

ATTI DI CONVEGNO

SAFAP 2021
SICUREZZA E AFFIDABILITÀ
DELLE ATTREZZATURE A PRESSIONE

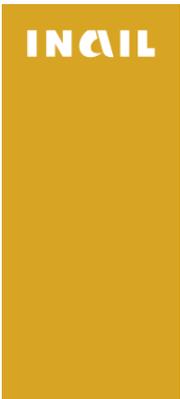
INAIL

16, 17 e 18 novembre

2021



Atti di Convegno

The logo for INCIL, consisting of the letters 'INCIL' in white, bold, uppercase font, positioned at the top of a solid gold-colored vertical rectangle.

INCIL

SAFAP 2021

SICUREZZA E AFFIDABILITÀ DELLE ATTREZZATURE A PRESSIONE

16, 17 e 18 novembre 2021

Edizione 2021

Pubblicazione realizzata da

INAIL

Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti,
prodotti e insediamenti antropici (Dit)

Editing

Francesca Ceruti
Daniela Gaetana Cogliani

Immagine di copertina

Antonino Rigano

per informazioni

INAIL - Dipartimento innovazioni tecnologiche
e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici
via Roberto Ferruzzi, 38/40 - 00143 Roma
dit@inail.it
www.inail.it

© 2021 INAIL
isbn 978-88-7484-709-9

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nella pubblicazione, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail.

Le pubblicazioni vengono distribuite gratuitamente e ne è quindi vietata la vendita nonché la riproduzione con qualsiasi mezzo. È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

INDICE

Sessione Plenaria

C. Mennuti, G. Augugliaro, I. Roselli, F. Saitta, A. Tati, A. Marzani

Manutenzione intelligente (smart maintenance) di impianti industriali e opere civili mediante tecnologie di monitoraggio 4.0 e approcci prognostici – MAC4PRO..... pag. 1

Sessione Progettazione e Costruzione

G. Corina, R. Longo, M. Oss

Il calcolo strutturale di tubazioni per il trasporto di gas metano..... pag. 8

J. Ferino, I. Mazzarelli, A. Meleddu, E. Pichini Maini

Progettazione e fabbricazione di attrezzature a pressione in composito: proposte per la caratterizzazione e l'accettazione dei materiali..... pag. 17

G. Vaccaro, G. Argento, D. Di Fonzo, A. Delfini

Valutazione della conformità ai requisiti essenziali di sicurezza PED di attrezzatura a pressione già omologata..... pag. 28

F. Giacobbe, G. Sepede

Peculiarità dei moduli di garanzia totale di qualità per la valutazione di conformità in accordo alla direttiva 2014/68/UE, con riferimento alla progettazione..... pag. 37

E. Becherini, S. Milani, M. Mencacci

Valutazione del fenomeno di instabilità mediante approccio "Direct Route" della EN13445 e confronto con i criteri dell'ASME VIII Div. 2..... pag. 46

R. Balistreri, E. Bemporad, E. Carducci, F. Giacobbe, G. Sepede

Analisi e confronto dei risultati di calcolo strutturale di recipienti in pressione utilizzando norme nazionali ed internazionali..... pag. 56

L. Bruzzo, L. Giacobelli

Difetti occulti nella fabbricazione di bombole senza saldatura..... pag. 65

A. Muratore, G. Giannelli, V. Nastasi, G. Sferruzza

Gestione in sicurezza delle bombole in pressione, negli ambienti di vita e di lavoro, alla luce della ADR 2021..... pag. 71

N. Altamura, V. Galasso, A. Mele, R. Acerboni, O. Di Donato

Anomali deterioramenti di bombole non saldate costruite sia secondo il d.m. 12.09.1925 e sia secondo Direttiva TPED..... pag. 82

Sessione Impianti RIR

R. Lauri, B. Pietrangeli

Applicazione di modelli predittivi finalizzati alla valutazione delle potenziali conseguenze di incendi di biocombustibili liquidi: un caso studio..... pag. 91

R. Marrazzo, C. Mazzini Aspetti di valutazione del rischio per le attività di stoccaggio sotterraneo di gas in Italia.....	<i>pag. 102</i>
G. Clerici, V. Prete, G. Gorrino, I. Oliaro, E. Portigliatti Sistemi di rilevamento gas tossici e funzioni strumentate di sicurezza in impianti a rischio di incidente rilevante.....	<i>pag. 112</i>
M.P. Gatto, M. del Gaudio, P. Castellano, R. D'Eliseo Incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose: criteri di scelta, requisiti di conformità e modalità di gestione degli APVR secondo la norma UNI 11719:2018 in applicazione alla UNI EN 529:2006.....	<i>pag. 122</i>
M. del Gaudio, G. Russo, D. Cerrone La comunicazione in attività a rischio d'incidente rilevante.....	<i>pag. 131</i>
A. Di Francesco, P. Iacono, A. Nebbioso, G. Saputi, C. Simeoni Analisi congiunta dei settori "Seveso" e "Attrezzature a pressione": esame e approfondimento statistico dei dati istituzionali.....	<i>pag. 140</i>
G.A. Zuccarello, M. Puccetti, A. Lambertini La Root Cause Analysis – Una applicazione diffusa in Stabilimento per l'analisi di anomalie e quasi incidenti.....	<i>pag. 151</i>
G. Battista, M.P. Gatto, M.M. La Veglia, J. Pardi, G. Triunfo Installazione di un impianto fotovoltaico in una attività R.I.R.: criticità, pianificazione e realizzazione.....	<i>pag. 162</i>
F. Fanigliulo, R. Longo, M. Oss, M. Palermo, F. Vazzana La dismissione come fattore peggiorativo nelle attività a rischio di incidente rilevante.....	<i>pag. 172</i>

Sessione Tecnologie di sicurezza

M. De Mattia, M. Larice, C. Piccolo, F. Rossetti, M.N. Tini Indicazioni tecniche per l'analisi della completezza documentale relativa alla dichiarazione di messa in servizio cumulativa per i serbatoi GPL fino a 13 m ³	<i>pag. 180</i>
R. Iovene, R. Vasile, E. Di Franciscantonio Conduzione in sicurezza di un'attività di ispezione interna ad una turbina a gas.....	<i>pag. 191</i>
E. Becherini, C. Mazzei, M. Ghisti, M. Lombardi, M. Gatto Revamping di una centrale di potenza in accordo allo standard EN 12952-7.....	<i>pag. 201</i>
M. Pirozzi, E. Di Ponzio, D. Freda, L. Ricciardi, L. Di Donato Assistenza agli operatori nelle procedure di verifica di serbatoi, intesi come ambienti confinati, in logica 4.0.....	<i>pag. 211</i>
G. Augugliaro, R. Balistreri, F. Giacobbe, E. Pichini Maini Procedura di verifica da remoto di attrezzature a pressione: stato dell'arte e evoluzione...	<i>pag. 218</i>
G. Landucci, L. Ricciardi, C. Nicoletta, C. Console, F. Cassandra, L. Di Donato Operazioni in spazi confinati nell'industria di processo: sviluppo di un metodo quantitativo per la valutazione dei rischi.....	<i>pag. 228</i>
M. Oss, R. Longo Lo stoccaggio di idrogeno. Aspetti della costruzione e verifica delle attrezzature in pressione.....	<i>pag. 238</i>
S. Guido, G. Odino, G. Gorrino, A. Urso Gli apparecchi a pressione in un impianto di STEAM REFORMIG dell'idrogeno.....	<i>pag. 248</i>

S. Anastasi, F. Ceruti, P. De Cillis, C. La Gioia, R. Modestino, V. Mordanini, A. Nebbioso, L. Ricciardi

Technical Repository: un passo verso la digitalizzazione nel mondo della sicurezza..... pag. 258

Sessione Meccanismi di danno

C. Andenna, D. Lega

Tecniche analitiche per la caratterizzazione dei fenomeni di degrado e la valutazione della vita residua delle tubazioni in polietilene ad alta densità..... pag. 269

L. Comel, R. Grassetti

Interventi di ripristino strutturale con sistema in materiale composito "P.R.S." per la sigillatura di perdite a carico di serbatoi di raffineria..... pag. 279

P. Coppoli, M. Garavaldi, N. Bravi, E. Franchi, M. Guerrieri

Come affrontare la riparazione di una filettatura tramite l'utilizzo di un inserto elicoidale... pag. 288

E. Opromolla, C. Liccardo, L. Tassan Pagnochit, A. Cocchiario

Protezione con INCONEL 625 di surriscaldatori di vapore all'interno di un termovalorizzatore..... pag. 296

D. Di Fonzo, G. Vaccaro

Requisiti di Damage Tolerance e Durability per la riparabilità delle attrezzature a pressione in materiale composito avanzato a matrice polimerica. Procedure operative sulle riparazioni strutturali pag. 306

G. Chiofalo, S. Guarnaccia, N. Scarfati, A. Iacino

UP-GRADING della piastra tubiera della caldaia a recupero di un impianto CLAUS pag. 316

D. Lega, M. Romitelli

La corrosione battericamente assistita nelle strutture metalliche interrate..... pag. 324

L. Scano, F. Piccini

Estensione sicura della vita a fatica di apparecchi a pressione: il caso di una grande autoclave per vetro laminato..... pag. 334

R. Amoriello, L. Cantoni, R. Gussoni, M. Piloni, C. Sampietri

Meccanica della frattura in ambiente corrosivo: alcuni test di caratterizzazione su campioni SENT E SENB..... pag. 345

Sessione Analisi dei rischi 1

R. Marrazzo, F. Vazzana

La gestione dell'ageing negli stabilimenti Seveso nazionali: analisi di incidenti e buone pratiche ispettive..... pag. 352

P. Bragatto, E. Bemporad, C. Delle Site, A. Pirone, M.R. Vallerotonda, F. Bellamino, T. Vairo, M.F. Milazzo

L'approccio gestionale al problema "invecchiamento" negli stabilimenti Seveso pag. 359

A. Cafaro, G. Del Gobbo, V. Galasso, M. Pellegrino, L. Politi, F. A. Sciancalepore, A. Sibilano

CASE OF STUDY - applicazione del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature critiche con particolare riferimento alle macchine rotanti..... pag. 370

A. Pirone, E. Floridi, F. Vazzana, A. De Rosa G. Caruso, T. Vairo, M.R. Vallerotonda, S.M. Ansaldi, F. Geri C. Delle Site	
I permessi di lavoro nell'ambito dei sistemi di gestione della sicurezza negli stabilimenti a rischio di incidente rilevante.....	pag. 381
T. Iannaccone, G.E. Scarponi, V. Cozzani	
Modellazione del comportamento di serbatoi criogenici per lo stoccaggio ed il trasporto di GNL esposti ad incendio.....	pag. 391
M. R. Vallerotonda, S. M. Ansaldi, A. Pirone, P. Agnello	
Le perdite di contenimento negli stabilimenti Seveso: uno studio sulla base delle schede dell'esperienza operativa.....	pag. 400
E. Bemporad, C. Delle Site, N. Palumbo, G. Sepede, F. Buti	
Sicurezza nel trasporto di merci pericolose su strada: lezione appresa dall'analisi di alcuni incidenti occorsi negli ultimi anni.....	pag. 411
G.A. Zuccarello, A. Lambertini	
Analisi di rischio dei depositi costieri di gas naturale liquefatto GNL – le principali caratteristiche degli impianti "Small Scale LNG".....	pag. 425
M. Adamo, N. Altamura, G. Batisti, E. Di Ponzio, V. Galasso, A. Mele, A. Sibilano	
Case history - analisi critica della linea guida di valutazione gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso.....	pag. 438

Sessione Impianti a pressione

M. Giacobbo, F. Centomo	
Sistemi strumentati di sicurezza negli impianti di processo: case study relativo ad un insieme marcato CE in accordo alle direttive PED, MD e ATEX	pag. 448
F.P. Nigri, D. Sallustio	
Utilizzo di un sistema strumentale contro il pericolo di sovrappressione di un serbatoio di abbattimento di effluenti gassosi.....	pag. 459
G. A. Zuccarello, C. Console, E. D'Alessandri, R. Melloni, A.P. Bacchetta	
Difficoltà di accesso nelle attrezzature a pressione e modifica degli standard progettuali... ..	pag. 468
A. Mura, A. Rubinato, F. Gambato, M. De Martin, C. Vianello	
Progetto di sviluppo di tool aggiuntivi per il miglioramento e la centralizzazione dell'Asset Integrity.....	pag. 477
F. Taurasi, C. Monserrato	
Radiografia digitale applicata al controllo degli spessori di tubazioni.....	pag. 487
G. Augugliaro, F. Brini, C. Mennuti, P. Quaresima, A. Tonti, P. Lenzuni	
Procedura per il controllo di serbatoi per GPL di capacità maggiore di 13 m ³ con tecnica basata sul metodo di Emissione Acustica ai fini della verifica di integrità.....	pag. 493
G. Oliva, G. Assenza, L. Faramondi, E. Del Prete, F. Pera, R. Setola	
Gestione integrata di safety e security: le sfide della dimensione cyber e gli insegnamenti tratti dal progetto Safëra 4STER	pag. 505
P. Addonizio, R. Bizzarro, M. Di Nardo, M. Madonna, T. Murino	
Analisi di un sistema complesso post disruption: la valutazione della resilienza di un servizio essenziale agli impianti.....	pag. 513
C. Piccolo, N. Altamura, A. De Palma, P. De Luca, L. Nastro	
Il processo di pressatura isostatica a caldo. Un caso studio.....	pag. 525

Sessione Prove non distruttive

- F. Zonzini, M. Zauli, N. Testoni, L. De Marchi**
Reti eterogenee di sensori intelligenti per il monitoraggio di attrezzature e impianti..... pag. 535
- F. Zonzini, D. Bogomolov, T. Dhamija, L. De Marchi, A. Marzani**
Algoritmi di intelligenza artificiale per l'identificazione del tempo di arrivo in segnali di emissioni acustiche..... pag. 542
- M.F. Milazzo, G. Ancione, P. Bragatto, C. Mennuti**
Modellazione della vita utile residua dei serbatoi di stoccaggio atmosferici contenenti idrocarburi liquidi..... pag. 549
- R. Balistreri, E. Pichini Maini, A. Gabbia**
Procedura di valutazione dello stato di integrità di membrane mediante analisi termica IR pag. 559
- L. Gigli, C. Aguzzi, L. Sciullo, L. Montecchiari, A. Trotta, F. Montori, I. D. Zyrianoff, T. Salmon Cinotti, L. Bononi, M. Di Felice**
BIG-DATA e gestione dell'interoperabilità in applicazioni IOT di monitoraggio strutturale.... pag. 573
- A.E. Milani, P. Baraldi, A. Palermo, A. Marzani, E. Zio**
Utilizzo dell'Analisi delle Componenti Principali (PCA) per la rilevazione di anomalie nelle strutture reticolari di impianti industriali..... pag. 584
- G. Mirasoli, C. Brutti, A. Chiappa, L. Mancini, S. Porziani, M.E. Biancolini**
Monitoraggio dell'integrità strutturale di apparecchi in pressione mediante emissione acustica..... pag. 593
- A. Pette, A. Nanni, E. Cartapati, D. Muneroni, S. Alessandri**
La digitalizzazione come strumento per l'analisi di rischio e la valutazione dell'affidabilità degli asset. Caso studio sui serbatoi di stoccaggio atmosferici..... pag. 603
- L. Casiraghi, A. Corsi, A. Staffolani, D. Benini, G. Merckling**
Controlli metallografici innovativi nell'ambito della valutazione di vita consumata per scorrimento viscoso di tubazioni del vapore principale in acciaio grado 91 secondo la UNI/TS 11325..... pag. 613

Sessione Rischio NaTech

- P. Addonizio, N. Pedicini, U. Nisticò, F. Nisticò, L. Ruffo**
Il rischio di rottura, per eventi sismici, delle tubazioni non intercettabili connesse alla radice dei serbatoi sotto pressione per GPL..... pag. 623
- G. Sferruzza, V. Nastasi, G. Giannelli, A. Muratore, R. Baldelli, A. Tamburini**
La modellazione ad elementi finiti applicata ai recipienti nelle attività RIR, scenari d'intervento, gestione del Rischio NaTech indotto da sisma. Esempi e criticità a confronto pag. 633
- M. D. Piccioni, A. Fraddosio, A. Castellano, N. Pecere, A. Altieri**
Il fenomeno dello sloshing nello studio di vulnerabilità sismica in ottemperanza alle nuove NTC2018 dei serbatoi in Stabilimenti soggetti a Rischio di Incidente Rilevante per la Valutazione dei Rischi naturali e Na-Tech..... pag. 644
- M. Salimbeni, M. De Angelis, M. Ciucci**
Rischio NaTech da sisma per stabilimenti con pericolo di incidente rilevante, un caso studio: serbatoi atmosferici a tetto galleggiante..... pag. 655

A. Falla, R. Nicosia, R. Acerboni, F. Boella, A. De Palma, P. Morucchio, V. Prete Serbatoi di stoccaggio con tetto galleggiante a doppio pontone. Un dispositivo per limitare le emissioni e contenere eventuali fuoriuscite accidentali di prodotto.....	pag. 665
G. Grillone, V. Nastasi Valutazione del rischio NaTech da alluvioni nelle attività RIR.....	pag. 674
M. Ciucci, L. Barbieri Vita, A. Marino Rischio NaTech da sisma negli stabilimenti con Pericolo di Incidente Rilevante: metodologie di valutazione e gestione.....	pag. 684
V. Vezzari, L. Barbieri Vita, M. Ciucci Individuazione/localizzazione delle perdite di fluidi per degrado o evento NaTech e monitoraggio strutturale su tubazioni, serbatoi, cisterne e flange di raccordo con sistemi di misura basati su sensori in fibra ottica a tecnologia FBG certificati ATEX.....	pag. 693
V. Cozzani, A. Misuri, F. Ricci, V. Caratozzolo, E. Salzano Gestione del Rischio Natech: il ruolo dei sistemi di sicurezza.....	pag. 703

Sessione Analisi dei rischi 2

F. Pera, G.L. Amicucci, E. Del Prete Il sistema di gestione della qualità e la certificazione per prodotti destinati a zone con presenza di atmosfere potenzialmente esplosive.....	pag. 712
C. Piccolo, F. Di Tosto, M.M. La Veglia La sicurezza antincendio nei siti aeroportuali. L'esperienza operativa sui "Dragon" dei Vigili del Fuoco.....	pag. 723
A. O. Iamele, M. Taralli, A. Ferraro, O. Borgia, M. Colavita La compliance delle attrezzature in pressione: un caso di successo.....	pag. 734
C. De Toro, O. Di Donato, G. Galasso, P. Visingardi, D. Salzano Rischi nell'esercizio delle vasche di impregnazione cavi. Esperienze operative di una ditta produttrice.....	pag. 748
G. Mazzuto, M. Ortenzi, F. Di Carlo, A. Ferraro, L. Tomassini, M. Pirozzi, L. Di Donato Adeguamento Industria 4.0 di un impianto di multifase gas-liquido per il miglioramento dei livelli di sicurezza e manutenzione.....	pag. 758
A. Tonti, I. Mazzarelli L'esonero dalla conduzione abilitata dei generatori di vapore: i requisiti tecnici tra norme nazionali e norme armonizzate europee.....	pag. 769
F. Di Tosto, G. Giannelli, A. Muratore, G. Sferruzza, G. Grillone La conduzione e l'esercizio dei generatori di vapore alla luce del DM 94 del 07/08/2020.....	pag. 779
F. Panin, E. Artenio, F. Di Rocco Anomalie nell'intervento delle valvole di sicurezza in relazione all'utilizzo e alla configurazione.....	pag. 790
R. Iovene, R. Vasile, V. Cusano Impianti per la produzione di azoto – Stato dell'arte e criticità.....	pag. 800

Sessione Impianti tecnologici

T. Pagliuso, V. Vosa, G. Lodomini, E. Fiocca, A. Villa Sistema di sicurezza anticondensa, integrato con recupero termico, installato su caldaie per la produzione di acqua calda.....	pag. 810
---	----------

R. Iovene, R. Vasile, A. Morettini

Impianti solari termici per la produzione di acqua calda ad uso riscaldamento ed ACS, di potenzialità inferiore a 35 KW – Criticità correlate alla sicurezza impiantistica e alla salute umana..... pag. 820

P. Infortuna, S. Spinoso, F. Panico

Studio di un impianto per il recupero di energia termica dai prodotti di combustione di un forno industriale, inserito in un circuito di produzione di acqua surriscaldata esistente. Considerazioni sui dati di progetto del sistema di recupero ed adempimenti Inail..... pag. 830

M. De Musso, A. De Musso

Studio di un impianto "ORC" alimentato da acqua surriscaldata integrato in un inceneritore per CSS per produzione di energia elettrica e termica..... pag. 840

G. Battista, C. De Toro, R. Modestino, G. Vaccaro, A. Amato

Impianto di cogenerazione a servizio di un pastificio. Innovazioni di processo e sicurezza dell'impianto..... pag. 850

Sessione Impianti complessi

D. Sallustio, S. Larghi

Analisi dei meccanismi di danneggiamento in impianti a ciclo combinato: impatti sui criteri di progettazione e metodologie di controllo e manutenzione..... pag. 858

C. Di Girolamo, R. De Robertis, L. Cavanna, A. Colautto, R. Ciancio, U. Colombini

Analisi costruttiva e progettuale delle valvole di sicurezza con particolare attenzione all'installazione e alla ritaratura..... pag. 864

N. Pedicini, T. Pagliuso, N. Romagnuolo, C. Genta

Impianto di recupero della CO2 nel ciclo di produzione del ghiaccio secco: descrizione del processo e implementazioni per il Piano Industria 4.0..... pag. 876

F. Taurasi, G. Vaccaro, P. Marcantonio

Reattore di idrogenazione analisi dei rischi, vita consumata e vita utile..... pag. 886

F. Di Rocco, F. Panin, E. Artenio

Automazione del processo della verifica della ritaratura delle valvole di sicurezza..... pag. 893

Sessione Gestione del rischio

R. Modestino, M. del Gaudio, M.M. La Veglia, C. Piccolo, R. Flammia

Analisi di Text mining applicato alle attività a rischio di incidente rilevante..... pag. 903

C. De Toro, M.P. Gatto, P. Castellano, G. Solimene, G. Licciardo

Utilizzo a pressione delle sabbiatrici nel settore edile e rischio ipoacusia: misure di prevenzione e protezione..... pag. 914

F. Vivaldi, G. Rosi, A. Cerchiai, N. Poma, A. Bonini, B. Melai, C. Fanizza, F. Di Francesco

Verso un dosimetro chimico per valutare l'esposizione allo stirene dei lavoratori nei cantieri navali: una breve panoramica della letteratura pag. 923

V. Prete, G. Gorrino, A. De Palma, R. Acerboni, M. Buonanno

Analisi dell'efficacia di formazione, informazione e addestramento nelle attività a rischio di incidente rilevante..... pag. 928

Manutenzione intelligente (smart maintenance) di impianti industriali e opere civili mediante tecnologie di monitoraggio 4.0 e approcci prognostici – MAC4PRO

C. Mennuti¹, G. Augugliaro¹, I. Roselli², F. Saitta², A. Tati², A. Marzani³

¹ Inail – Dit

² Enea

³ Università di Bologna - Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, DICAM

Sommario

In questa memoria si presenta il progetto "Manutenzione intelligente (smart maintenance) di impianti industriali e opere civili mediante tecnologie di monitoraggio 4.0 e approcci prognostici – MAC4PRO" cofinanziato da INAIL e dalle Università di Bologna, Messina, Roma (Tor Vergata) e dal Politecnico di Milano. Il progetto verte allo sviluppo di reti di monitoraggio 4.0 integrate a modelli probabilistici avanzati al fine di realizzare uno schema prognostico per la gestione in sicurezza di componenti e sistemi, strutture ed infrastrutture. A tal fine il progetto sviluppa e integra diverse verticalizzazioni tra le quali (i) reti di nodi-sensore per il monitoraggio di attrezzature e strutture, minimamente invasive e a basso costo; (ii) protocolli software e hardware per la gestione remota e la visualizzazione dei dati derivanti dal monitoraggio; (iii) metodiche avanzate, alimentate da sensori virtuali e/o sperimentali eterogenei, atte alla diagnostica e alla prognostica dei diversi contesti operativi.

Oltre a mostrare nel dettaglio obiettivi e la struttura del progetto MAC4PRO, questo lavoro presenta e discute gli scenari di validazione nei quali saranno messi a confronto i sistemi di misura sviluppati nel progetto con quelli commerciali di riferimento.

1. Introduzione

L'obiettivo generale del progetto MAC4PRO è quello di sviluppare reti di monitoraggio 4.0 integrate a modelli probabilistici avanzati al fine di realizzare uno schema prognostico per la gestione in sicurezza di componenti e sistemi, strutture ed infrastrutture. A tal fine il progetto ambisce (i) allo sviluppo di tecnologie innovative di monitoraggio e di modelli predittivi avanzati e (ii) alla loro validazione su casi studio rappresentativi della realtà industriale nazionale, con il fine ultimo di contribuire alla evoluzione di strumenti prognostici finalizzati sia al miglioramento dell'utilizzo in sicurezza di attrezzature, impianti e opere civili (infrastrutture e immobili) sia alla programmazione delle azioni di manutenzione in base alle effettive condizioni.

Per il raggiungimento di questo obiettivo il progetto è stato strutturato in sei Obiettivi Specifici, che prevedono sviluppi metodologici e tecnologici (OS1-OS6), tra i quali:

1. analisi dinamiche di meccanica della frattura volte a collegare l'evoluzione del danno alla generazione di onde meccaniche guidate o emissioni acustiche (EA);
2. sviluppo di un sensore virtuale in grado di processare misure eterogenee e restituire un indicatore relativo alla vita residua di componenti di impianti industriali e strutture,
3. sviluppo di reti di monitoraggio leggere e di facile implementazione in campo, minimamente invasive e a basso costo, per il monitoraggio di EA e accelerazioni;
4. protocolli e hardware dedicato per il trasferimento wireless dei dati, il loro storage e la loro visualizzazione su web;

5. metodiche di prognostica avanzata alimentate da dati pseudo-sperimentali derivanti da simulazioni numeriche e sensori virtuali e/o sperimentali eterogenei;

Nell'ambito del progetto sono stati realizzati campi prove atti alla validazione delle attività sviluppate negli OS.

Ogni OS contribuisce in modo organico allo sviluppo e avanzamento di altri OS, in forza della collaborazione sinergica tra i partner del progetto secondo l'articolazione delle attività come da schema proposto in Fig. 1.

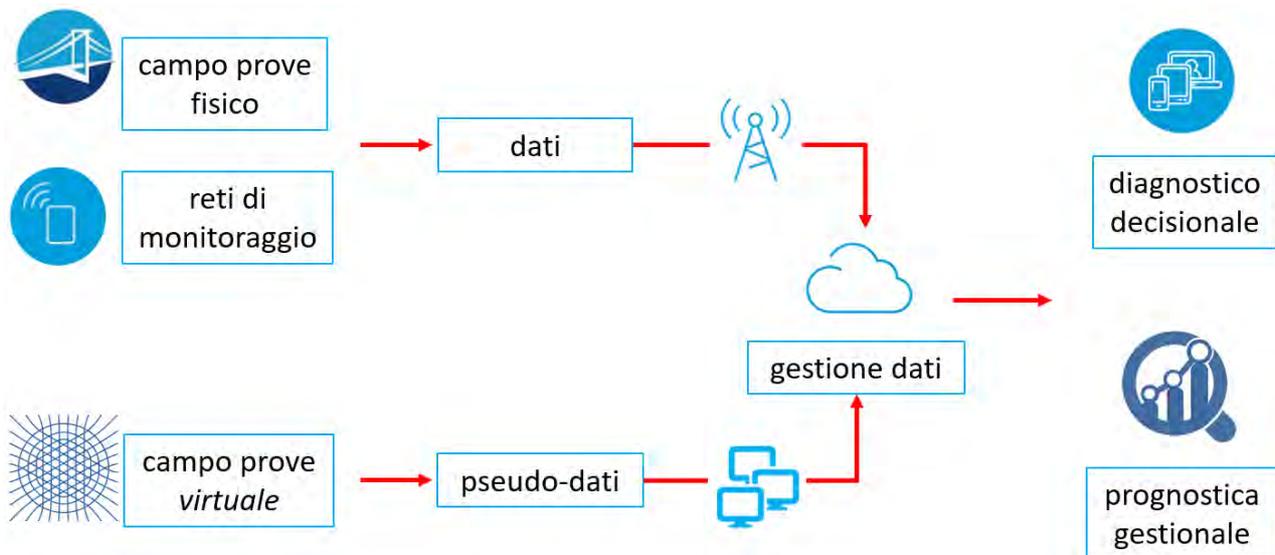


Figura 1. Schema di flusso delle attività previste

In particolare, l'idea del progetto è quella di costruire un campo prove virtuale nel quale sviluppare metodologie e idee che saranno poi successivamente implementate nel campo prove fisico. In particolare, il campo di prove virtuale vede l'utilizzo di avanzate modellazioni numeriche a supporto della comprensione fisica dei fenomeni di danneggiamento, sia a supporto dello sviluppo dei sistemi di monitoraggio, sia al fine di aumentare la flessibilità tempi. Il campo prove fisico, invece, prevede l'implementazione e ottimizzazione delle reti di monitoraggio sviluppate nel progetto per la misura di accelerazioni e di emissioni acustiche nei diversi casi di indagine considerati. I dati raccolti dalle reti di monitoraggio alimentano una piattaforma cloud per la gestione di dati eterogenei, denominata MODRON, sviluppata all'interno del progetto. I dati raccolti diventano poi input per lo sviluppo di strategie diagnostiche e prognostiche atte a stimare lo stato di integrità e la vita residua delle strutture e attrezzature oggetto del monitoraggio (validazione sui campi prove).

Grazie alle attività di ricerca del progetto, che contempla anche aspetti di costi di installazione, adattabilità e durabilità delle reti di sensori, robustezza delle metriche di danno e di prognostica, la loro validazione sperimentale in un campo prove dedicato, MAC4PRO mira a fare un passo nella direzione della certificazione di metodiche di prognostica alimentate da sistemi di monitoraggio.

2. Attività di validazione

Le attività di validazione del progetto MAC4PRO prevedono la realizzazione di due scenari di prova, rappresentativi di due contesti legati rispettivamente alle attrezzature industriali, e strutture e infrastrutture civili. Il primo, in particolare, si focalizza sull'utilizzo

delle emissioni acustiche per la diagnostica ed il monitoraggio di serbatoi in pressione fuori terra per lo stoccaggio di GPL. Il secondo, mira all'uso di accelerazioni per la diagnostica ed il monitoraggio globale di strutture civili in calcestruzzo armato, e verte ad esplorare l'uso delle emissioni acustiche per la diagnostica locale delle strutture. Nel seguito sono brevemente descritte le azioni intraprese nel progetto per la progettazione e realizzazione dei due scenari di prova.

2.1 Attrezzature industriali: serbatoi in pressione per lo stoccaggio di GPL

Al fine di validare la rete di monitoraggio per emissioni acustiche su serbatoi per il contenimento di GPL, è stato realizzato presso l'Università di Bologna un circuito idraulico di prova, in grado di pressurizzare due serbatoi (non simultaneamente) secondo una storia di pressurizzazione caratterizzata da fasi a pressione crescente, costante e decrescente, fino ad un valore massimo di 16 bar. I serbatoi saranno riempiti con acqua in modo tale da evitare la presenza della fase gassosa durante tutto lo svolgimento delle prove.

Il circuito, in Fig. 2, progettato e sviluppato da una ditta specializzata, può essere gestito sia direttamente dalla "control room" sia in modalità remota mediante un'interfaccia sviluppata in Labview che consente la definizione della storia di pressione, il monitoraggio in tempo reale della pressione nei serbatoi, come pure della temperatura e della portata nel circuito.



Figura 2. Circuito di prova per la pressurizzazione di due serbatoi.

I serbatoi saranno monitorati durante le fasi di carico e scarico mediante la rete di monitoraggio sviluppata nel progetto (Fig. 3). Tale rete, è composta da un insieme di nodi sensore miniaturizzati, in grado di leggere la risposta dei sensori piezoelettrici posti a contatto con il serbatoio, e da un accentratore (gateway) per la raccolta dei dati del monitoraggio. I nodi sensore consentono di effettuare un processing locale delle emissioni acustiche registrate e di trasferire solo i parametri caratteristici delle emissioni utili ai fini delle inferenze diagnostiche e prognostiche.

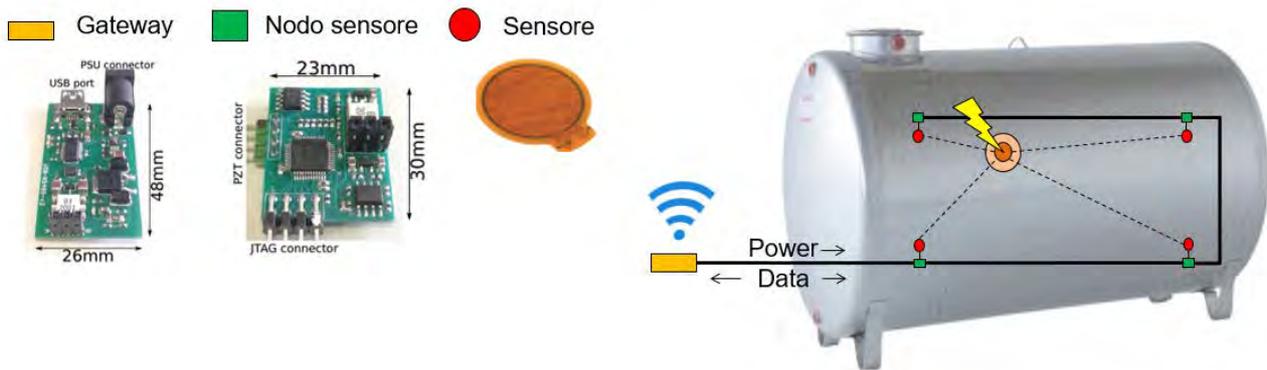


Figura 3. (sinistra) Elementi della rete di monitoraggio per emissioni acustiche sviluppata nell'OS3 del progetto. (destra) Schema di implementazione della rete su un serbatoio.

La sperimentazione verte a validare (i) la capacità del circuito di pressurizzare e depressurizzare in modo controllato i serbatoi, (ii) la capacità della rete di sensori di rilevare e monitorare nel tempo emissioni acustiche, insorgenti all'atto della pressurizzazione dei serbatoi e/o appositamente generate tramite HSU-Nielsen pencil break test (iii) di validare un algoritmo di localizzazione della sorgente, [1], [2], [3].

2.2 Strutture e infrastrutture civili: telaio in cemento armato su tavola vibrante

Il secondo scenario di validazione delle attività del progetto prevede la prova dinamica di un telaio su tavola vibrante presso il Laboratorio SSPT-MET-DISPREV, del C. R. ENEA (sede di Casaccia, Roma). Il laboratorio è dotato di due tavole vibranti a 6 Gradi Di Libertà (6GDL), una delle quali è tra le più grandi d'Europa, e le cui caratteristiche tecniche costituiscono una eccellenza a livello nazionale e internazionale (Fig. 4). Consentono di effettuare prove sismiche triassiali per qualifica sismica di componenti e sistemi, nonché lo studio e la sperimentazione di nuove tecnologie e nuovi materiali per la protezione sismica di manufatti civili, industriali e storico/monumentali.



Table 1. Technical specifications of shaking table.

Frequency range (Hz)	0-50
Stroke (mm peak -peak)	275
Max Velocity (m/s)	0.78
Max Acceleration at bare table (g)	
Harmonic	5.0
Impulse	8.0
Yaw/Pitch/Roll rotation (+/- degrees)	4.7
Yaw/Pitch/Roll velocity (rad/s)	13.03
Max Overturning Moment (kNm)	300
Max Specimen Dead Weight (kN)	300

Figura 4. Vista panoramica della Hall sismica (a sinistra). Caratteristiche tecniche della tavola vibrante grande (a destra).

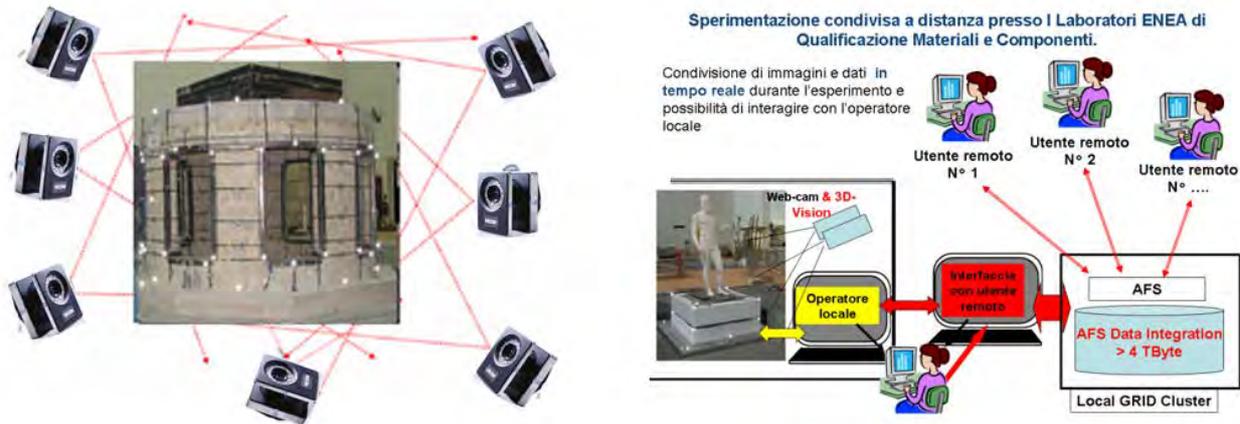


Figura 5. Acquisizione dei dati di spostamento tramite il sistema 3DVision (a sinistra) e schema del sistema di condivisione a distanza dell'esperimento (a destra).

In particolare è stato realizzato un telaio in cemento debolmente armato, di due piani, di dimensione in pianta di 3 m per 3 m, pilastri di dimensione 20x20 cm, altezza di interpiano 2 m, e solette in cemento armato di spessore 20 cm. Il telaio è stato appositamente progettato (materiali e dimensioni) per danneggiarsi sotto le azioni dinamiche imponibili mediante la tavola vibrante (Fig. 5). Ad esempio in Fig. 6 è mostrata la formazione di cerniere plastiche nel telaio simulando la risposta mediante una analisi dinamica non lineare e avendo considerato in input alla base del telaio l'accelerogramma registrato il 24 agosto 2016 ad Amatrice (Lat 42.6325 Lon 13.2866 WGS84, suolo tipo B, stazione AMT).

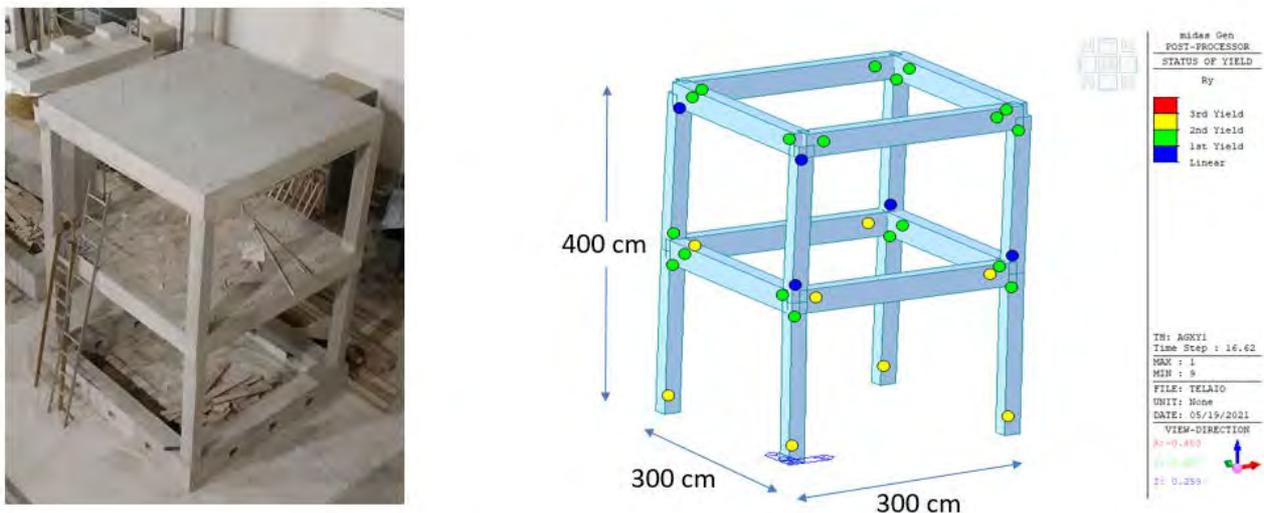


Figura 6. (sinistra) Telaio in calcestruzzo debolmente armato realizzato presso i laboratori di ENEA Casaccia. (destra) Simulazione dello stato cerniere plastiche a fine sisma.

Il protocollo di prova prevedrà l'utilizzo di un input sismico alla base del telaio tale da indurre un graduale danneggiamento del telaio per fatica nei componenti. Durante le prove la risposta del telaio sarà misurata mediante le reti di misura di accelerazioni ed emissioni acustiche sviluppate nel progetto. Le prestazioni della rete accelerometrica saranno validate mediante una rete di misura parallela che prevede l'utilizzo di accelerometri e sistemi di acquisizione commerciali. I sensori per la rilevazione delle emissioni acustiche saranno posizionati in corrispondenza dei nodi del telaio in prossimità delle posizioni in cui è atteso il danneggiamento per flessione (cerniere plastiche) ed

eventualmente per taglio dei nodi. In aggiunta, è prevista la registrazione degli spostamenti dinamici del telaio mediante un esclusivo sistema ottico passivo di ENEA (sistema motion capture 3D). Il sistema, denominato 3DVision [4], è composto da una costellazione di 10 telecamere ad alta risoluzione nel vicino infrarosso in grado di triangolare la posizione di centinaia di marcatori posti sulla struttura con una accuratezza dell'ordine 0.01-0.1 mm (Fig. 5). Inoltre, saranno effettuate altre prove non distruttive (indagini sonore e ultrasonore) prima e dopo le prove sismiche per valutare lo stato di danneggiamento dei pilastri [5].

Le prove saranno anche fruibili in remoto in tempo reale grazie al laboratorio virtuale DYSCO di ENEA che permetterà a studenti, docenti, collaboratori interessati, di assistere alle prove e visualizzare in tempo reale i dati acquisiti [6] (Fig. 5).

3. Conclusioni

Questo lavoro descrive due scenari progettati e sviluppati per la validazione delle attività del progetto MAC4PRO. In particolare, un circuito idraulico e un telaio in cemento debolmente armato sono stati appositamente realizzati presso dell'Università di Bologna e le strutture di ENEA Casaccia, rispettivamente.

Il circuito idraulico prevedrà l'installazione di reti di sensori per il monitoraggio delle vibrazioni, nella circuiteria idraulica, e per la rilevazione dei segnali di emissione acustica nei serbatoi per il contenimento di GPL. Il circuito sarà poi soggetto a cicli operativi in grado di pressurizzare e depressurizzare, secondo storie di pressione assegnate, i serbatoi strumentati. Scopo della sperimentazione sarà quello di correlare i parametri delle emissioni acustiche, quali l'ampiezza del segnale, il rise time, la durata dell'evento, i counts, il MARSE (Measured Area of Rectified Signal Envelope), allo stato di salute dei serbatoi. A tal fine ipotesi di danneggiamento dei serbatoi sono al momento oggetto di approfondimenti. Inoltre, sarà utilizzato l'Akaike Information Criterion per stimare il Time of Arrival dei segnali acquisiti al fine di localizzare le sorgenti acustiche simulate mediante test di HSU-Nielsen.

Il telaio, sarà strumentato con diverse tipologie di sistemi e reti di misura per il monitoraggio dello stato di danno strutturale locale e globale, durante prove sismiche su tavola vibrante. In particolare sensori per emissioni acustiche saranno posizionati in prossimità dei nodi potenzialmente oggetto di danneggiamento mentre gli accelerometri saranno posizionati in modo da poter ricostruire al meglio i modi di vibrare della struttura. Prima e dopo le prove sismiche verranno condotte una serie di prove non distruttive sui pilastri, sulle travi e sui nodi della struttura al fine di valutarne lo stato pre- e post- prove dinamiche.

I dati sperimentali in output dalla sperimentazione su tavola vibrante saranno processati al fine di capire se le emissioni acustiche possono fungere da precursori del danno incipiente, validare la rete per la misura delle accelerazioni sviluppata nel progetto, alimentare gli algoritmi proposti nel progetto per la rilevazione del danno e per la stima della vita residua di attrezzature e strutture.

4. Bibliografia

- [1] UNI EN 13554: 2011 Prove non distruttive - Prova di emissione acustica - Principi generali
- [2] UNI EN 13477-2:2010 Prove non distruttive - Emissione acustica - Caratterizzazione dell'apparecchiatura - Parte 2: Verifica delle caratteristiche funzionali.
- [3] UNI EN 14584:2013 Prove non distruttive - Prova di emissione acustica - Ispezione di attrezzature a pressione metalliche durante la prova di accettazione - Localizzazione planare delle sorgenti di EA.

- [4] De Canio, G., de Felice, G., De Santis, S., Giocoli, A., Mongelli, M., Paolacci, F., Roselli, I. Passive 3D motion optical data in shaking table tests of a SRG-reinforced masonry wall (2016) *Earthquake and Structures*, 10 (1), pp. 53-71.
- [5] Polimeno, M.R., Roselli, I., Luprano, V.A.M., Mongelli, M., Tati, A., De Canio, G. A non-destructive testing methodology for damage assessment of reinforced concrete buildings after seismic events (2018) *Engineering Structures*, 163, pp. 122-136.
- [6] Mongelli, M., De Canio, G., Roselli, I., Baldini, M., Colucci, A., Di Biagio, F., Picca, A., Tati, A., Cancelliere, N., Coniglio, L., Ghersi, A. Experimental tests of reinforced concrete buildings and ENEA DySCo Virtual Laboratory (2011) *SHMII-5 2011 - 5th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, 9 p.

Il calcolo strutturale di tubazioni per il trasporto di gas metano

G. Corina¹, R. Longo², M. Oss³

¹ Biomasse Italia spa Centrale di Strongoli

² Inail - Uot di Catanzaro

³ Inail - Uot di Bolzano

Sommario

La progettazione, costruzione, collaudo e sorveglianza delle condotte di distribuzione di gas metano interne alle utenze industriali, con pressione massima di esercizio non superiore a 5 bar, è regolamentata in Italia dal D.M. 16/04/2008 *“Regola tecnica per la progettazione, costruzione, collaudo, esercizio e sorveglianza delle opere e dei sistemi di distribuzione e di linee dirette del gas naturale con densità non superiore a 0,8”*. Per come definito nella sezione 2 dell'allegato A del succitato decreto la condotta che dall'impianto di riduzione e misura adduce gas alle apparecchiature di utilizzazione (rete di adduzione) *“dovrà essere realizzata in conformità ai requisiti contenuti nel D. Lgs. 23/02/2000 n° 93 Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione ed alle relative norme tecniche”*. Nell'articolo verrà esaminata la procedura di calcolo prevista dalla sezione I del D.M. 16/04/2008, mettendo in evidenza i collegamenti con il metodo di calcolo della direttiva armonizzata EN 13480 sulle tubazioni industriali metalliche. Verrà infine esaminato un caso reale di applicazione combinata del D.M. 16/04/2008 e della Direttiva PED ad una condotta di gas metano a servizio di una centrale di produzione di energia elettrica.

1. Introduzione

Per la progettazione delle apparecchiature a pressione generalmente vengono utilizzate le norme europee armonizzate alla direttiva PED 2014/68/UE oppure altri codici internazionali tra cui sicuramente il più diffuso è il codice ASME.

La norma armonizzata europea che si occupa della progettazione delle tubazioni industriali metalliche è la EN 13480 che è suddivisa in otto parti:

UNI EN 13480-1:2019	Generalità
UNI EN 13480-2:2020	Materiali
UNI EN 13480-3:2021	Progettazione e calcolo
UNI EN 13480-4:2017	Fabbricazione e installazione
UNI EN 13480-5:2019	Collaudo e prove
UNI EN 13480-6:2019	Requisiti addizionali per tubazioni interrate
UNI EN 13480-7:2018	Guida sull'utilizzo delle procedure di valutazione della conformità
UNI EN 13480-8:2017	Requisiti addizionali per tubazioni di alluminio e leghe di alluminio

In Italia si sovrappone però alla norma armonizzata, prevalendo, il vigente Decreto del Ministero dello sviluppo economico del 16/04/2008, *“Regola tecnica per la progettazione, costruzione, collaudo, esercizio e sorveglianza delle opere e dei sistemi di distribuzione e di linee dirette del gas naturale con densità non superiore a 0,8”*, pubblicato nel Supplemento Ordinario n. 115 alla Gazzetta Ufficiale n. 107 del 08/05/2008. Il Decreto detta i requisiti minimi di sicurezza per la progettazione, costruzione, collaudo, esercizio e

sorveglianza delle opere e degli impianti di distribuzione del gas naturale con densità non superiore a 0,8 kg/mc, e si applica ai sistemi di distribuzione ed alle linee dirette del gas naturale con pressione massima di esercizio fino a 5 bar, oltre che ai gruppi di misura presso i clienti finali. Definisce inoltre i criteri di sicurezza, compresi quelli relativi agli aspetti antincendio, e la possibilità di interconnessione e di interoperabilità dei sistemi stessi. Pertanto, al fine di ottenere le autorizzazioni per la connessione alla rete di trasporto del gas naturale e per la prevenzione degli incendi, è necessario che in tutte le fasi di produzione, dalla progettazione al collaudo, venga rispettata la regola tecnica in questione.

L'allegato tecnico al D.M. 16/04/2008 rimanda, per la scelta dei materiali, per il dimensionamento delle condotte, per i sistemi di giunzione, per la protezione dalla corrosione, alla norma UNI 9034, recentemente modificata nell'edizione 2020, "*Tubazioni per la distribuzione del gas con pressione massima di esercizio (MOP) minore o uguale 0,5 MPa (5 bar) - Materiali e sistemi di giunzione*". Quest'ultima rimanda, per i criteri di progettazione, costruzione e collaudo, alle norme:

- UNI 9165:2020 "*Infrastrutture del gas - Condotte con pressione massima di esercizio minore o uguale a 5 bar - Progettazione, costruzione, collaudo, conduzione, manutenzione e risanamento*";
- UNI 9860:2020 "*Infrastrutture del gas - Condotte con pressione massima operativa non maggiore di 0,5 MPa (5 bar) - Impianti di derivazione di utenza del gas - Progettazione, costruzione, collaudo, conduzione, manutenzione e risanamento*";
- la serie delle norme UNI EN 12007 (parti 1, 2, 3, 4 e 5) relative alle condotte con pressione massima di esercizio non superiore a 16 bar.

2. Il calcolo delle tubazioni in pressione

La norma UNI 9034 non detta dunque le formule per il calcolo delle tubazioni, ma contiene comunque, nel capitolo 4, delle tabelle indicanti lo spessore minimo che deve avere la tubazione in funzione del tipo di materiale e del diametro. La norma prevede l'utilizzo di quattro tipologie di materiali: acciaio, ghisa, polietilene, rame. In questa pubblicazione considereremo solo le tubazioni di acciaio, che è il materiale utilizzato nel caso di studio che esamineremo ed è l'unico materiale in comune con la norma UNI EN 13480.

Nel prospetto 1 della norma UNI 9034 viene stabilito che, per $MOP \leq 0,5$ MPa (5 bar) e tubazione interrata, devono essere utilizzati tubi in acciaio di livello PSL1 o superiore e di qualità non inferiore a L210 in conformità alla norma UNI EN ISO 3183:2019 "*Industrie del petrolio e del gas naturale - Tubi di acciaio per i sistemi di trasporto per mezzo di condotte*". Lo spessore, diminuito della tolleranza negativa garantita di fabbricazione, deve rispettare il minimo riportato nella tabella 1, presente nella norma al paragrafo 4.1.1.1:

Spessore (mm)	Diametro nominale DN
2,3	Per DN fino a 20
2,6	Per DN maggiore di 20 e fino a 40
2,9	Per DN maggiore di 40 e fino a 65
3,2	Per DN maggiore di 65 e fino a 100
3,6	Per DN maggiore di 100 e fino a 125
4,0	Per DN maggiore di 125 e fino a 150
4,5	Per DN maggiore di 150 e fino a 200

5,0	Per DN maggiore di 200 e fino a 250
5,6	Per DN maggiore di 250 e fino a 350
6,3	Per DN maggiore di 350 e fino a 600
1% DN	Per DN maggiore di 600

Tabella 1. Spessore minimo tubi in acciaio secondo norma UNI 9034.

La tabella 1 è fondamentale alla luce del fatto che neppure la norma UNI 9165:2020 fornisce formule di calcolo, in quanto nel paragrafo 7.1, “Dimensionamento delle condotte”, recita: <<Si intende per dimensionamento delle condotte la determinazione del diametro di calcolo dei tubi al fine di assicurare il trasferimento della quantità di gas necessaria.>> Dunque si tratta non di un calcolo di resistenza dei tubi, ma di un dimensionamento funzionale che deve tenere conto: dell’ubicazione, tipologia e numero delle utenze da alimentare; delle perdite di carico lungo la condotta; della velocità del gas, che deve essere tale da limitare il trascinarsi di eventuali impurità, perdite di carico e fenomeni di rumorosità.

Ecco allora che dal punto di vista del calcolo strutturale si ritorna alla norma armonizzata UNI EN 13480-3:2021, ricordando però che la direttiva PED 2014/68/UE consente l’uso di qualsiasi codice di calcolo, a scelta del fabbricante, che permetta di adempiere ai RES ed in particolare al requisito essenziale di sicurezza “2.2 Progettazione ai fini di una resistenza adeguata”.

2.1 Il metodo di calcolo previsto dalla UNI EN 13480-3:2021

Nel paragrafo 6.1 la norma armonizzata fornisce le classiche formule per il calcolo dello spessore di una tubazione soggetta a pressione interna:

$$e = \frac{p_c \cdot D_o}{2f_z + p_c} \quad (1)$$

oppure

$$e = \frac{p_c \cdot D_i}{2f_z - p_c} \quad (2)$$

con $D_o/D_i \leq 1,7$,
in cui:

- p_c è la pressione massima di progetto in MPa
- D_o è il Diametro esterno della tubazione in mm
- f_z è la sollecitazione ammissibile in MPa moltiplicata per il modulo di efficienza che per i tubi è assunto pari ad 1.

A parte la semplicità di questa formula, la norma è molto completa ed articolata, prendendo in considerazione tutte le possibili sollecitazioni cui può essere soggetta una condotta. Tra le problematiche che possono interessare una tubazione per il trasporto di gas metano citiamo: la pressione esterna, come ad esempio l’azione esercitata dal terreno su una tubazione interrata; il peso proprio della tubazione, del fluido, del fluido utilizzato per la prova finale, degli accessori e dell’isolamento esterno; i carichi da neve e vento sui tratti di tubazione non interrati; la velocità del flusso; l’azione sismica; sollecitazioni dovute alle eventuali strutture di supporto ed ai loro cedimenti differenziali; il

colpo d'ariete; fenomeni di fatica dovuti alle vibrazioni cui può essere soggetta la condotta; l'azione dinamica di reazione allo scarico di una valvola di sicurezza installata sulla tubazione; gli effetti della corrosione interna ed esterna; le variazioni termiche; sollecitazioni dovute a discontinuità geometriche della condotta (curve, gomiti, derivazioni a "T", variazioni di sezione, irregolarità delle giunzioni saldate, innesti di bocchelli, ecc.).

3. Un caso di studio

Esamineremo ora gli aspetti principali di un caso relativo ad una condotta di distribuzione di gas naturale a servizio dei bruciatori di avviamento di due caldaie alimentate a biomasse solide facenti parte di una centrale realizzata nel 2019. La condotta è installata a valle di un impianto di riduzione della pressione collegato alla rete gas di SNAM. La pressione operativa è pari a 4 bar e l'impianto è dotato di idoneo dispositivo di limitazione della pressione, ovvero di un regolatore di pressione di emergenza (monitor) comprensivo di valvola di blocco di emergenza tarata a 4,4 bar, valore pertanto coincidente con la pressione massima operativa MOP della condotta di distribuzione. Nella progettazione è stata considerata cautelativamente una pressione massima ammissibile PS di 5 bar.

Secondo il D.M. 16/04/2008 si tratta dunque di una condotta di quarta specie, cioè di una condotta con pressione massima di esercizio (MOP) superiore a 1,5 bar (0,15 MPa) ed inferiore o uguale a 5 bar (0,5 MPa). La classe del materiale da utilizzare è definita dalla norma UNI EN 3183:2018 "Industrie del petrolio e del gas naturale - Tubi di acciaio per i sistemi di trasporto per mezzo di condotte", livello di prodotto PSL1, che ha sostituito la norma UNI EN 10208-1:2009. È stato dunque utilizzato un tubo in acciaio saldato longitudinalmente "HFW" di qualità L245.

Per come definito nella sezione 2 del D.M 16/04/2008 si tratta della "condotta che dall'impianto di riduzione e misura adduce gas alle apparecchiature di utilizzazione (rete di adduzione)" e pertanto è stata realizzata in conformità ai requisiti contenuti nella direttiva PED.

Secondo la Direttiva 2014/68/UE si tratta di tubazioni definite dall'art. 4, paragrafo 1, lettera c), punto i), primo trattino, ovvero di "tubazioni destinate a gas, gas liquefatti, gas dissolti sotto pressione, vapori e liquidi la cui tensione di vapore alla temperatura massima ammissibile è superiore di 0,5 bar alla pressione atmosferica normale (1013 mbar)". La categoria di rischio è dunque determinata dalla tabella 6 dell'Allegato II che, in considerazione della PS e del DN massimo delle tubazioni (5 bar e 200 mm), consente di classificare la condotta in categoria II. Il modulo applicato è stato il modulo A2.

3.1 Calcolo dello spessore

La condotta in oggetto è costituita da tre sezioni con diametri differenti ovvero DN200 (De 219,1 mm), DN 150 (De 168,3 mm) e DN100 (De 114,3 mm); il calcolo dello spessore è stato effettuato pertanto per ogni sezione applicando la formula (1).

Nel caso in oggetto, i parametri della formula risultano essere:

- $p_c = 0,5 \text{ MPa}$
- $f_z = R_{t0,5} / 1,5 = 245/1,5 = 163,33 \text{ MPa}$ (con $R_{t0,5}$ si intende la resistenza allo snervamento del materiale utilizzato, pari a 245 MPa)

Per la sezione DN 200, la formula (1) diventa dunque la seguente:

$$e = (0,5 \times 219,1)/(2 \times 163,33 + 0,5) = 0,335 \text{ mm}$$

Per la sezione DN150:

$$e = (0,5 \times 168,3)/(2 \times 163,33 + 0,5) = 0,257 \text{ mm}$$

Per la sezione DN100:

$$e = (0,5 \times 114,3)/(2 \times 163,33 + 0,5) = 0,175 \text{ mm}$$

Dalla tabella 1 si ricavano invece i seguenti spessori minimi, che coincidono con gli spessori commerciali:

- DN200 spessore minimo 4,5 mm
- DN150 spessore minimo 4 mm
- DN100 spessore minimo 3,2 mm

Gli spessori minimi previsti dalla norma UNI 9034 garantiscono quindi dei coefficienti di sicurezza molto elevati, nel caso del DN200 lo spessore minimo è 13 volte superiore a quello calcolato. Si omette, per ovvi motivi, di riportare il calcolo della tubazione in condizioni di prova idraulica.

3.2 Azione sismica

Gli effetti dell'azione sismica sono stati limitati effettuando la posa interrata ricoprendo integralmente la condotta con sabbia di idonea granulometria al fine di consentire margini di movimento adeguati anche in caso di evento sismico. Per quanto riguarda la parte aerea, la condotta non è stata vincolata alle strutture delle caldaie in quanto la tipologia di supporti utilizzata consente traslazioni ampiamente sopportabili dalla condotta nello stato limite di operatività della struttura delle caldaie.

3.3 Materiali

La norma UNI 9034 prescrive che i tubi in acciaio devono essere conformi alla norma UNI EN 3183:2018 "*Industrie del petrolio e del gas naturale - Tubi di acciaio per i sistemi di trasporto per mezzo di condotte*". La norma in questione non rientra tra le norme armonizzate previste dalla direttiva PED, pertanto è necessario predisporre una opportuna Approvazione Particolare dei Materiali (PMA) ai sensi del paragrafo 4.2. lettera b) dell'Allegato I della direttiva stessa.

3.4 Sistemi di giunzione

La giunzione dei vari tronchi costituenti la linea è stata effettuata in ottemperanza a quanto previsto dalla norma UNI 9034:2004 (ora sostituita dalla già citata UNI 9034:2020), con le integrazioni previste dalla norma UNI 9165:2004, che prevede per la tipologia della condotta installata solo la possibilità di giunzioni saldate con materiale d'apporto. Nel caso in esame la norma non ammette dunque la saldatura ossiacetilenica e le giunzioni meccaniche mediante filettature, flange e raccordi a compressione. Le saldature sono pertanto state eseguite con procedimento di saldatura TIG testa a testa.

3.5 Controlli non distruttivi

Per quanto riguarda i controlli non distruttivi da effettuare sulle giunzioni saldate, i controlli minimi effettuati sono quelli previsti dalla norma UNI EN 13480-5:2017 (l'edizione 2019 della norma non era stata ancora pubblicata); cautelativamente sono stati però incrementati i controlli PT. Pertanto sono stati effettuati i seguenti esami:

- 100% VT, esame visivo secondo la norma UNI EN ISO 17637:2017 "*Controllo non distruttivo delle saldature - Esame visivo dei giunti saldati per fusione*", con criteri di accettabilità secondo UNI EN ISO 5817:2014 "*Saldatura - Giunti saldati per fusione di*

acciaio, nichel, titanio e loro leghe (esclusa la saldatura a fascio di energia) - Livelli di qualità delle imperfezioni”;

- 100% PT, esame con liquidi penetranti secondo la norma UNI EN ISO 3452-1:2013 “*Prove non distruttive - Esame con liquidi penetranti - Parte 1: Principi generali*”, con criteri di accettabilità secondo UNI EN ISO 23277:2015 “*Controllo non distruttivo delle saldature - Controllo mediante liquidi penetranti - Livelli di accettabilità*”;

- 10% RT Esame radiografico secondo la norma UNI EN ISO 17636-1:2013 “*Prove non distruttive delle saldature - Controllo radiografico - Parte 1: Tecniche a raggi -X e gamma mediante pellicola*”, con criteri di accettabilità secondo UNI EN 10675-1:2017 “*Controlli non distruttivi delle saldature - Livelli di accettabilità per il controllo radiografico - Parte 1: Acciaio, nichel, titanio e loro leghe*”.

3.6 Collaudo finale

Per il collaudo dell’impianto il D.M. 16/04/2008 al punto 3.7.1 impone una prova idraulica alla pressione di 7,5 bar per le condotte con MOP compreso tra 1,5 e 5 bar. In sostanza una prova pari a 1,5 volte la pressione massima di esercizio, maggiore della pressione di prova idraulica imposta dalla direttiva PED, pari a 1,43 P_{max}. Il Decreto permette anche di sostituire la prova idraulica con una prova pneumatica per le condotte esercite fino a 5 bar e per quelle di diametro non superiore a 100 mm. Questa possibilità, prevista anche dal punto 9.3.3 della norma UNI EN 13480-5:2017, è stata utilizzata a causa della impossibilità di bonificare adeguatamente la condotta in caso di utilizzo dell’acqua. La presenza di residui di acqua potrebbe danneggiare irreversibilmente le apparecchiature facenti parte dell’impianto a seguito dell’immissione di gas metano. La prova è stata eseguita con aria compressa secca e disoleata, predisponendo preventivamente un adeguato piano di sicurezza. In particolare la tubazione è stata ricoperta di terreno all’interno dello scavo, mantenendo scoperte soltanto le giunzioni saldate; l’esterno dello scavo è stato delimitato con nastro bianco-rosso per una larghezza di 15 metri dai due lati; il manometro ed il manografo sono stati collegati alla tubazione in prova con manichette flessibili in modo da posizionarli in zone protette non investite dall’onda d’urto in caso di rottura delle tubazioni. Secondo il Decreto la prova ha esito positivo se dopo almeno quattro ore la pressione si sia mantenuta costante, a meno delle variazioni dovute all’influenza della temperatura. Nella realtà la prova, per eccesso di cautela, è stata eseguita alla pressione di 8 bar ed ha avuto una durata di 24 ore, con registrazione continua della pressione su disco manografo firmato prima dell’inizio della prova.

3.7 Dichiarazione di conformità

In casi come quello esposto è fondamentale che nella dichiarazione di conformità venga riportato l’elenco di tutte le norme utilizzate nella progettazione ed esecuzione, che come si è visto contengono regole diverse da quelle delle norme armonizzate alla direttiva PED.

4. Il confronto tra il D.M. 16/04/2008 e la norma UNI EN 13480-3:2021

Nella tabella 2 si presenta un confronto tra gli spessori di tubazione calcolati con la formula (1) fornita dalla norma armonizzata UNI EN 13480-3:2021 e quelli minimi definiti dalla norma UNI 9034. La sollecitazione ammissibile è stata assunta pari a quella del caso di studio del paragrafo precedente, dunque pari a:

$$f = R_{t0,5} / 1,5 = 245 / 1,5 = 163,33 \text{ Mpa}$$

DN (mm)	spessore minimo UNI 9034 per tubi di quarta e quinta specie (mm)	Spessore (mm) calcolato con la UNI EN 13480-3 con $f = 163,3$ Mpa	
		condotte di quinta specie (1,5 bar)	condotte di quarta specie (5 bar)
10,3	2,3	0,005	0,016
13,7	2,3	0,006	0,021
17,1	2,3	0,008	0,026
21,3	2,3	0,01	0,033
26,7	2,3	0,012	0,041
33,4	2,6	0,015	0,051
42,2	2,6	0,019	0,064
48,3	2,6	0,022	0,074
60,3	2,9	0,028	0,092
73	2,9	0,034	0,112
88,9	3,2	0,041	0,136
101,6	3,2	0,047	0,155
114,3	3,2	0,052	0,175
141,3	3,6	0,065	0,216
168,3	4	0,077	0,257
219,1	4,5	0,101	0,335
273	5	0,125	0,417
323,8	5,6	0,149	0,495
355,6	5,6	0,163	0,543
406,4	6,3	0,187	0,621
457,2	6,3	0,21	0,699
508	6,3	0,233	0,776
558,8	6,3	0,256	0,854
609,6	6,3	0,28	0,932
660,4	6,6	0,303	1,009
711,2	7,1	0,326	1,087
762	7,6	0,35	1,165
812,8	8,1	0,373	1,242
863,5	8,6	0,396	1,32
914,4	9,1	0,42	1,397

Tabella 2. Confronto tra gli spessori imposti dalla norma UNI 9034 e quelli calcolati con la UNI EN 13480-3.

Dalla tabella 2 si evince facilmente come sia inutile effettuare il calcolo a pressione della condotta, risultando gli spessori calcolati con la UNI EN 13480-3 molto inferiori a quelli minimi imposti dalla UNI 9034.

5. Conclusioni

Il presente lavoro mette in evidenza le intersezioni tra le direttive europee di prodotto e le norme nazionali di settore, e l'influenza preponderante di queste ultime su quella armonizzata per alcuni aspetti della costruzione. Ovviamente lo scopo del legislatore nazionale è quello di aumentare i margini di sicurezza, tenuto conto della pericolosità del fluido cui le condotte sono destinate. Comunque non bisogna mai fare l'errore di trascurare le norme armonizzate, al fine di adempiere compiutamente all'obbligo, previsto dalla direttiva PED, di effettuare l'analisi dei rischi e dei requisiti essenziali di sicurezza. Come infatti abbiamo detto nel paragrafo 2.1, la norma UNI EN 13480-3:2021 obbliga a considerare una serie di fattori che possono essere preponderanti rispetto al calcolo di resistenza a pressione interna, comportando delle sollecitazioni di flessione che possono influire sui risultati del calcolo. Le condotte vanno pertanto attentamente verificate nella loro configurazione spaziale, compito facilitato dalla presenza in commercio di programmi di calcolo dedicati.

6. Bibliografia

- [1] D. M. 16 aprile 2008. In Supplemento ordinario n. 115 alla Gazzetta Ufficiale n. 107 del 08/05/2008.
- [2] Giuseppe De Luca. Impianti ed infrastrutture del gas: le nuove UNI 9034, UNI 9165, UNI 9060. In www.biblus.acca.it/impianti-ed-infrastrutture-del-gas-le-nuove-uni-9034-uni-9165-uni-9060/
- [3] Direttiva 2014/68/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 15/05/2014 concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione.
- [4] Norma UNI 9034:2020. Tubazioni per la distribuzione del gas con pressione massima di esercizio (MOP) minore o uguale 0,5 MPa (5 bar) - Materiali e sistemi di giunzione.
- [5] Norma UNI 9165:2020. Infrastrutture del gas – Condotte con pressione massima di esercizio minore o uguale a 5 bar – Progettazione, costruzione, collaudo, conduzione, manutenzione e risanamento.
- [6] Norma UNI EN 13480-3:2021. Tubazioni industriali metalliche – Parte 3: Progettazione e calcolo.
- [7] Norma UNI EN ISO 3183:2019. Industrie del petrolio e del gas naturale - Tubi di acciaio per i sistemi di trasporto per mezzo di condotte.
- [8] Norma UNI EN ISO 17637:2017. Controllo non distruttivo delle saldature - Esame visivo dei giunti saldati per fusione.
- [9] Norma UNI EN ISO 5817:2014. Saldatura - Giunti saldati per fusione di acciaio, nichel, titanio e loro leghe (esclusa la saldatura a fascio di energia) - Livelli di qualità delle imperfezioni.
- [10] Norma UNI EN ISO 3452-1:2013. Prove non distruttive - Esame con liquidi penetranti - Parte 1: Principi generali.

[11] Norma UNI EN ISO 23277:2015. Controllo non distruttivo delle saldature - Controllo mediante liquidi penetranti - Livelli di accettabilità.

[12] Norma UNI EN ISO 17636-1:2013. Prove non distruttive delle saldature - Controllo radiografico - Parte 1: Tecniche a raggi -X e gamma mediante pellicola.

[13] Norma UNI EN 10675-1:2017. Controlli non distruttivi delle saldature - Livelli di accettabilità per il controllo radiografico - Parte 1: Acciaio, nichel, titanio e loro leghe.

Progettazione e fabbricazione di attrezzature a pressione in composito: proposte per la caratterizzazione e l'accettazione dei materiali

J. Ferino¹, I. Mazzarelli², A. Meleddu¹, E. Pichini³

¹ Astarte Strategies SRL

² Inail - Uot di Milano

³ Inail - Dit

Sommario

Per talune specifiche applicazioni i materiali compositi rappresentano da tempo una concreta alternativa ai materiali metallici. Nel settore delle attrezzature a pressione fabbricate con materie plastiche rinforzate con fibre di vetro, la normativa italiana ha registrato una battuta d'arresto con la "Raccolta PRFV" emanata con la circolare ISPESL 41060 del 2.12.1982. La caratterizzazione dei materiali compositi in base all'impiego non ha raggiunto il medesimo standard previsto per i materiali metallici: ciò implica la ripetizione di prove su ogni lotto di fabbricazione.

La memoria, partendo dal quadro normativo di riferimento nazionale ed europeo per la progettazione e fabbricazione di attrezzature in pressione fuori terra, intende illustrare in particolar modo le problematiche connesse alla scelta e all'accettazione dei materiali e le prove previste per la loro caratterizzazione.

La memoria illustrerà il progetto di ricerca condotto dagli autori mirato a individuare un percorso di caratterizzazione basato su requisiti specifici comuni a una famiglia di materiali, tale da evitare la ripetitività di prove sui lotti, con il fine ultimo di creare delle vere e proprie schede di accettazione.

1. Cenni storici. Legislazione e normativa di riferimento

Ai primi del secolo scorso la produzione delle attrezzature a pressione era incentrata sull'impiego dell'acciaio e di altri materiali metallici. In Italia la prima regolamentazione della fabbricazione delle attrezzature a pressione si ebbe con il R.D. n. 824 del 12.05.1927. L'Associazione Nazionale per il Controllo della Combustione (ANCC) istituita nel 1926 e diventata Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro (ISPESL) nel 1982, fu incaricata dei controlli in fase di fabbricazione ed esercizio delle attrezzature in pressione. Le prime norme di calcolo vennero emanate dall'ANCC, sotto forma di progetto di regolamentazione del settore (PNR), nel 1953. Successivamente, con il DM 21.11.1972 vennero ufficialmente emanate le norme per la costruzione degli apparecchi in pressione (recipienti e generatori di vapore), con la conseguente emanazione delle specifiche tecniche e delle norme per la realizzazione delle saldature e per la scelta e la caratterizzazione dei materiali, note come Raccolte ISPESL VSR, VSG, S, M che ancora oggi costituiscono, rivedute e corrette, il codice di calcolo Italiano.

Già negli anni '70 alcuni settori iniziarono a fare uso di materiali diversi dall'acciaio, principalmente là dove era necessario che alcune parti dell'attrezzatura a pressione possedessero caratteristiche isolanti: tipico del settore elettrico. Da ciò l'impiego di materiali a base ceramica e successivamente di "materiali compositi", di cui si parlerà nel seguito.

Con il DM 1.12.1980 sono stati disciplinati i contenitori a pressione di gas con membrane miste (materiali metallici ed isolanti) contenenti parti attive di membrane elettriche. Tuttavia la caratterizzazione dei materiali contemplati nella Raccolta M disciplinava ancora solo i materiali vetrosi (per spie visive), alcune materie plastiche a base di resine

polimetilmetacriliche per la fabbricazione di camere iperbariche, l'elettrografite impregnata e la porcellana per la costruzione di involucri degli isolatori elettrici.

Così, parallelamente all'emanazione di specifiche costruttive nel settore elettrico, nel 1982 l'ISPESL - in via sperimentale - emana la specifica tecnica PRFV per i recipienti fabbricati in materie plastiche rinforzate con fibre di vetro di tutti i settori commerciali. Nei primi anni della sua applicazione, essendo molto pochi i produttori di tali materiali, era possibile effettuare una caratterizzazione legata al fabbricante che, in base all'accertamento dell'uniformità di produzione, evitava prove ripetute sui lotti.

Nel 1997 viene emanata la prima Direttiva Europea di prodotto in materia di attrezzatura a pressione - la Direttiva 97/23/CE nota come PED, successivamente modificata con la Direttiva 2014/68/UE - che apre all'impiego di materiali altri rispetto a quelli metallici. Tuttavia la PED esclude dal suo campo di applicazione gli alloggiamenti per apparecchiature ad alta tensione che in Italia continuano ad essere regolamentati con il D.M. 1.12.1980.

A seguito dell'emanazione delle PED diventa necessario adeguare alla Direttiva - ovvero 'armonizzare' - il quadro normativo: nel 1999 viene emanata la serie di norme UNI EN 976 per i serbatoi interrati in PRFV; nel 2006 la UNI EN 13923 per serbatoi in pressione ottenuti per avvolgimento di filamenti (FRP); nel 2008 la serie di norme UNI EN 13121 per i serbatoi fuori terra in PRFV. Quindi il quadro normativo viene via via ad arricchirsi di nuove norme di settore, incluse norme specifiche su metodologie di prova dei materiali e di test dei serbatoi. Come si cercherà di illustrare nel seguito, la regolamentazione italiana e le norme europee presentano forti punti di contatto nell'approccio e nella metodologia di caratterizzazione dei materiali compositi. È necessario sottolineare però che il sempre più largo uso dei materiali compositi e l'aumento dei produttori rende più difficoltoso l'approccio precedentemente descritto, in termini di costi da affrontare per la prototipazione e la produzione di serie.

Assume fondamentale importanza quindi un approccio basato sulla emissione di schede specifiche di tali materiali al pari di quelli metallici, da inserire nella Raccolta M, così da definire condizioni tecniche di fornitura comuni, caratteristiche chimiche e meccaniche, comportamento in temperatura, etc., e ridurre i costi di commercializzazione.

2. Cenni sulla norma UNI EN 13121

La norma UNI EN 13121 fornisce le indicazioni per le condizioni di specifica e di uso delle materie prime (parte 1), per la resistenza chimica dei materiali compositi (parte 2), per la progettazione e lavorazione di serbatoi e contenitori di materie plastiche rinforzate con fibre di vetro (PRFV) per utilizzi fuori terra (parte 3); inoltre, nella sua parte 4 indica le condizioni di fornitura e installazione, e nella parte 5 fornisce esempi di calcolo.

Particolare rilievo si vuole dare alla parte 3 che ai capitoli 6, 7 e 8 individua le caratteristiche minime da garantire per i materiali, in particolare le proprietà meccaniche e le sollecitazioni massime da considerare nelle fasi di progettazione (unitamente agli annessi A e B) e della sua analisi descritte nei capitoli 9 e 10. I carichi da determinare per le varie componenti di un serbatoio sono riepilogati nei capitoli da 11 a 16, mentre la parte 17 è dedicata al controllo di qualità e alle prove, specificate poi negli annessi C e D. Nell'annesso F sono descritte le metodologie per la progettazione mediante *stress analysis*.

È utile sottolineare che per l'impiego di materiali compositi, ogni valutazione è fortemente legata alle condizioni del loro impiego; è essenziale quindi, prima della progettazione, acquisire informazioni da parte del Committente, quali le condizioni di funzionamento e ambientali. In Italia un utile supporto è rappresentato dalla norma UNI 9032, nonché eventuali imposizioni dovute a regolamentazioni nazionali.

La norma specifica i requisiti minimi, in base al tipo di laminato ottenuto per avvolgimenti di filamenti, riguardo lo spessore minimo di ogni strato del laminato, il modulo elastico a

trazione unitario, il modulo di taglio e la resistenza al taglio, la resistenza al distacco, la determinazione della temperatura di deflessione al calore.

Le prove (elencate nell'annesso D) devono essere effettuate presso un laboratorio certificato e indipendente dalla produzione.

La norma consente due metodi di progettazione:

- a) una progettazione di base adottando le proprietà minime specificate nella norma e determinate mediante le prove descritte nel punto 7.9.2 della norma (metodo simile a quello riportato nella norma ASTM D 2992-01), oppure
- b) una progettazione avanzata che stabilisce proprietà meccaniche più elevate mediante un programma di prove meccaniche ampliato definito nel punto 7.9.3 e nell'annesso D.

Il metodo b) è basato su fattori di progettazione complessivi e parziali, meglio descritti nel seguito, avendo ottenuto una specifica deviazione standard dei risultati di prova su un numero elevato di provini. Questo approccio consente anche di ottenere uno 'storico' utile per ridurre nel futuro il numero di prove su produzioni di laminati simili. Ad oggi uno dei limiti della norma risiede in una scarsa definizione dei processi di produzione dei laminati al fine di conferire loro caratteristiche meccaniche minime definite; pertanto occorre sempre affidarsi a prove sui lotti.

Per motivi di brevità si descrive sommariamente il principio di progettazione indicato nella norma, basato sulla determinazione dei fattori complessivi K ed F indicati nelle formule (1) e (2), utilizzati per determinare le deformazioni e i carichi ammissibili da verificare poi nelle formule di calcolo e durante le prove del prototipo del serbatoio:

$$(1) \quad K = \gamma_M \cdot \gamma_{F,i} \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5$$

$$(2) \quad F = \gamma_M \cdot \gamma_{F,i} \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot \sqrt{A_5}$$

I fattori di deformazione parziali A variano tra un minimo e un massimo fissati dalla norma e sono rappresentativi:

- A_1 relativo alle prove delle proprietà dei materiali
- A_2 relativo all'ambiente chimico (vedi EN 13121-2)
- A_3 relativo all'influenza della temperatura di progettazione ed alla temperatura di deflessione al calore HDT
- A_4 relativo ai cicli di funzionamento a pressione, a temperatura oppure combinati (pressione e temperatura)
- A_5 relativo alle prestazioni a lungo termine (durata di vita prevista)
- γ_M fattore parziale di proprietà dei materiali pari a 1,4 per tutti i laminati
- $\gamma_{F,i}$ fattore parziale di azione variabile in funzione della combinazione dei carichi

Definite come descritto le proprietà di base dei laminati, occorre verificarle mediante i programmi di prova e determinare i limiti di deformazione per la progettazione:

- deformazione massima ammissibile per la resina pari a 1/10 dell'allungamento a rottura della resina non rinforzata;
- deformazione limite del laminato o della lamina, funzione di K e delle proprietà meccaniche ricavate durante le prove dei laminati in base al loro rinforzo ed alle caratteristiche di laminazione;
- deformazione di progetto massima ammissibile della lamina che tiene conto delle precedenti e delle deformazioni limiti per i rivestimenti termoplastici;
- deformazione ammissibile in condizioni di prova.

A differenza di altri codici di calcolo cui siamo abituati nel settore delle attrezzature a pressione, una volta determinate le deformazioni limite e fissati gli spessori omogenei adottati, vanno calcolati i carichi ammissibili dovuti alle sollecitazioni di origine interna ed esterna, in particolare quelle localizzate. Successivamente occorre determinare le pressioni

di instabilità critiche per i carichi combinati, in particolare per punti di indebolimento come saldature e aperture.

La norma consente anche di adottare un metodo sperimentale - prova a pressione spinta a rottura ove la pressione di prova deve essere almeno 5 volte quella di progetto - molto simile a quello previsto dal DM 1.12.1980 per gli isolatori: tale metodologia è ammessa se la geometria non consente l'utilizzo di formule, se la TS non è superiore a (HDT-20°), e se si dispone di documentate esperienze rappresentative su produzioni similari a parità di materiali verificate da un'autorità di ispezione.

3. Requisiti e test dei materiali nello standard UNI EN 13121

Il fabbricante di recipienti conformi alla UNI EN 13121-3 deve effettuare i test previsti nel punto 7 per i laminati al fine di dimostrare anche i requisiti dei materiali desunti nella UNI EN 13121-1. La norma non specifica i metodi di produzione delle resine, rimandando alle specifiche dettate dal fabbricante che, sulla base dei valori minimi di resistenza a flessione e trazione (con relativi moduli di elasticità), dell'allungamento a trazione, della durezza e della temperatura di deflessione al calore e vetrosa, deve classificare la resina secondo il prospetto 2 riportato nella UNI EN 13121-1.

La caratterizzazione delle resine deve essere effettuata nello stato non polimerizzato per determinarne principalmente massa, viscosità e peso equivalente; e nello stato polimerizzato per determinarne le principali caratteristiche meccaniche sopra enunciate.

La UNI EN 13121-1 completa il quadro relativo alle caratteristiche dei materiali di rinforzo (vetro tessile) che devono essere compatibili con la resina e col processo di laminazione e per i quali va specificata la struttura, il filo base e suo orientamento, il legante e la massa per unità di area in g/m².

In tutti i casi il fabbricante del materiale deve emettere opportuni certificati in conformità alla UNI EN 10204, indicando i valori delle caratteristiche sopra specificate. Lo standard UNI EN 13121-1 è armonizzato ai requisiti essenziali di sicurezza 4.1 e 4.3 della Direttiva 97/23/CE. La norma UNI EN 13121-3 specifica per i laminati i valori minimi del carico unitario di rottura a trazione U ($UTUS$) e del modulo a trazione unitario X_i della lamina per kg/m² di vetro. Tali valori devono essere ottenuti specificando l'angolo di direzione dell'avvolgimento e il rapporto della massa del vetro nella direzione dell'ordito e della trama rispetto alla massa totale di vetro.

Ci limiteremo a considerare i test richiesti per il laminato, essenziali per determinare i valori da inserire nei calcoli di progetto del serbatoio: questi dunque devono essere o valori specifici del lotto di materiale (*advanced design proofed values*) o valori minimi da garantire mediante prove. Proprio questo ultimo approccio ha ispirato l'attività di ricerca che verrà discussa nel paragrafo 5.

Le principali prove sono mirate a ottenere i valori specifici che servono per determinare le caratteristiche di deformazione della resina, del laminato e della lamina sia in condizioni di limite di esercizio che di prova. Per i laminati, in base al contenuto di vetro e al numero di strati (tipo e loro configurazione), le prove sono finalizzate a determinare la resistenza al taglio e al distacco del rivestimento termoplastico, lo scorrimento, la durezza, il modulo di trazione unitario e flessione, la resistenza a flessione, il carico di rottura a trazione e la resistenza al taglio interlaminare. I valori sono conseguiti come media di 5 prove o 3 prove restanti scartando i valori limite superiore e inferiore dei 5 provini.

Nell'allegato D della UNI EN 13121-3 sono indicati tutti i metodi di prova, tra i quali quelli per la determinazione della $UTUS$ e di X_i e quindi della deformazione \mathcal{E} ; calcolata come loro rapporto, basati su provini conformi alla UNI EN 527-4 (osso di cane).

Fin qui vi sono numerose analogie con quanto avviene per i materiali metallici; tuttavia nel caso di recipienti cilindrici in materiale composito occorre considerare le forti differenze di

alcune caratteristiche delle PRFV, in particolare riguardo al comportamento ai carichi localizzati in termini di risposta ai momenti flettenti (circonferenziali e longitudinali – nella memoria non è trattato il caso dei carichi radiali) unitari che prevedono di determinare le forze unitarie massime applicabili alla membrana. Nel punto 10 della UNI EN 13121-3 è illustrato un metodo di calcolo: per la sua applicazione è fondamentale determinare i carichi massimi circonferenziali applicabili e quindi nell'applicazione pratica determinare la "resistenza in trazione circonferenziale apparente iniziale".

4. Dai limiti della VSR8.B.2 al progetto INAIL-ASTARTE

Come è noto, la PED esclude dal suo campo di applicazione gli alloggiamenti per apparecchiature ad alta tensione. Pertanto l'utilizzo di isolatori in vetroresina per la costruzione di interruttori o altro tipo di dispositivi per alta tensione è sotto regolamentazione degli Stati Membri: in Italia è tuttora in vigore il DM 1.12.1980 (e s.m.i. di cui al DM 10.09.1981) che definisce la procedura per l'approvazione di prototipi di contenitori a pressione di gas realizzati con membrane miste di materiale isolante e di materiale metallico, contenenti parti attive di apparecchiature elettriche.

Il percorso di approvazione di un nuovo prototipo prevede:

- l'approvazione particolare dei materiali non standard non ancora autorizzati all'impiego;
- la prova di scoppio su un prototipo di ogni componente metallico la cui stabilità alla pressione di progetto non possa essere verificata mediante calcolo;
- la prova di scoppio su un prototipo di ogni componente non metallico;
- una prova idraulica su un prototipo assemblato a 1,5 volte la pressione di progetto.

Le prove di scoppio devono assicurare che tutti i componenti che verranno prodotti identici a quelli sottoposti alla prova, resistano almeno fino a 4,25 volte la pressione di progetto P. Ma come assicurare con una sola prova di scoppio che tutti i componenti di un'intera produzione resistano almeno fino a 4,25 volte la pressione di progetto se essi possono avere resistenze meccaniche diverse a seconda della particolare resistenza meccanica della particolare fusione (i.e. colata) del materiale con cui sono stati realizzati?

A tal fine, in conformità al DM 1.12.1980, fu scritta la Regola VSR.8.B.2 che, nell'ipotesi (sottintesa) di comportamento lineare dei materiali, e imponendo che il componente meno resistente debba comunque resistere ad almeno 4,25 volte la pressione di progetto P, determina la pressione minima da raggiungersi nella prova di scoppio pari a

$$(3) \quad B_N = 4,25 \times P \times R_N / R_{\min}$$

essendo R_N la resistenza meccanica del componente N sottoposto a prova di scoppio e R_{\min} la resistenza meccanica minima ammissibile dichiarata dal fabbricante del materiale¹.

Si noti come il rapporto R_N / R_{\min} sia un indicatore della dispersione delle prestazioni meccaniche del materiale:

- minore è la dispersione nella produzione → più vicino a 1 è il rapporto R_N / R_{\min}
- maggiore è la dispersione nella produzione → maggiore è il rapporto R_N / R_{\min}
- maggiore è il rapporto R_N / R_{\min} → maggiore è la pressione minima di scoppio

Scritta quando l'impiego di materiali compositi fortemente ortotropi e non lineari quali le PRFV non era ancora diffuso, e dunque pensando principalmente a materiali isolanti quali ceramiche e resine epossidiche (oltre che a materiali metallici quali fusioni di leghe di

¹ Se R_{\min} è la resistenza della colata meno resistente (assicurata dal produttore del materiale) e R_N è la resistenza della colata N con cui è realizzato il componente sottoposto a prova di scoppio (rilasciato dal certificato del produttore del componente), sotto l'ipotesi di comportamenti lineari, se il componente con R_{\min} resisterà fino alla pressione di scoppio B_{\min} , il componente con R_N resisterà fino a B_N tali che $B_N / B_{\min} = R_N / R_{\min}$. E poiché il Decreto Italiano prevede che tutti i componenti debbano resistere almeno fino a 4,25 volte la pressione di progetto P, imponendo che sia $B_{\min} = 4,25 \times P$, si ottiene $B_N = 4,25 \times P \times R_N / R_{\min}$.

alluminio), la regola italiana VSR8.B.2 è una norma molto ben costruita per eseguire prove di tipo su componenti prodotti in serie quando questi sono ottenuti mediante processi di fusione (materiali isotropi omogenei, sia metallici che plastici): essa permette di assicurare che tutti gli individui della produzione resisteranno almeno fino a 4,25 volte la pressione di progetto conoscendo solo, dal certificato del produttore, l' R_{min} e l' R_N del componente sottoposto a prova di scoppio.

Ma il processo di produzione degli isolatori in fibra di vetro è molto diverso dalla fusione. Gli isolatori in PRFV sono ottenuti per *'filament winding'*, ovvero avvolgendo le fibre di vetro intrise di resina attorno a un mandrino rotante. Gli isolatori vengono poi tagliati a misura dal mandrino secondo la lunghezza richiesta.

I produttori seguono la norma di produzione europea IEC 61462:2007 – *"Composite hollow insulators – Pressurized and unpressurized insulators for use in electrical equipment with rated voltage greater than 1000 V"* che impone loro di eseguire test di routine su ciascun isolatore a due volte la pressione di progetto P, e test di tipo (cioè su individui rappresentativi del materiale o del processo di fabbricazione se cambiano) a 4 volte la pressione di progetto P. I produttori NON sono obbligati a misurare la resistenza del materiale; quindi spesso i certificati degli isolatori in fibra di vetro non riportano il valore R_{min} . Inoltre:

- mentre l' R_{min} è una caratteristica dei "parametri di progetto": percentuale di materiali (vetro e resina), angoli di avvolgimento, diametro, spessore,
- l' R_N è una caratteristica strettamente legata alla lavorazione; pertanto per un lotto di isolanti in fibra di vetro identici ottenuti da più mandrini, il produttore dovrebbe misurare l' R_N di ciascuna mandrinatura.

Ma quanti campioni dovrebbe tagliare il produttore dalla mandrinatura per determinare con sufficiente attendibilità/accuratezza il valore di R_N ? Con un materiale così non lineare e ortotropo, qual è il significato di R_N e la direzione 'giusta' lungo la quale determinarlo? È lo stesso misurare R_N lungo l'asse del cilindro o in senso circonferenziale?

Le difficoltà e i costi relativi alla determinazione dell' R_N di ogni mandrinatura sono evidenti, motivo per cui è valore che in genere il certificato del produttore non riporta.

Pertanto, per applicare la VSR8.B.2 il tecnico è spesso costretto a cercare di determinarlo mediante prove meccaniche (di trazione) da realizzarsi su campioni tagliati appositamente. Ma quale garanzia avrà che i campioni tagliati per le prove meccaniche siano ricavati dalla stessa mandrinatura da cui è stato tagliato l'isolatore sottoposto alla prova di scoppio?

In breve, nell'indisponibilità di R_N e R_{min} – che frequentemente si verifica - come determinare il valore minimo della pressione di scoppio per questo tipo di componenti?

Considerando inoltre i loro principali meccanismi di rottura, molto diversi dalla rottura fragile cui vanno soggette le resine epossidiche e che consistono

- nel distacco o nella rottura fragile delle flange quando il composito si trova ancora in campo elastico e prima/senza che questo subisca alcun danno;
- nella fessurazione della resina - con fessurazioni verticali o orizzontali a seconda dell'angolo di avvolgimento della fibra di vetro - ancora in regime elastico,

si è avviata la ricerca di standard europei che potessero offrire alternative alla VSR8.B.2.

Si è così arrivati allo standard CENELEC - EN 50052 *"High-voltage switchgear and controlgear - Gas-filled cast aluminium alloy enclosures"*.

Detto standard - che tratta purtroppo solo dei contenitori realizzati in getti di leghe di alluminio – stabilisce che i contenitori di forma non calcolabile debbano essere sottoposti a prova di tipo costituita da una prova di scoppio in cui la pressione di scoppio minima è:

$$(4) \quad B = 4 \times P \times 1/CF$$

dove P è la pressione di progetto e CF un fattore (il *Casting Factor*) che copre l'eventuale variabilità nella produzione dei getti e aumenta il coefficiente di sicurezza tanto più quanto maggiore è tale variabilità (CF basso).

Confrontando la VSR8.B.2 e la EN 50052, si può facilmente notare che, a parte la piccola differenza nei coefficienti di sicurezza (4 e 4,25), le due formule (3) e (4) sono molto simili e che il fattore $1/CF$ per i contenitori in getto di lega di alluminio ha la stessa “funzione” del rapporto R_N/R_{min} per gli isolatori in composito. Entrambi i fattori tengono conto della “qualità della produzione”, ovvero della dispersione delle effettive prestazioni meccaniche rispetto ai valori minimi dichiarati/attesi, nonché della capacità del sistema del fabbricante di produrre componenti con proprietà esattamente prevedibili.

Si è dunque avviato un percorso di ricerca, in collaborazione con la ASTARTE, spin off dell'Università di Cagliari, per provare a stimare la variabilità delle produzioni di isolatori in composito e definire un indicatore della loro 'Qualità', intesa come la capacità del fabbricante di riprodurre in modo identico i parametri di produzione - e quindi le prestazioni meccaniche - di tutti gli isolatori all'interno dello stesso lotto.

Questo indicatore potrebbe quindi essere utilizzato, al posto del rapporto R_N/R_{min} e in analogia con la EN 50052, per aumentare il coefficiente di sicurezza 4,25 nella regola VSR8.B.2 tanto più quanto minore dovesse risultare la qualità della produzione.

5. Caratterizzazione del materiale. Prove NOL ed UNI EN 1394.

La caratterizzazione della resistenza meccanica di ogni lotto di produzione è un punto fondamentale per la stima del corretto fattore di sicurezza per la prova di pressione secondo la VRS8.B.2. Nell'ambito del progetto di ricerca, Inail e ASTARTE sono impegnati nello sviluppo di una procedura innovativa per stimare la distribuzione statistica dei parametri di resistenza del materiale, a partire da dati sperimentali facilmente reperibili. La procedura si basa su due campagne di test parallele da eseguirsi su isolatori e campioni di anelli estratti dagli stessi lotti di produzione di isolatori in materiale composito. La Fig. 1 mostra uno schema di tutte le fasi del progetto, mentre una descrizione dettagliata di ogni fase è riportata nelle sezioni seguenti.

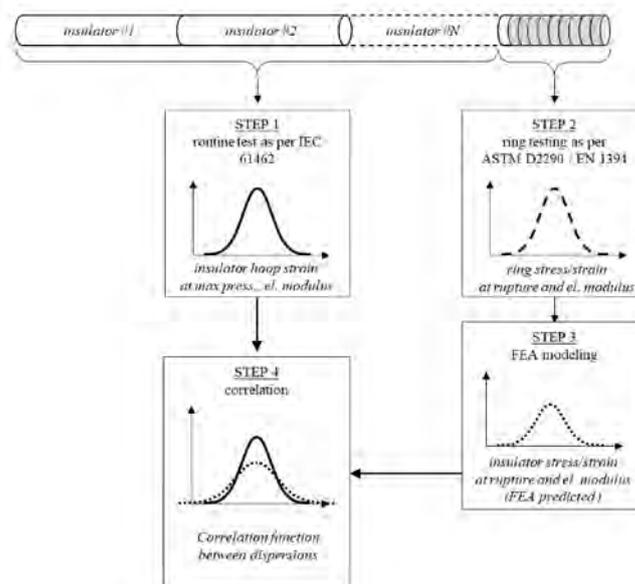


Figura 1. Schema dell'approccio proposto

Step 1 – routine tests - Per gli scopi del progetto, la norma internazionale CEI IEC 61462 assume un'importanza di rilievo. La norma definisce i criteri di accettazione per gli isolatori cavi in materiale composito, basandosi su una serie di test sperimentali da eseguire in varie fasi durante i processi di progettazione e produzione. Questi sono:

- *Design tests* - da eseguire su un solo campione prelevato tra isolatori dello stesso design e materiale. La prova è tesa a verificare l'idoneità del progetto e dei materiali per applicazioni ad alta tensione.
- *Type tests* – per la verifica delle caratteristiche meccaniche di isolatori di differente tipologia.
- *Sample tests* – eseguiti su campioni prelevati casualmente per verificarne le prestazioni in funzione della qualità di fabbricazione e dal materiale utilizzato.
- *Routine tests* – eseguiti allo scopo di individuare e scartare gli isolatori con difetti di fabbricazione.

Tra questi, i *routine test* sono gli unici eseguiti regolarmente su ogni isolatore. Pertanto, rappresentano un'importante fonte di dati sperimentali per la caratterizzazione del lotto. Il test include l'esame visivo, test di pressione, test meccanico e test di tenuta. Secondo la procedura di prova, ogni isolatore cavo viene pressurizzato fino a 2 volte la pressione massima di servizio (*Maximum Service Pressure, MSP*) e mantenuto a tale pressione per almeno 1 minuto, prima di essere scaricato. Durante l'intera prova, le deformazioni vengono monitorate con estensimetri posti a metà estensione del tubo. Se la deformazione residua dopo lo scarico è pari o inferiore a \pm al 5% della deformazione massima rilevata durante il test, il tubo è considerato in fase elastica (Fig. 2) ed è accettato. In caso contrario viene scartato, anche se non viene registrato alcun danno visibile, in quanto si presume che abbia subito un processo di danneggiamento irreversibile. La tolleranza di \pm 5% è dovuta a potenziali imprecisioni delle misurazioni, scarso posizionamento degli estensimetri e altri problemi secondari.

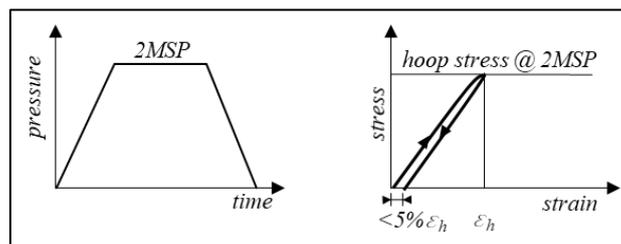


Figura 2. Routine test: procedura di pressurizzazione ed evoluzione della deformazione elastica circonferenziale in corrispondenza della mezzeria dell'isolatore.

Se si verifica un comportamento elastico lineare, la deformazione circonferenziale ϵ_h alla pressione di prova è data dalla seguente relazione:

$$(5) \quad \epsilon_h = \frac{p D_{ave}}{2 t E}$$

dove p è la pressione di prova (pari a $2MSP$, al suo massimo), D_{ave} è il diametro medio, t è lo spessore della parete dell'isolatore ed E è il modulo di elasticità del materiale composito. Nel caso limite in cui diametro, spessore della parete, proprietà del materiale siano omogenei su tutto il set di campioni del lotto, il valore di ϵ_h risultante è teoricamente identico per tutti i campioni del lotto. In casi reali, le sollecitazioni e le deformazioni sono influenzate dalle effettive tolleranze geometriche, dai materiali e dal processo di fabbricazione. Tuttavia è lecito attendersi che se il controllo di qualità garantisce proprietà del materiale omogenee e un processo di produzione stabile, i valori di deformazione massima e del modulo di elasticità saranno caratterizzati da distribuzioni statistiche a bassa dispersione (Fig. 3a).

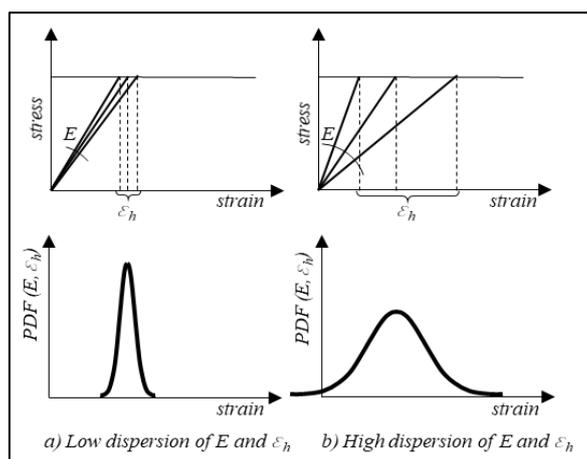


Figura 3. Risultati dei test di pressurizzazione degli isolatori fabbricati con un controllo di qualità buono (a) e scarso (b) e funzioni di densità di probabilità (PDF).

Al contrario, lotti fabbricati sotto uno scarso controllo di qualità si riflettono in un'ampia dispersione dei parametri caratteristici (Figura b).

Ad ogni modo il *routine test*, a causa della natura non distruttiva, non fornisce alcuna indicazione sul valore di rottura finale R.

Step 2 – test di laboratorio su campioni ring - L'approccio proposto in questo articolo presuppone che esista una correlazione tra la dispersione statistica degli indicatori misurabili (deformazione e modulo) e la resistenza finale sconosciuta dell'isolante (R). Tuttavia, derivare la dispersione statistica del carico di rottura attraverso test distruttivi non è ragionevolmente praticabile in quanto implicherebbe massicce campagne di test di pressione fino a rottura su campioni in scala reale.

Nell'ambito del presente progetto si propone quindi una procedura per prevedere la dispersione di R partendo da test di laboratorio su piccola scala, secondo l'ASTM D2290 o EN1394. Gli standard forniscono le specifiche dei campioni e i metodi di prova per caratterizzare la resistenza a trazione dei campioni di anelli attraverso un dispositivo di prova detto *split-disc*. La metodologia è applicabile a tubi in resina termoindurente rinforzata indipendentemente dal metodo di fabbricazione, nonché a tubi termoplastici estrusi e stampati. È quindi una procedura ammissibile ai nostri scopi.

Una serie di anelli è estratta da ogni lotto di produzione, ma lontano dalle regioni di inversione alle estremità del tubo, in modo da garantire che siano rappresentativi degli isolatori. Gli anelli sono successivamente sottoposti a un test di trazione in cui il carico è applicato attraverso due semi-dischi, in modo da approssimare una prova di pressurizzazione interna fino a rottura (Fig. 4). Il campione è dotato di un intaglio per promuovere la rottura in una specifica regione, dove è applicato un estensimetro per la misura della deformazione. Attraverso l'elaborazione della curva carico-deformazione si deriva la curva stress-deformazione e, dunque i valori di sollecitazione e deformazione a rottura, nonché il modulo di elasticità.

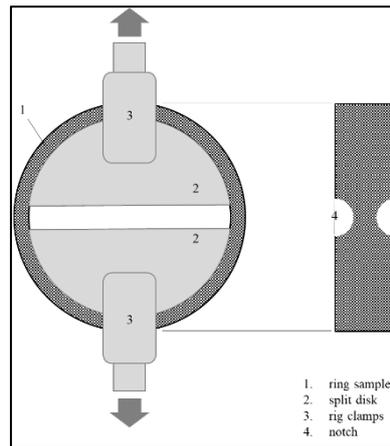


Figura 4. Schema di un set-up di prova per ring-test.

Step 3 – Analisi FEA ed estensione dei risultati ad isolatori in scala reale - I valori di sollecitazione di trazione finali derivati dalle prove su anelli non sono pienamente rappresentativi della resistenza degli isolatori in scala reale. L'estensione a questi ultimi richiede l'impiego di strumenti numerici per la simulazione strutturale.

Il ring test secondo ASTM D2290 o EN1394 viene simulato attraverso modellazione agli elementi finiti (Finite Element Method, FEA). Questo tiene conto delle dimensioni del campione, della geometria, del materiale e della procedura di prova. I risultati numerici sono preliminarmente validati attraverso il confronto con i risultati effettivi del test, in modo da ottenere una calibrazione fine del modello del materiale composito. Successivamente, il medesimo modello di materiale sarà impiegato per creare un modello FEA di isolatore in scala reale da sottoporre alla simulazione di un test di pressurizzazione fino a rottura. Attraverso questa procedura è quindi possibile stimare per via numerica la massima sollecitazione a rottura (R) per ogni isolatore del lotto, la deformazione circonferenziale e_h , il modulo elastico E e le relative dispersioni statistiche.

Step 4 – Correlazione tra i risultati dei routine test e le proprietà meccaniche - Come fase finale dell'approccio proposto, i parametri statistici che caratterizzano la dispersione delle deformazioni elastiche massime misurate durante le prove di routine ricavati nello *step 1* sono correlati con i parametri statistici della dispersione della resistenza meccanica prevista per via numerica nello *step 3*. Si prevede che la qualità delle due dispersioni sia direttamente correlabile. In tal modo, in futuro sarà possibile dedurre indicazioni affidabili sulla dispersione dei valori di rottura dei materiali R partendo da dati facilmente reperibili attraverso test di routine eseguiti dal produttore secondo la IEC 61462. Questo rappresenterà la base per calcolare coefficienti di sicurezza adeguati per i materiali compositi ortotropi da adottare nell'omologazione di nuovi prodotti.

6. Conclusioni

L'ampio utilizzo di materiali compositi in diversi settori industriali deve stimolare l'aggiornamento degli standard normativi in materia di caratterizzazione dei materiali, al fine di adeguare la standardizzazione degli attuali processi produttivi. Purtroppo, la valutazione delle caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche di questi materiali risente ancora dell'elevata variabilità dei processi citati. Inoltre, l'assenza di requisiti comuni vincola il processo di approvazione e certificazione dei prodotti a continui test sui lotti.

I risultati ottenibili attraverso attività sperimentali volte alla caratterizzazione dei processi produttivi, apriranno la strada alla definizione di requisiti di accettazione da trasferire in specifiche e standard simili a quelli oggi esistenti per i materiali metallici. L'approccio

proposto si concentra sulla determinazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali compositi con resine epossidiche, ma può essere esteso ad altri materiali utilizzati in altri settori come i serbatoi realizzati con polimeri rinforzati con fibra di vetro, come da EN 13121. Questo approccio dovrebbe stimolare un percorso congiunto tra fabbricanti, autorità di normazione, istituti di ricerca e laboratori, al fine di fondere le conoscenze sui processi produttivi e sul comportamento dei materiali nel tempo, con quelle sulla standardizzazione dei materiali.

7. Bibliografia

[1] Pandita, Surya & Irfan, Muhammad Shafiq & Machavaram, V. & Shotton-Gale, Nick & Mahendran, Ramani & Wait, Claire & Paget, M. & Harris, D. & Leek, C. & Fernando, Gerard. (2013). Clean wet-filament winding - Part 1: Design concept and simulations. *Journal of Composite Materials*. 47. 379-390. 10.1177/0021998312440474.

[2] Design and homologation of fiberglass insulators for high voltage switches: an overview of Italian regulation and a proposal for a new approach to determine safety coefficients – Pichini E., Mazzarelli I., Meleddu A., Ferino J. (31th European Safety and Reliability Conference, Angers. France, September 2021)

Valutazione della conformità ai requisiti essenziali di sicurezza PED di attrezzatura a pressione già omologata

G. Vaccaro¹, G. Argento¹, D. Di Fonzo¹, A. Delfini²

¹ Inail – Uot di Palermo

² EP Produzione S.p.A.

Sommario

La memoria intende presentare una esperienza di certificazione di un'attrezzatura già omologata ANCC per la quale l'utilizzatore ha avuto la necessità di sottoporla ad una valutazione della conformità ai requisiti essenziali di sicurezza della direttiva PED - 2014/68/UE, poiché soggetta a modifica ai sensi dell'art. 14 del DM n.329 del 2004.

L'attrezzatura oggetto di modifica è stata utilizzata sin dal primo impianto come autoclave a servizio dell'impianto antincendio di una centrale Turbogas.

La suddetta modifica ha comportato la rideterminazione della pressione e della temperatura massima di esercizio, resasi necessaria in seguito al rilevamento, attraverso controlli non distruttivi, di sottospessore sui fondi dell'autoclave.

Nella parte iniziale della memoria verrà presentato il caso e le motivazioni che hanno portato alla scelta di certificare l'attrezzatura, in conformità alla direttiva PED, piuttosto che procedere ad una riparazione per sostituzione delle membrane sotto spessore.

Successivamente si illustreranno le problematiche che occorre affrontare per avviare l'iter di valutazione della conformità alla direttiva PED di attrezzature a pressione già omologate. Si metterà in evidenza l'importanza dell'acquisizione e dell'esame della documentazione originaria di omologazione e di tutta quella documentazione quali verbali di verifiche e controlli, essenziali per una analisi dei rischi che tenga conto dell'esercizio pregresso.

Infine si analizzerà la documentazione necessaria che concorre al soddisfacimento dei requisiti essenziali di sicurezza previsti dalla direttiva PED, alla luce del parere condiviso del 2 aprile 2020 del Forum italiano degli organismi notificati PED/SPV.

1. Introduzione

Qualsiasi attrezzatura a pressione, per poter essere marcata CE, a seguito di modifica, oppure per essere inserita in un insieme da marcare CE, deve essere rispondente ai requisiti essenziali di sicurezza (RES) dell'Allegato I della direttiva PED.

In caso di modifiche di attrezzature occorre procedere a una valutazione di conformità alla PED e nel caso di inserimento in un insieme di un'attrezzatura a pressione già costruita e in esercizio prima dell'avvento della PED essa deve soddisfare i RES, pur non esistendo al momento della costruzione gli obblighi formali previsti oggi dalla direttiva.

Il soggetto che assume la figura di fabbricante dell'attrezzatura o dell'insieme, dovrà verificare il buono stato di conservazione, attraverso ispezioni visive e controlli strumentali dell'attrezzatura, e dovrà accertarsi attraverso una attenta analisi dei rischi e pericoli prendendo in considerazione le trascorse condizioni di esercizio che la stessa possieda tutti i requisiti per poter continuare l'esercizio in sicurezza.

Occorre ricordare che pur concorrendo alcuni documenti allegati al libretto ISPESL/ANCC al soddisfacimento dei RES, la responsabilità della sicurezza è a carico del nuovo fabbricante che dovrà emettere la dichiarazione di conformità e le istruzioni operative.

2. Caso studio – storia dell’attrezzatura

Nel serbatoio in oggetto, costruito nel 1982, immatricolato ANCC ed installato presso una Centrale turbogas sin dalla prima accensione del turbogas avvenuta nel ottobre del 1986, sono stati riscontrati sotto spessori sui fondi rispetto ai valori nominali di progetto in occasione di un controllo di integrità dell’attrezzatura.

Da indagini effettuate, come verrà descritto in seguito, è stato appurato che la diminuzione dello spessore non era dovuto ad un problema degenerativo di corrosione, ma dalla formatura disomogenea dei fondi in fase di costruzione non rilevata precedentemente.

Inoltre, è stata effettuata una accurata ricerca ed analisi della documentazione sulla storia dell’esercizio dell’attrezzatura, dalla quale non sono emersi interventi di riparazioni e/o modifiche della stessa.

Da una valutazione tecnico-economica, tenuto conto delle dimensioni delle membrane da sostituire e delle caratteristiche costruttive originarie, l’utente ha preferito certificare la propria autoclave ai sensi della direttiva PED piuttosto che riparare l’attrezzatura sostituendo le membrane sottospessorate.

Per la re-immissione dell’attrezzatura sul mercato è stato necessario rideterminare i valori di PS e TS di progetto iniziale. Per tale rideterminazione l’attrezzatura è stata assoggettata ad una procedura di valutazione di conformità in ottemperanza al decreto legislativo n° 26/2016 del 15 febbraio 2016.

Considerate le esigue attività manutentive di ripristino previste sul serbatoio e le competenze adeguate nel campo delle attrezzature a pressione, XYZ S.p.A. si è costituita come Fabbrikante e si è avvalsa di un Organismo Notificato per la valutazione di conformità dell’attrezzatura a pressione, alle disposizioni di legge previste dalla direttiva 2014/68/UE.



Figura 1. Foto attrezzatura

ASSOCIAZIONE NAZIONALE PER IL CONTROLLO DELLA COMBUSTIONE
SERVIZIO SORVEGLIANZA APPARECCHI A PRESSIONE
Legge 16 Giugno 1997 N. 112 Regolamento R.D. 474-1997 N. 824

SEZIONE del Lazio
Apparecchio tipo: RC RLC N. F. 116
Costruttore: [redacted]
Località: [redacted] Anno 1982

C A M E R A	Tip. del serbatoio	Volume nominale (m³)	Pressione (bar)	Temperatura (°C)	Capacità (kg)
1	Corpo principale	16,5	210	Aria + H ₂ O	30980
2	Serviziati: interno cabi				
3	Serviziati: Esterno tubi				
4	Economicità: Camicia				
5					

R STATO FISICO: L = Liquido; V = Vapore; G = Gas
Superficie rivestita m²: 30980 Capacità totale: 30980
Produttore SR: [redacted] Pressibilità ICAN: [redacted] a livello

VERIFICHE DI COSTRUZIONE
Vista interna (a apparecchi completati) data 22/12/82
Località LATINA SCAUD
La costruzione ed i materiali impiegati (vedere documentazioni allegati) risultano conformi alle disposizioni vigenti, le parti soggette a sorveglianza corrispondono al progetto esecutivo, a firma: M. TINGHI PALMA
Note: [redacted] L'Agente Tecnico [redacted]

PROVE IDRAULICHE:

DATA	LOCALITÀ	FIRMA E MATRICOLA TECNICO
1) <u>20/8 21/2 8 1 2 8 2</u>	<u>LATINA SA</u>	<u>[redacted]</u>
2)		
3)		
4)		
5)		

Divisibile (sezione di) Fm. Controsegno: [redacted]
completamento del mod. 10 ED 40 44
sopr. messa in servizio: [redacted]

Vista la nota n. 10478 in data 22/12/82 della Sezione del Lazio esaminata la documentazione di cui agli allegati n. 116 sotto specificati, certifico che l'apparecchio ha subito con buon esito le prescritte regolamentari verifiche di costruzione.

FUNZIONAMENTI ESEGUITI:
Sull'apparecchio data 28/12/82 N. F. [redacted] tra altre ANCC (colazione) del Lazio presso FAVORA
Sulla targhetta matricola n. [redacted] vigli. [redacted] della Provincia
Note: [redacted]

Data 28/12/82 L'Agente Tecnico [redacted]

ALLEGATI: Disegni n. CT 1628 all. n. 1
Progetto dei materiali impiegati (figli n. [redacted]) all. n. 2
Dichiarazione del costruttore all. n. 3
Dichiarazione di verifica all. n. 4
Riassunto delle verifiche all. n. 5
Ricevuta di accettazione all. n. 6
Dichiarazione di idoneità all. n. 7
Paglio dei calcoli (solo per copia archivio) all. n. 8

PRIMA UTENZA E VARIAZIONI SUCCESSIVE

DATA	UTENZE	LOCALITÀ	DOMINE	PAG

AVVERTENZE:
- IL PRESENTE LIBRETTO DEVE SEMPRE ACCOMPAGNARE L'APPARECCHIO ED ESSERE ESIBITO, A RICHIESTA, SUGLI AGENTI PROVINCIALI O SUGLI UFFICII DEL LAVORO.
- UTILIZZARE LE CONDIZIONI DI CUI È CONTENUTO IL PRESENTE LIBRETTO. PER RENDICONTI ALLA SEZIONE ANCC, CORRISPONDENTE ALLA SEZIONE DELL'APPARECCHIO.
- L'APPARECCHIO DOVrà SUBIRE, FIRMA DI ESSERE POSTO IN FUNZIONE, LE REGOLAMENTARI VERIFICHE SUI LUOGHI DI IMPIANTO.

Figura 2. Frontespizio Libretto matricolare

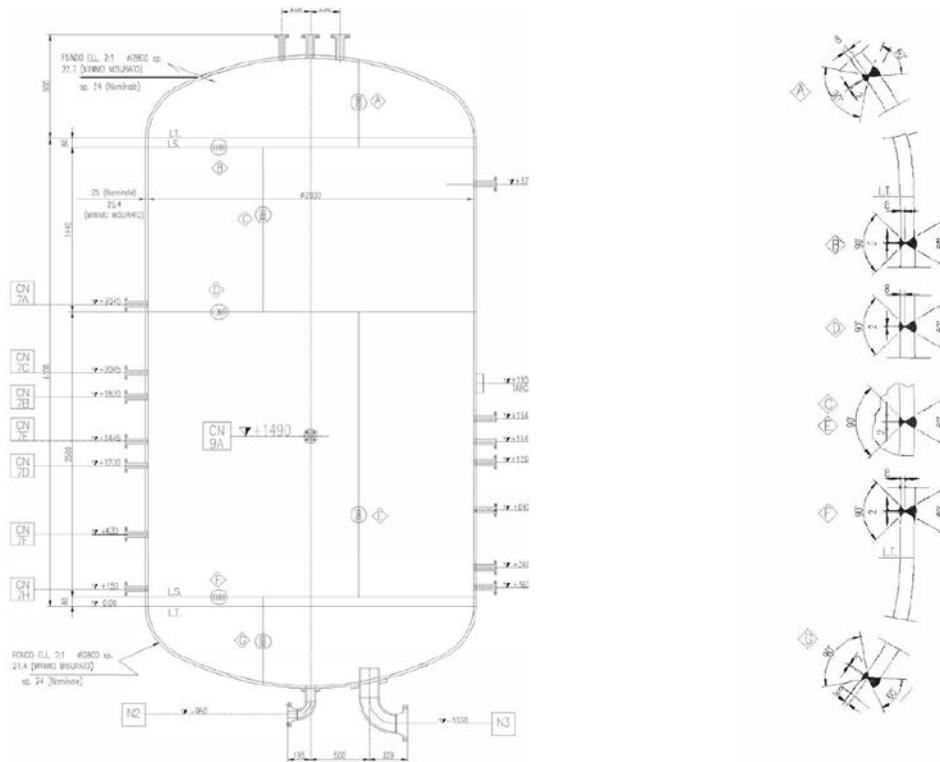


Figura 3. Stralcio Disegno e Particolari saldatura

3. Verifica dello stato di conservazione dell'attrezzatura

Per valutare lo stato di conservazione e definire le attività di ripristino delle superfici interne si è resa necessaria una ispezione visiva interna diretta del serbatoio.

L'ispezione interna ha rilevato:

- sul fondo superiore un rivestimento di vernice epossicatramosa in buone condizioni di conservazione, l'esame non ha evidenziato corrosione superficiale tale da giustificare i valori di sotto spessore rilevati mediante controllo spessimetrico ultrasonoro.

- la superficie superiore del fasciame, ovvero quella non lambita dall'acqua, risulta rivestita da vernice epossicatramosa omogenea e priva di depositi di corrosione generalizzata. Nella parte intermedia del serbatoio e nella zona dei livelli del fluido interno, il fasciame presentava una superficie ricoperta da depositi di calcare e fanghi. La semplice rimozione manuale di tali depositi mediante spazzole e stracci ha messo in evidenza un rivestimento ancora in ottime condizioni di conservazione.



Figura 4. Superficie interna fasciame in corrispondenza dei livelli dell'acqua

- La superficie interna del fondo inferiore si presenta ricoperta da depositi consistenti di varia natura di tipo solido calcareo e limacciosi.

La saldatura circonferenziale appare visivamente in buone condizioni di conservazione e ricoperta da depositi calcarei.

In corrispondenza del tubo di adduzione, distribuzione e scarico acqua, si notano depositi di elevato spessore che ricoprono in modo non uniforme la superficie bassa del fondo inferiore.

La rimozione mediante spazzola metallica, raschietto e stracci ha messo in evidenza un sottostante rivestimento di colore giallastro di natura probabilmente epossidica.

Non sono stati rilevati depositi attribuibili a prodotti corrosivi di dimensioni e quantità che giustifichino le riduzioni di spessore riscontrate mediante controllo spessimetrico ultrasonoro.

Anche le zone più critiche del fondello, quali gli spigoli della tubazione adduzione e distribuzione dell'acqua, risultano non interessate da fenomeni corrosivi in atto.

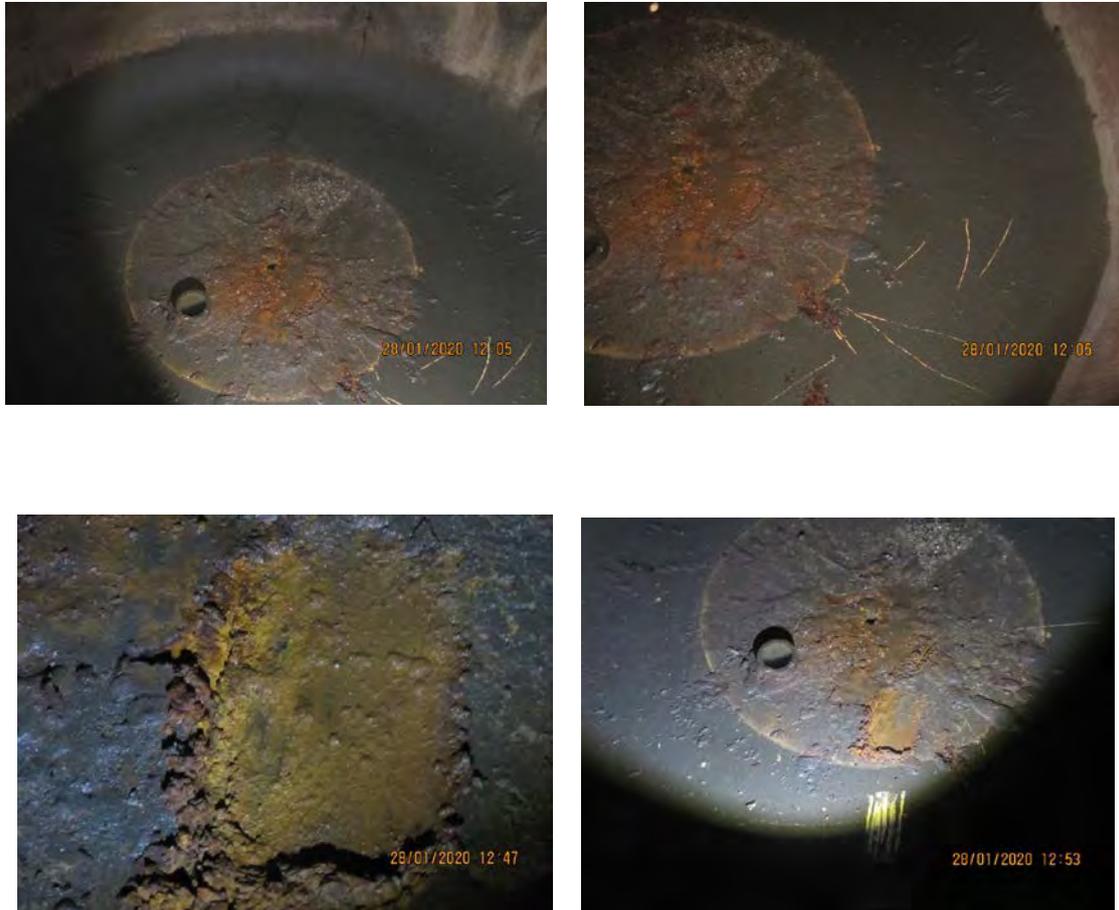


Figura 5. Superficie interna fondello inferiore

Considerate le condizioni superficiali interne del serbatoio, si sono eseguite le seguenti azioni di pulizia e ripristino:

- Pulizia mediante idropulitrice ad alta pressione con rimozione completa dei detriti e limo presenti all'interno;
- Essiccazione mediante aria calda delle superfici interne con particolare riguardo al fondello inferiore;
- Applicazione a rullo di uno strato min. 50 nm di primer epossidico Surface tolerant di tutto il fondello inferiore del serbatoio.

Per quanto rilevato durante l'esecuzione delle sopradescritte analisi si può ragionevolmente desumere che i sotto spessori riscontrati nel corso del controllo spessimetrico ultrasonoro dei fondi siano dovuti esclusivamente al processo di formatura originale e non a processi di corrosione generalizzata in atto.

4. Documentazione necessaria che concorre al soddisfacimento dei RES previsti nell'allegato I della direttiva PED - Parere condiviso del Forum italiano degli organismi notificati PED/SPV

La normativa italiana previgente alla PED richiedeva il soddisfacimento solo di alcuni dei RES richiesti oggi dalla direttiva. Il Fabbricante deve valutare e soddisfare i RES, non considerati precedentemente, ricavati dall'analisi dei rischi.

Il soddisfacimento di tali requisiti si verifica alle seguenti condizioni:

- L'attrezzatura deve essere identificabile mediante targa dati e punzonature e deve essere corredata dal libretto matricolare completo dei suoi allegati rilasciato dall'Ente che all'epoca era autorizzato per l'attività di costruzione.
- per la progettazione e la costruzione dell'apparecchio omologato Ispesl siano state applicate le normative tecniche "Raccolte Ispesl VSR, VSG, M, S ed E " nella edizione corrente all'atto della fabbricazione in quanto è possibile renderle coerenti con l'attuale normativa europea armonizzata alla PED effettuando le valutazioni aggiuntive richieste dalla UNI/PdR 55:2019;
- i materiali delle membrature a pressione devono risultare valutati positivamente secondo PED dal fabbricante con appropriate valutazioni particolari dei materiali a posteriori.

La certificazione di origine e le prove meccaniche dei materiali utilizzati sono reperibili tramite la documentazione Ispesl.

Il requisito relativo alla rintracciabilità dei materiali (Allegato I, punto 3.1.5), si potrà ritenere soddisfatto in quanto la normativa ante PED prevedeva la certificazione e la rintracciabilità dei materiali;

- Per le saldature già realizzate i procedimenti di saldatura, il personale di saldatura e quello addetto alle prove non distruttive devono risultare qualificati ai sensi della normativa vigente all'atto della fabbricazione.

Le certificazioni delle qualifiche dei procedimenti e dei saldatori risultano effettuate dall'Ispesl secondo le norme della Raccolta S e indicate negli allegati al libretto.

I certificati dei controlli non distruttivi dovranno essere presi in considerazione, essendo stati valutati positivamente dagli Ispettori Ispesl.

I requisiti di tali attività, si possono ritenere soddisfatti essendo state eseguite dall'Ente autorizzato dallo Stato membro all'epoca della costruzione;

Se la modifica dovesse comportare la realizzazione di nuove saldature o l'effettuazione di controlli, questi dovranno rispondere agli attuali requisiti legislativi e normativi.

Per assicurare l'integrità si dovranno comunque eseguire controlli superficiali e volumetrici, basati su un'analisi di rischio dell'esercizio pregresso.

5. Piano di Controllo Qualità, Verifica e Ripristino

Nel caso in esame al fine di garantire il soddisfacimento dei Requisiti Essenziali di Sicurezza (RES) dell'apparecchio nella sua re-immissione nel mercato, è stato predisposto un Piano dei Controlli per verificare lo stato di conservazione del recipiente e per definire eventuali azioni di ripristino.

5.1 Controlli non distruttivi, ispezioni e prove

Sono stati considerati con esito positivo i certificati dei controlli non distruttivi presenti negli allegati al libretto ANCC originale.

Tuttavia, sono stati eseguiti controlli non distruttivi di tipo superficiale e volumetrico come da PCQ, basati sull'analisi del rischio dell'esercizio pregresso, al fine di assicurarne l'integrità allo stato attuale.

5.2 Attività di ripristino

A fronte dei controlli eseguiti, sono state eseguite ove necessario azioni di ripristino di parte della superficie interna del serbatoio mediante una sola verniciatura.

6. Verifica dell'esistenza di condizioni di fatica con carichi variabili periodicamente

Per il serbatoio oggetto della presente memoria le verifiche di progetto eseguite sono state esclusivamente di tipo statico, in quanto il servizio del serbatoio è stato di tipo pressoché continuo e senza particolari variazioni di carico e sollecitazione. La ciclicità delle sollecitazioni pertanto è data esclusivamente dalla depressurizzazione dello stesso nel corso delle manutenzioni programmate e/o accidentali.

Per la frequenza degli avviamenti/fermate si è ipotizzata 1 fermata per anno.

Per cause accidentali di esercizio dell'impianto si potrà arrivare ad un numero massimo di 2 avviamenti/fermate per anno.

Sulla base della vita reale del serbatoio oggetto della rideterminazione della PS e TS costruito e messo in esercizio nel 1982, si determinano le seguenti assunzioni:

Anno di costruzione:	1982
Anni di esercizio dalla costruzione:	38
N° di avviamenti/fermate programmate ed accidentali per anno:	3
N° di avviamenti/fermate (cicli) massimi accumulati nella vita:	114

Il numero di cicli equivalente si calcola in base alla formula:

$$n_{eq} = n_{eff} \left(\frac{\Delta P}{P_{max}} \right)^3 \quad (1)$$

dove con n_{eq} ed n_{eff} si intendono rispettivamente il numero di cicli equivalente e quello effettivo, mentre ΔP indica la variazione di pressione durante un ciclo e P_{max} la massima pressione sopportabile dall'apparecchio in base agli spessori utilizzati.

$$n_{eff} = 114$$

$$\Delta P = 11 \text{ bar (p esercizio)}$$

$$P_{max} = 16,5 \text{ bar}$$

$$n_{eq} = 32,77$$

Considerato il valore di n_{eq} notevolmente inferiore a 500, non è necessaria una opportuna analisi a fatica dell'attrezzatura in base alla UNI EN 13445-3:2019.

Considerando inoltre il valore di 500 come valore sopra al quale l'attrezzatura è da considerarsi sollecitata a fatica oligociclica si può valutare in termini conservativi una Valutazione di Vita dell'attrezzatura utilizzando la medesima relazione di cui sopra:

$$\text{Cicli in 38 anni:} \quad 114$$

Alle condizioni di origine si rendono necessari ulteriori 128 anni circa di esercizio alle nuove condizioni per sollecitare l'attrezzatura ad un valore superiore a 500 cicli di fatica oligociclica accumulati nella vita.

7. Conclusione iter certificativo e conseguente immissione sul mercato dell'attrezzatura

In seguito all'esame documentale dell'fascicolo tecnico dell'attrezzatura alle nuove condizioni di progetto, secondo quanto previsto al punto 3.2 dell'ALLEGATO I della Direttiva 2014/68/UE, l'attrezzatura a pressione è stata sottoposta ad una verifica finale al fine di accertarne l'idoneità alla sua re-immissione nel mercato.

La verifica finale ha compreso le seguenti attività:

- Esame finale volto a verificare, de visu e tramite controllo della documentazione, il rispetto dei requisiti della Direttiva, includendo un'ispezione visiva all'interno ed all'esterno delle parti del serbatoio.

- Prova Idrostatica del serbatoio alle nuove condizioni di progetto per accertare la resistenza alla pressione in conformità ai valori previsti al punto 7.4 dell'ALLEGATO I della Direttiva.

Sull'attrezzatura a pressione modificata, è stata applicata la nuova targa dati con la marcatura CE e sarà accompagnata da istruzioni operative come previsto rispettivamente ai punti 3.3 e 3.4 dell'Allegato I della direttiva PED.

EP PRODUZIONE

DICHIARAZIONE DI CONFORMITA'

Il Fabbricante:
S.p.A.
Sede Legale: Roma
Sede Operativa:

In applicazione della Direttiva europea 2014/68/UE, dichiaro che l'Attrezzatura a pressione di seguito specificata, è stata costruita in conformità ai requisiti essenziali di sicurezza previsti dall'allegato 1 della Direttiva 2014/68/UE e ad esso applicabili.

La procedura di verifica utilizzata è quella di "Verifica CE di un unico prodotto" (Modulo G) prevista per attrezzature appartenenti alla categoria di rischio IV.

Descrizione dell'Attrezzatura costruita

Denominazione	Autore	Anno di Emissione
SERBATOIO AUTOCLAVE D301	S.p.A.	2020
Numero di Emissione	Numero di Progetto	Ris.
	219-1220	ATTREZZATURA
Pressione Progettata (P _{DES}) (bar)	Temperatura massima ammessa di PT (°C)	Volume (L)
14,5	Amb/+60	30980
Fluidi contenuti:	Numero di Fluidi	Gruppo dei Fluidi
Aria + Acqua	Liquido/Gas	2
Normativa Applicata:	ISPEL-VSR Ed.1995 - E.C.31/03/2003 - UNI/PdR 55:2019	

L'Organismo Notificato con sede legale ha certificato la conformità ai requisiti della Direttiva 2014/68/UE.

Estremi dell'Attestato di Conformità rilasciato dall'Organismo Notificato:
Certificato n° ON

La presente Dichiarazione viene rilasciata sotto la responsabilità esclusiva del Fabbricante.
Roma

Firmato per conto del Fabbricante:

FABBRICANTE
S.p.A.
Sede Legale
Sede Operativa

N° di FABBRICA: 0-301

PRESS. PROG: 14,5 bar

PRESS. TEST: 20,73 bar

MODULO: G

GRUPPO FLUIDO: 2

CATEGORIA: IV

TIPO DI FLUIDO: ARIA+ACQUA

N° ORGANISMO NOTIFICATO: 0102

ANNO: 2020

TEMP. PROG: AMB/+60°C

VOLUME: 30980 L

% RADIOGRAFICA: 15%/100%

TRATTAMENTO TERMICO: NO

Figura 7. Dichiarazione di conformità e Targa dati

8. Conclusioni

La valutazione di conformità dell'attrezzatura di IV categoria con il Modulo G, oggetto della presente memoria, si è prestata bene ad evidenziare i RES che rimangono soddisfatti poiché corrispondono per alcuni aspetti a quanto veniva richiesto per una omologazione ISPEL/ANCC.

Si evidenzia che una delle fasi più importanti che porta ad una valutazione di conformità di un apparecchio costruito con la legislazione previgente alla PED è lo studio dell'esercizio

pregresso dell'attrezzatura e gli sforzi da parte del costruttore vanno incentrati al fine di eseguire tutti quei controlli che possano dare una indicazione sullo stato di conservazione delle membrature.

Bibliografia

- [1] Direttiva 2014/68/UE (97/23/CE) recepita con D.Lgs. 15/02/16, n. 26 (PED)
- [2] DM 1/12/2004, n. 329 "Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'art. 19 del D.Lgs. 25/02/00, n. 93"
- [3] Linee Guida PED A-03 e C-11
- [4] Parere condiviso n. 327 del 2 aprile 2020 del Forum italiano degli organismi notificati PED/SPV
- [5] UNI/PdR 55:2019 "Linee guida per l'applicazione delle raccolte ISPEL VSR-VSG-M-S nell'ambito della Direttiva 2014/68/UE"
- [6] UNI EN 13445-3:2019 "Recipienti a pressione non esposti a fiamma – Parte 3: Progettazione.

Peculiarità dei moduli di garanzia totale di qualità per la valutazione di conformità in accordo alla direttiva 2014/68/UE, con riferimento alla progettazione

F. Giacobbe¹, G. Sepede²

¹ Inail – Uot di Messina

² Ingegnere

Sommario

La direttiva 2014/68/UE o Ped, come tutte le direttive di prodotto del nuovo approccio, prevede tra le procedure di valutazione della conformità, quelle basate sulla garanzia della qualità. Dall'esperienza maturata da INAIL 0100 si evince che i fabbricanti, che decidono di adottare questi moduli, operano principalmente integrando il sistema qualità aziendale secondo le ISO 9001 con i requisiti richiesti dalla Ped.

Nel presente lavoro, partendo da una breve sintesi delle principali caratteristiche dei moduli qualità H e H1 in ambito Ped, per le attrezzature delle categorie di rischio più elevate, rispettivamente III e IV, in cui la garanzia di qualità include la progettazione, si approfondiscono in particolare i requisiti relativi a tale fase. L'approfondimento prevede un parallelo in merito alla progettazione tra ciò che prescrive la Ped e ciò che prevede la UNI EN ISO 9001, considerando che entrambe le norme sono fondate su un approccio basato sul rischio.

In conclusione la presente memoria potrà costituire un utile riferimento per implementare i requisiti previsti dai moduli di garanzia di qualità totale, utilizzando le disposizioni previste dalla normativa sui sistemi qualità. Pertanto, anche se la ISO 9001 non è norma armonizzata, attraverso una logica di sistema è possibile gestire efficacemente la delicata fase della progettazione di un'attrezzatura a pressione in tutte le sue fasi, dalle iniziali valutazioni di massima alle finali definizioni dei disegni costruttivi.

Parole chiave: PED, moduli qualità, progettazione, requisiti essenziali di sicurezza, UNI EN ISO 9001

1. Introduzione

La progettazione di attrezzature a pressione dipende, tra l'altro, dai materiali e dai processi di fabbricazione utilizzati. Un ruolo fondamentale ricopre l'analisi del rischio associata al processo decisionale di progettazione per la produzione, rispetto alla priorità dell'eliminazione o della riduzione del rischio. Quando le misure per eliminare o ridurre il pericolo non sono ragionevolmente praticabili, devono essere fornite agli utilizzatori informazioni appropriate (informazioni sui pericoli residui). Un ruolo basilare e propedeutico è determinato dalla fase della progettazione. Un approccio sistemico agevola sicuramente la gestione di questo processo con la definizione di procedure per le revisioni dei documenti, le verifiche ed i controlli sui dimensionamenti, la normativa tecnica di riferimento. Una efficace gestione della documentazione della progettazione permette di correlare i singoli requisiti di cui all'allegato I alla Ped con i documenti che costituiscono il fascicolo tecnico. L'identificazione dei requisiti essenziali di sicurezza (RES), è la novità fondamentale delle Direttive Nuovo Approccio, inclusa la Ped. Se il produttore applica standard armonizzati, i

RES sono sicuramente soddisfatti. I RES devono essere soddisfatti per tutti i tipi di attrezzature a pressione, ad es. recipienti, tubazioni o scambiatori di calore, immessi sul mercato europeo. I RES sono elencati nell'Allegato I della Ped e sono generalmente di natura qualitativa, lasciando al produttore la scelta della soluzione preferita per soddisfarli. Sono formalizzati come principi generali ai quali il prodotto deve conformarsi al fine di garantire il livello minimo di sicurezza richiesto per consentire la libera circolazione all'interno del mercato europeo.

L'analisi e la valutazione del rispetto dei requisiti essenziali di sicurezza è necessariamente correlata all'analisi dei pericoli in quanto consente di identificare quali si applicano alle attrezzature a pressione da produrre.

Anche per la ISO 9001 la progettazione è un processo di particolare importanza, che l'organizzazione stabilisce, attua e mantiene in modo da assicurare la fornitura di un prodotto adeguato, che nel caso specifico equivale ad un prodotto conforme ai RES.

Il parallelo tra i requisiti previsti dalla Ped e dalla ISO 9001 risulta particolarmente interessante in quanto secondo quanto stabilisce la Guida Blu all'attuazione della normativa UE sui prodotti 2016 la conformità del fabbricante alle norme EN ISO 9000 e EN ISO 9001 conferisce la presunzione di conformità ai corrispondenti moduli basati sulla garanzia della qualità per quanto concerne le disposizioni dei moduli coperte dalle norme in questione, purché il sistema di qualità tenga conto delle specificità dei prodotti interessati.

2. Analisi dei requisiti di qualità per la progettazione

2.1 I moduli di garanzia di qualità totale (H e H1)

La valutazione della conformità si articola in moduli, comprendenti un numero specifico e limitato di procedure diverse applicabili ai prodotti. I moduli riguardano la fase di progettazione, la fase di fabbricazione dei prodotti o entrambe. Gli otto moduli di base possono essere combinati tra loro, nei casi previsti, in vari modi per definire le procedure complete di valutazione della conformità.

Pertanto ai sensi della normativa di armonizzazione dell'Unione, le procedure di valutazione della conformità si compongono di uno o due moduli. Poiché i prodotti sono sottoposti alla valutazione della conformità durante le fasi di progettazione e di produzione, la procedura di valutazione della conformità copre entrambe le fasi, mentre un modulo può riguardare:

- una delle due fasi (in tal caso la procedura di valutazione della conformità si compone di due moduli);
- entrambe le fasi (in tal caso la procedura di valutazione della conformità si compone di un modulo).

La decisione n. 768/2008/CE stabilisce una serie orizzontale di moduli di valutazione della conformità e le modalità di articolazione in moduli delle procedure. Il legislatore seleziona dalla serie di moduli/procedure di valutazione della conformità quelli più adatti per rispondere alle esigenze specifiche del settore interessato. Le procedure di valutazione della qualità sono equivalenti da un punto di vista giuridico, ma non tecnicamente identiche in termini di metodi. La loro applicazione nella legislazione settoriale è intesa a garantire un livello elevato di fiducia per quanto concerne la conformità dei prodotti ai requisiti essenziali pertinenti.

Sono previsti otto moduli (denominati con le lettere da A a H) che stabiliscono le responsabilità del fabbricante (e del suo rappresentante autorizzato) e il grado di coinvolgimento dell'organismo interno accreditato o dell'organismo di valutazione della conformità, notificato. L'impiego di sistemi di garanzia della qualità ai fini della valutazione della conformità nella normativa di armonizzazione dell'Unione è descritto nei moduli D, E e H e nelle relative varianti. Nei moduli H e H1 il sistema qualità istituito dal fabbricante deve

prevedere il seguente campo di applicazione: la progettazione, la fabbricazione, l'ispezione del prodotto finale e le prove.

Nella tabella 1 vengono sintetizzati i criteri caratterizzanti i moduli della garanzia qualità totale.

Moduli	Conformità	Ambito	Descrizione
H	basata sulla garanzia qualità totale	Riguarda progettazione e produzione	Il fabbricante applica un sistema di qualità totale atto a garantire la conformità alle prescrizioni legislative. L'organismo notificato valuta il sistema di qualità.
H1	basata sulla garanzia qualità totale e sull'esame del progetto	Riguarda progettazione e produzione	Il fabbricante applica un sistema di qualità totale atto a garantire la conformità alle prescrizioni legislative. L'organismo notificato valuta il sistema di qualità e il progetto del prodotto e rilascia un certificato di esame UE del progetto.

Tabella 1. Differenze tra modulo H e H1

Rispetto al modulo H, il modulo H1, unico applicabile per le attrezzature di rischio più elevato (IV categoria), prevede che l'organismo notificato formalizzi l'esito della valutazione dell'adeguatezza del progetto tecnico del prodotto. Il certificato di esame UE del progetto non deve essere confuso con il certificato di esame UE del tipo del modulo B, che attesta la conformità di un campione «rappresentativo della produzione prevista» in modo che la conformità dei prodotti possa essere verificata a fronte di tale campione. Il certificato di esame UE del progetto del modulo H1 non prevede un campione, ma attesta che la conformità del progetto del prodotto è stata controllata e certificata da un organismo notificato.

Ulteriore peculiarità del modulo H1 rispetto al modulo H è la esplicita responsabilizzazione dell'ON rispetto all'evoluzione del progresso tecnologico generalmente riconosciuto, che l'ON dovrà seguire per valutare se il progetto approvato non è più conforme ai requisiti applicabili della direttiva e decidere se tale progresso richieda ulteriori indagini per poi informarne il fabbricante. In questo il modulo H1 è accomunato al modulo B. Va evidenziato che comunque il fabbricante è tenuto ad interpretare ed applicare i RES in modo da tenere conto dello stato della tecnica e della prassi al momento della progettazione e della fabbricazione, conciliando i fattori tecnici ed economici con un elevato livello di protezione della salute e della sicurezza (osservazione preliminare n.4 in allegato I alla Ped).

Per entrambi i moduli, H e H1 risultano necessarie da un lato la documentazione di sistema che gestisce il processo di fabbricazione e dall'altro la documentazione tecnica (fascicolo tecnico e modulistica varia), che scaturisce dall'applicazione del sistema qualità declinato nella suddetta documentazione di sistema.

Come tutti i moduli di qualità, i moduli H e H1 sono poi soggetti a sorveglianza sotto responsabilità dell'ON, atta a garantire che il fabbricante soddisfi correttamente gli obblighi derivanti dal sistema di qualità approvato. In sede di sorveglianza il fabbricante dovrà garantire all'ON l'accesso a tutti i locali/siti dove hanno luogo tutte le fasi della costruzione, inclusa la progettazione, e a tutta la documentazione, inclusi i registri riguardanti la qualità previsti in materia di progettazione, come i risultati di analisi, calcoli, prove, ecc.

2.2 La progettazione nella ISO 9001

La EN ISO 9001 riserva uno specifico paragrafo della sua sezione 8, attività operative, alla progettazione e sviluppo di prodotti o servizi, l'8.3, prevedendo che siano affrontate sotto tutti gli aspetti necessari quali definizione delle responsabilità e autorità, principi, requisiti, criteri, modalità operative cioè risorse (umane e strumentali), tempi, processi ed infine documentazione, le seguenti attività: pianificazione, definizione degli elementi in ingresso (input), attività di riesame, verifica e validazione (controlli), definizione degli elementi in uscita, compresi i requisiti di monitoraggio (output) e gestione delle modifiche.

Nel determinare tali fasi è essenziale tenere conto della complessità delle attività di progettazione e sviluppo, coinvolgere i committenti e/o gli utilizzatori e tenere conto di tutte le interfacce fra le persone coinvolte nelle attività.

3. Parallelo tra la PED e la ISO 9001 per i moduli Ped di qualità totale che includono la progettazione

La norma ISO 9001 è stata pensata e strutturata per dimostrare la capacità dell'organizzazione di fornire prodotti o servizi che soddisfino i clienti e tutti i requisiti normativi, cogenti e stabiliti dall'organizzazione. Pertanto attraverso un'efficace applicazione del sistema si finalizza un processo virtuoso di miglioramento dei processi e per l'assicurazione della conformità ai requisiti. Il legislatore europeo con la direttiva Ped, ha evidenziato sostanzialmente i medesimi scopi prestando molta attenzione all'organizzazione, alle procedure e al controllo dei processi.

Le procedure di valutazione di conformità in qualità della direttiva (moduli D, E, H e relative varianti) si basano sulle tecniche di garanzia della qualità e derivano proprio dalle norme EN ISO 9000 e EN ISO 9001. Questi moduli descrivono gli elementi che un fabbricante deve attuare nella sua organizzazione per dimostrare che il prodotto soddisfa i requisiti essenziali della legislazione applicabile.

Sicuramente le ISO 9001 hanno un grado di maturità e diffusione molto elevato e possono essere considerate come riferimento per altri sistemi di gestione. Con il presente lavoro si vuole focalizzare l'attenzione sui requisiti comuni per un'integrazione efficace ed un'implementazione intelligente che favorisce il controllo dei processi di progettazione e costruzione non escludendo gli aspetti gestionali del sistema qualità. Una visione unitaria del sistema aziendale, infatti, valorizza l'intera organizzazione attraverso una migliore visibilità ed attuazione degli obiettivi comuni, il controllo dei processi, l'unicità di gestione e un unico riferimento per la documentazione e per la gestione dei dati, l'ottimizzazione delle risorse, il contenimento dei costi ed una migliore integrazione delle competenze.

Un utile strumento, per attuare l'integrazione, è la tabella 2 che indica in forma sintetica sia i requisiti Ped che quelli della ISO 9001. Nella prima colonna viene indicato un numero progressivo, non previsto dalla Ped, utile per codificare i singoli requisiti espressi per il sistema qualità che deve adottare il fabbricante come da allegato III, p.to 12 modulo H1, par. 3.2 e p.to 11 modulo H par. 3.2 (sostanzialmente uguale) della direttiva 2014/68/UE.

Da evidenziare che con l'adozione della struttura HLS viene dato un importante valore al concetto di valutazione del rischio, per supportare e migliorare la comprensione e l'applicazione dell'approccio per processi. Aspetto quello della valutazione del rischio già ampiamente strutturato ed intrinseco nel processo di progettazione e costruzione di un'attrezzatura a pressione.

Adempimenti PED per moduli H e H1 (All. III, p.to 11 modulo H par. 3.2 e p.to 12 modulo H1, par. 3.2)		ISO 9001:2015	
		requisito	Paragrafo di dettaglio
1	—obiettivi di qualità, struttura organizzativa, responsabilità e poteri del personale direttivo in materia di progettazione e qualità del prodotto	Contesto dell'Organizzazione	4.3 Determinare il campo di applicazione del sistema di gestione per la qualità 4.4 Sistema di gestione per la qualità e relativi processi
2	—specifiche tecniche di progettazione, comprese le norme che saranno applicate e, qualora le relative norme armonizzate non siano applicate integralmente, mezzi per garantire che siano stati rispettati i requisiti essenziali di sicurezza della presente direttiva che si applicano alle attrezzature a pressione	Leadership	5.1 Leadership e impegno 5.2 Politica 5.3 Ruoli, responsabilità e autorità nell'organizzazione
		Pianificazione	6.2 Obiettivi per la qualità e pianificazione per il loro raggiungimento
		Supporto	7.2 Competenza 7.3 Consapevolezza 7.5 Informazioni documentate 7.5.1 Generale 7.5.2 Creazione ed aggiornamento
		Miglioramento	10.3 Miglioramento continuo
3	—tecniche di controllo e di verifica della progettazione, processi e interventi sistematici per la progettazione delle attrezzature a pressione corrispondenti al tipo in questione, in particolare per quanto riguarda i materiali, in base al punto 4 dell'allegato I	Pianificazione	6.1 Azioni per affrontare rischi e opportunità
		Attività operative	8.2 Requisiti per i prodotti e i servizi 8.3.1 Generale 8.3.2 Pianificazione della progettazione e sviluppo 8.3.3 Input alla progettazione e sviluppo 8.3.5 Output alla progettazione e sviluppo
4	—corrispondenti processi di fabbricazione, tecniche di controllo e di garanzia della qualità, dei processi e interventi sistematici che saranno applicati, in particolare le modalità operative di giunzione permanente dei pezzi approvati in base al punto 3.1.2 dell'allegato I	Attività operative	8.1 Pianificazione e controllo operativi 8.3.4 Controlli nella progettazione e sviluppo 8.3.5 Output alla progettazione e sviluppo 8.3.6 Modifiche della progettazione e sviluppo 8.4 Controllo dei processi, prodotti e servizi forniti dall'esterno 8.5.1 Controllo della produzione ed erogazione dei servizi

Adempimenti PED per moduli H e H1 (All. III, p.to 11 modulo H par. 3.2 e p.to 12 modulo H1, par. 3.2)		ISO 9001:2015	
		requisito	Paragrafo di dettaglio
			8.5.2 Identificazione e tracciabilità 8.5.4 Conservazione 8.5.6 Controllo dei cambiamenti 8.7 Controllo degli output non conformi
5	—esami e prove che saranno effettuati prima, durante e dopo la fabbricazione, con indicazione della frequenza con cui si intende effettuarli	Supporto	7.1.5 Risorse per il monitoraggio e la misurazione
		Attività operative	8.6 Rilascio di prodotti e servizi
		Valutazione delle performance	9.1 Monitoraggio, misurazione, analisi e valutazione
6	—registri riguardanti la qualità, come le relazioni ispettive e i dati sulle prove e sulle tarature, le relazioni sulle qualifiche o sull'approvazione del personale interessato, in particolare quelle del personale addetto alla giunzione permanente dei pezzi e alle prove non distruttive, in base ai punti 3.1.2 e 3.1.3 dell'allegato I	Supporto	7.5 Informazioni documentate 7.5.2 Creazione e aggiornamento 7.5.3 Controllo delle informazioni documentate
7	—mezzi di sorveglianza che consentono di controllare che sia ottenuta la qualità richiesta in materia di progettazione e di prodotti e se il sistema di qualità funziona efficacemente.	Pianificazione	6.1 Azioni per affrontare rischi ed opportunità
		Valutazione delle performance	9.1.3 Analisi e valutazioni 9.2 Audit interni 9.3 Riesame di direzione
		Miglioramento	10.2 Non conformità e azioni correttive

Tabella 2. Correlazione tra i requisiti del SQ richiesti dalla PED modulo H1 e la norma ISO 9001

È altresì interessante rimodulare la correlazione tra i due modelli di sistemi qualità ponendo come primo riferimento i singoli requisiti della ISO 9001. Tramite questa impostazione è agevole contestualizzare i singoli requisiti del sistema qualità della Ped con i riferimenti previsti dallo standard ISO 9001. Si evidenzia che molti Fabbricanti, per esigenze contrattuali o per volontà del top management hanno già implementato e certificato il loro sistema qualità interno secondo le ISO 9001 aggiornandolo alla edizione 2015.

Nella tabella 3 è possibile analizzare i fattori comuni che presentano evidenti affinità.

ISO 9001:2015 Requisiti	PED - Requisiti modulo H1						
	1	2	3	4	5	6	7
4 Contesto dell'Organizzazione							
4.1 Comprendere l'Organizzazione e il suo contesto							
4.2 Comprendere i bisogni e le aspettative delle parti interessate							
4.3 Definizione dello scopo del Sistema di Gestione per la Qualità	X						
4.4 Sistema di Gestione per la Qualità e relativi processi	X						
5 Leadership							
5.1 Leadership e impegno		X					
5.2 Politica		X					
5.3 Ruoli, responsabilità e autorità nell'Organizzazione		X					
6 Pianificazione							
6.1 Azioni per affrontare rischi e opportunità			X				X
6.2 Obiettivi per la Qualità e pianificazione per il loro raggiungimento		X					
6.3 Pianificazione delle modifiche							
7 Supporto							
7.1 Risorse					X		
7.2 Competenza		X					
7.3 Consapevolezza							
7.4 Comunicazione							
7.5 Informazioni documentate		X				X	
8 Attività operative							
8.1 Pianificazione e controllo operativi				X			
8.2 Requisiti per i prodotti e servizi			X				
8.3 Progettazione e sviluppo di prodotti e servizi			X	X			
8.4 Controllo dei processi, prodotti e servizi forniti dall'esterno				X			
8.5 Produzione ed erogazione dei servizi				X			
8.6 Rilascio di prodotti e servizi					X		
8.7 Controllo degli output non conformi				X			
9 Valutazione delle prestazioni							
9.1 Monitoraggio, misurazione, analisi e valutazione					X		X
9.2 Audit interno							X
9.3 Riesame di Direzione							X
10 Miglioramento							
10.1 Generalità							
10.2 Non conformità e azioni correttive							X
10.3 Miglioramento continuo		X					

Tabella 3. Correlazione tra i requisiti della norma ISO 9001 ed il SQ richiesto dalla Ped modulo H1

4. Conclusioni

Si può certamente affermare che la chiave per la gestione della progettazione in ambito Ped è l'analisi dei pericoli e dei rischi, attività purtroppo non sempre documentata dai fabbricanti con un adeguato grado di approfondimento. Analogamente l'analisi dei rischi è la base adeguata di un sistema di gestione complesso come quello che la Ped richiede ai fabbricanti di implementare nell'ambito dei moduli di qualità totale. I rischi cui si indirizza la EN ISO

9001 sono ovviamente diversi rispetto quelli considerati dalla Ped, si tratta di rischi legati al contesto interno ed esterno, riferiti al processo e quindi non direttamente al prodotto come invece accade per la direttiva. Ciò che è comune è l'approccio basato sul rischio. Il livello di rischio è ciò che guida le richieste della direttiva relativamente alle fasi del processo di fabbricazione che il sistema dovrà garantire, alle modalità con cui dovrà farlo ed anche al grado di coinvolgimento dell'ON.

Con riferimento particolare alla progettazione è possibile evidenziare come, in presenza di attrezzature delle categorie di rischio più elevate, la verifica da parte dell'ON del sistema di qualità relativo alla progettazione non è considerata sufficiente a garantire la conformità e quindi la sicurezza delle attrezzature stesse, ma viene richiesto all'ON di ripetere, per ciascun tipo di attrezzatura/insieme prodotto, la fase di verifica e validazione già effettuate dal fabbricante, con documentazione degli esiti specifici nel caso dei moduli H1. Per questi ultimi non è inoltre considerato sufficiente l'azione di monitoraggio prevista dal fabbricante, che dovrebbe garantire che lo stesso tenga sotto controllo l'evoluzione del progresso tecnico, ma il monitoraggio su questo aspetto è affidato all'ON.

In questo la Ped si distingue rispetto alla EN ISO 9001, che ai fini della certificazione non richiede, in funzione del livello di rischio associato, ulteriori verifiche all'organismo certificatore su specifiche fasi del processo di realizzazione del prodotto (o del servizio) certificato.

Nonostante tali diversità legate alle diverse finalità delle due norme, si può comunque affermare che le disposizioni per la progettazione della EN ISO 9001 integrano e completano quelle della Ped ed il parallelo tra i requisiti delle due norme può costituire un utile riferimento per implementare un sistema di gestione qualità di tutte le fasi della produzione di attrezzature o insiemi a pressione certificato con moduli di garanzia di qualità totale, inclusa la progettazione.

5. Bibliografia

- [1] Directive 2014/68/EU of the European Parliament and of the Council of 15 May 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of pressure equipment.
- [2] ISO 9001:2015 (en), Quality management systems — Requirements
- [3] I. Abuhav. ISO 9001 2015 - A Complete Guide to Quality Management Systems. CRC Press. (2017), ISBN 878-1-4987-33212.
- [4] W. Cory. Quality assurance, inspection and performance certification, Fans and Ventilation. A Practical Guide. Elsevier Science, (2005), 265-280, ISBN 9780080531588.
- [5] J. Darlston, J. Wintle. Safety factors in the design and use of pressure equipment. Engineering Failure Analysis, (2007), 14(3), 471-480.
- [6] A. Fortuni, F. Giacobbe. Implementazione di un sistema qualità integrato nell'ambito dell'operatività degli organismi notificati. Proceedings of the SAFAP2016, (2016), ISBN ISBN 978-88-7484-520-0
- [7] C. Del Castillo-Peces, C. Mercado-Idoeta, M. Prado-Roman, C. Del Castillo-Feito. The influence of motivations and other factors on the results of implementing ISO 9001 standards. European Research on Management and Business Economics, (2018), 24(1), 33-41, doi: 10.1016/j.iedeen.2017.02.002
- [8] C. Faidy. EPR Codes and Standards for Pressure Equipments. International Association for Structural Mechanics in Reactor Technology, (2005), 1, 1141-1150, ISBN: 978-1-5108-1701-2.

- [9] R. Balistreri, E. Bemporad, F. Giacobbe. Operation of the Notified Body according to the Directive 2014/68/UE (PED) during the covid-19 emergency. Case study of a surveillance audit according to module H1. Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, (2020), ISBN: 978-981-14-8593-0, 3672-3679, doi: 10.3850/978-981-14-8593-0
- [10] L. Fonseca, J. P. Domingues. ISO 9001:2015 edition- management, quality and value. International Journal for Quality Research, (2017), 11(1), 149–158, doi: 10.18421/IJQR11.01-09
- [11] F. Giacobbe, E. Bemporad. Conformity assessment of pressure equipment during coronavirus disease emergency: Risks and opportunities. Chemical Engineering Transactions, (2020), 82, 55–60.
- [12] A. Labodová. Implementing integrated management systems using a risk analysis based approach. Journal of Cleaner Production, (2004), 12(6), 571-580.
- [13] M. Playle. CE Marking – the Essential Requirements, Advances in Systems Safety. Springer, (2010), 251-271
- [14] J. L. Zeman. The role of quality systems in the Pressure Equipment Directive. Technology, Law and Insurance, (1998), 3(3), 183-189, doi: 10.1080/135993798349370
- [15] J. Wilson, L. Campbell. Developing a knowledge management policy for ISO 9001:2015. Journal of Knowledge Management, (2016), 20(4), 829-844
- [16] R. Wolniak. Design in ISO 9001:2015, (2020), doi 10.29119/1641-3466.2020.148.57
- [17] M. Jakubiec. European Policy of Products' Quality Management and Improvement. on European Integration 2018, pp.512-519
- [18] Gazzetta ufficiale dell'Unione europea C 272/1 del 26.7.2016. comunicazione della Commissione. La guida blu all'attuazione della normativa UE sui prodotti

Valutazione del fenomeno di instabilità mediante approccio “Direct Route” della EN 13445 e confronto con i criteri dell’ASME VIII Div.2

E. Becherini, S. Milani, M. Mencacci

Ener Consulting s.r.l.

Sommario

Nelle verifiche dei Pressure Vessel con metodologia “Design by Analysis”, i fenomeni di instabilità generati dalla presenza di stati di sollecitazione di compressione, come descritti nella EN13445-3 Annex B, vengono spesso erroneamente non considerati o trascurati dai progettisti. Tale aspetto può portare a problematiche di funzionamento, ed in alcuni casi limite, ad un collasso generalizzato delle attrezzature a pressione.

Le verifiche strutturali secondo tale modalità di collasso, risultano pertanto di primaria importanza, non solo per garantire la corretta funzionalità, ma soprattutto per la sicurezza e quindi la stabilità delle attrezzature.

Si tenga conto infine che, a differenza di altre modalità di collasso, la perdita di stabilità avviene in maniera repentina ed imprevedibile, e ciò ne incrementa la criticità e pericolosità.

L’articolo si propone di discutere quindi, mediante un esempio applicativo, la corretta procedura di verifica riportata nell’Annex B della EN13445-3 “Instability Check” e in ultimo di confrontarla brevemente con quanto richiesto nell’ASME VIII Div.2.

Si darà particolare risalto agli aspetti pratici di tali valutazioni, evidenziando i principali parametri che influiscono in maniera significativa nella determinazione del carico limite, superato il quale si ha il collasso.

1. Introduzione

Il fenomeno di instabilità elastica, simile al fenomeno del “carico di punta” (in inglese buckling), può venire a generarsi a seguito dell’applicazione di carichi che generano stati di sollecitazione di compressione.

Dal punto di vista teorico, al raggiungimento del cosiddetto punto di biforcazione, si viene ad instaurare una conversione di energia immagazzinata tale da trasformare una sollecitazione di compressione a una di flessione, senza alcuna variazione del carico esterno applicato.

In presenza di azioni a “controllo di carico”, il raggiungimento di tale condizione determina, nella maggior parte dei casi, il collasso della struttura (ove per controllo di carico si intendono carichi meccanici e non termici).

Nella pratica, la condizione di carico critico, ossia il carico massimo sopportabile dalla struttura, viene raggiunto con un valore ben minore di quello teorico: ciò è dovuto a molteplici aspetti, quali fenomeni non lineari (plasticizzazione o grandi spostamenti) e per imperfezioni geometriche che presentano le strutture dovute anche alle lavorazioni (ovalizzazione, cilindricità, ecc), le quali accentuano in maniera significativa tale fenomeno.

2. Modalità di valutazione del fenomeno di instabilità

La valutazione del fenomeno di instabilità, può essere eseguita tramite due diverse metodologie in ambito CAE:

- Instabilità Lineare agli autovalori
- Analisi di Instabilità non lineare

Ognuna di queste procedure presenta ovviamente vantaggi e svantaggi, in particolare:

- L'analisi Lineare permette di ottenere rapidamente il valore del carico critico teorico di buckling.
Come sopra detto, il carico di buckling reale risulta in realtà inferiore rispetto a quello teorico: tale procedura permette di determinare, seppur in maniera approssimata, il margine di sicurezza della struttura, in quanto se l'autovalore calcolato risulta sufficientemente grande, è possibile affermare che la struttura risulta verificata;
- L'analisi di buckling non lineare risulta sicuramente molto più complessa, richiedendo maggiori competenze. Inoltre, i tempi di calcolo richiesti per lo svolgimento di tale analisi, sono sicuramente maggiori.
Il principale vantaggio di questa procedura risiede nella possibilità di considerare tutti i fenomeni di non linearità, le imperfezioni geometriche iniziali, ma soprattutto determinare l'effettivo carico critico ed analizzare la condizione di post-buckling, cioè studiare il comportamento della struttura al superamento di tale valore.
Non sempre infatti il raggiungimento del carico critico determina il collasso della struttura, ma si può ottenere una condizione di equilibrio prossima a quella iniziale, senza conseguenze catastrofiche, ma comunque tali da mettere fuori servizio l'apparecchio.

Il grafico di Figura 1 riassume i concetti appena esposti. È possibile in particolare notare:

- La differenza tra il carico critico teorico, determinato mediante l'analisi agli autovalori, ed il carico critico reale ottenuto tenendo conto del comportamento che presenta effettivamente la struttura.
- Il comportamento post-buckling ottenibile con l'analisi non lineare

Il raggiungimento del punto 1 di cui alla figura, comporta una successiva riduzione della capacità portante della struttura.

Come sopra esposto, vi possono essere casi in cui questa raggiunge una nuova configurazione di equilibrio la quale, seppur significativamente diversa dalla precedente, non determina il collasso ma comunque una configurazione potenzialmente pericolosa (punto 2 della figura).

L'analisi di Post – Buckling permette quindi di valutare appieno la capacità portante della struttura, anche dopo il superamento del carico critico reale (ossia al punto 1 del grafico).

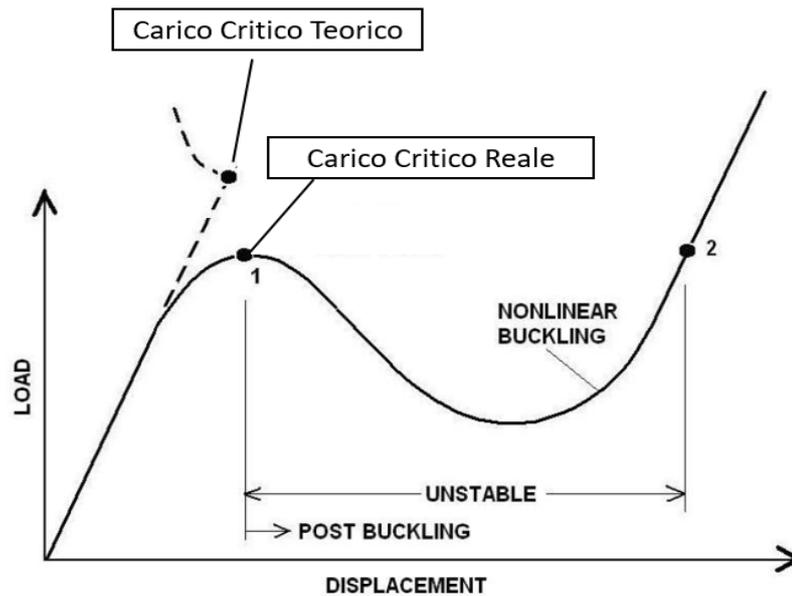


Figura 1. Andamento Carico – Spostamento

3. Valutazione del fenomeno di Instabilità secondo EN 13445

La resistenza a buckling di una struttura, determinata in accordo all'Annex B della EN 13445-3, passa per i seguenti punti:

- Applicazione di una pre-deformazione, determinata mediante l'analisi agli autovalori. Tale analisi iniziale permette di determinare la "forma" di perdita di instabilità. Essendo i risultati di tale analisi "normalizzati", la grandezza della pre-deformazione iniziale dovrà essere determinata sulla base delle tolleranze applicate, le quali dovranno rispettare i criteri di accettabilità geometrici riportati nella EN13445-4
- La legge costitutiva del materiale dovrà essere lineare elastica – perfettamente plastica (senza incrudimento);
- Utilizzo del criterio di snervamento secondo Von Mises;
- I parametri di progetto da applicare, dovranno essere determinati in accordo al punto B.8.4.4 della norma.
In particolare, il coefficiente parziale di resistenza, per la determinazione del carico critico di buckling di progetto, dovrà essere:

- 1.25, se si effettuerà un successivo test a pressione esterna,
- 1.5 negli altri casi

Si noti che i coefficienti parziali di sicurezza non tengono in considerazione l'effetto delle imperfezioni: come già detto, queste dovranno essere incluse direttamente all'interno del modello matematico, mediante la preventiva esecuzione di un'analisi agli autovalori e successiva applicazione di una pre-deformazione iniziale.

4. Esempio Applicativo

Per l'applicazione della metodologia in oggetto, si è fatto riferimento ad una porzione di fasciame, al cui centro è stato posto un bocchello.

Il serbatoio oggetto del presente studio, risulta sottoposto esclusivamente ad una pressione esterna.

Visto il carattere puramente descrittivo del presente articolo, si è fatto uso di piani di simmetria ed altre semplificazioni, le quali nella pratica non sarebbero ammesse, in quanto non mostrerebbero eventuali forme di instabilità anti-simmetriche.

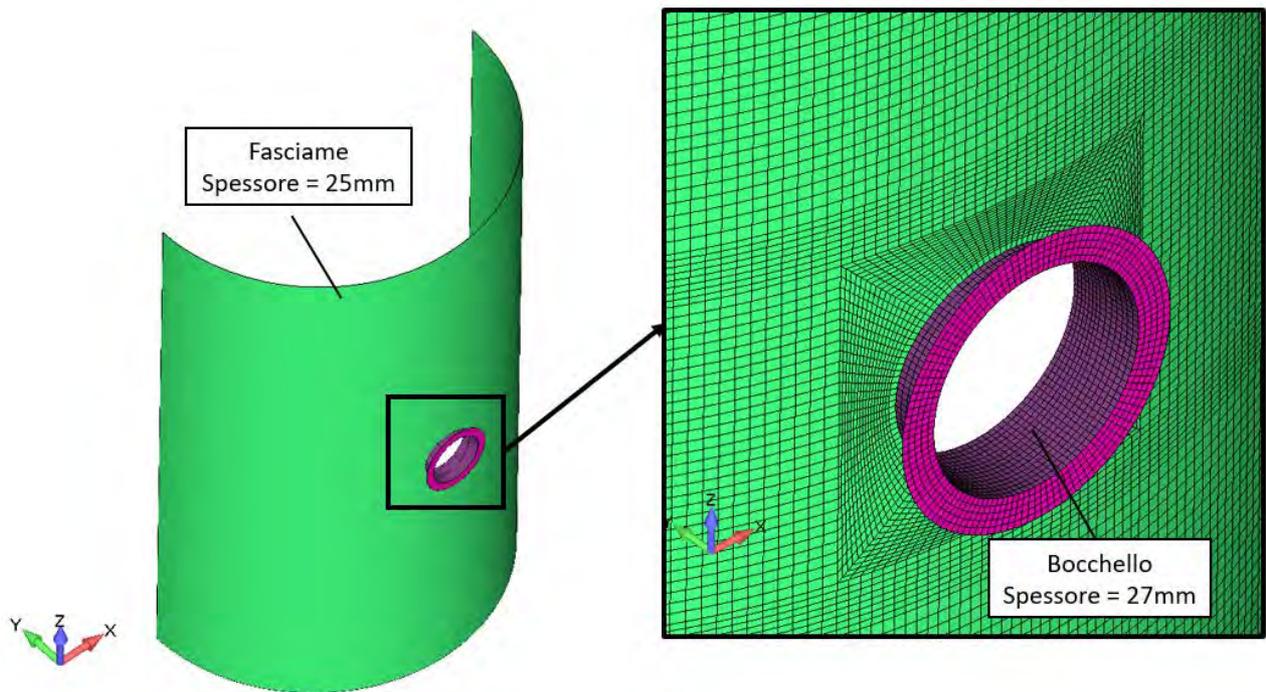


Figura 2. Definizione del caso di studio

Definizione	Valore	Unità di Misura
Materiale	P355GH	-
Diametro Fasciame	2270	mm
Diametro Bocchello	324	mm
Modulo di Young	200	GPa
Tensione di Snervamento	345	MPa
Temperatura di Progetto	+20	°C
Pressione di Progetto (esterna)	3	MPa

Tabella 1. Dati di Progetto

4.1. STEP 1 - Analisi lineare agli autovalori

Si riportano di seguito i risultati relativi all'analisi di instabilità lineare elastica.

Come precedentemente detto, questa analisi rappresenta per la EN13445-3 un punto di partenza, volto a determinare la forma di perdita di instabilità.

Questa tuttavia fornisce già indicazioni estremamente utili sul margine di sicurezza che possiede la struttura, in quanto un autovalore prossimo all'unità evidenzia sin da subito una criticità.

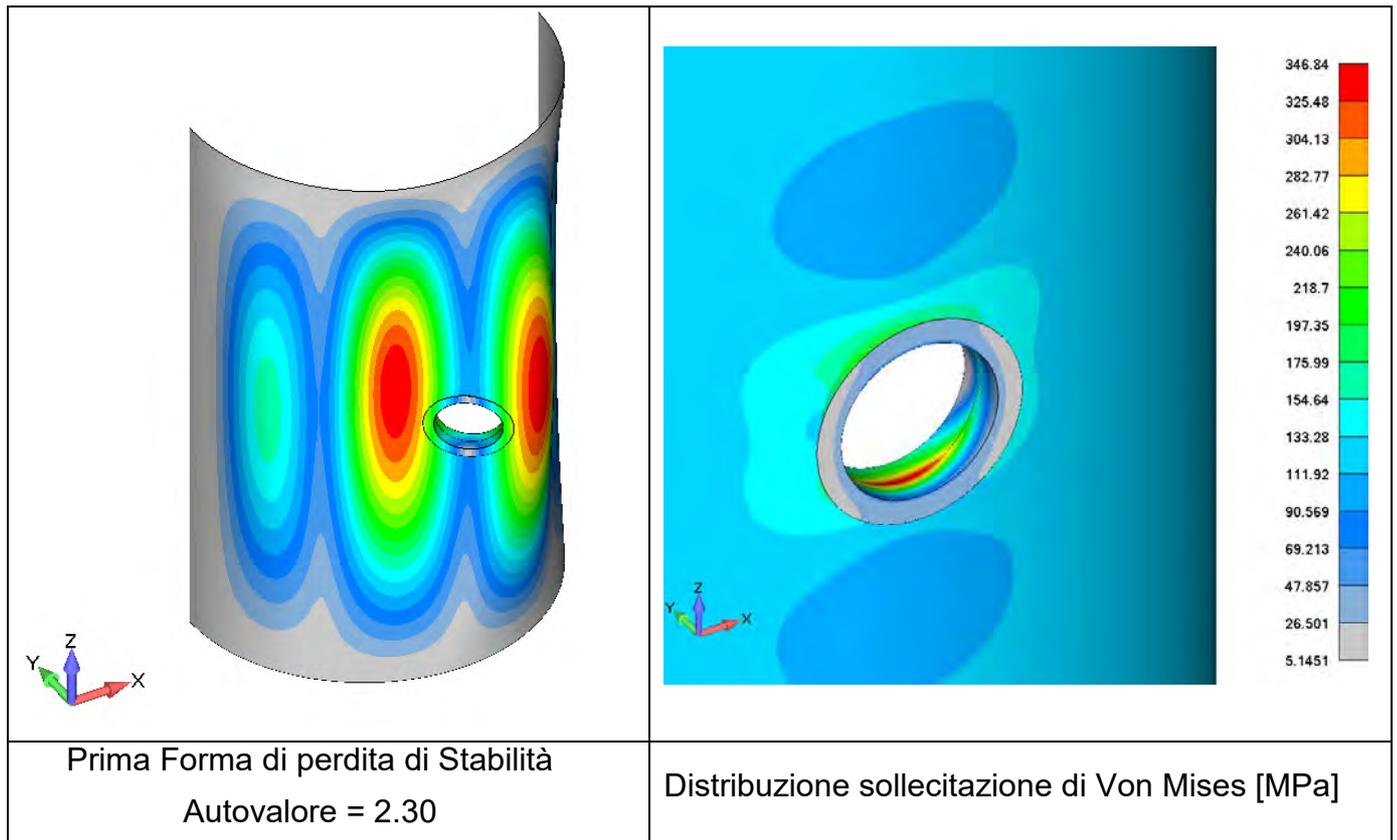


Figura 3. Risultati Analisi di Instabilità agli autovalori

Nella figura di sinistra è possibile osservare la prima forma di perdita di stabilità, il cui autovalore risulta pari a 2.30. Seppur maggiore di 1, il margine di sicurezza che rappresenta è piuttosto limitato. Ricordiamo infatti che tale analisi tende a sovrastimare la reale capacità portante dell'apparecchio.

Nella figura di destra invece, viene riportata la distribuzione delle sollecitazioni secondo Von Mises calcolata nella condizione di progetto sopra indicata, dalla quale è possibile osservare come, ad eccezione della regione di giunzione tra bocchello e fasciame, le sollecitazioni assumono valori inferiori alla tensione di snervamento.

Ciò implica che l'instabilità della struttura tenderà ad essere generata principalmente dalla sua snellezza, piuttosto che da eventuali fenomeni di plasticizzazione.

4.2. STEP 2 - Analisi di Buckling Non Lineare

Facendo riferimento ai risultati dello STEP 1 per la determinazione della pre-deformazione iniziale, si è provveduto ad eseguire un'analisi non-lineare.

Il carico applicato è stato maggiorato di un fattore fittizio 4, così da esser certi di non raggiungere la convergenza numerica, e poter valutare il carico critico della struttura, ed il successivo comportamento di Post-Buckling.

Si noti che per analisi di Post-Buckling l'algoritmo di Newton-Raphson non risulta adeguato, in quanto lavora solo per trend di post-buckling stabili, ottenibili in strutture la cui matrice di rigidezza risulta sempre definita positiva, ma questo aspetto non può essere valutato a priori.

Uno degli algoritmi più adatti per questo tipo di analisi è invece rappresentato dall' "Arc-Length Method": non ci addentreremo ulteriormente su questo aspetto, rimandando a testi specialistici riportati ad esempio in bibliografia.

Nella seguente figura vengono riportati i risultati in corrispondenza dello step che definisce il carico critico reale, in termini di distribuzione delle sollecitazioni e deformazioni.

Quest'ultime sono state valutate al fine di soddisfare il requisito secondo cui le deformazioni strutturali principali massime si attestino al di sotto del 5% come richiesto da norma, indipendentemente dal carico critico ottenuto.

Qualora tale condizione non venisse soddisfatta, si dovrà ridurre opportunamente il valore del carico critico.

Dalla seguente figura è possibile apprezzare come venga a generarsi una significativa plasticizzazione in corrispondenza del fasciame, la quale concorre nella riduzione della capacità portante e conseguente manifestazione del fenomeno di instabilità.

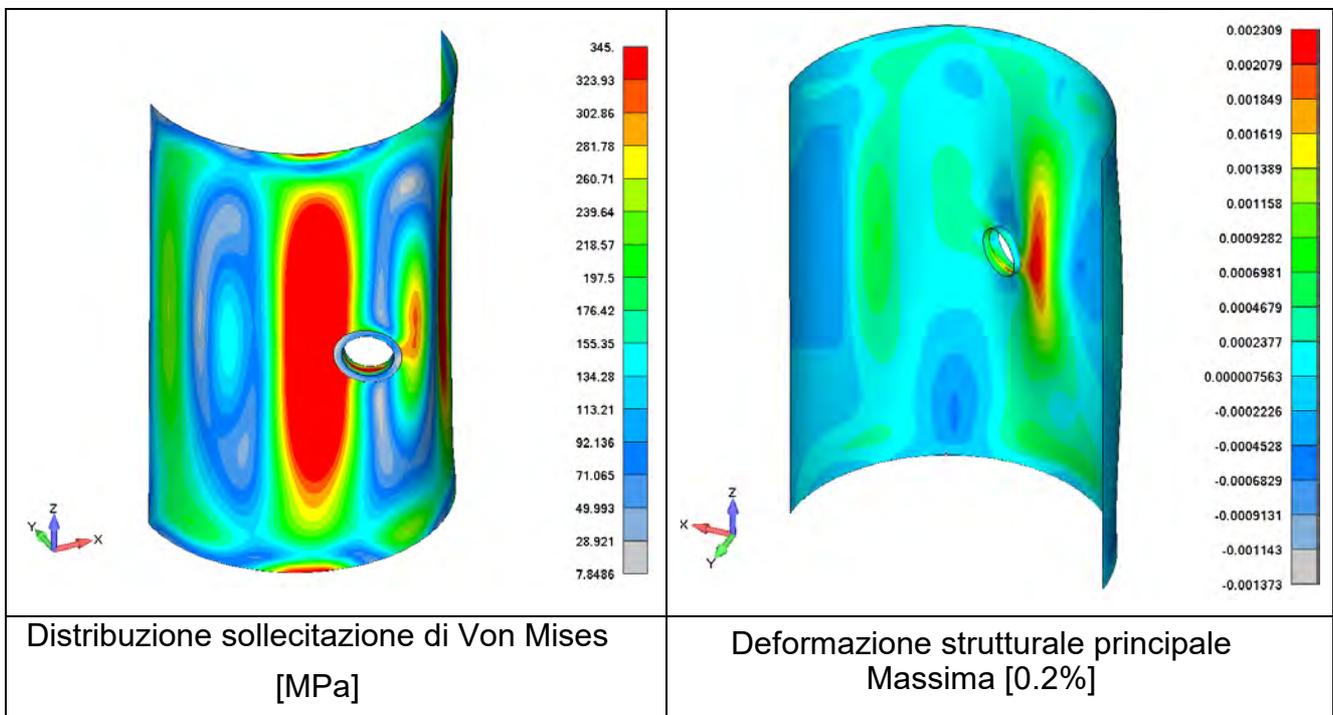


Figura 4. Risultati Analisi non lineare – Load Factor = 0.304

Nel seguente grafico viene riportato l'andamento del "Load Factor" in funzione dello spostamento massimo ottenuto.

Al fine di valutare l'influenza delle imperfezioni geometriche, si è:

- Riportato tale trend nel caso di geometria "perfetta";
- Riportato tale trend con una ovalizzazione iniziale dell'1%, valore limite consentito dalla EN13445-4.

Da questo, è possibile osservare come il carico critico massimo applicabile si riduca sensibilmente, evidenziando la notevole influenza delle imperfezioni geometriche iniziali sul fenomeno di buckling.

Superato il punto critico, entrambe le analisi tendono a convergere, evidenziando come le imperfezioni influenzino in maniera meno marcata il successivo comportamento di Post-Buckling.

Per il caso sotto analisi, non si raggiunge una successiva configurazione di equilibrio stabile, pertanto il superamento del carico critico comporta un cedimento strutturale.

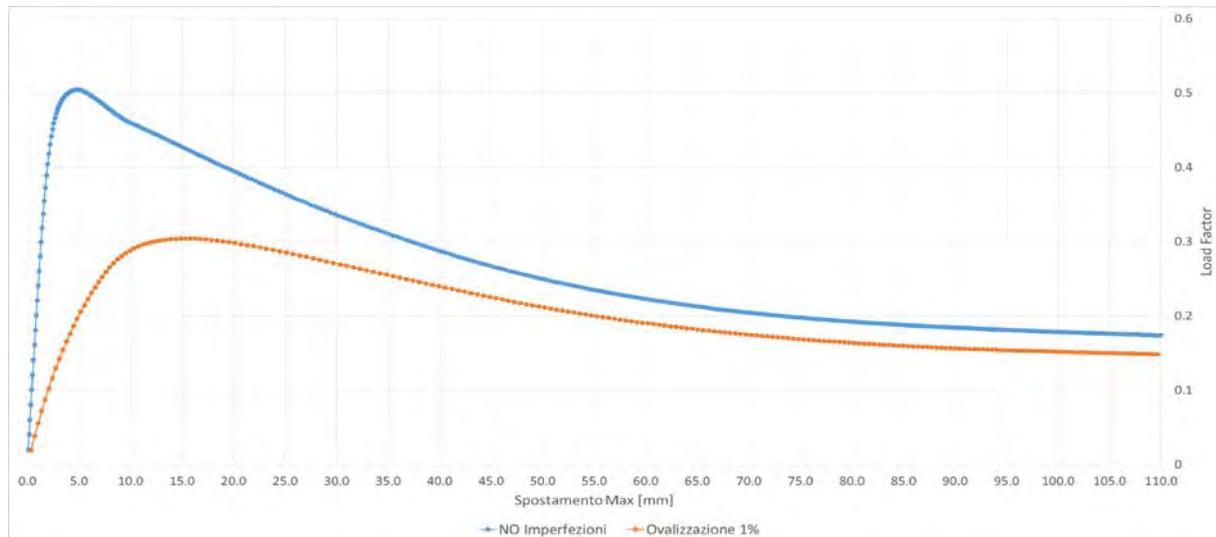


Figura 5. Fattore di Carico Vs Spostamento Massimo

La procedura per il calcolo del carico massimo di progetto applicabile secondo EN13445-3 Annex B, viene riportata nella seguente tabella.

Si noti che, essendo questa procedura basata sull'approccio agli stati limite, i valori determinati durante l'analisi agli elementi finiti devono essere ridotti per gli opportuni coefficienti parziali di sicurezza.

Definizione	Modello Matematico senza imperfezioni geometriche		Modello Matematico con imperfezioni geometriche	
	Valore	Unità di misura	Valore	Unità di misura
Pressione di Progetto	3	MPa	3	MPa
Pressione Applicata	12	MPa	12	MPa
Fattore di carico massimo raggiunto	0.504	-	0.304	-
Coefficiente parziale di sicurezza del carico	1.2	-	1.2	-
Coefficiente parziale di sicurezza del materiale	1.5	-	1.5	-
Pressione di progetto massima applicabile	3.36	MPa	2.03	MPa

Tabella 2. Risultati Analisi di Buckling Non Lineare

5. Analisi di instabilità Elastica secondo ASME VIII Div.2

Il codice di calcolo ASME VIII Div.2 presenta tre diverse procedure per la valutazione dei fenomeni di instabilità:

- Type 1: Analisi agli autovalori eseguita sui risultati di un'analisi lineare elastica, la quale non tiene conto di alcuna forma di non linearità;
- Type 2: Analisi agli autovalori eseguita sui risultati di un'analisi elasto-plastica, dove sono inclusi anche gli effetti di non-linearità geometriche;
- Type 3: Analisi non lineare di instabilità, dove le imperfezioni geometriche e le non linearità sono esplicitamente incluse all'interno del modello matematico.

Dalla precedente lista possiamo notare in particolare la presenza di una procedura che si basa esclusivamente sui risultati dell'analisi lineare autovalori (Type 1). Questa, risulta estremamente utile, in quanto permette di sfruttare la semplicità di tale approccio per le valutazioni strutturali del caso. In ambito progettuale infatti, quasi mai si è interessanti allo studio del comportamento di Post-Buckling di una struttura, bensì è di estremo interesse il carico limite applicabile.

Ciò differenzia i due codici di calcolo, in quanto la EN 13445-3 richiede necessariamente lo svolgimento di una analisi non lineare, cosa che invece non avviene nel codice ASME.

Nella procedura "Type 1", viene richiesto che il "Fattore minimo di Progetto Φ_B " assuma un valore maggiore di $2/\beta_{cr}$.

Il parametro β_{cr} prende il nome "Fattore di riduzione della capacità", ed incrementa il margine minimo di sicurezza da garantire nell'analisi, così da tenere conto di tutti gli aspetti precedentemente indicati (imperfezioni geometriche, non linearità, ecc).

Tale parametro viene indicato di seguito, e varia in funzione della geometria e del tipo di carico applicato.

(a) For unstiffened or ring stiffened cylinders and cones under axial compression

$$\beta_{cr} = 0.207 \quad \text{for } \frac{D_o}{t} \geq 1\,247$$

$$\beta_{cr} = \frac{338}{389 + \frac{D_o}{t}} \quad \text{for } \frac{D_o}{t} < 1\,247$$

(b) For unstiffened and ring stiffened cylinders and cones under external pressure

$$\beta_{cr} = 0.80$$

(c) For spherical shells and spherical, torispherical, elliptical heads under external pressure

$$\beta_{cr} = 0.124$$

Figura 6: ASME VIII Div.2 - Fattore di Riduzione della Capacità

Nella seguente tabella, sono riassunti i passaggi necessari per la valutazione della capacità portante del componente.

Definizione	Simbolo	Valore
Fattore di riduzione della capacità	β_{cr}	0.8
Fattore minimo di Progetto	$\Phi_B = 2/\beta_{cr}$	2.5
Primo Autovalore calcolato	λ_1	2.3
Coefficiente di Sicurezza	$SF = \lambda_1/\Phi_B$	0.92

Tabella 3. Analisi di Buckling – ASME VIII Div.2 – Type 1 Procedure

Il vantaggio di tale metodologia, legata alla semplicità di realizzazione, risulta evidente.

Al tempo stesso però, tale procedura risulta applicabile solo per geometrie semplici, e non permette di valutare il comportamento di post-buckling.

In merito alle altre procedure riportate nel codice di calcolo ASME, si consideri che la Type 3 risulta del tutto analoga all'approccio non-lineare dell'euronorma, mentre la Type 2 rappresenta un compromesso tra i due approcci discussi finora, in quanto esegue un'analisi agli autovalori partendo dai risultati di un'analisi elasto-plastica.

6. Conclusioni

Seguendo quanto sopra esposto, abbiamo:

- Evidenziato il corretto percorso di un'analisi di buckling eseguita tramite tecniche CAE, secondo quanto riportato nel codice di calcolo EN 13445-3;
- Annotato le differenze procedurali di tale norma rispetto alla ASME VIII Div.2.

Nella presente si è voluto quindi evidenziare ancor meglio le differenze, anche in termini pratici, degli approcci proposti dalle due norme.

La procedura di cui alla EN 13445, risulta sicuramente più accurata rispetto all'analisi agli autovalori, in quanto permette sia una precisa definizione del carico critico reale, che un successivo studio del comportamento della struttura al superamento di tale punto limite.

D'altro canto però, risultano evidenti le seguenti problematiche:

- Uno studio del comportamento della struttura in campo non lineare risulta, anche se particolarmente approfondito molto complesso, richiedendo all'analista un notevole background tecnico che esula anche dalla conoscenza della norma;
- Tale procedura, oltre ad essere complessa, risulta particolarmente onerosa dal punto di vista computazionale, richiedendo tempi di calcolo tutt'altro che trascurabili.

Del resto, il codice di calcolo ASME VIII Div.2 fornisce la possibilità di utilizzare procedure semplificate, ma cautelativamente con dei margini di sicurezza più alti, con conseguente riduzione significativa del tempo di validazione della struttura, pur non mantenendo la rigosità scientifica dell'approccio della EN 13445.

Gli autori della presente pubblicazione suggeriscono l'inserimento di procedure di verifica dei fenomeni di instabilità in campo lineare, analogamente a quanto riportato nel codice ASME, anche nella EN 13445 al fine di permettere una valutazione di tale

modalità di collasso, almeno per attrezzature in pressione di geometria non troppo complessa.

7. Bibliografia

- [1] EN 13445-3:2021. *Recipienti a pressione non esposti a fiamma – Parte 3: Progettazione*
- [2] ASME VIII Div.2:2021. *Rules for Construction of Pressure Vessels – Alternative Rules*
- [3] European Commission – Joint Research Centre. *The Design-by-Analysis Manual*.1999
- [4] ASME PTB-3-2013 – *ASME Section VIII Div.2 Example Problem Manual*
- [5] S.P.Timoshenko, J.M.Gere. *Theory of Elastic Stability*. Dover Publications, 2009

Analisi e confronto dei risultati di calcolo strutturale di recipienti in pressione utilizzando norme nazionali ed internazionali

R. Balistreri¹, E. Bemporad², E. Carducci², F. Giacobbe³, G. Sepede⁴

¹ Inail - Uot di Cagliari

² Inail - Dit, Organismo Notificato per direttive europee

³ Inail - Uot di Messina

⁴ Ingegnere

Sommario

La costruzione di recipienti in pressione, prima dell'entrata in vigore della direttiva 97/23/CE, ad oggi sostituita dalla 2014/68/UE (PED), era regolamentata da norme tecniche nazionali. Ai fini del rispetto dei requisiti essenziali di sicurezza (RES) per la progettazione il fabbricante può adottare la norma EN 13445-3 che ha valore di norma armonizzata. I fabbricanti hanno comunque la facoltà di poter scegliere l'utilizzo delle norme tecniche nazionali (raccolte ISPEL) integrate con la UNI/PdR 55:2019 che le rende applicabili in conformità ai RES.

L'applicazione di diversi codici, utilizzando fattori di sicurezza differenti, comporta risultati con variazioni sensibili in termini di spessori minimi di progetto.

In questo lavoro sono state implementate differenti simulazioni per verificare la stabilità di uno scambiatore di calore a piastre fisse. In particolare si sono utilizzati i metodi di calcolo secondo la raccolta VSR, quindi secondo la norma armonizzata EN 13445-3. Per completezza di analisi le simulazioni sono state effettuate anche in accordo alla norma ASME VIII Div. I e Div. II Ed.2019.

Ad esito delle simulazioni sono emerse differenze significative nei calcoli effettuati con i diversi codici, soprattutto alle piastre tubiere e ai flangioni di accoppiamento lato mantello – lato tubi.

L'articolo fornisce in definitiva alcune indicazioni utili ai fini di un auspicabile allineamento tra i diversi codici di calcolo prevalentemente utilizzati dai fabbricanti.

1. Introduzione

Ai fini della progettazione, fabbricazione e prove di recipienti a pressione la PED si limita a fornire i RES, con un approccio "risk-based" improntato alla flessibilità. Per semplificare la valutazione di conformità ai RES sono state emanate norme armonizzate. Per la progettazione la norma armonizzata alla PED, che prevede la presunzione di conformità ai RES specifici, con riferimento ai recipienti non esposti a fiamma, è la EN 13445-3, attualmente (Decisione di esecuzione UE 2020/542) nell'edizione 2014 con gli emendamenti fino all'A8 del 2019 [1]. L'applicazione delle norme armonizzate non è però obbligatoria ed il fabbricante ha facoltà di applicare altri standard, comprovando il raggiungimento di un livello di sicurezza globale equivalente.

A livello nazionale continuano infatti ad essere applicate le norme tecniche vigenti in epoca anteriore alla direttiva 97/23/CE o "vecchia" PED, le "raccolte ISPEL" [2, 3, 4, 5]. Già con l'entrata in vigore della "vecchia" PED erano state elaborate raccomandazioni, nell'ambito del Comitato Termotecnico Italiano (CTI) [6, 7], proprio ai fini dell'uso delle raccolte ISPEL revisione '95 edizione '99, nell'ambito della PED. Quindi, più recentemente, è stata pubblicata la Prassi di Riferimento UNI/PdR 55:2019 [8] che fornisce le linee guida per continuare a rendere applicabili le raccolte ISPEL in conformità ai RES della "nuova" PED. La PdR ha ripreso i contenuti della raccomandazione CTI del 2005 [7] aggiornandoli in base

ai RES della nuova PED e tenendo conto degli ulteriori aggiornamenti normativi nel frattempo intervenuti per le norme armonizzate, tra cui le EN 13445, con la modifica, ad es., di alcuni coefficienti di sicurezza e di alcuni dei criteri per l'utilizzo dei coefficienti di giunzione.

Un altro standard largamente applicato, soprattutto da parte di ditte che esportano in paesi extra-UE, è l'ASME Boiler and Pressure Vessel Code (B&PV), sezione VIII (recipienti non soggetti a fiamma), Div. 1 (recipienti con una pressione interna o esterna superiore a 15 psi o 1,034 barg) [9] e in misura minore la Div.2 (stesso campo di applicazione della Div.1 ma con regole alternative) [10] e la Div.3 (regole alternative per apparecchiature ad alta pressione, superiore a 10.000 psi o 689,5 barg) [11]. Anche l'ASME nel 2015 ha pubblicato una guida per i detentori dell'"ASME Stamp" all'uso della sezione VIII, div. 1 per i fabbricanti soggetti alla PED [12].

I fattori da considerare nella scelta e nella progettazione di recipienti a pressione sono molteplici [13]:

- Dimensioni e geometria: diametro, lunghezza, spessore e loro limitazioni;
- Condizioni operative: pressione e temperatura;
- Funzioni e localizzazione;
- Natura del fluido, corrosività;
- Disponibilità di materiali, loro proprietà fisiche e costi;
- Teorie e tipi di rottura;
- Tecniche di costruzione o fabbricazione;
- Considerazioni economiche.

Alcuni studi sono stati condotti nel tempo per comparare le differenze ed i limiti dei metodi previsti dai principali codici applicabili.

Roman G. [14] ha presentato un'analisi comparativa delle normative internazionali, in particolare EN 13445-3:2009, ASME VIII Div.2 2010, BS PD 5500: 2009, per il calcolo delle guarnizioni dei giunti flangiati, posizionate all'interno dei fori dei bulloni, condotta in termini di costi di costruzione, concludendone che si riferiscono soltanto ai carichi statici, condizioni operative e prova di pressione, mentre sarebbe necessario completarle introducendo l'effetto della differenza di temperatura tra flange e bulloni sulla resistenza e sulla tenuta e l'influenza della rigidità della flangia sulla tenuta. Lo studio si spinge anche a proporre un nuovo metodo di valutazione.

Trieglaff et al. [15] hanno comparato i risultati degli approcci proposti dalla EN 13445-3 2014/prA3:2015; 2015-10, per la verifica a fatica con i risultati degli altri codici per applicazioni nucleari e non nucleari, trovandoli sostanzialmente sovrapponibili.

Askestrand & Gudmestad [16] hanno comparato il metodo diretto della EN 13445-3: 2009, con i metodi di analisi delle sollecitazioni elastiche e di analisi elasto-plastica previsti dal codice ASME VIII Div.2 ed. 2010 concludendone che il primo richiede grande esperienza nell'interpretazione dei risultati e nel caso esaminato risulta il più conservativo; il secondo è il più rapido e può comportare un notevole risparmio di tempi e costi, ma solo per strutture semplici, mentre il terzo nel caso di strutture geometricamente complesse richiede notevoli risorse in termini di potenza di calcolo ma rappresenta in modo più realistico il comportamento reale della struttura, consentendo di ottimizzare i costi del materiale, fornendo d'altra parte i risultati meno conservativi.

Delaforce [17] ha comparato i codici ASME VIII, Div. 1 e Div. 2, PD 5500, EN 13445-3, per le sollecitazioni ammissibili derivanti dalla pressione interna. Non ne sono specificate le edizioni, ma si presume fossero quelle allora in vigore, l'ediz. 2010 dell'ASME VIII, l'ediz. 2009 per la PD 5500 e l'ediz. 2009 della EN 13445-3. Ne ha concluso che ciascun codice, in quegli anni aveva il proprio modo di calcolare un fondo, mentre per altri aspetti i codici si erano copiati: era il caso dell'analisi delle flange che ASME VIII Div.2, EN 13445-3 e PD 5500 hanno ripreso da ASME VIII Div.1, le aperture di accesso alle gonne che la EN 13445-

3 ha ripreso dalla AD MerKblatt (AD 2000), il metodo dell'area della PD 5500 di cui ASME VIII Div.1 e Div.2, EN 13445-3 hanno ripreso il principio, modificandolo. Inoltre la ASME VIII Div.1, richiedendo lo spessore maggiore rappresenta ancora il metodo con il coefficiente di sicurezza più elevato, gli altri codici richiedono spessori minori, ma la sollecitazione ammissibile risulta vicina al limite di snervamento, offrendo quindi minor sicurezza.

Palumbo, [18] ha esaminato e confrontato i campi di applicazione delle formule previste nei codici VSR rev.'95, VSG rev.'95, ASME VIII Div.1, Div.2 e Div.3 ed. 2004, EN 13445: 2004, CODAP 2000, AD-2000 Merkblatt e PD 5500 ed. 2000 concludendo che nel campo degli spessori sottili la norma ASME VIII-1, assumendo quale tensione ideale quella massima, a differenza degli altri codici, risulta la più cautelativa, mentre nel campo dei grossi spessori è la AD-2000 nel proprio campo di validità, a risultare più cautelativa, poiché ottenuta dal criterio di von Mises in campo elastico considerando la tensione ideale della fibra interna uguale alla tensione ammissibile.

Nel luglio 2004 la DG Impresa della Commissione Europea ha pubblicato i risultati di uno studio comparativo sugli standard per le attrezzature a pressione [19]. In particolare lo studio compara le implicazioni economiche e non economiche derivanti dall'applicazione della EN 13445 (Issue 1, 2002-05, incluse tutte le correzioni fino al 07-2003) e ASME B&PVC (2001 inclusi gli addenda 2002 e 2003) più, ove appropriato, i maggiori codici correlati quali TEMA, 1999) [20] e WRC Bulletin 107(rev. 1979) [21], 297(rev. 1987) [22] e 368(1991) [23] di 9 esempi di riferimento di recipienti non esposti a fiamma, dimostrando complessivamente che la EN 13445 all'epoca già offriva un metodo di progettazione tecnicamente ed economicamente competitivo, risultando il più economico in 6/7 dei 9 casi esaminati, pur evidenziando che in alcuni casi le differenze di costo riportate per fabbricanti diversi, risultavano maggiori rispetto alle differenze di costo risultanti dall'applicazione dei diversi codici.

Negli ultimi anni i codici comparati negli studi sopra menzionati hanno subito una notevole evoluzione. Ad es. la EN 13445-3 con l'edizione 2019 che ha integrato tutti gli emendamenti effettuati fino al 2018, ha superato la limitazione presente nel capitolo 16 nel calcolo delle sollecitazioni generate su fasciami e fondi dalle forze e dai momenti che le tubazioni scaricano sui bocchelli degli apparecchi, consentendo di evitare la verifica con una norma alternativa (WRC Bulletin o PD5500), in tutti quei casi in cui l'analisi del piping forniva tutte le sei componenti di carico. Inoltre le ASME hanno completamente rielaborato la parte VIII Div.2, avvicinandola alla Div.2 e copiando alcuni punti della norma europea [24].

Considerando tale profonda evoluzione, si è ritenuto utile effettuare una nuova comparazione degli standard di progettazione maggiormente applicati, inclusi i codici nazionali, con riferimento alle edizioni correnti. In particolare la presente memoria illustra i risultati dell'applicazione di tali codici in un caso che è risultato particolarmente significativo ai fini del confronto tra questi, indicando la necessità di ulteriori interventi normativi di allineamento.

2. Verifica di stabilità di attrezzature a pressione

2.1 Tipologia e caratteristiche del recipiente modellato

Ai fini della comparazione è stato analizzato uno scambiatore di calore a piastre fisse, le cui caratteristiche geometriche sono esclusivamente funzionali allo scopo del presente lavoro. Le condizioni considerate per la modellazione sono illustrate in tabella 1, mentre le caratteristiche geometriche per i componenti principali dello scambiatore e i materiali sono presentati nelle tabelle 2A e 2B. Con riferimento allo spessore i dati riportati in tabella 1 sono ricavati utilizzando il codice VSR rev. 95 ed.99.

Lo scambiatore modellato è rappresentato graficamente in figura 1.

Componente	T_p [°C]	P_p [MPa]	T_{mm} [°C]	T_o [°C]	z [ad]
Fondi (torosferico ed ellittico)	200	1.0	-	-	0.85
Virole (Centrale, destra e sinistra)	250	1.5	200	250	1
Piastra tubiera	250	-	220	-	-
Tubi	250	1	200	220	1

T_p temperatura di progetto; P_p pressione di progetto; T_{mm} temperatura media di parete del componente; T_o temperatura operativa; z efficienza della saldatura.

Tabella 1. Condizioni considerate per la modellazione sono illustrate in tabella 1

Dim. [mm]	Fondo Ellitt.	Fondo Torosf.	Virole laterali	Virola centrale	Materiali			
S	7	7	7	4	SA-516 Gr.70			
D_i	750	750	750	750				
D_e	764	764	764	758				
R	-	600	-	-				
r	-	115,5	-	-				
L	-	-	300	2958				
Componenti della virola di sinistra. Dimensioni geometriche e materiali								
Dimensioni [mm]	Setto partitore	Materiale	Tronchetto Penetrante	Flangia sald. WN 125/25	Materiale			
S	9.5	SA-516 Gr.70	11.18	23	SA-106 Gr. B			
L	422		121	-				
D_i	-		117.64	117.64				
D_e	-		140	270				
B	750		-	-				
g_1	-		-	12				
g_0	-		-	11.18				
Componenti della virola centrale. Dimensioni geometriche e materiali								
Dimensione [mm]	Piastra tub.	Materiale	Fascio tubiero	Materiale	Tronchetto	Materiale	Flangia sald. WN 125/40	Materiale
h	21	SA-266 Gr 2	-	SA-178 Gr C	-	Sa-106 Gr.B	-	Sa-105 Gr.B
D_e	846		9.52		140		270	
D_i			5.3		117.64		117.64	
e_F	21		-		-		-	
D_h			-		-		-	
D_0	-		-		-		-	
S	-		2.11		11.18		23	
p_t	-		20		-		-	
L	-		3000		121		-	
l	-		450		-		-	
N_t [ad]	-		200		-		-	
g_0	-		-		-		11.18	
g_1	-		-		-		12	

s spessore; D_i e D_e diametri int. ed est.; R raggio calotta; r raggio raccordo; L lunghezza virole; g_1 e g_0 altezza max. e min. codolo; h spessore piastra tubiera, e_F estensione spessore flangia; D_h diametro foro tubo; D_0 limite est. tubi; p_t passo tubo; l max. lunghezza non supportata tubo; nt num. tubi.

Tabella 2A. Caratteristiche geometriche e materiali dello scambiatore (virole, fondi, piastra tubiera fissa, tronchetti e flangia saldata)

Dim. [mm]	Flangia a codolo	Materiali	Bulloni di serraggio	Guarnizione
D_e	846	Sa-105 Gr.B	Nr. 80 da 1 1/2" ANSI TEMA con cerchio tiranti 814 mm, materiale Sa-193 Gr.B	Spiral-wound metal, mineral fiber filler - Carbon steel, di Diametro medio 781 e larghezza 13
D_i	750			
s	47			
g_0	7			
g_1	11.5			

Tabella 2B. Caratteristiche geometriche e materiali dello scambiatore (flange a codolo, bulloni e guarnizioni)



Figura 1. Scambiatore di calore a tubi fissi modellato

2.2 Standard di progettazione comparati

Si è scelto il metodo di progettazione mediante formule previsto dai codici più comunemente utilizzati dai fabbricanti, nella versione corrente:

- VSR Rev. 1995, Ed 1999 come implementato dalla UNI/PdR 55:2019
- ASME VIII div 1 e 2 Ed 2019
- EN 13445 Ed. 2014 lussue 5 + 2019 Amendments (2019-04).

2.3 Carichi considerati

Ai fini delle simulazioni, per rendere più chiaro e lineare il confronto, rispetto quanto richiesto in allegato I alla PED (RES) in particolare al punto 2.2 Progettazione, si sono considerati i seguenti carichi:

- pressione interna/esterna,
- pressione statica e massa della sostanza contenuta alle condizioni di esercizio e durante le prove.

Il volume interno dello scambiatore è 1.247 m³, il peso netto è di 539 kg e quello del liquido 1247 kg. Allo stesso è applicato un peso supplementare (per la fase di sollevamento) di 1500 kg.

Anche se presenti, il lavoro non tratta il comportamento delle selle e i relativi calcoli sismici e le azioni dinamiche dovute al vento, ai terremoti, alle forze e ai momenti di reazione provocati da sostegni, collegamenti, tubazioni, e le azioni legate ai meccanismi di deterioramento dovuti al fluido (corrosione ed erosione, fatica, decomposizione dei fluidi instabili, ecc.).

3. Analisi e confronto dei risultati delle simulazioni

3.1 Risultati e discussione

I risultati ottenuti per i diversi codici di calcolo per i componenti in pressione sono presentati nella tabella 3, riportando gli spessori minimi per la pressione di progetto (P_s) e per il valore di prova idraulica (P_t).

Componente		spessori nominali e minimi per i differenti codici [mm]					
		VSR Minimi	ASME minimi	EN-13445 minimi	VSR nominali	ASME nominali	EN-13445 nominali
Fondo ellittico	P_s	5.96	5.68	5.85	7	6	6
	P_t	3.08	2.34	2.57			
Viola cilindrica canale di sinistra/destra	P_s	5.99	5.99	5.98	7	6	6
	P_t	2.21	2.60	2.21			
Setto partitore	P_s	-	-	-	9.50	9.50	9.50
	P_t	-	-	-			
Tronchetti	P_s	4.99	4.94	4.98	11.18	11.18	11.18
	P_t	1.84	1.85	1.83			
Flange saldate tronchetto lato tubi	P_s	-	-	-	23	22,30	23
	P_t	-	-	-			
Flange saldate tronchetto lato mantello	P_s	-	-	-	23	33.40	23
	P_t	-	-	-			
Viola principale	P_s	3.95	3.95	3.95	4	4	4
	P_t	3.44	3.50	3.44			
Piastra tubiera fissa sinistra/destra	P_s	20.30	69 (B1)	49 (B1)	21	69	49
	P_t	7.14					
Fascio tubiero (spessore tubo standard 3/8")	P_s	0.05	0.02	0.05	2.11	2.11	2.11
	P_t	0.09	0.21	0.17			
Flangia a codolo destra/sinistra	P_s	47 (B1)	64 (B1)	51 (B1)	47	64	51
	P_t						
Fondo torosferico	P_s	5.91	5.39	5.86	7	6	6
	P_t	2.99	2.08	2.58			

(B1) il software utilizzato restituisce direttamente i valori nominali

Tabella 3. Confronto tra i risultati dei diversi codici di calcolo (spessori minimi e nominali)

In accordo con i codici di calcolo per le VSR ed EN sono state utilizzate sempre flange standard DN 125 PN 25, per le ASME WN DN 5" ASA 300 per le flange dei bocchelli di ingresso/uscita lato mantello, ed ASA 150 per le flange dei bocchelli di ingresso/uscita lato tubi.

I risultati dei codici risultano differenti per i diversi componenti, in particolare:

- per i fondi è più conservativo il codice nazionale, seguono EN ed ASME, ma le differenze sono contenute (rispettivamente 1,8% e 4,7%) e quindi non sono particolarmente significative e infatti tendono ad annullarsi per lo spessore nominale; in particolare non si rilevano differenze rispetto quanto concluso da Delaforce [17] per le edizioni precedenti delle norme;
- per le virole e tronchetti è più conservativa l'ASME, per le virole EN e VSR forniscono risultati pressoché equivalenti e comunque anche in questo caso le differenze tra i codici non risultano significative (rispettivamente 0,2% e 1%) e si annullano per lo spessore nominale;
- per il fascio tubiero ed il setto partitore non si rileva alcuna differenza;
- per le flange saldate ai tronchetti di ingresso/uscita lato mantello si rileva una differenza significativa, tra VSR, EN, per cui lo spessore è identico, e ASME più conservativa; lo spessore determinato con le prime due norme è infatti inferiore di oltre il 30%;
- le differenze maggiori nell'applicazione dei tre codici si rilevano per i flangioni e le piastre tubiere, dove il codice ASME risulta il più conservativo in assoluto. Gli spessori determinati con EN e VSR sono inferiori rispettivamente di ca. il 20% ed il 27% per i flangioni e ca. il 30% ed il 70% per le piastre tubiere.

Si è quindi approfondita la differenza di risultato relativamente alle differenze più significative rilevate.

Per quanto riguarda le flange, mentre le ASME applicano il criterio di rigidità (la ASME div.2 in modo più esteso rispetto alla div.1), le EN 13445 adottano invece un approccio alternativo incorporando un fattore di riduzione della sollecitazione (k). Mentre però il criterio di rigidità non ha limitazioni in termini di diametri delle flange, il fattore di riduzione dello stress è inteso esclusivamente per le flange con diametro superiore a 1000 mm [25].

In tal caso (diametro interno pari a 750 mm) il fattore k non è entrato in gioco per le EN ed è interessante notare che, nonostante la base teorica (analisi di Taylor-Forge [26]) e lo scopo (controllare la rotazione angolare delle flange) siano comuni, l'approccio EN conduce a risultati meno conservativi nel caso dei piccoli diametri (< 1000 mm) mentre nel caso di diametri più elevati, la differenza con le ASME si inverte, come si evince da [25]. Si evidenzia che il criterio di rigidità delle flange è stato introdotto nel codice ASME nel 2007.

Con riferimento alla piastra tubiera le ASME risultano più conservative nella compensazione del fenomeno del "buckling" per i tubi, dovuto al "carico termico". In particolare la compensazione di tale fenomeno risulta più complessa per il caso della piastra tubiera fissa.

4. Conclusioni

La finalità del presente lavoro è stata quella di confrontare i codici di calcolo prevalentemente utilizzati dai fabbricanti quali:

- la norma nazionale VSR rev.95 ediz. 99 previgente alla Ped, come integrata dalla recente PdR UNI 55/19;
- la norma armonizzata alla Ped EN 13445-3;
- la normativa ASME VIII, Div. 1 e 2,

nelle edizioni attualmente vigenti. Per il confronto è stato simulato il dimensionamento di uno scambiatore a piastre tubiere fisse. Le differenze significative si riscontrano relativamente al dimensionamento e verifica delle flange e delle piastre tubiere. La normativa VSR, per quanto aggiornata con la PdR UNI 55/19, mostra ancora un divario rispetto all'evoluzione delle norme EN e ASME che sono revisionate con maggiore frequenza. Per le VSR si ritiene quindi opportuno di un intervento di allineamento.

5. Bibliografia

- [1] The European Standards, EN 13445, Unfired Pressure Vessel: Design Part 3: 2019
- [2] Raccolta R revisione 1995, Specifiche tecniche applicative del Decreto Ministeriale 21 novembre 1972 per la verifica della stabilità dei recipienti in pressione, Edizione 1999. I.S.P.E.S.L.
- [3] Raccolta G revisione 1995, Specifiche tecniche applicative del Decreto Ministeriale 1972 per la verifica della stabilità dei generatori di vapore d'acqua, Edizione 1999, I.S.P.E.S.L.
- [4] Raccolta M revisione 1995, Specifiche tecniche applicative del Decreto Ministeriale 1972 riguardanti l'impiego dei materiali nella costruzione degli apparecchi e sistemi in pressione, Edizione 1999, I.S.P.E.S.L.
- [5] Raccolta S revisione 1995, Specifiche tecniche applicative del Decreto Ministeriale 1972 per l'impiego della saldatura nella costruzione e riparazione degli apparecchi e sistemi in pressione, Edizione 1999, I.S.P.E.S.L.
- [6] Comitato Termotecnico Italiano, CTI – R -2/2003, Rev 04/2003, Raccomandazioni CTI per l'uso delle raccolte ISPEL, revisione 1995, nell'ambito della Direttiva CE 97/23.
- [7] Comitato Termotecnico Italiano, CTI – R 2/2005, Rev 05/2005 della R 2/2003, Raccomandazioni CTI per l'uso delle raccolte ISPEL, revisione '95 CTI 2005

- [8] Ente nazionale italiano di unificazione, UNI/PdR 55: 2019, Linee guida per l'applicazione delle raccolte ISPEL VSR-VSG-M-S nell'ambito della Direttiva 2014/68/UE
- [9] ASME (The American Society of Mechanical Engineers) Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels, 07/01/2019
- [10] ASME (The American Society of Mechanical Engineers) Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, sez. VIII Division 2: Alternative Rules, 07/01/2019
- [11] ASME (The American Society of Mechanical Engineers) Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, sez. VIII Division 3 Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels, 07/01/2019
- [12] ASME (The American Society of Mechanical Engineers) Guide for ASME Section VIII Division 1 Stamp Holders - PTB-10 – 2015
- [13] Nirbhay M., Tripathi P., Gupta V.K., Implementation of ASME Codes to Design A Pressure Vessel and To explore the Influence of Various Design Parameters, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 3 Issue 1, January – 2014 ISSN: 2278-0181
- [14] Roman G., Comparative Analysis of Current International Standards for Calculations Flanges Joint with Gasket Inside the Circle Location of the Bolt Holes, Revista de Chimie (Rev. Chim.), 71 (3), 2020, 1-8, <https://doi.org/10.37358/RC.20.3.7963>
- [15] Trieglaff R., Rudolph J., Beckert M., Friers D., Methods for Structural Stress Determination according to EN 13445-3 Annex NA – Comparison with other Codes for Unfired Pressure Vessels, MATEC Web of Conferences, Volume 165 (2018), 12th International Fatigue Congress (FATIGUE 2018) Poitiers Futuroscope, France, May 27 - June 1st, 2018 <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816510003>
- [16] Askestrand F. T., Gudmestad O.T., A comparison study of pressure vessel design using different standards, Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2013 June 9-14, 2013, Nantes, France
- [17] Delaforce R., Comparison of pressure vessel codes. Why do the codes differ and How do they differ?, Webinar 03/24/2011, disponibile on-line <https://pdf4pro.com/docs/en-13445-175564.html>
- [18] Palumbo N. Fondamenti teorici delle formule per il calcolo dei fasciami cilindrici nelle attrezzature a pressione. Confronto tra codici di progettazione, Atti del Convegno SAFAP Roma, 4-6 Aprile 2006
- [19] European Commission, DG Enterprise (Contractors: TÜV Austria (Austria), CEC (Italy)), Comparative Study on Pressure Equipment Standards, Summary, July 2004, disponibile on-line: https://www.unm.fr/medias/files/144_FICHER_0.pdf (consultato il 14/07/2021)
- [20] TEMA 8th Edition of the Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc., 1999
- [21] Wichman K. R., Hopper A. G., Mershon J. L., Welding Research Concil, WRC Bulletin 107(/Revision 1979), Local stresses in spherical and cylindrical shells due to external loadings
- [22] Wichman K. R., Hopper A. G., Mershon J. L., Welding Research Concil, WRC Bulletin 297(/Revision 1987), Local stresses in spherical and cylindrical shells due to external loadings on nozzles
- [23] Mokhtarian K., Endicott J. S., Welding Research Concil, WRC Bulletin 368(1991). Stresses in intersecting cylinders subjected to pressure
- [24] Lidonnici F., Il mondo degli apparecchi a pressione – Le novità del 2019, News Sant'Ambrogio, Editoriale, 7 novembre 2019, disponibile on line: <https://www.sant->

ambrogio.it/il-mondo-degli-apparecchi-a-pressione-le-novita-del-2019/(consultato il 15/07/2021)

[25] Stikvoort. W., "Evaluation of the flange rigidity index J - versus the k - factor approach for large diameter integral type shell girth flanges". American Journal of Engineering Research (AJER), vol. 9(03), 2020, pp. 68-76.. (e-ISSN: 2320-0847 p-ISSN : 2320-0936)

[26] Taylor Forge "Modern Flange Design" Bulletin 502, 7th edition, 1972

[27] Zhu G. D., Qian C. F., Shou B. N., Tube bundle buckling analysis with support effects on tubesheet in heat exchangers, The 2nd International Workshop on Materials Science and Mechanical Engineering, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 504 (2019) 012094, doi:10.1088/1757-899X/504/1/012094

Difetti occulti nella fabbricazione di bombole senza saldatura

L. Bruzzo¹, L. Giacopelli²

¹ Inail – Uot di Livorno

² Italcontrolli s.r.l.

Sommario

La presente memoria vuole evidenziare come alcuni difetti, aventi origine nel ciclo di fabbricazione delle bombole ove si utilizzano tubi come semilavorati di partenza, siano di fatto scarsamente rilevabili dalle prove previste sia in fase di fabbricazione che in fase di ispezione periodica.

1. Introduzione

Le bombole oggetto della presentazione sono state costruite in accordo alla norma UNI EN ISO 9809-1, secondo la quale ogni bombola è stata soggetta alle prove previste dalla norma stessa.

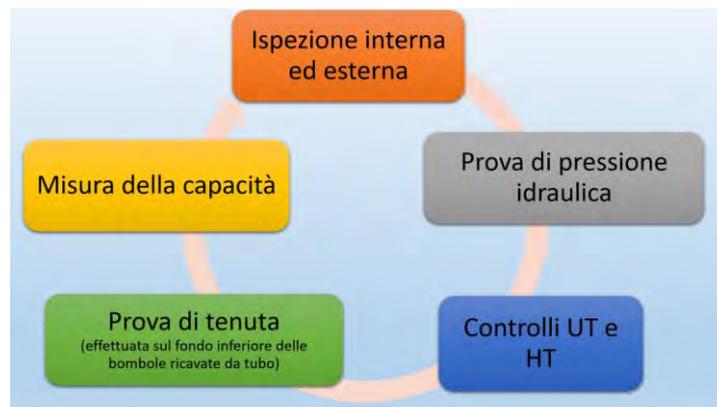


Figura 1. Attività principali fase di costruzione bombole

Di seguito vengono illustrate le fasi di fabbricazione di una bombola.

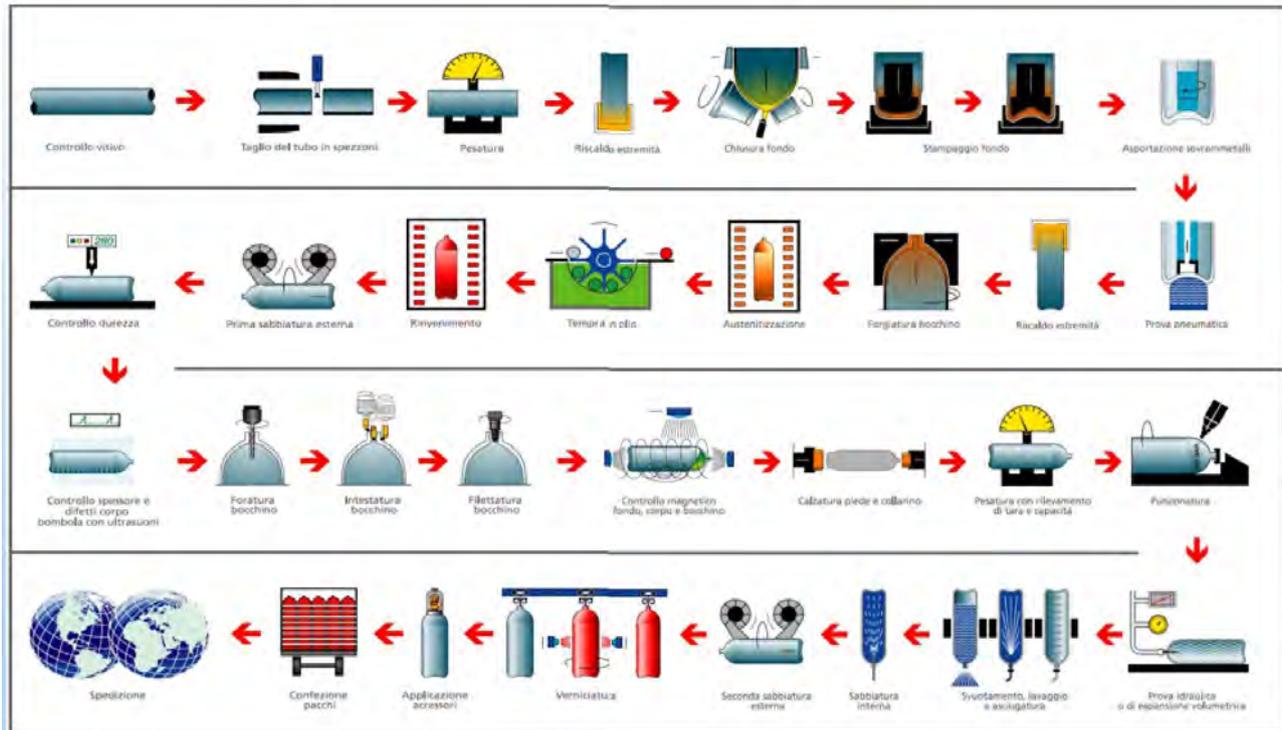


Figura 2. [1]

Una delle fasi più critiche della fabbricazione di bombole costruite da tubo è sicuramente l'ogivatura (Hot Spinning) effettuata sul fondo inferiore.



Figura 3. [2] Macchina per ogivatura (Hot Spinning)

Le bombole oggetto della presentazione sono costruite in 35CrMo4, trattasi di acciaio da bonifica (tempra + rinvenimento) contenente elementi tempranti (Cr-Mo) che hanno lo scopo di favorire la trasformazione, dopo il rinvenimento, della martensite tetragonale in martensite rinvenuta o sorbite in modo da ottenere il miglior compromesso tra caratteristiche meccaniche e tenacità.

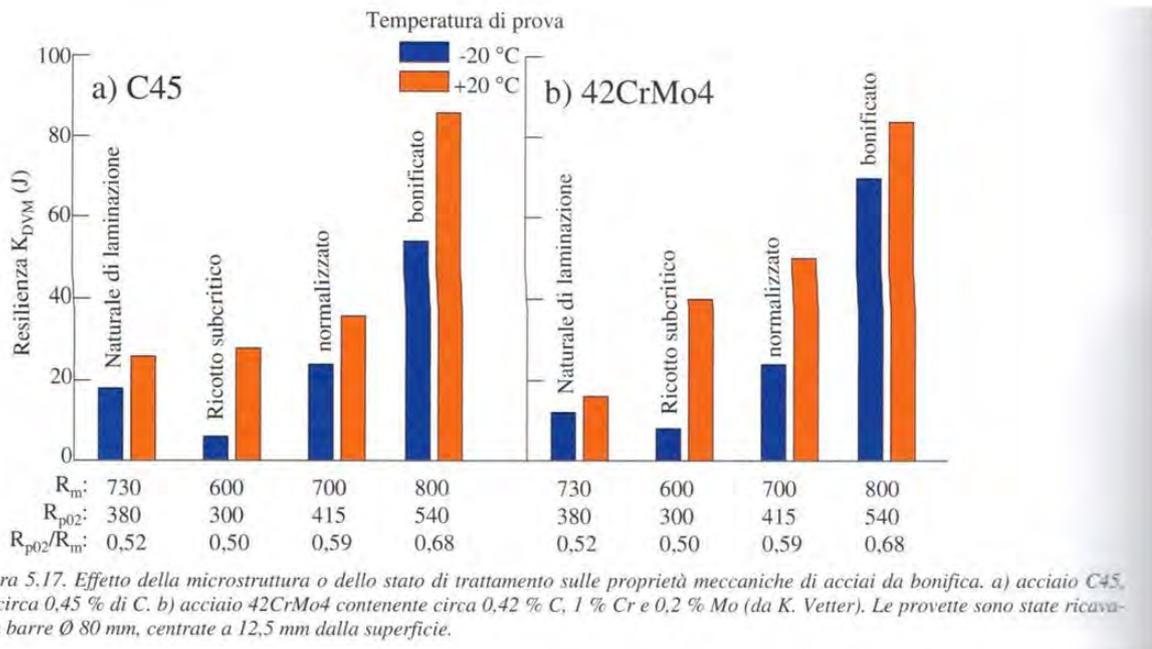


Figura 4. [3] Caratteristiche meccaniche acciai bonificati.

L'ogivatura risulta una operazione equivalente ad una saldatura senza materiale d'apporto ed in considerazione del valore di carbonio equivalente certamente non trascurabile ($C_e \geq 0,75$), presenta alcuni problemi di tipo metallurgico quali la criccabilità a freddo.

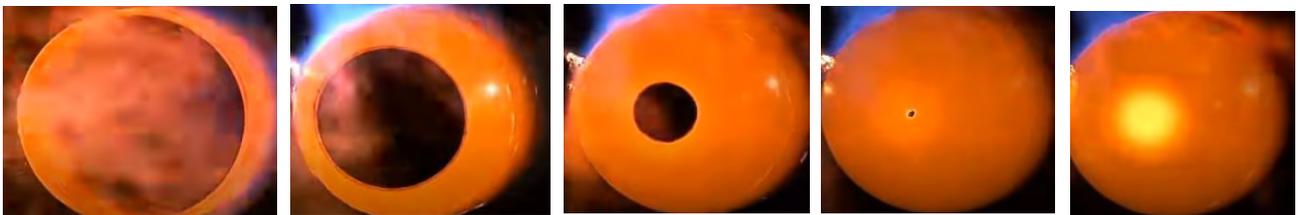


Figura 5. Varie fasi di chiusura del fondo inferiore

La presenza di difetti sui fondi inferiori delle bombole ricavate da tubo, è una problematica nota in ambito normativo internazionale.

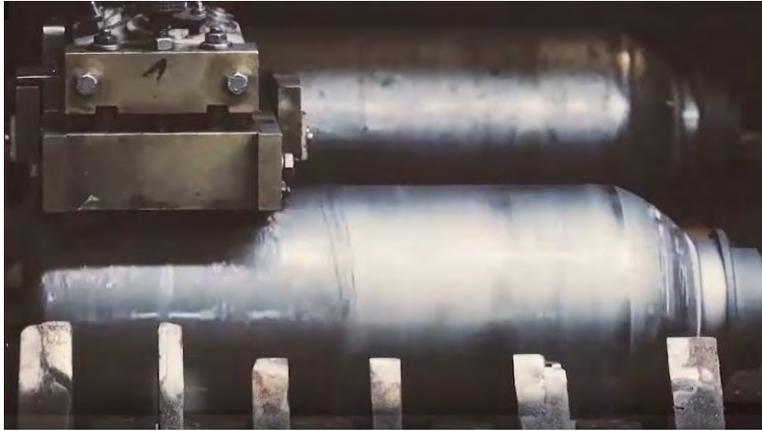
La stessa norma UNI EN ISO 9809-1:2020 prevede, esclusivamente per questa tipologia di bombole, l'effettuazione di una prova di tenuta pneumatica da effettuarsi sul fondo inferiore della bombola tramite un'attrezzatura particolare. Prevede inoltre un controllo UT sulle zone che saranno soggette ad ogivatura prima dell'effettuazione del processo.

Nella prova di tenuta, la pressione di prova deve essere pari ad almeno i 2/3 della pressione di prova idraulica e deve avere una durata di almeno 1 minuto; la zona oggetto della prova deve avere un diametro non inferiore a 20 mm attorno alla chiusura e ricoprire almeno il 6% della superficie di base totale dell'area totale della base. La parte opposta, ricoperta con acqua o da mezzo adatto, deve essere attentamente esaminata per individuare eventuali perdite.



Prova pneumatica

Il paragrafo 8.4 della norma UNI EN ISO 9809-1 obbliga all'effettuazione di un controllo CND UT su ogni bombola alla fine del trattamento termico, tale controllo, effettuato con modalità automatica, garantisce un buon controllo della parte cilindrica ma uno scarso esame del fondo inferiore.



Controllo UT con sonde poste su slitta traslante, bombola in rotazione e acqua utilizzata come mezzo di accoppiamento.

Figura 6. [4]

In aggiunta all'esame ad ultrasuoni previsto nell'appendice B della stessa norma, l'area che sarà oggetto di ogivatura deve essere esaminata ad ultrasuoni prima del processo di formatura per rilevare eventuali difetti.

Allegato B 3.1 della norma UNI EN ISO 9809-1 prevede un controllo aggiuntivo della l'area di transizione tra la parte cilindrica e il fondo della bombola esclusivamente per le bombole a base concava dove possono verificarsi infragilimenti da idrogeno o stress corrosion (vedi ISO 11114-1).

2. Ispezione periodica

L'ispezione periodica è stata effettuata secondo le modalità indicate dalla norma UNI EN 1968:2005, non essendo la nuova norma UNI EN ISO 18119:2018 ancora integralmente recepita in ambito ADR 2021.



Figura 7. Attività principali effettuate nell'ispezione periodica

Le bombole in occasione dell'ispezione periodica non avevano mostrato nessun difetto degno di nota, l'utilizzatore però dovendo, per procedura interna, pesare le bombole sia

dopo il riempimento che dopo le 24 ore successive, notava cali di peso, non accettabili secondo i propri standard.

Le bombole oggetto di calo di peso, sono state sottoposte ad una ulteriore ispezione periodica utilizzando un tempo di prova idraulica superiore rispetto ai 30 secondi previsti dalla norma; l'incremento temporale ed una attenzione mirata ha consentito il rilevamento di micro-perdite poste sul fondo inferiore.

Le perdite purtroppo non erano di entità tale da essere rilevate dalla variazione di pressione leggibile sul manometro.



Figura 8. Aspetto della perdita sul fondo della bombola.

3. Indagini

Sulle bombole sono stati eseguiti dei controlli non distruttivi quali PT (colorati e fluorescenti) e RT digitali che hanno evidenziato la presenza di microcricche posizionate nel centro del fondo, cioè nella zona di unione dei lembi nella fase di ogivatura.

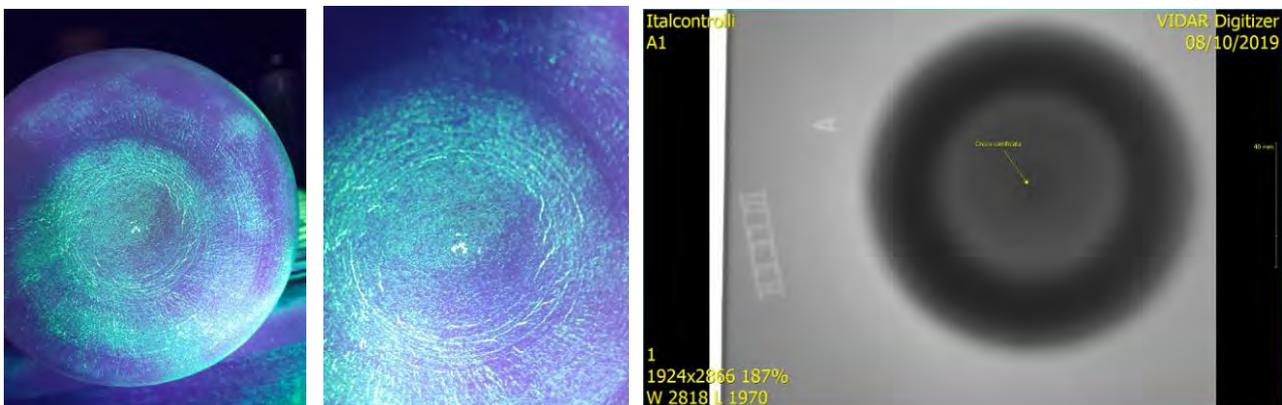


Figura 9. CND con PT fluorescenti

CND con RT digitali

4. Conclusioni

Trattandosi di bombole di recente costruzione (circa 3 anni) sottoposte a pochissimi cicli di carico-scarico, sembra improbabile imputare a problematiche di esercizio l'origine di tali difetti.

Non essendo stati rilevati i difetti dalle prove eseguite in fase di fabbricazione, né dalla prova di tenuta, prevista al paragrafo 11.4 della norma UNI EN ISO 9809-1, e neanche dal controllo UT previsto dal paragrafo 8.4 della stessa norma, si suggerisce di integrare tali prove con "economici" CND superficiali quali i PT, da applicarsi almeno nella zona sottoposta ad

ogivatura, tali CND sarebbero sicuramente in grado di rilevare difetti “passanti” come quelli oggetto della presentazione.

L’ogivatura avviene solitamente in una atmosfera non protetta quindi l’effetto di sovrassaturazione dell’idrogeno associato alla possibile presenza di strutture fuori equilibrio (martensite), aumenta la possibilità di avere fenomeni di criccabilità a freddo. Se il tenore di idrogeno non è così elevato, tali fenomeni si possono verificare con notevole ritardo (fino a 48h) per effetto dei meccanismi di diffusione dell’idrogeno. L’effettuazione del ciclo termico di ciclo di bonifica (tempra + rinvenimento) prima del completo raffreddamento successivo all’operazione di ogivatura, aiuterebbe la diffusione dell’idrogeno fuori dal metallo fuso.

Infine, non essendo la definizione del tipo di semilavorato utilizzato (tubo, lamiera o billetta) indicato nella dichiarazione di conformità ma solo negli allegati «non obbligatori» alla stessa (elenco materiali e elenco prove eseguite), si ritiene utile suggerire che in occasione della revisione della norma UNI EN ISO 13769:2018 afferente la marcatura delle bombole, venga prevista l’aggiunta di un simbolo che consenta, al verificatore che presiede il collaudo idraulico di distinguere rapidamente le bombole ricavate da tubo in modo da porre sulle stesse un’attenzione ed un tempo di prova maggiore.

Tale indicazione risulta già prevista, sulle bombole «americane», dal *Title 49 Transportation - Code of Federal Regulations* (n.d.r. ADR americana), che richiede la punzonatura della dicitura SPUN per distinguere quelle fabbricate tramite l’ogivazione del fondo inferiore (rif. Subpart C - Specifications for Cylinders §178.35 General requirements for specification cylinders).

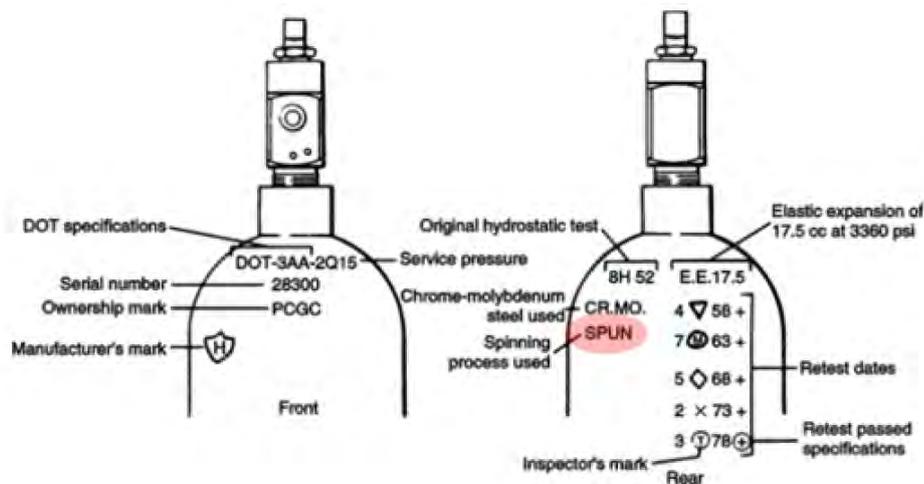


Figura 10. Marcatura bombole secondo *Code of Federal Regulations*

5. Bibliografia

- [1] ciclo produttivo bombole tratto dall’opuscolo informativo del fabbricante Tenaris.
- [2] immagini tratte dal sito internet del fabbricante Repkon
- [3] immagine tratta dal documento Materiali I a cura dell’Ing. Alessandro Berto
- [4] immagine tratte dal sito internet del fabbricante Cylinders Holding.

Gestione in sicurezza delle bombole in pressione, negli ambienti di vita e di lavoro, alla luce della ADR 2021

A. Muratore¹, G. Giannelli¹, V. Nastasi², G. Sferruzza²

¹ Inail - Uot di Como

² Inail - Uot di Palermo

Sommario

In questo lavoro affronteremo l'utilizzo in sicurezza delle bombole in pressione che spesso sono presenti in industrie, attività artigianali, ospedali, abitazioni, mercatini, depositi, ecc. Le cronache sono piene di incidenti derivanti da bombole in pressione di GPL, Ossigeno, Aria, ecc., che tenuto conto della pressione interna provocano quasi sempre incidenti gravi e/o mortali. Partendo dalle varie tipologie di bombole comunemente disponibili, prenderemo in considerazione le norme che regolano le varie fasi di vita delle bombole. In modo sintetico si vogliono dare le indicazioni essenziali, per una corretta gestione in sicurezza di tali recipienti, che tengano conto della costruzione, della immissione sul mercato, del mantenimento in servizio, dei principali fattori di rischio (con particolare riguardo al rischio pressione) nonché delle precauzioni essenziali da adottare sia nei confronti della sicurezza del cittadino che della sicurezza del lavoratore, il tutto alla luce della ADR 2021. In conclusione, viene data una visione dei principali aspetti di cui l'utilizzatore / datore di lavoro deve farsi carico per una corretta gestione delle bombole in pressione, oggetti che spesso si trovano sia negli ambienti di vita che in quelli di lavoro. Inoltre si evidenzia che negli ambienti di lavoro in aggiunta a quanto previsto negli ambienti di vita, essendo le bombole in pressione equiparate a tutti gli effetti ad attrezzature di lavoro, il datore di lavoro deve riscontrare le stesse tenendo conto anche del D.Lgs. n. 81/2008.

1. Diverse tipologie di parchi bombole

Le bombole sono delle attrezzature a pressione trasportabili (recipienti a pressione) con capacità inferiore a 150 litri.

Prima di entrare nel merito degli aspetti evidenziati in premessa è opportuno puntualizzare che ad oggi e ancora per qualche decennio l'utilizzatore / datore di lavoro si troverà a gestire, con modalità differenti, le diverse tipologie di parchi di bombole in pressione. Infatti l'utilizzatore / datore di lavoro può utilizzare negli ambienti di vita / luoghi di lavoro, bombole costruite e immesse sul mercato:

a) secondo la vecchia normativa (DM 12/9/1925 e successive serie di Norme Integrative e R.D. 12/05/1927 n. 824, fino all'entrata in vigore della prima direttiva europea Tped). Esse rispondono a criteri di costruzione ed omologazioni previsti dal prima citato DM e possono essere revisionati solo da INAIL (ex ISPESL) o da Organismi Notificati nazionali (per i dettagli si rimanda al Decreto delle Infrastrutture e dei trasporti del 18/06/2015, GU n 159 del 11/7/2015). Su di esse vi è una marcatura di riconoscimento "RI" (Repubblica Italiana) con stella. Possono essere riempite solo sul territorio nazionale;

b) in conformità alla prima direttiva europea di prodotto "TPED" (Transportable Pressure Equipment Directive – direttive 1999/36/CE, 2001/2/CE e della decisione 2001/107/CE) che è stata recepita in Italia con il D.Lgs. n. 23 del 2 febbraio 2002 ed entrata in vigore il 1 luglio 2003; Successivamente a partire dal 1 luglio 2011, in conformità alla nuova e attualmente vigente direttiva europea di prodotto "TPED" (Transportable Pressure

Equipment Directive, 2010/35/UE), che è stata recepita nell'ordinamento Italiano con il D. Lgs. 12 giugno 2012 n. 78.

Possono rientrare tra i recipienti Tped anche le bombole costruite secondo normativa italiana ma rivalutabili per caratteristiche tecniche e costruttive alla Tped. I recipienti Tped hanno la marcatura di riconoscimento: "π". Essi possono essere revisionati da Enti notificati internazionali e gli stessi possono essere riempiti anche in altri Paesi contraenti ADR;

c) in conformità alla direttiva PED, 97/23/CE (recepita dal D.Lgs. 93/2000) modificata dalla nuova direttiva PED, 2014/68/UE (recepita dal D.Lgs. 26/2016). In questa tipologia rientrano le bombole per apparecchi respiratori e gli estintori portatili (con peso fino a 20 Kg).

In accordo alla classificazione degli estintori portatili d'incendio, questi vengono definiti come estintori progettati per essere trasportati e azionati a mano di peso non maggiore di 20 Kg in condizioni operative. Gli estintori portatili, così come i diffusori di aerosol, gli autorespiratori subacquei, e gli apparecchi respiratori in materiale composito, sono esclusi dalla TPED. Ne consegue che gli estintori di peso maggiore di 20 Kg sono assoggettati alla direttiva TPED così come quelli impiegati negli impianti antincendio come fissi e non azionati a mano (Guidelines PED n A/36).

Al fine di rispettare le indicazioni editoriali inerenti il numero di pagine, nel presente articolo vengono trattate le tipologie di bombole più diffuse e non vengono trattate alcune tipologie di bombole meno diffuse, anche se di indubbio interesse tecnologico, quali per esempio: bombole sovrastampate, bombole in materiale composito, ecc...

2. Bombole in pressione nei luoghi di lavoro

Nel campo degli ambienti di lavoro, le bombole si configurano generalmente come attrezzature di lavoro, cui è applicabile l'art. 70 del D.Lgs. n. 81/2008, infatti al comma 1 lo stesso articolo evidenzia: "Il datore di lavoro mette a disposizione dei lavoratori attrezzature conformi ai requisiti di cui all'articolo precedente, idonee ai fini della salute e sicurezza e adeguate al lavoro da svolgere o adattate a tali scopi che devono essere utilizzate conformemente alle disposizioni legislative di recepimento delle Direttive comunitarie.", mentre al comma 2 evidenzia: "All'atto della scelta delle attrezzature di lavoro, il datore di lavoro prende in considerazione: a) le condizioni e le caratteristiche specifiche del lavoro da svolgere; b) i rischi presenti nell'ambiente di lavoro; c) i rischi derivanti dall'impiego delle attrezzature stesse; d) i rischi derivanti da interferenze con le altre attrezzature già in uso." Al comma 3 riporta: "Il datore di lavoro, al fine di ridurre al minimo i rischi connessi all'uso delle attrezzature di lavoro e per impedire che dette attrezzature possano essere utilizzate per operazioni e secondo condizioni per le quali non sono adatte, adotta adeguate misure tecniche ed organizzative, ...".

Bisogna altresì evidenziare che le bombole in pressione non rientrano nella disciplina delle verifiche periodiche ai sensi dell'art. 71 del D.Lgs. n. 81/2008, in quanto non elencate nell'allegato VII del medesimo decreto. Per esse sono previste delle revisioni come evidenziato nei paragrafi successivi.

Infine trattandosi di attrezzature di lavoro, le bombole devono essere poste sotto attenzione in merito a tutti i fattori di rischio che possono impattare sulla sicurezza e salute dei lavoratori; gli stessi devono essere considerati nel Documento di Valutazione dei Rischi "DVR" (art. 28 del D.Lgs. n. 81/2008).

3. Direttiva quadro trasporto interno di merci pericolose

Nel campo specifico delle attrezzature a pressione trasportabili, il Parlamento Europeo ha definitivamente approvato la Direttiva Quadro 2008/68/CE del 24 settembre 2008, relativa al trasporto interno di merci pericolose recepita in Italia con il D.Lgs. 27 gennaio 2010 n. 35, abrogando le direttive 94/55/CE, 96/49/CE, 96/35/CE e 2000/18/CE.

Il D.Lgs. 27 gennaio 2010 n. 35 in merito al campo di applicazione evidenzia che (art. 1):

— si applica al trasporto di merci pericolose fatto su strada, per ferrovia o per via navigabile interna, sia all'interno dello Stato nazionale che tra gli Stati della Comunità europea, alle operazioni di carico e scarico, al trasferimento da un modo di trasporto ad un altro ed alle soste rese necessarie dalle condizioni di trasporto.

— non si applica al trasporto di merci pericolose fatto:

a) mediante veicoli, vagoni o unità navali che appartengono alle forze armate o che si trovano sotto la responsabilità di queste ultime ovvero mediante navi in servizio governativo non commerciale;

b) mediante unità navali adibite alla navigazione marittima su vie navigabili marittime che si estendono nelle vie navigabili interne;

c) mediante traghetti che effettuano soltanto l'attraversamento di una via navigabile interna o di un porto; oppure

d) interamente all'interno del perimetro di un'area chiusa.

Ai fini del D.Lgs. 35/2010 si intende per (art. 2):

a) ADR: l'accordo europeo relativo al trasporto internazionale delle merci pericolose su strada, concluso a Ginevra il 30 settembre 1957, e successive modificazioni;

b) RID: il regolamento relativo al trasporto internazionale delle merci pericolose per ferrovia, che figura come appendice C alla convenzione sul trasporto internazionale per ferrovia (COTIF), conclusa a Vilnius il 3 giugno 1999, e successive modificazioni;

c) ADN: l'accordo europeo relativo al trasporto internazionale delle merci pericolose per vie navigabili interne, concluso a Ginevra il 26 maggio 2000, e successive modificazioni.

Ai sensi dell'art. 5 del D.Lgs. 35/2010, con provvedimento dell'amministrazione, sono recepite le direttive comunitarie concernenti adeguamento al progresso scientifico e tecnico della materia del trasporto di merci pericolose su strada, per ferrovia o per via navigabile interna recanti modifiche:

— degli allegati A e B dell'ADR;

— dell'allegato del RID, che figura come appendice C della COTIF;

— dei regolamenti allegati all'ADN.

Sulla Gazzetta Ufficiale n. 34 del 10 febbraio 2021 è stato pubblicato il Decreto 13 gennaio 2021 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti intitolato "Recepimento della direttiva (UE) 2020/1833 della Commissione, che modifica gli allegati della direttiva 2008/68/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio relativa al trasporto interno di merci pericolose". Con tale decreto si stabilisce che, a partire dal 1° luglio 2021, i trasporti nazionali, stradali, ferroviari e per le vie di navigazione interna, di merci pericolose devono essere conformi alle disposizioni contenute nelle rispettive edizioni 2021.

I fluidi contenuti nelle attrezzature a pressione trasportabili sono i gas di cui alla classe 2 come riportati nella Parte 2.1.1.1. "Classificazione" dell'ADR 2021. La classe 2

comprende i gas puri, le miscele di gas, le miscele di uno o più gas con una o più altre materie e gli oggetti contenenti tali materie.

I gas sono definiti come quelle materie che a 50°C, hanno una tensione di vapore maggiore di 300 kPa (3 bar) o sono completamente gassose a 20°C alla pressione standard di 101,3 kPa.

In Tabella 1 si riportano le merci pericolose per classi ai sensi dell'ADR 2021.

Classificazione trasporto merci pericolose (2.1.1.1. ADR)	
Classe 1	Materie ed oggetti esplosivi
Classe 2	Gas
Classe 3	Liquidi infiammabili
Classe 4.1	Solidi infiammabili, materie autoreattive, materie che polimerizzano e esplosivi solidi desensibilizzati
Classe 4.2	Materie soggette ad accensione spontanea
Classe 4.3	Materie che a contatto con l'acqua sviluppano gas infiammabili
Classe 5.1	Materie comburenti
Classe 5.2	Perossidi organici
Classe 6.1	Materie tossiche
Classe 6.2	Materie infettanti
Classe 7	Materiale radioattivo
Classe 8	Materie corrosive
Classe 9	Materie ed oggetti pericolosi diversi

Tabella 1. Classi merci pericolose – ADR 2021

In particolare, le materie e gli oggetti della Classe 2, nella sezione 2.2.2, sono ripartiti nelle seguenti categorie:

- 1) Gas compressi (temperatura critica $\leq -50^{\circ}\text{C}$)
- 2) Gas liquefatti (temperatura critica $> -50^{\circ}\text{C}$):
 - Gas liquefatti ad alta pressione (temperatura critica $> -50^{\circ}\text{C}$ e $\leq +65^{\circ}\text{C}$)
 - Gas liquefatti a bassa pressione (temperatura critica $> +65^{\circ}\text{C}$)
- 3) Gas liquefatti refrigerati
- 4) Gas disciolti sotto pressione
- 5) Generatori di aerosol e cartucce di gas
- 6) Altri oggetti contenenti gas sotto pressione
- 7) Gas non compressi sottoposti a prescrizioni speciali (campioni di gas)
- 8) Prodotti chimici sotto pressione
- 9) Gas adsorbito

Alle materie in ADR è assegnato un codice di classificazione del pericolo costituito da una o più lettere in caso di pericolo multiplo, come riportato nella Tabella 2.

Codici di classificazione (2.2 ADR)	
A	asfissiante
C	corrosivo
D	esplosivo desensibilizzato
F	infiammabile
I	infettanti
M	miscelaneo (pericolo generico)
O	comburente
P	perossido organico
S	accensione spontanea
SR	autoreattivo
T	tossico
W	reattivo con l'acqua

Tabella 2. Codici di classificazione – ADR 2021 (punto 2.2.2.1.3)

Per i gas, si ha:

1A) gas compresso asfissiante (es. Azoto, Argon, Miscela Argon/Diossido di carbonio, ecc.)

1O) gas compresso comburente (es. ossigeno ecc.)

3A) gas liquefatti refrigerati asfissianti (es. azoto liquido)

4F) gas disciolto sotto pressione infiammabile (es. acetilene)

2TOC) gas liquefatto tossico comburente corrosivo (es. cloro)

4. Attrezzature a pressione trasportabili

La nuova direttiva europea di prodotto “TPED” (Transportable Pressure Equipment Directive), 2010/35/UE a partire dal 1 luglio 2011, che è stata recepita nell’ordinamento Italiano con il Decreto Legislativo 12 giugno 2012 n. 78, disciplina le attrezzature a pressione trasportabili, al fine di migliorare la sicurezza e garantire la libera circolazione di tali attrezzature nell'Unione europea, e si applica:

a) alle nuove attrezzature a pressione trasportabili di nuova fabbricazione (Nuova TPED), definite nell'articolo 2, comma 1, che non recano i marchi di conformità di cui alle direttive 84/525/CEE, 84/526/CEE e 84/527/CEE, recepite con il decreto del Ministro dei trasporti 7 aprile 1986, o alla direttiva 1999/36/CE, attuata con decreto legislativo 2 febbraio 2002, n. 23, per quanto riguarda la messa a disposizione sul mercato di tali attrezzature;

b) alle attrezzature a pressione trasportabili definite nell'articolo 2, comma 1, che recano i marchi di conformità alla direttiva 2010/35/UE, o alle direttive 84/525/CEE, 84/526/CEE e 84/527/CEE, recepite con il decreto del Ministro dei trasporti 7 aprile 1986, o alla direttiva 1999/36/CE (Prima TPED), attuata con decreto legislativo 2 febbraio 2002, n. 23, per quanto riguarda le ispezioni periodiche, le ispezioni intermedie, le verifiche straordinarie e l'uso di tali attrezzature;

c) alle attrezzature a pressione trasportabili definite nell'articolo 2, comma 1, che non recano i marchi di conformità di cui alla direttiva 1999/36/CE (Prima direttiva TPED), attuata con decreto legislativo 2 febbraio 2002, n. 23, per quanto riguarda la rivalutazione della conformità.

La direttiva 2010/35/UE – nuova TPED (che ha sostituito la precedente direttiva TPED 1999/36/CE) stabilisce le regole e le modalità da seguire obbligatoriamente per la certificazione delle attrezzature a pressione trasportabili. L’applicazione di detta direttiva si concretizza attraverso il rispetto dei requisiti stabiliti nella direttiva 2008/68/CE (vista

nel paragrafo precedente e che tratta il trasporto interno di merci pericolose) e, in base a quanto applicabile, negli accordi internazionali delle merci pericolose su strada (ADR), al regolamento europeo relativo al trasporto internazionale delle merci pericolose per ferrovia (RID) e all'accordo europeo relativo al trasporto internazionale delle merci pericolose per vie navigabili interne (ADN).

Il D.Lgs. 78/2012, non si applica alle attrezzature a pressione trasportabili immesse sul mercato in data antecedente al 9 marzo 2002 o alle date antecedenti a quelle previste dall'articolo 15 del decreto legislativo 2 febbraio 2002, n. 23, che non sono state sottoposte ad una rivalutazione della conformità e a quelle utilizzate esclusivamente per operazioni di trasporto di merci pericolose tra gli Stati membri dell'Unione europea e Paesi terzi, fatte ai sensi dell'articolo 4 del decreto legislativo 27 gennaio 2010, n. 35, di attuazione della direttiva 2008/68/CE.

Ai fini del D.Lgs. 78/2012 (art.2) si intende per:

a) attrezzature a pressione trasportabili:

1) tutti i recipienti a pressione, i loro rubinetti e gli altri accessori, se presenti, di cui al punto 6.2 degli allegati alla direttiva 2008/68/CE, se utilizzati conformemente a tali allegati per il trasporto di gas della classe 2. I recipienti per gas - Classe 2 ADR (Cap. 6.2) comprendono:

- Bombe (capacità fino a 150 litri);
- Tubi senza saldatura o in materiale composito (capacità da 150 a 3.000 litri);
- Fusti a pressione (capacità da 150 a 1.000 litri);
- Recipienti criogenici chiusi (capacità fino a 1.000 litri);
- Recipienti criogenici aperti (mantenuto alla pressione atmosferica, capacità fino a 1.000 litri);
- Pacchi di bombe (capacità fino a 3.000 litri oppure fino a 1.000 litri per gas tossici);
- Dispositivi di stoccaggio ad idruro metallico;
- Recipiente a pressione di soccorso (fino a 3.000 litri di capacità).

2) le cisterne, i veicoli e vagoni batteria, i contenitori per gas a elementi multipli (MEGC), i loro rubinetti e altri accessori, se presenti, di cui al punto 6.8 degli allegati alla direttiva 2008/68/CE, se utilizzati conformemente a tali allegati per il trasporto di gas della classe 2.

Occorre evidenziare che in questo lavoro ci si occupa solamente delle bombe in pressione con capacità fino a 150 litri.

5. Recipienti di trasporto gas – Bombe GPL

Le bombe GPL (normalmente in acciaio saldate, non superiori a 150 litri di capacità) devono essere realizzate e mantenute in efficienza in modo che ne sia garantita la sicurezza durante le operazioni di trasporto e in occasione dell'utilizzo finale presso l'utilizzatore/datore di lavoro.

Sono soggette a revisione le bombe:

a) certificate dagli organismi preposti secondo una specifica normativa nazionale (bombe vecchio parco, DM 12/9/1925 e successive serie di Norme Integrative);

b) quelle certificate ai sensi delle direttive europee recepite in Italia dal D.Lgs. 2 febbraio 2002 n. 23 (prima direttiva Tped) e dal D.Lgs. 12 giugno 2012 n. 78 (nuova e vigente direttiva Tped).

5.1. Bombole GPL, vecchio parco

Per le bombole GPL vecchio parco le revisioni sono condotte secondo le modalità del DM 12 settembre 1925 e successive Norme Integrative, in particolare le stesse sono sottoposte alle seguenti attività di revisione:

- 1) visita esterna nella quale dovrà essere assicurato che i recipienti stessi non presentino segni di falle, fenditure e/o ammaccature (che possono incidere significativamente sul volume delle bombole). Nel caso di recipienti saldati la maggiore attenzione deve essere rivolta all'esame delle saldature;
- 2) prova di pressione idraulica.

Conseguentemente alle prove viene emessa una certificazione cumulativa che individua il fabbricante, il numero di fabbrica di ciascuna bombola e l'anno di costruzione di ciascun recipiente, riportando il periodo di ulteriore esecrabilità del recipiente sino alla scadenza della successiva revisione periodica (31 dicembre del decimo anno successivo al collaudo). Al termine della procedura di revisione sono punzonate sulla ghiera le ultime due cifre dell'anno di collaudo, seguite dalla stella RI (Repubblica Italiana).

Tali revisioni vengono eseguite da INAIL (ex ISPESL) o da Organismi Notificati nazionali (per i dettagli si rimanda al Decreto delle Infrastrutture e dei trasporti del 18/06/2015, GU n 159 del 11/7/2015).

5.2. Bombole GPL, TPED

Per le bombole costruite secondo la TPED la revisione viene fatta secondo le disposizioni della norma EN 1440:2016 fino al 31 dicembre 2021 e delle norme EN 1440:2016 + A1:2018 + A2:2020 dal 1 gennaio 2022, espressamente indicate nell'ADR 2021 secondo la tabella 6.2.4.2 "controlli e prove periodici". In funzione della tipologia di bombola è riportata la norma tecnica EN che fornisce le indicazioni sulle prove da fare in sede di revisione; per il GPL la norma è la UNI EN 1440:2016. Qualora vi sia conflitto tra la norma indicata e le disposizioni dell'ADR prevalgono sempre le disposizioni di quest'ultimo (p.to 1.1.5 ADR 2021). L'attività di revisione si articola:

- 1) ispezione visiva esterna;
- 2) ispezione visiva interna;
- 3) prova di pressione;
- 4) controllo delle filettature del collare e della valvola;
- 5) controllo degli equipaggiamenti di servizio (Valvole, ecc.).

È prevista la possibilità per le bombole in acciaio saldate e ricaricabili, utilizzate per il trasporto GPL, di essere esentate dall'obbligo della ispezione visiva interna, la cui deroga prevista dall'ADR (p.to 1.5.1), è contemplata dall'accordo multilaterale M308. La circolazione delle bombole, verificate secondo l'Accordo M308 è limitata esclusivamente ai Paesi firmatari (Italia e Francia).

Conseguentemente alle prove viene emessa una certificazione (anche cumulativa) purché le bombole appartengano allo stesso proprietario con l'indicazione della scadenza della revisione periodica successiva. Vengono punzonati l'identificativo dell'Organismo Notificato e la data del collaudo.

Per quanto riguarda la periodicità di revisione in accordo alla tipologia di merce pericolosa (GPL), l'istruzione di imballaggio applicabile è la P200. In detta istruzione tra le altre cose è indicata la periodicità di revisione (GPL, 10 anni) e la pressione di prova idraulica (GPL 30 bar).

Inoltre sia per le bombole del vecchio parco che per quelle fabbricate secondo la Tped, la periodicità della revisione può essere estesa a 15 anni dietro precise condizioni imposte dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT), in conformità alle disposizioni contenute nella istruzione di imballaggio P200 dell'ADR ed. 2021 (disposizioni sostanzialmente invariate rispetto alla edizione dell'ADR precedente).

In Italia, a seguito dell'emanazione del DM n. 585 del 21 dicembre 2017 ed alla sottoscrizione dell'Addendum alla Convenzione tra il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti e ACCREDIA del 09 giugno 2020, con il quale viene precisato che l'Accreditamento costituisce un prerequisito obbligatorio per il rilascio dell'Abilitazione da parte dello stesso Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, vengono, di fatto, rese operative le disposizioni di cui all'art. 6 del DM n. 585 del 21 dicembre 2017 per l'ottenimento da parte degli Organismi Notificati dell'Autorizzazione all'estensione della periodicità di revisione delle bombole da 10 a 15 anni.

6. Bombole in un sol pezzo contenenti aria, azoto, ossigeno, idrogeno, protossido di azoto, acetilene

Tenuto conto della elevata pressione interna delle bombole che contengono aria, azoto, ossigeno, idrogeno, protossido di azoto, acetilene, ecc., le stesse sono costruite in un sol pezzo senza saldature (Art. 4 DM 12 settembre 1925). Anche queste tipologie di recipienti devono essere realizzati e mantenuti in efficienza in modo che ne sia garantita la sicurezza durante le operazioni di trasporto e in occasione dell'utilizzo finale presso l'utilizzatore / datore di lavoro.

6.1. Bombole vecchio parco

Per le bombole che contengono aria, azoto, ossigeno, idrogeno, protossido di azoto, acetilene, ecc., vecchio parco, le revisioni sono condotte secondo le modalità del DM 12 settembre 1925 e successive serie "Norme integrative", in particolare le stesse sono sottoposte alle seguenti attività di revisione:

- 1) visita esterna ed interna nella quale dovrà essere assicurata che i recipienti stessi non presentino segni di falle o fenditure;
- 2) prova di pressione idraulica;
- 3) determinazione del peso a vuoto in chilogrammi (tara).

Conseguentemente alle prove viene emesso un certificato cumulativo di revisione che individua tra l'altro, il fabbricante, il numero di fabbrica di ciascuna bombola e l'anno di costruzione di ciascun recipiente, riportando il periodo di ulteriore esecrabilità del recipiente sino alla scadenza della successiva revisione periodica. Al termine della procedura di revisione viene punzonata sull'ogiva la data di revisione, tra le stelle "RI".

Tali revisioni vengono eseguite da INAIL (ex ISPESL) o da Organismi Notificati nazionali (per i dettagli si rimanda al Decreto delle Infrastrutture e dei trasporti del 18/06/2015, GU n 159 del 11/7/2015)

6.2. Bombole TPED

Per le bombole di cui al presente paragrafo costruite secondo la TPED la revisione viene fatta secondo le disposizioni della norma EN 1968:2002 + A1:2005 fino al 31 dicembre 2022, espressamente indicata nell'ADR 2021 secondo la tabella 6.2.4.2 "controlli e prove periodici". Qualora vi sia conflitto tra la norma indicata e le disposizioni dell'ADR prevalgono sempre le disposizioni di quest'ultimo (p.to 1.1.5 ADR 2021). L'attività di revisione si articola:

- 1) ispezione visiva esterna;

- 2) ispezione visiva interna;
- 3) prova di pressione;
- 4) nella determinazione del peso a vuoto in chilogrammi (tara);
- 5) controllo delle filettature del collare e della valvola;
- 6) ispezione della valvola;
- 7) eventuali prove suppletive.

Conseguentemente alle prove viene emessa una certificazione cumulativa purché le bombole appartengono allo stesso proprietario con l'indicazione della scadenza della revisione periodica successiva. Vengono punzonati l'identificativo dell'organismo notificato e la data del collaudo.

Per quanto riguarda la periodicità di revisione in accordo alla tipologia di merce pericolosa, l'istruzione di imballaggio applicabile è la P200. In detta istruzione tra le altre cose è indicata la periodicità di revisione (10 anni per: aria, azoto, ossigeno, idrogeno, protossido di azoto, acetilene) e la pressione di prova idraulica.

7. Fattori di rischio connessi all'utilizzo delle bombole

Di seguito vengono riportati i principali fattori di rischio a cui l'utilizzatore / datore di lavoro deve porre attenzione al fine di tenere gli stessi entro i limiti di accettabilità. In particolare negli ambienti di lavoro la presenza di bombole in pressione deve essere evidenziata nel Documento di Valutazione dei Rischi - DVR (art. 28 del D.Lgs. n. 81/2008).

a) Rischio caduta bombole

Bombole di grossa taglia possono investire le persone e procurare lesioni. Le cause possono essere principalmente dovute a:

- Perdita di presa della bombola da parte dell'operatore durante la movimentazione manuale (scorretto modo di rotazione);
- Suoli sconnessi (presenza di buche, dislivelli, ecc.);
- Sosta nei passaggi (improvvisa collisione con cose e/o persone);
- Sollevamento dal cappello (soprattutto quando non è ben avvitato sul collare);
- Carico e scarico dai mezzi di trasporto (quando il carico è sfuso).

Le conseguenze di una caduta accidentale possono essere aggravate dalla fuoriuscita del gas contenuto (pressione) se le bombole cadono con la valvola aperta o con il regolatore di pressione collegato. In questo caso la pressione del gas imprimerà al recipiente un pericoloso movimento rotatorio su sé stesso che difficilmente potrà essere arrestato. Quando sarà cessata l'azione della pressione, la bombola si sposterà in maniera incontrollata rovinando su cose o persone.

b) Rischio perdite di gas

Si tratta di fughe attraverso il collegamento valvola/bocchello o attraverso il raccordo di erogazione del gas. Le cause possono essere principalmente dovute a:

- Sopravvenuti difetti di tenuta sul bocchello in seguito alle sollecitazioni meccaniche sopportate durante il trasporto;
- Rottura della valvola in seguito a caduta della bombola sprovvista di cappello;
- Difetti di tenuta sulla valvola.

c) Rischio rottura delle bombole

Esposto al calore, qualsiasi recipiente può rompersi se raggiunge la pressione di scoppio e può rilasciare una notevole quantità di energia. Le cause possono essere principalmente dovute a sovrappressione dovuta all'esposizione al calore dei recipienti (fiamme, calore radiante, punti caldi, ecc.).

d) Rischio infragilimento del materiale

Il materiale può subire modifiche strutturali e cristalline in seguito all'esposizione alle basse temperature. I recipienti in acciaio si possono utilizzare sino a temperature naturali

di -20°C . Questo tipo di inconveniente è anche connesso con l'erogazione forzata oltre misura dei gas liquefatti.

e) Rischio interazione dei gas con l'ambiente di lavoro

I gas a differenza delle sostanze solide e/o liquide, non sono accatastabili, impilabili o segregabili in fusti. Essi vengono prodotti e utilizzati in circuiti chiusi. Pertanto i rilasci di gas non voluti provengono o da difetti di tenuta delle tubazioni e dei contenitori o da rotture degli stessi per cedimenti alla pressione e alle sovrappressioni generate da accensioni interne.

Questi gas possono interagire con l'ambiente di lavoro creando rischi potenziali di diversa natura:

- atmosfere sottossigenate: si formano in seguito a rilasci e accumuli di gas diversi dall'ossigeno soprattutto negli spazi non aerati, per cui l'atmosfera non è più idonea alla respirazione (limite di sicurezza dell'ossigeno: 18%);
- atmosfere sovraossigenate: si formano in seguito a rilasci e accumuli di ossigeno soprattutto negli spazi non aerati. L'aumento del tenore di ossigeno può provocare fenomeni di incendio e/o esplosione (limite di sicurezza dell'ossigeno: 23%);
- atmosfere esplosive: si formano in seguito a rilasci e accumuli di gas infiammabili quando superano i limiti di infiammabilità;
- atmosfere tossiche: si formano in seguito a rilasci e accumuli di gas tossici mettendo a repentaglio la salubrità dell'ambiente di lavoro.

f) Rischi in caso di incendio

Procedure da seguire in presenza di gas infiammato da bombole:

- per prima cosa occorre se possibile eliminare la perdita agendo sulle apposite valvole di intercettazione;
- se ciò non fosse possibile perché l'incendio interessa le valvole stesse, prima di intervenire è necessario considerare che ad estinzione avvenuta il gas in fuga invaderà l'ambiente in cui si trova la perdita con possibilità di raggiungere concentrazioni pericolose che possono condurre ad una esplosione [vedi punto e) di sopra];
- spegnendo la fiamma di gas con estintore è necessario erogare il getto in modo che la sostanza estinguente segua la stessa direzione della fiamma. Non tagliare trasversalmente né colpire frontalmente la fiamma.

8. Controlli

Controllare periodicamente che le bombole di gas siano immagazzinate, trasportate ed utilizzate correttamente, secondo quanto indicato nelle precauzioni essenziali da adottare. Verificare inoltre che la detenzione dei quantitativi di bombole in giacenza, non superi la capienza massima ammissibile per quella tipologia di gas.

9. Conclusioni

In sintesi nella presente memoria, si è voluto dare una visione dei principali aspetti di cui l'utilizzatore / datore di lavoro deve farsi carico per una corretta gestione delle bombole in pressione che spesso si trovano sia negli ambienti di vita che in quelli di lavoro.

Partendo dalle varie tipologie di bombole che si utilizzano, bisogna prendere in considerazione le norme che ne hanno regolato la costruzione e la relativa immissione sul mercato.

Successivamente bisogna verificare se le bombole che si utilizzano per quanto riguarda il mantenimento in servizio siano state sottoposte a regolare revisione e che la stessa sia in corso di validità. Ricordando di non utilizzare mai bombole con revisione scaduta.

È stato evidenziato che negli ambienti di lavoro, essendo le bombole equiparate a tutti gli effetti ad attrezzature di lavoro, il datore di lavoro, in aggiunta a quanto detto sopra, deve riscontrare le stesse tenendo conto anche del D. Lgs. n. 81/2008.

Inoltre quanto sopra descritto è stato esaminato e proposto alla luce della ADR 2021.

10. Bibliografia

[1] D. Lgs. 25/02/2000, n. 93: “Attuazione della Direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione” (PED);

[2] D. Lgs. 12/06/2012 n.78 “Attuazione della Direttiva 2010/35/UE in materia di attrezzature a pressioni trasportabili” (TPED);

[3] Decreto 1/12/2004, n. 329 “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all’art. 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93”;

[4] D. Lgs. 15 febbraio 2016, n. 26, “Attuazione della Direttiva 2014/68/UE” (nuova PED);

[5] Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81, Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. (GU Serie Generale n.101 del 30-04-2008 - S. O. n. 108);

[6] D. Lgs. 27 gennaio 2010 n 35 “Attuazione Direttiva Quadro 2008/68/CE del 24 settembre 2008, relativa al trasporto interno di merci pericolose “;

[7] V. Nastasi, «Manuale Sicurezza Lavoro», Ed. Grafill;

[8] Lettera Circolare n. 1/2006 del 25 maggio 2006 – INAIL/DIT. “Bombole per auto respirazione contenenti aria compressa, estintori portatili e bombole certificate come recipienti fissi ricadenti in ambito TPED. Ispezioni periodiche”;

[9] ADR 2021 - Accordo europeo relativo ai trasporti internazionali di merci pericolose su strada (ADR) – ARS Edizioni informatiche srl;

[10] DM n. 585 del 21 dicembre 2017 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti;

[11] Circolare tecnica DC N° 03/2021 - Requisiti di accreditamento di Organismi di Ispezione e Organismi di certificazione del Sistema di Gestione per la qualità, ai sensi del Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 585 del 21/12/2017, per l’ottenimento dell’Autorizzazione all’estensione della periodicità di revisione delle bombole da 10 a 15 anni – ACCREDIA.

Anomali deterioramenti di bombole non saldate costruite sia secondo il DM 12.09.1925 e sia secondo Direttiva TPED

N. Altamura¹, V. Galasso², A. Mele², R. Acerboni³, O. Di Donato⁴

¹ Inail - Uot di Bari

² Inail - Uot di Taranto

³ Inail - Uot di Venezia

⁴ Inail - Uot di Avellino

Sommario

Durante il collaudo di bombole in acciaio senza saldature costruite sia secondo il DM 12.09.1925 e sia la Direttiva TPED si possono generalmente riscontrare molti fenomeni di danneggiamento che inducono i collaudatori a dichiarare il “fuori uso” delle stesse. Spesso i danneggiamenti riscontrati sono di facile interpretazione perché legati a fattori “tipici” come l’età dei contenitori, il tipo di installazione afferente l’esercizio, tipo di fluido contenuto, ecc. Non di rado però si riscontrano delle anomalie poco spiegabili con i fattori “tipici” a causa di incongruenze evidenti: bombole relativamente giovani molto corrose all’esterno; bombole contenenti fluidi inerti o inertizzanti inaspettatamente deteriorate all’interno; bombole che presentano dei difetti sui boccagli e sugli accessori, ecc.

Nel presente studio si riportano alcuni casi rappresentativi di tali anomalie riscontrate durante l’esperienza di verifiche istituzionale Inail, con una disamina delle fasi del ciclo di vita delle bombole (dalla costruzione fino all’esercizio), senza trascurare i richiami normativi.

1. Sintesi del quadro normativo

Attualmente, le bombole in acciaio senza saldature, dal punto di vista giuridico possono essere sinteticamente suddivise nei seguenti tre gruppi:

- a) Appartenenti al vecchio parco in quanto rispondenti al DM 12.09.1925 e ss.mm.ii;
- b) Appartenenti al nuovo parco TPED;
- c) Appartenenti al nuovo parco PED

Quelle del gruppo a) sono progettate, costruite e collaudate secondo le regole imposte dal DM 12.09.1925 e dalle norme integrative del Ministero dei Trasporti, riportano il marchio della stella contenente la dicitura “RI” e possono circolare o essere utilizzate ad uso fisso solo sul territorio italiano. A questo gruppo appartengono anche le bombole che riportano il marchio “E” e che risultano conformi alle precedenti direttive 84/525/CEE, 84/526/CEE 84/527/CEE, ormai superate dalla direttiva 2010/35/UE.

Al contrario il gruppo b) comprende tutte le bombole conformi alla norma che disciplina la libera circolazione sul mercato UE, e cioè la direttiva **2010/35/UE** (TPED) recepita in Italia con il D.lgs. 12 giugno 2012 n.78.

In questo caso i fabbricanti devono garantire che le bombole, in qualità di attrezzature a pressione trasportabili, siano state:

- Progettate secondo i requisiti della direttiva 2008/68/UE e TPED;
- Fabbricate secondo le procedure indicate nella direttiva 2008/68/UE e TPED;
- Corredate di documentazione conformemente ai requisiti stabiliti negli allegati alla direttiva 2008/68/CE e alla direttiva TPED.

Il recepimento della direttiva quadro 2008/68/CE nell'ambito UE ha reso obbligatori i seguenti regolamenti di attuazione:

- ADR (su strada);
- RID (su ferrovia);
- ADN (per navigazione interna)

In Italia, i suddetti regolamenti sono diventati cogenti mediante l'emanazione del D.lgs. 27 gennaio 2010 n.35, regolamenti che disciplinano tutte le classi di merci pericolose, quindi non soltanto quelle della classe 2 (così come previsto dalla direttiva TPED).

Tutte le bombole che rispettano la direttiva 2010/35/UE riportano il marchio “π” e tutte le altre iscrizioni rese obbligatorie da tale direttiva.

Oltre alle bombole trasportabili costruite ai sensi della direttiva TPED, sul mercato sono presenti le bombole del gruppo c), che risultano certificate ai sensi della direttiva 2014/68/UE o della precedente direttiva 97/23/CE (PED) ormai abrogata proprio dalla direttiva 2014/68/UE, con particolare riferimento agli apparecchi respiratori (anche per subacquei) e agli estintori portatili. Queste due tipologie di contenitori sono trattate specificatamente dal D.M. 329/04 “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all’articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93”. Infatti, diversamente dai contenitori certificati esclusivamente in TPED e riportanti il marchio “π”, gli autorespiratori e gli estintori portatili (quindi non quelli carrellati) sono certificati secondo la Direttiva PED e riportano solo il marchio “CE”; per questo motivo la periodicità della loro revisione è trattata dall’allegato “B” del DM n. 329/04.

2. Produzione delle bombole non saldate

Le bombole non saldate sono progettate e fabbricate in ossequio a norme tecniche e regolamenti richiamati nelle direttive e altre leggi viste sopra. Un esempio è rappresentato dalle norme tecniche ISO EN 1964 e ISO EN 9809 [1]. Tali bombole sono realizzate solitamente in acciaio bonificato, cioè sottoposto ad un trattamento di tempra seguito da un trattamento di rinvenimento con un aumento della resistenza a trazione, inferiore o superiore a 1100 Mpa, nonché in acciaio normalizzato ed in alluminio. In linea generale, le bombole in acciaio non saldato possono essere prodotte partendo da tre semilavorati:

- Dischi ricavati da lamiera;
- Billette di tondi;
- Tubi

Indipendentemente dal semilavorato, durante la produzione si avranno deformazioni plastiche sia a **freddo** che a **caldo**, ma con una fase comune che sarà quella del **trattamento di bonifica**.

Come noto, la deformazione plastica a freddo, consegue alla fase di elasticità o di reversibilità in cui è ben chiaro il modulo elastico “E”, ma ha un andamento non lineare e sintetizzabile con la classica relazione:

$$\sigma = C\varepsilon^n$$

Dove la tensione monoassiale è legata alla deformazione mediante le due costanti “C” e “n” che sono tipiche del materiale; in particolare “n” prende il nome di **indice di incrudimento** e indica fundamentalmente la resistenza che il materiale offre nel subire ulteriori deformazioni permanenti dopo lo snervamento, pertanto più è alto tale indice maggiore sarà l’allungamento prima che sul provino si manifesteranno le prime contrazioni della sezione.

Al contrario, le deformazioni a caldo sono molto più complicate da schematizzare con dei modelli reologici. In generale al crescere della temperatura di lavorazione plastica si avrà un intuitivo rilassamento del materiale con diminuzione della tensione di snervamento e incremento della deformazione. In questo tipo di lavorazioni diventa quindi importante la velocità di deformazione che se aumenta produce un aumento della tensione di snervamento a parità di temperatura.

Da quanto sopra si deduce che per lavorazioni plastiche a caldo del tipo “veloce” sarà necessario imprimere degli sforzi maggiori per deformare il prodotto secondo la geometria desiderata, ma ciò potrà nascondere insidie sulla bontà del risultato finale (cricche, geometrie non continue, intagli, ecc).

Tutti i comportamenti sopra descritti per le lavorazioni a caldo derivano in realtà da due fenomeni microstrutturali di “riassetto” e “ricristallizzazione”, che dipendono fortemente dalla temperatura del processo. Entrambi i fenomeni avvengono per la mobilità degli atomi all’interno del reticolo cristallino; infatti considerando che la temperatura del riassetto è di circa 1/3 di quella di fusione dell’acciaio, il primo fenomeno che si riscontra è proprio del riassetto: ciò che in questa fase si muovono non sono gli atomi ma le dislocazioni che si riordinano in maniera più regolare, dando maggiore duttilità e lavorabilità al prodotto. Alzando la temperatura a circa la metà di quella della fusione si assiste alla ricristallizzazione: in questo caso sono gli atomi a muoversi per riordinarsi in cristalli tendenzialmente privi di dislocazioni all’interno e con maggiore uniformità della geometria dei grani, che a loro volta tendono ad aumentare le dimensioni in funzione del tempo di permanenza alla temperatura di lavorazione (grani piccoli sono un ostacolo allo spostamento delle dislocazioni e l’acciaio diventa più duro, grani grandi permettono un maggior movimento delle dislocazioni ma resistenze meccaniche inferiori).

Per avere un’idea immediata di un ciclo produttivo di bombole, di seguito si riporta un tipico Lay-out di produzione di bombole in acciaio bonificato (Fig. 1) [2],

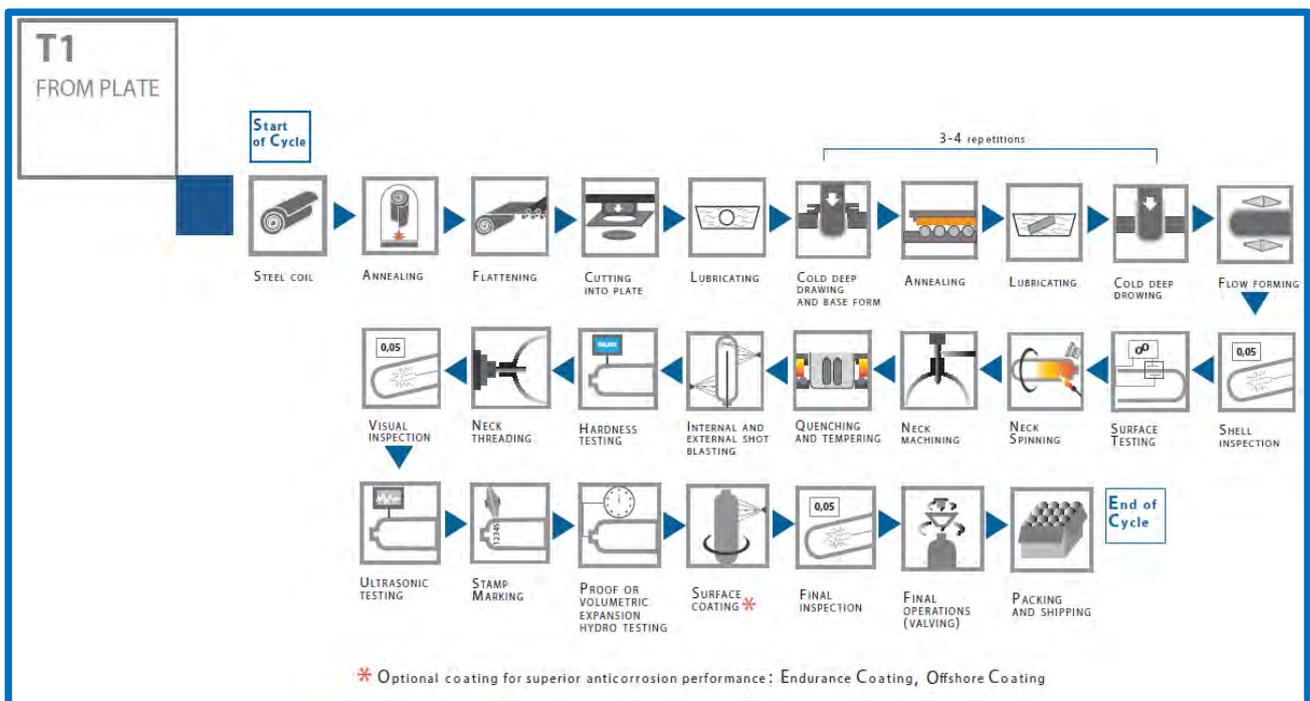


Figura 1. Bombole ricavate da disco di lamiera

Come si potrà notare vi sono operazioni di:

- Deformazioni plastiche a freddo: imbutitura della lamiera, perforazione della billetta;
- Deformazioni plastiche a caldo: spinning di base o spinning ogiva-boccaglio;
- Tempra e rinvenimento: Quenching and tempering;
- Rifinitura spessori;
- Sabbiature interne ed esterne;
- Filettature boccagli;
- Controlli visivi;
- Controlli non distruttivi come gli UT difettoscopici;
- Prova idraulica;
- Punzonature dati
- verniciatura
- Montaggio valvole ed accessori.

Comunque, al di là di tutti i controlli e verifiche eseguibili in fase di accettazione dei semilavorati e di post plasticizzazione a caldo ed a freddo, risulta evidente che il trattamento di bonifica diventa fondamentale per la buona riuscita del prodotto “bombola”.

Gli acciai da bonifica hanno un contenuto in peso di Carbonio compreso solitamente fra 0.15 – 0.65 % e si distinguono fra l'altro anche per i diagrammi di tempra e rinvenimento. Come noto l'utilizzo di Cromo e Molibdeno aumenta lo spessore temprato: infatti dopo aver portato l'acciaio ad una temperatura leggermente superiore alla A_3 di austenizzazione, il raffreddamento che segue secondo le curve *CCT* produce la formazione di martensite, la quale conferisce all'acciaio alta durezza e resistenza meccanica ma anche fragilità; per ovviare a quest'ultimo inconveniente si procede appunto al successivo rinvenimento che permette alla martensite di trasformarsi in Sorbite. La Sorbite è sostanzialmente formata da Cementite (Carburo di Ferro) in una matrice di ferrite.

3. Anomalie riscontrate nelle bombole non saldate durante le verifiche obbligatorie

Ad esclusione della pressione, normalmente l'utilizzo delle bombole non saldate è privo di altre sollecitazioni. Buona parte sono utilizzate singolarmente e spostate mediante l'ausilio di carrelli con movimentazione manuale; altre volte sono assemblate per formare dei pacchi bombole; e in casi specifici possono essere usate in modo fisso per costituire riserve di fluido estinguente in caso di incendio o come sistema di “polmonazione” per sistemi di compressione ad alti valori delle pressioni, come accade ad esempio per il metano destinato all'autotrazione.

Come detto nell'introduzione, al netto dei consueti difetti riscontrati durante le verifiche periodiche obbligatorie (per lo più corrosioni sulla superficie esterna riferibili all'esercizio), purtroppo, sia durante le suddette verifiche e sia a causa di particolari incidenti si sono rilevate dei difetti anomali o anomalie che non sempre possono essere riconducibili all'utilizzo.

La prima di queste è identificabile in difetti di produzione, ed in particolar modo ad una cattiva esecuzione della bonifica. Infatti come anticipato sopra, il trattamento di rinvenimento è quello che potrebbe indurre un particolare tipo di infragilimento della struttura in acciaio della bombola, fenomeno sovente chiamato “malattia di Krupp”.

Negli acciai bonificati non sempre il Molibdeno è contenuto così come viene garantito dalla ferriera, e quindi per un rinvenimento con temperatura compresa fra i 450°C e 550 °C e raffreddamento lento si avrà una microprecipitazione di elementi ai bordi dei grani con conseguente infragilimento della struttura. Il prodotto finale avrebbe una fortissima disomogeneità, con parti ricche di Molibdeno la cui martensite è stata ben rinvenuta e altre

estremamente fragili. In questa situazione si potrebbe avere il paradosso che la bombola superi le prove di pressione grazie alla parte “sana” ma non si esclude che a causa della forte differenza di microstruttura creatasi si inneschino in futuro dei processi di corrosione e/o di tensocorrosione, che andando ad indebolire anche la parte sana con riduzione delle sezioni resistenti produrranno improvvisi cedimenti.

Il fenomeno è accelerato dalla presenza del Cromo e Manganese, ma rallentato dalla presenza del Molibdeno e Tungsteno; infatti qualora il fenomeno si dovesse riscontrare anche con la presenza del Molibdeno, significherebbe che il trattamento di rinvenimento è durato ben oltre il dovuto (secondo tabelle in funzione del tipo di acciaio) con tempi compresi nell'intervallo $10^2 \div 10^3$ ore.

Al fine di ovviare a tali inconvenienti si potrebbero utilizzare altri due accorgimenti come quello:

- Di raffreddare velocemente la microstruttura;
- Di non riscaldare nell'intervallo critico 450°C e 550°C , ma di non usare intervalli di temperature compresi fra 250°C e 350°C (infragilimento dovuto a precipitazione di cementite o di carburi a bordo della martensite).

Ma in entrambi i casi però si avrebbe una struttura finale non sorbitica e quindi con caratteristiche meccaniche inferiori.

Oltre alla composizione chimica del materiale, ai fini della corretta esecuzione del rinvenimento molta importanza riveste il mezzo temprante, le dimensioni del prodotto e la posizione che occupa lo stesso nella cella di tempra, tutte caratteristiche che fanno parte delle procedure di bonifica del fabbricante. Come confermano diverse esperienze, le minori differenze delle durezza fra parte interna ed esterna della bombola si avranno con raffreddamento ad aria ma con valori inferiori a quelli producibili con l'olio o acqua, che invece producono valori più elevati delle durezza. Mentre una stessa bombola raffreddata in olio potrà avere durezza finali diverse a seconda della distanza delle sue parti dal bagno d'olio.

3.1. Esempi

Di seguito verranno illustrati e commentati alcuni esempi di difetti contenenti anomalie di diversa natura



Figura 2. Bombola rinvenuta non correttamente in modo generalizzato senza particolari corrosioni

Nelle foto della figura 2 vi è un esempio di come, a causa di un rinvenimento non corretto, nella sezione dello spessore della bombola vi saranno praticamente due tipi di acciai. All'esterno vi è un acciaio correttamente bonificato con tempra e rinvenimento corretto, all'interno un acciaio estremamente fragile a causa della cosiddetta “malattia di Krupp” che

in alcuni punti ha ridotto notevolmente la sezione resistente, in altri la ha letteralmente annullata.



Figura 3. Bombola rinvenuta correttamente ma con tensocorrosione non facilmente visibile dall'interno: si presume il contenimento di acqua insieme ad agenti estinguenti

Nelle foto della figura 3 [3], il problema riscontrato è quello della tensocorrosione. Anche in questo caso all'interno dello spessore della bombola si leggono ad occhio nudo degli strati di materiale "diverso", con formazione di ossidi a margine di una zona infragilita. Infatti nella foto in cui si ritrae la sezione dello spessore della lamiera, si potrà facilmente notare il tipo diverso di rottura fra una zona esterna ancora duttile ed una zona interna fragile, separate da uno strato di corrosione.

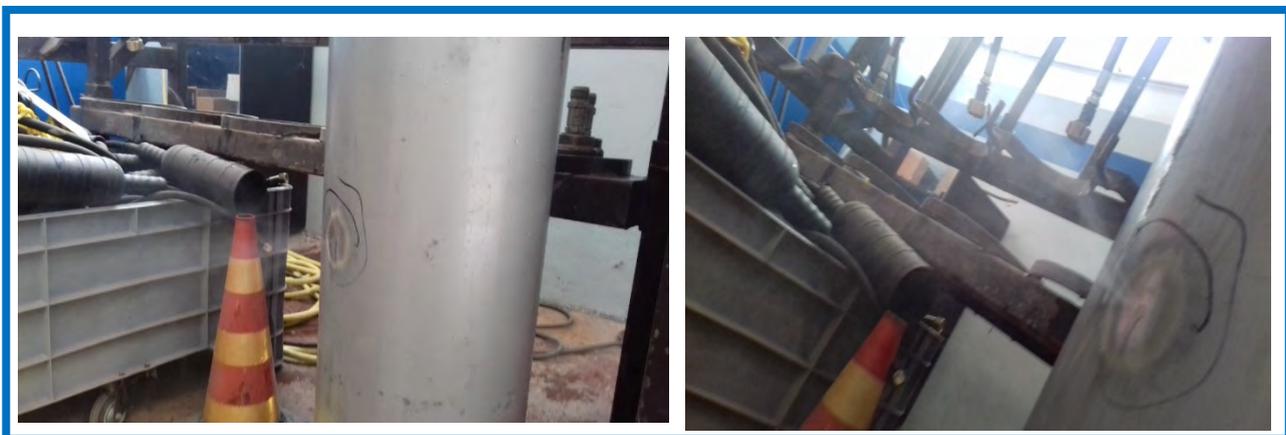


Figura 4. Bombola non rinvenuta correttamente solo in alcuni punti

Invece, durante la routinaria prova idraulica, un apparente problema di corrosione localizzata si è evidenziato nella bombola di figura 4 con una perdita di acqua riscontrabile solo alla pressione di prova di 300 bar ma non rilevabile fino ai 200 bar. L'anomalia si è ripetuta per diversi cicli di discesa e salita della pressione. Anche in questo caso non si trattava di corrosione ma di materiale eterogeneo con zone infragilitate da rinvenimento che solo nel punto di perdita raggiungevano la parte esterna della bombola.

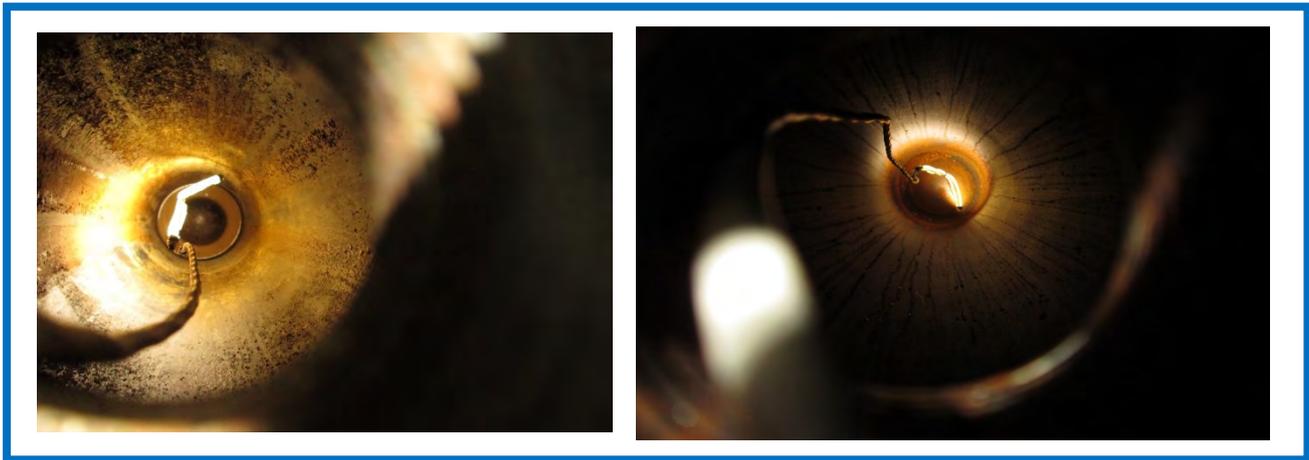


Figura 5. Bombole sporche all'interno a causa del contenimento di fluidi non puri



Figura 6. Bombole che hanno contenuto fluidi non puri

Nella figura 5 vi sono due foto significative di visita interna in cui lo sporco trasportato dal fluido contenuto, nella foto in alto si è solidificato iniziando l'azione corrosiva, mentre nella foto in basso lo sporco è costituito da olii e grassi che permangono nella loro posizione di colatura e hanno trascinato l'ossido di corrosione fino in basso sul fondo della bombola.

Ossidazioni generalizzate si riscontrano in bombole destinate come apparecchi respiratori, ad indicare la scarsa qualità del prodotto inserito, così come si evince dalle foto della figura 6, in cui già dallo stato in cui si presentano le valvole si denotano ed intuiscono le problematiche rinvenibili all'interno della bombola. Come si può vedere in questo caso la sezione eseguita presenta uno spessore delle pareti che oltre a mantenersi intatto presenta un materiale qualitativamente buono; il problema è la velocità di avanzamento della corrosione interna al fine di "consumare" acciaio in futuro.

Anomalie della filettatura si riscontrano nella figura 7. Infatti non si tratta dei più comuni filetti con le punte alterate, ma bensì di "strappi" di valvole o come mostrato nelle foto in basso e a destra della stessa figura, di "saldature" generatesi a causa della forzatura di accoppiamenti non congrui.



Figura 7. Difetti al bocaglio

4. Conclusioni

Solitamente molte bombole non saldate, o come comunemente vengono chiamate “in un sol pezzo”, sono scartate durante la verifica obbligatoria già nella fase di esame visivo esterno. Le corrosioni che spesso si presentano su tutte le parti della superficie esterna descrivono l’utilizzo della bombola in termini di luogo di installazione (all’interno, all’esterno, zone costiere, zone umide, su navi, locomotive, ecc.) ed anche di posizionamento (verticale, orizzontale, adiacenti ai muri, adiacenti a parti in metallo, poggiate su terreni, ecc). Tali corrosioni sono anche rapportate alla data di costruzione e quindi si può risalire alla velocità del fenomeno corrosivo e capire la qualità del metallo. Come già anticipato i problemi e le anomalie si riscontrano nelle fasi successive delle verifiche. Già nella fase di smontaggio della valvola si possono riscontrare indicazioni che possono definitivamente compromettere la bombola per l’uso futuro. E’ in generale la visita interna che permette una prima disamina di quello che la bombola ha contenuto e di come l’ha contenuto. E’ spesso in questa fase che si comprende come grandi responsabilità sul proseguo dell’esercizio di una bombola la hanno le modalità di riempimento delle stesse. Delle bombole contenenti aria o fluidi non corrosivi, addirittura inerti in quanto agenti estinguenti per l’incendio, che presentano situazioni come quelle viste nelle foto sopra ci portano a pensare che grande attenzione occorre porre:

- Nelle condizioni di stoccaggio delle bombole vuote in attesa di riempimento;
- Nelle condizioni atmosferiche ed ambientali di prelevamento dell’aria da comprimere;
- Nelle condizioni di essiccazione dell’aria da comprimere;
- Nelle condizioni dei filtri dei booster di compressione;
- Nelle condizioni dei sistemi di lubrificazione dei booster di compressione;
- Nelle condizioni dei tubi e accessori di raccordo dei sistemi di compressione;
- Nelle condizioni ambientali ed impiantistiche dei luoghi di esercizio (posizione, adiacenza ad altri prodotti, temperature, ecc.);
- Nelle condizioni chimiche e fisiche dell’acqua usata in prova idraulica;
- Nelle condizioni di essiccazione dopo l’esecuzione della prova idraulica;
- Nelle operazioni di corretta manutenzione.

Infatti molte anomalie riscontrate (fenomeni di tensocorrosione e di corrosione localizzata e generalizzata) sono riconducibili alla presenza di acqua derivante dall’umidità dell’aria di compressione o direttamente da liquidi e sporcizia del sistema di compressione. Anche se i fluidi contenuti nelle bombole dovrebbero risultare inerti, in presenza dell’acqua producono

reazioni che inevitabilmente portano al fenomeno della corrosione interna (es. per gli acciai bonificati in presenza di CO/CO₂ e H₂O in letteratura sono noti i lavori di Kowaka-976 [4]). Quando anche la visita interna non evidenzia particolari anomalie, le insidie si possono nascondere in difetti risalenti alla costruzione. Come evidenziato, sia sulla superficie esterna che interna non necessariamente possono comparire tali difetti che, purtroppo, si nascondono all'interno dello spessore della bombola e potranno essere riscontrati solo con indagini più profonde rispetto a quelle obbligatorie.

Non possiamo concludere tale studio senza citare un'osservazione che meriterebbe studi più approfonditi. In tutti i casi in cui le visite interne hanno comportato situazioni di incertezza sull'esecuzione della successiva prova idraulica, un elemento che spesso è stato di aiuto è stata la prova acustica con martelletto metalico. Ovviamente quest'ultima se eseguita ad orecchio richiede una grandissima esperienza per capire come "suonano" le bombole (ovviamente vuote), ma in verità ogni volta che dopo tale prova ci sono stati dei dubbi che hanno portato allo scarto della bombola, dopo il taglio e la successiva visione della stessa si sono riscontrati piccoli intagli o difetti prevalentemente morfologici che con le verifiche di norma non si sono riscontrati.

5. Bibliografia

[1] ISO EN 1964 sostituita dalla ISO EN 9809-1 e ISO EN 9809-3: 2010

[2] Produzione Faber Cylinders SpA.

[3] Inail. Quaderni di Ricerca n. 9. Febbraio 2016

[4] Kowaka M. Recenti progressi nella tensocorrosione di acciai inossidabili e leghe ad alto contenuto di nichel (ed. 1974. ISSN-L: 0021-1575)

Applicazione di modelli predittivi finalizzati alla valutazione delle potenziali conseguenze di incendi di biocombustibili liquidi: un caso studio

R. Lauri¹, B. Pietrangeli¹

¹ Inail - Dit

Sommario

La necessità di attuare, in tempi ragionevolmente brevi, la transizione energetica ha impresso un forte impulso alla diffusione di biocombustibili di seconda generazione, che vengono principalmente impiegati nel settore dell'autotrazione. Questo scenario ha avviato una riflessione su aspetti di sicurezza connessi con gli impianti di produzione ed i depositi di stoccaggio di tali vettori energetici. Partendo da tale contesto, il presente lavoro focalizza l'attenzione sui potenziali pericoli relativi all'utilizzo del bioetanolo, soffermandosi, in particolar modo, sull'applicazione di modelli predittivi, finalizzati a valutare le possibili conseguenze di pool fires.

1. Introduzione

L'Unione Europea ha definito dei nuovi obiettivi, nell'ambito delle politiche per il clima e l'energia, che devono essere centrati dagli Stati Membri entro il 2030. Tra questi è presente la copertura, mediante l'utilizzo di fonti rinnovabili, di una quota pari al 32% del consumo energetico. In questo contesto possono rivestire un ruolo strategico i biocombustibili di seconda generazione, tra i quali va annoverato il bioetanolo, prodotto da biomasse. Un'ulteriore accelerazione all'utilizzo dei biocarburanti può essere sicuramente impressa dalla necessità, sempre più impellente, di avviare la transizione energetica, riducendo drasticamente l'impiego di combustibili fossili. Da ciò deriva una crescente attenzione verso l'efficienza e la sicurezza dei processi di produzione di tali vettori energetici. In questa ottica si colloca l'analisi delle conseguenze di eventi incidentali (prevalentemente pool fire), derivanti da rilasci accidentali di bioetanolo, poiché esso è classificato come liquido facilmente infiammabile ai sensi del Regolamento CE n°1272/2008. In Italia, il Ministero dell'Ambiente e quello dello Sviluppo Economico emanarono nel 2013 il nuovo regolamento per la semplificazione delle procedure di autorizzazione degli impianti di produzione di biocarburanti, le cosiddette "bioraffinerie" (Decreto 9 ottobre 2013, n. 139). Tale Decreto disciplina gli impianti di seconda e terza generazione per la produzione di biocombustibili e prodotti biochimici ad alto valore aggiunto e snellisce gli iter burocratici relativi a queste unità produttive, con il duplice scopo di favorire la diffusione di tali realtà nel nostro Paese e facilitare gli investimenti nel settore. L'impianto, che è stato esaminato nel lavoro, è situato nell'Italia Settentrionale e dispone di un'area dedicata allo stoccaggio di bioetanolo. Tale biocombustibile viene miscelato in proporzioni variabili con la benzina verde, nonché venduto da solo per numerose applicazioni industriali e civili (riscaldamento). Lo sviluppo di questi nuovi insediamenti produttivi (bioraffinerie) pone, però, dei problemi di valutazione e gestione del rischio per la sicurezza, che vanno attentamente considerati, al fine di evitare incidenti, che potrebbero generare ripercussioni negative su un settore molto interessante per l'economia nazionale per vari motivi (indipendenza energetica, valorizzazione di terreni marginali per la produzione agro-industriale, sviluppo occupazionale in tutta la filiera impiantistica, etc.). Il presente lavoro è focalizzato sulla valutazione delle conseguenze

sulla salute delle persone di un pool fire, originato dal rilascio accidentale di bioetanolo dalla pompa di trasferimento. In particolar modo, mediante l'applicazione di uno specifico software, viene studiato l'andamento del flusso termico (espresso in kW/m^2), generato dall'incendio, valutando l'influenza dei principali parametri atmosferici (velocità del vento e umidità relativa dell'aria).

2. Materiali e metodi

La valutazione dei possibili effetti del pool fire di bioetanolo è stata condotta mediante il software Effects, il quale consente di considerare sia l'influenza del livello di oscuramento della superficie radiante, dovuto al particolato incombusto, che quella dei parametri atmosferici (velocità, temperatura e umidità relativa dell'aria). In particolar modo, la velocità (v) del flusso di ventilazione incide sull'emissività superficiale della fiamma (E) e sul fattore di vista (F), mentre la temperatura e l'umidità relativa dell'aria influenzano il valore della trasmissività atmosferica (τ_a). E , F e τ_a sono grandezze fondamentali [1], poiché compaiono nei modelli predittivi, finalizzati a calcolare l'andamento del flusso termico (indicato dalla lettera q ed espresso in kW/m^2), sprigionato dall'incendio, in funzione della distanza. In particolar modo:

- E (kW/m^2) è influenzato da v e dalla presenza del particolato incombusto [2];
- τ_a (parametro adimensionale) è la trasmissività atmosferica [2], che consente di ricavare la frazione di energia trasmessa dall'atmosfera verso il potenziale bersaglio. Infatti, una parte del flusso termico prodotto viene assorbita dal volume di aria, compreso tra la superficie radiante e il recettore;
- F (parametro adimensionale) rappresenta il fattore di vista (view factor), che dipende dalla velocità del vento, dalla geometria della fiamma e dalla distanza esistente tra elemento radiante e bersaglio e consente di valutare la quota dell'energia termica [3], che può investire un potenziale recettore.

Nel presente lavoro sono state valutate le conseguenze del pool fire, esaminando l'influenza della variazione della velocità del vento sull'irraggiamento termico. A tal proposito lo studio è stato svolto, confrontando i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate con il modello proposto dallo "Yellow Book" e con quello denominato "Two zones". La differenza principale tra i due modelli risiede nel fatto che quello proposto dallo Yellow Book (indicato successivamente con l'acronimo YB) considera la superficie radiante come un'unica entità, utilizzando un coefficiente (ζ), per indicare la frazione della fiamma [4], coperta dal particolato incombusto, mentre il modello "Two zones" (indicato successivamente con l'acronimo TZ), suddivide l'emettitore (figura 1) in due parti [5] (una inferiore, che non risente della presenza del particolato incombusto, ed una superiore, che, invece, è parzialmente oscurata da esso).

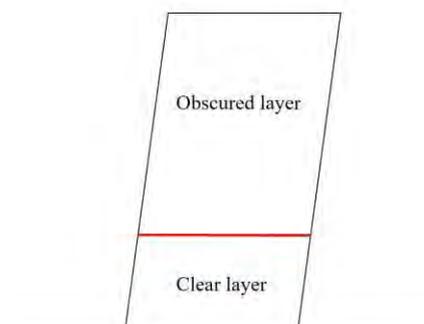


Figura 1. Rappresentazione della fiamma (modello "Two zones")

Il primo step dell'analisi è basato sulla definizione di un intervallo di valori realistici relativi all'intensità della ventilazione, i quali sono fondamentali per ottenere delle simulazioni, che siano il più possibile vicine alle condizioni reali. Per conseguire questo obiettivo la velocità del vento è stata desunta dall'Atlante eolico dell'Italia, dalla cui consultazione è stato riscontrato un valore medio annuale di v inferiore a 3 m/s alla quota di 25 m [6] per la località, in cui è stato installato il deposito di stoccaggio del biocombustibile. Pertanto nel caso studio sono stati considerati i valori di 3, 6 e 9 m/s al fine di valutare anche l'effetto di brezze di maggiore intensità. Poiché il software richiede come input la velocità del vento riferita a 10 m di altezza, è stata effettuata la conversione, applicando la seguente equazione [7]:

$$v(z) = v_{10} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (1)$$

In cui:

- $v(z)$ è la velocità del vento (espressa in m/s) alla quota z ;
- v_{10} indica la velocità del vento all'altezza di 10 metri;
- p è un parametro adimensionale, che dipende dalla classe di stabilità atmosferica e dalla tipologia dell'ambiente.

Poiché ai fini della valutazione delle conseguenze degli eventi incidentali si assumono solitamente le classi D e F come condizioni cautelative di riferimento, nel caso studio analizzato è stato considerato lo scenario D (condizioni neutre). Essendo il territorio a carattere rurale, p risulta pari a 0,15 (Tabella 1). Nella seguente tabella 2 sono riportati i valori convertiti del flusso di ventilazione.

Classe di stabilità atmosferica	p (ambiente urbano)	p (ambiente rurale)
A	0,15	0,07
B	0,15	0,07
C	0,2	0,1
D	0,25	0,15
E	0,4	0,35
F	0,6	0,55

Tabella 1. Valori del parametro p

	Quota di riferimento ($z=25$ m)	Quota di riferimento ($z=10$ m)
Velocità del vento (m/s)	3	2,6
	6	5,2
	9	7,8

Tabella 2. Conversione della velocità del vento

In tutti i casi esaminati è stata assunta un'umidità dell'aria pari al 75% e come direzione prevalente, in cui spira il vento, la nord.

3. Potenziali conseguenze degli incendi sulle persone

I danni provocati dall'energia termica, prodotta da un incendio, comprendono la disidratazione dei tessuti, la difficoltà di respirazione e le ustioni. Facendo riferimento a questo ultimo effetto, si evidenzia che la massima temperatura sopportabile dalla pelle

nuda è di circa 150°C, per brevissimo tempo e in assenza di umidità. Le ustioni sono classificate nei seguenti modi:

- di primo grado: esse sono superficiali e facilmente guaribili;
- di secondo grado: si ha formazione di bolle e vesciche e deve essere consultata una struttura sanitaria;
- di terzo grado: sono profonde, estremamente pericolose e richiedono un'immediata ospedalizzazione.

In tabella 3 si riportano le correlazioni esistenti tra il valore dell'irraggiamento termico e l'effetto provocato [8]. Gli incendi di etanolo presentano delle caratteristiche estremamente diverse da quelli di idrocarburi (Figura 2) per quanto concerne il tasso di produzione di fuliggine. Infatti, nel caso dell'etanolo, vi è un'esigua formazione di particolato incombusto [9] e la fiamma risulta generalmente "pulita" (Figura 3), mentre l'accensione di idrocarburi è caratterizzata da fiamme fumose, in cui la superficie emettente è parzialmente coperta e ciò determina una riduzione dell'irraggiamento trasmesso.



Figura 2. Incendio di idrocarburi



Figura 3. Incendio di etanolo

Effetto	Irraggiamento (kW/m ²)
Nessuno per persone vestite, anche per lunghe esposizioni	1,4
Ustioni di primo grado	1,8
Lesioni reversibili	3
Danni a operatori con indumenti protettivi per lunghe esposizioni (lesioni irreversibili)	5
Elevata letalità/danneggiamento di serbatoi metallici	12,5
Danneggiamento di strutture in acciaio	40

Tabella 3. Effetti degli incendi

4. Il caso studio: pool fire causato dal rilascio di bioetanolo dalla pompa di trasferimento

L'evento incidentale, di cui sono state studiate le possibili conseguenze, è il pool fire, derivante dal rilascio di bioetanolo dalla pompa centrifuga 4408 (Figura 4) dedicata al carico dei vagoni ferroviari. L'emissione del biocombustibile è ascrivibile alla perdita dalle

tenute della turbomacchina operatrice, che è caratterizzata dai seguenti parametri operativi:

- prevalenza= 25 m;
- portata nominale=75 m³/h;
- pressione di esercizio=2,5-3 bar.

Ai fini dello studio del rilascio e della successiva valutazione degli effetti del pool fire è stata esaminata la tubazione (la sua lunghezza è pari a 15 m ed il diametro è di 152 mm), che collega il serbatoio TK 4406 alla pompa 4408. A tal proposito è stata ipotizzata, dopo la consultazione dei dati riportati nel Purple Book, la formazione di un foro di emissione, avente un diametro (D_f) pari al 10% di quello della condotta [10]. Lo studio è stato finalizzato a descrivere l'andamento dell'irraggiamento (q) in funzione della variazione di v e della distanza rispetto alla superficie radiante.



Figura 4. Pompa di trasferimento del bioetanolo

5. Le principali cause delle perdite dalle tenute delle pompe

Nelle pompe centrifughe è di fondamentale importanza la scelta dell'elemento di tenuta, che ha il compito di ridurre la fuoriuscita del fluido da un ambiente verso un altro (generalmente l'atmosfera). Nonostante lo sviluppo tecnologico abbia ampliato la gamma di soluzioni per realizzare le tenute, dei trafilamenti, seppur ridotti, sono sempre presenti. Le perdite di una tenuta possono essere calcolate teoricamente e dipendono da molti fattori, quali la velocità di rotazione dell'albero, la natura del liquido, la pressione, ma anche da aspetti meccanici, che riguardano la macchina, sulla quale viene installata. Si riportano alcune delle cause più frequenti, responsabili di rilasci di fluido dalle tenute delle pompe:

- rottura della tenuta;
- usura della bussola di protezione dell'albero;
- forze e momenti sulla turbomacchina operatrice, causati dalle tubazioni;
- insufficiente lubrificazione;
- errata installazione della pompa, che può dar vita a vibrazioni.

I fenomeni vibratorii possono essere generati anche da:

- cavitazione;
- cuscinetti difettosi;
- portata eccessiva di liquido.

6. Risultati e discussione

L'irraggiamento termico, prodotto dal pool fire, è stato calcolato all'altezza di 1,7 m rispetto al suolo al fine di considerare gli effetti sulle persone. In tabella 4 si riportano i valori delle grandezze utilizzate per lo studio del rilascio del bioetanolo dalla pompa di trasferimento. Con tali parametri è stata ricavata, mediante il software Effects, una portata massica rilasciata pari a 1,46 kg/s, che genera nel bacino di contenimento una pozza, avente un volume di circa 1,13 m³. La simulazione effettuata è basata sull'ipotesi che l'innesco della massa del biocombustibile avvenga dopo che essa abbia completamente ricoperto la superficie del bacino (la sua area è pari a 66 m²), in cui sono collocate le due turbomacchine.

Parametri	Valori
densità del bioetanolo (kg/m ³)	781
temperatura di rilascio (°C)	30
lunghezza della tubazione (mm)	15000
diametro della tubazione (mm)	152
diametro (D _f) del foro (mm)	15,2
volume di bioetanolo nel serbatoio (l)	1198285
grado di riempimento del serbatoio (%)	82
coefficiente di scabrezza della tubazione (mm)	0,045
coefficiente di efflusso	0,7
durata del rilascio (s)	600
Massima distanza di valutazione di q (m)	60

Tabella 4. Rilascio di bioetanolo da pompa: parametri utilizzati

Per quanto concerne la valutazione degli effetti del pool fire sono state considerate, come soglie di riferimento, i seguenti valori: 3 kW/m², 5 kW/m² e 12,5 kW/m². I risultati dello studio, vengono mostrati nelle figure 5 e 6, illustranti l'andamento dell'irraggiamento (q) in funzione della distanza dal centro della fiamma e della velocità del vento. Dall'analisi dei grafici emerge il fatto che le curve tendono a sovrapporsi alla distanza di circa 20 m dalla fiamma, per quanto concerne il modello YB, mentre questa sovrapposizione avviene circa a 10 m, applicando il modello TZ. Inizialmente il flusso termico si mantiene costante (questo si verifica all'interno dell'area della pozza) e successivamente decresce all'aumentare della distanza. In particolar modo, esaminando la regione interna allo spandimento del bioetanolo, si nota che il passaggio della velocità di ventilazione da 2,6 m/s a 7,8 m/s determina una crescita del parametro q pari al 15,8% (esso passa da 39,1 kW/m² a 45,3 kW/m²), applicando il modello YB, mentre l'irraggiamento è pari sempre a 130 kW/m² nel caso del modello TZ, poiché esso considera la fiamma non oscurata dal particolato incombusto (pertanto l'emissività superficiale raggiunge il suo massimo valore),

il cui effetto viene calcolato solamente all'esterno della pozza. Le differenze più significative tra i due modelli sono riscontrabili solamente nelle immediate vicinanze della fiamma, in cui è maggiore l'influenza della superficie radiante non oscurata dal fumo. Nelle figure 7 ed 8 viene mostrata la rappresentazione grafica delle aree di impatto del pool fire ed è indicata, con una croce blu, la posizione della sorgente di rilascio (pompa). In tabella 5 si riporta la correlazione tra i valori dell'irraggiamento termico ed i colori utilizzati per delimitare l'estensione di tali zone. A tal proposito, si precisa che per entrambi i modelli è stata assunta la medesima colorazione, la quale varia solamente in funzione di q e dell'intensità del flusso di ventilazione.

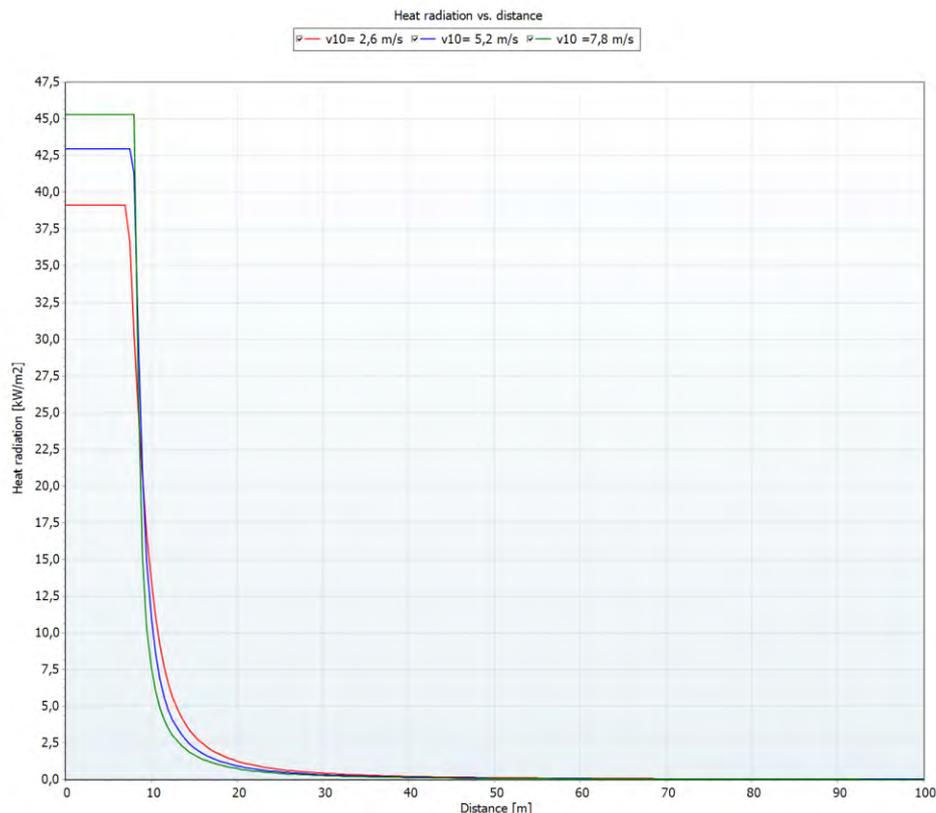


Figura 5. Andamento dell'irraggiamento termico (Yellow Book)

Irraggiamento termico	Velocità del vento		
	v ₁₀ = 2,6 m/s	v ₁₀ = 5,2 m/s	v ₁₀ = 7,8 m/s
3 kW/m ²	giallo	blu	verde chiaro
5 kW/m ²	celeste	verde scuro	arancione
12,5 kW/m ²	nero	rosa	viola

Tabella 5. Correlazione tra colori e valori dell'irraggiamento termico

Facendo riferimento alle soglie di 12,5 kW/m², 5 kW/m² e 3 kW/m² sono stati definiti, attraverso la simulazione effettuata, dei range (la loro estensione è risultata limitata) per le distanze massime, alle quali sono riscontrabili i suddetti valori dell'irraggiamento (tabelle 6 e 7).

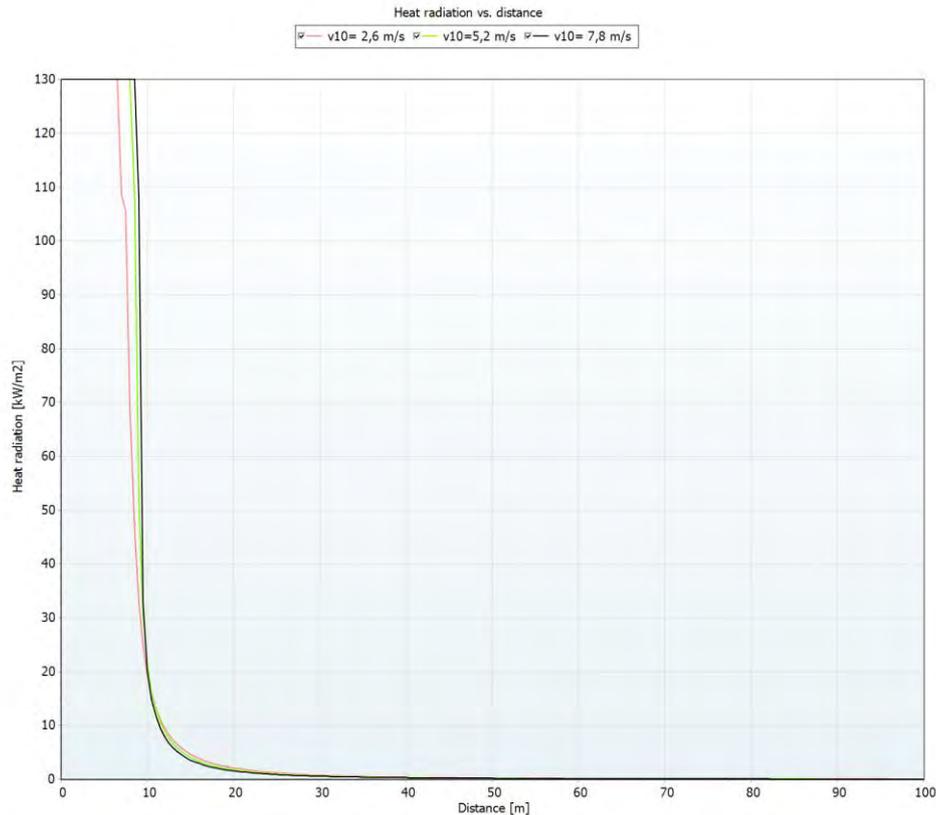


Figura 6. Andamento dell'irraggiamento termico (modello "Two zones")

Come si evince dalla consultazione delle tabelle, le maggiori ampiezze delle aree di impatto dell'evento incidentale sono relative al modello TZ, poiché esso non considera la presenza di particolato incombusto all'interno della pozza. Le distanze massime, a cui sono riscontrabili i livelli del flusso termico pari a 3 kW/m², 5 kW/m² e 12,5 kW/m² sono rispettivamente 15 m e 17 m, 13 m e 15 m ed infine 10 m e 11 m.

	Velocità del vento (m/s)		
q (kW/m ²)	2,6	5,2	7,8
3	15	14	13
5	13	12	11
12,5	10	10	9

Tabella 6. Distanze di impatto del pool fire (Yellow Book)

	Velocità del vento (m/s)		
q (kW/m ²)	2,6	5,2	7,8
3	17	17	16
5	15	14	14
12,5	11	11	11

Tabella 7. Distanze di impatto del pool fire (modello "Two zones")

Valutando l'incremento percentuale di tali estensioni, è stata riscontrata una modesta variazione dei risultati, forniti dai due modelli, la quale è compresa tra il 10% e il 15,4%. Alla distanza di 60 m il valore di q oscilla tra $0,055 \text{ kW/m}^2$ e $0,09 \text{ kW/m}^2$, applicando il modello YB, mentre la variazione è compresa tra $0,11 \text{ kW/m}^2$ e $0,15 \text{ kW/m}^2$ con quello TZ. Tali valori sono nettamente inferiori alla soglia di $1,4 \text{ kW/m}^2$, che viene indicata in letteratura come limite al di sotto del quale non si verificano conseguenze per le persone. In particolar modo, l'irraggiamento termico raggiunge il valore di $1,4 \text{ kW/m}^2$ alle distanze massime di 19 m (modello YB) e 23 m (modello TZ) rispetto al centro della superficie radiante e pertanto l'incremento percentuale delle estensioni è pari al 21%.

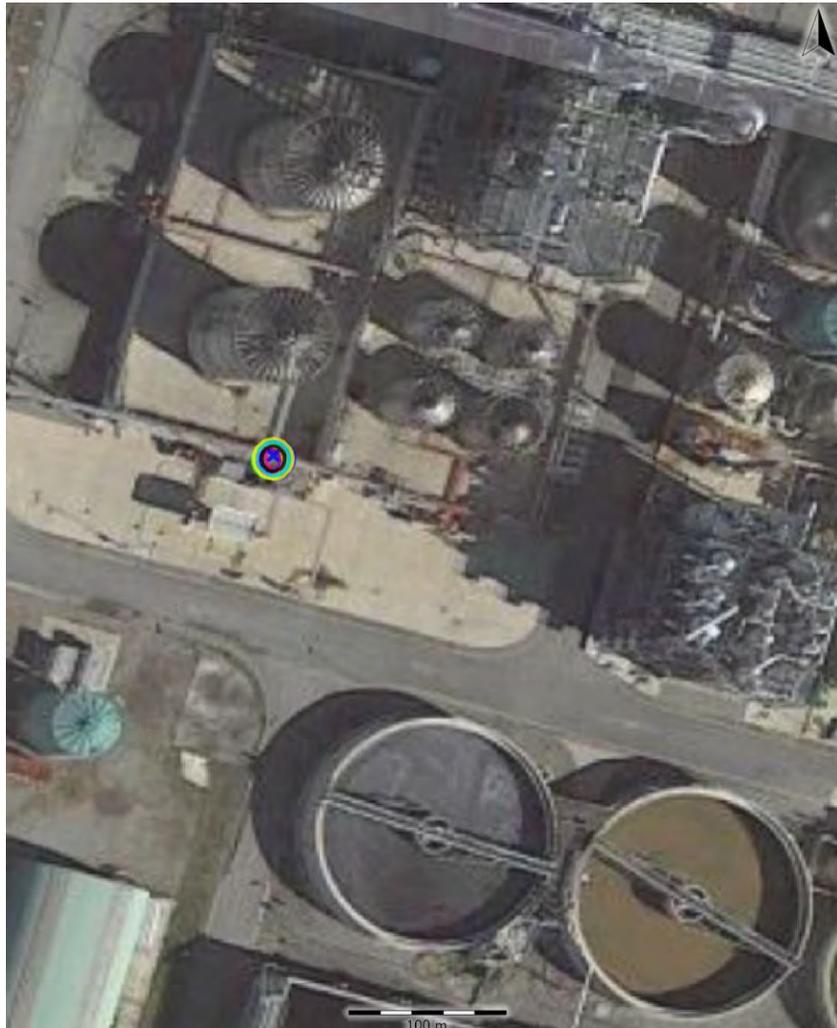


Figura 7. Rappresentazione grafica delle aree di impatto del pool fire (modello YB)

Facendo riferimento al valore di $12,5 \text{ kW/m}^2$ si nota che l'irraggiamento è in grado di minare l'integrità strutturale dell'adiacente pompa di trasferimento 4407 (la distanza tra le due turbomacchine è di 1,5 m) e delle tubazioni limitrofe (presenti nel raggio di 11 m), in cui fluisce il bioetanolo, costituendo una possibile sorgente di innesco di potenziali effetti domino. Il software Effects permette di considerare la fiamma come un emettitore solido cilindrico (tutta la sua superficie partecipa alla radiazione) e ne consegue un avvicinamento più consistente alla realtà rispetto al modello "puntiforme", che assume che tutta l'energia venga irradiata dal centro geometrico della superficie radiante. I risultati delle simulazioni del pool fire dipendono fortemente dalla natura stocastica della ventilazione sia in termini di velocità che direzione. Un altro elemento, che incide sull'entità dell'irraggiamento termico, è la presenza di ostacoli tra la fiamma ed i potenziali recettori.

Facendo riferimento a questo ultimo aspetto, bisogna sottolineare il fatto che il software utilizzato consente solamente un parziale avvicinamento alla realtà, poiché è presente l'opzione di definire l'altezza di un solo ostacolo (in questo caso studio è stata introdotta l'elevazione del bacino di contenimento, contenente le pompe di trasferimento), che si frappone alla trasmissione del flusso termico. Considerando questa problematica, per migliorare l'accuratezza dei risultati, si dovrebbero usare modelli basati sulla fluidodinamica computazionale, che richiedono, però, tempi lunghi di calcolo e personale altamente specializzato in tale settore.



Figura 8. Rappresentazione grafica delle aree di impatto del pool fire (modello TZ)

7. Conclusioni

I danni, derivanti da un evento incidentale (pool fire, rilascio di composti tossici, esplosioni di nubi di gas/vapori infiammabili, etc.), possono essere quantificati solamente avvalendosi di un'accurata modellazione dell'evento stesso. Purtroppo i risultati di questi studi sono affetti da un inevitabile margine di incertezza, riconducibile alla natura dello scenario incidentale. Infatti, è solitamente possibile effettuare una stima solamente approssimativa di alcuni fattori, che influenzano le conseguenze dell'incidente: caratteristiche geometriche della sorgente di emissione (ad esempio la dimensione del foro di rilascio presente in un accoppiamento flangiato, in una pompa, etc.), incompleta rappresentazione dei fenomeni chimico-fisici, descritti nel modello di simulazione utilizzato, etc. A tal proposito, è

opportuno precisare che se l'emissione avviene attraverso un dispositivo di scarico di emergenza (ad esempio una valvola di sicurezza) la sezione è nota, mentre se si ipotizza la fuoriuscita di una sostanza pericolosa da un dato componente (tubazione, valvole di regolazione, etc.), il diametro del foro può essere ricavato dai dati, riportati in letteratura, sui quali, però, non vi è un consenso generale sulla sezione di rottura da ipotizzare. Facendo riferimento al caso studio esaminato, è stata riscontrata una modesta variazione dei risultati, derivanti dall'applicazione dei due modelli predittivi. Ciò è dovuto principalmente al fatto che solamente nelle immediate vicinanze della fiamma si risente dell'influenza della zona inferiore (quella non oscurata dal particolato incombusto) della superficie radiante. Il modello "Two Zones" è generalmente preferibile, poiché la suddivisione in regioni della fiamma, le quali sono caratterizzate da differenti valori dell'emissività superficiale, consente una rappresentazione più realistica della stessa e questo fattore ha un'incidenza rilevante soprattutto durante la modellazione di incendi di sostanze (idrocarburi), che sono caratterizzate da un elevato tasso di produzione di fumo.

Ringraziamenti

Si ringrazia il Gruppo BioChemtex per la gentile concessione dei dati.

Bibliografia

- [1] Babrauskas V. Estimating large pool fire burning rates. *Fire Technology*. 1983; 19: 251–261.
- [2] Burgess D.S., Hertzberg M. Radiation from pool flames, heat transfer in flame. John Wiley and sons. New York, 1974, pp. 64-68.
- [3] Casal J. Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants. Elsevier. Eastbourne, 2019, pp. 91-107.
- [4] TNO. Methods for the calculation of physical effects. Van den Bosch C.J.H., Weterings R.A.P.M. The Hague, 2005, pp. 6.61-6.74.
- [5] Rew P.J., Hulbert W.G., Deaves D.M. Modelling of thermal radiation from external hydrocarbon pool fires. *Institution of Chemical Engineers*. 1997; 75: 81-83.
- [6] RSE. Interactive Wind Atlas. Disponibile su: www.atlanteeolico.rse-web.it.
- [7] Lauri R., Grospietro B., Cova A., Accardi D.S., Pietrangeli B. Pool fires: a model for assessing meteorological parameters influence on thermal radiation. *Chemical Engineering Transactions*. 2017; 57, 229-234.
- [8] Lauri R., Verna L., Paiardini G. Analisi delle conseguenze di evento incidentale in un deposito di idrocarburi. *La Termotecnica*. 2017; 8: 66-69.
- [9] Persson H., Amon F. Fire protection of ethanol storage plants. *Industrial Process Safety*. 2012; 1: 4-7.
- [10] National Institute of Public Health and the Environment. Guidelines for quantitative risk assessment. CPR. 2005, pp. 3.8.

Aspetti di valutazione del rischio per le attività di stoccaggio sotterraneo di gas in Italia

R. Marrazzo¹, C. Mazzini²

¹ VAL-RTEC, Ispra

² PTR Impianti RIR, Arpae

Sommario

Il paper riassume i contenuti delle Linee Guida, redatte da un GdL istituito dal Coordinamento per l'uniforme applicazione sul territorio nazionale di cui all'art.11 del D.Lgs. 105/2015, il cui scopo è fornire un supporto tecnico alla valutazione dei rapporti di sicurezza degli stabilimenti sotterranei di stoccaggio del gas naturale, per perseguire un'uniformità di valutazione a cura delle AA.CC..

Le tematiche principali trattate riguardano: requisiti normativi; indagine sugli stabilimenti italiani; informazioni relative alla struttura organizzativa aziendale; informazioni sulla classificazione delle sostanze pericolose; sicurezza industriale e approccio metodologico per la valutazione dell'analisi dei rischi degli impianti; sistemi tecnici e di sicurezza.

L'analisi di rischio, per determinare la compatibilità territoriale e la pianificazione di emergenza esterna degli stabilimenti di stoccaggio sotterraneo di gas naturale, è condotta con riferimento agli impianti di superficie delle aree pozzi, impianti di trattamento e compressione, oltre che alle condotte di trasporto. Vengono forniti alcuni riferimenti per individuare i parametri più "critici" delle diverse tecniche di analisi, tenendo conto anche delle corrette misure di sicurezza al fine di limitare le conseguenze di un incidente.

Sono proposti alcuni aspetti migliorativi del quadro normativo: definire una metodologia convalidata di analisi integrata dei rischi, al fine di quantificare l'effetto del sistema di gestione della sicurezza sulla riduzione della probabilità di accadimento ed entità delle conseguenze incidentali; individuare possibili soglie di credibilità per gli eventi; identificare i metodi per eseguire le analisi del rischio NATECH; mettere in atto misure per contenere le emissioni di metano (gas serra) in condizioni diverse dal normale funzionamento.

1. Introduzione

Lo scopo di questo contributo è di illustrare l'attività svolta da un gruppo di lavoro, istituito all'interno del Tavolo di coordinamento nazionale sul D.lgs. 105/2015, il recepimento italiano della direttiva Seveso III (2012/18/UE), finalizzata alla prevenzione degli incidenti rilevanti con sostanze pericolose. Questo gruppo di lavoro era composto da rappresentanti di: Agenzia Regionale per l'Ambiente (ARPA), Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco (VVF), Istituto Nazionale per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), Istituto per la Sicurezza sul Lavoro (INAIL), Regione, Ufficio Nazionale Minerario (UNMIG) e Università.

Lo scopo è quello di fornire supporto tecnico nella valutazione dei rapporti di sicurezza degli impianti di stoccaggio di gas naturale interrati, effettuati dalle Autorità Locali Competenti, al fine di perseguire un'uniformità di valutazione su tutto il territorio nazionale, tenendo conto degli aspetti territoriali impiantistici e sito specifici.

Il documento, in particolare, illustra i principali contenuti delle Linee Guida per la valutazione del rapporto di sicurezza degli stoccaggi sotterranei di gas naturale, che sono state predisposte per le seguenti ragioni [1]: Stabilimenti situati in quattro diverse regioni;

Discrepanze nei criteri per identificare gli scenari di incidente; Discrepanze nelle valutazioni delle conseguenze (aree danneggiate).

Lo scopo è stato quello di creare linee guida condivise al fine di avere una valutazione uniforme su tutto il territorio nazionale delle analisi di rischio prodotte.

Queste le principali sfide affrontate: Sistematizzare l'esperienza di analisi dei rischi maturata negli anni nelle diverse regioni; Indagare su regole e metodologie applicabili agli impianti di stoccaggio di gas sotterranei

1.1 Panoramica dei requisiti legali

Al fine di inquadrare il tema, viene fornita una panoramica della normativa italiana e dei requisiti legali in materia di valutazione dei rapporti di sicurezza e del settore del gas naturale, focalizzando l'attenzione anche sulla situazione degli stabilimenti italiani di Seveso.

Il D.Lgs. n. 105/2015 riguarda gli stabilimenti in cui possono essere presenti sostanze pericolose (ad esempio durante la lavorazione o lo stoccaggio) in quantità superiori a determinate soglie. I gestori degli stabilimenti sono tenuti ad adottare tutte le misure necessarie per prevenire incidenti rilevanti e per limitarne le conseguenze per la salute umana e per l'ambiente.

A seconda della quantità di sostanze pericolose presenti, gli stabilimenti sono classificati in livello inferiore e superiore, con obblighi diversi. I requisiti includono, tra gli altri: notifica di tutti gli stabilimenti interessati; implementazione di una Politica di Prevenzione degli Incidenti Rilevanti (PPIR) e di un Sistema di Gestione della Sicurezza (SGS); produrre un Rapporto di Sicurezza (RdS) per gli stabilimenti di livello superiore; produrre un Piano di Emergenza Interno (PEI) per gli stabilimenti di livello superiore; fornire informazioni in caso di incidenti.

In Italia, in base alle informazioni contenute nell'inventario delle notifiche di stabilimento, in occasione della redazione delle LLGG, erano presenti 994 siti Seveso, suddivisi in 515 stabilimenti di fascia alta e 479 stabilimenti di fascia bassa [2].

Tra questi, dodici siti di stoccaggio sotterraneo di gas naturale operano in quattro diverse regioni del centro nord del Paese: Lombardia, Veneto, Emilia Romagna e Abruzzo.

1.2 Stoccaggio sotterraneo in Italia

I siti di stoccaggio operativi sono siti di produzione di gas esaurito: strutture naturali in cui è stato intrappolato il gas e che, una volta completata la fase di sfruttamento primario, sono state convertite in stoccaggio.

Questi stabilimenti sono: Impianti di superficie (compressori e unità di trattamento); Serbatoi (depositi - sistemi di stoccaggio naturale); Pozzi (collegamento del serbatoio con piante di superficie); Linee di flusso interconnesse

L'attività consiste nello stoccaggio del gas naturale in strutture geologiche sotterranee (iniezione) e nella successiva distribuzione, secondo la domanda del mercato e per garantire l'approvvigionamento "strategico" del Paese.

A causa delle elevate quantità di gas naturale stoccato, gli stoccaggi sotterranei rientrano negli obblighi degli stabilimenti di fascia alta.

1.3 Valutazione dei rischi e rapporto di sicurezza

Nel rapporto di sicurezza, il gestore produce una valutazione dei rischi con la descrizione di un'analisi dei rischi e delle misure per la prevenzione dei pericoli di incidenti rilevanti.

L'autorità italiana competente per la valutazione del rapporto di sicurezza è il Comitato Tecnico Regionale (CTR). È costituito dal Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco (VVF), dall'Agenzia Regionale per l'Ambiente (ARPA), dall'Istituto per la Sicurezza sul Lavoro

(INAIL), dalle Regioni e dai Comuni, dall'Azienda Sanitaria Locale (ASL) e, per il caso specifico del gas naturale sotterraneo stoccaggio, l'Ufficio nazionale minerario (UNMIG). Il comitato nomina un gruppo di lavoro di rappresentanti di VVF, ARPA e UNMIG, che svolge la valutazione tecnica per il rapporto di sicurezza con un approccio multidisciplinare.

La valutazione tecnica individua gli scenari incidentali, le distanze e le frequenze di accadimento dei danni, nonché le misure di sicurezza adottate, ai fini del Piano di Emergenza Esterna (PEE) e della Pianificazione urbanistica e Territoriale.

2. Linee guida per la valutazione del rapporto di sicurezza degli stoccaggi sotterranei di gas naturale

Le "Linee guida per la valutazione del rapporto di sicurezza degli stoccaggi sotterranei di gas naturale" non introduce novità, ma è frutto dell'esperienza maturata negli anni a livello nazionale nella valutazione dei Rapporti di sicurezza di questo tipo di stabilimenti. I criteri raccolti nella linea guida, infatti, fanno riferimento a tecniche, conoscenze e metodologie già esistenti e consolidate per la valutazione dei pericoli.

La specificità di questi impianti è quella di effettuare lo stoccaggio del gas nel sottosuolo all'interno di strutture geologiche complesse, per le quali non sono applicabili le consuete tecniche di analisi del rischio. La sicurezza dello stoccaggio sotterraneo è quindi garantita dalla storia produttiva del giacimento stesso, in quanto le strutture geologiche di copertura hanno garantito la permanenza in sito del gas per milioni di anni, ed è inoltre gestita attraverso la realizzazione di specifici modelli geomeccanici di sito e adottando particolari tecniche di monitoraggio. Illustrati nel documento, la cui valutazione richiede competenze altamente specializzate.

Le linee guida, con un approccio multidisciplinare, forniscono indicazioni tecniche per la valutazione dei rapporti di sicurezza presentati dai gestori dei siti di stoccaggio sotterranei di gas naturale. I contenuti principali sono:

- Informazioni relative allo stabilimento. Attività: serbatoi; unità di trattamento; grappoli; pozzi isolati. Struttura organizzativa
- Classificazione e verifica dello stabilimento soggette a Seveso. Quantità presenti: stoccaggio e trattenuta in serbatoi; piante di superficie; singole piante; altre sostanze
- Sicurezza di stabilimento. Rischio: perdita di integrità dei giacimenti; perdita di contenimento del pozzo (LOC); linee di flusso di collegamento; formazione di idrati; NA-TECH
- Identificazione di eventi e scenari di incidenti. Analisi dell'esperienza storica, analisi preliminare degli impianti critici di superficie
- Valutazione degli eventi e frequenza degli scenari. Valutazione della frequenza: eventi (albero dei guasti e/o banche dati); scenari (albero degli eventi)
- Calcolo delle conseguenze. Identificazione dei termini di origine dell'evento; valutazione della dinamica di rilascio e calcolo delle portate. Calcolo delle conseguenze; valutazione delle distanze di danno attraverso modelli matematici
- Sistemi di sicurezza. Misure di protezione contro i fulmini; sistemi di chiusura. Misure di prevenzione incendi

2.1 Sicurezza degli impianti di stoccaggio del gas naturale

Per quanto concerne il rischio di perdita di integrità di giacimenti e pozzi, esistono due parametri per la valutazione della sicurezza dei giacimenti di gas, considerando una profondità di 1000-2000 m: Il modello geomeccanico per il giacimento di gas fornisce valutazioni quantitative della pressione limite con cui può essere effettuato lo stoccaggio

in sicurezza; Monitoraggio di pressione, microsismicità e deformazione del suolo indicano il mantenimento dello stato del giacimento di gas in condizioni di sicurezza durante l'attività di iniezione e distribuzione

Il pozzo è costituito da "involucro", tubi in acciaio e un riempimento in cemento.

Anomalie con perdite di gas che possono causare rischi sono: Tenuta inefficace dalla cementazione dell'involucro del pozzo; Rischio di eruzione (blow out) del pozzo anche durante le operazioni di manutenzione.

In relazione alla sicurezza delle linee di flusso di collegamento (flow-line), esse sono condotte di collegamento, all'esterno delle recinzioni degli impianti, tra le aree pozzo/cluster e gli impianti di superficie (unità compressori).

In Italia la norma sui "metanodotti" stabilisce le distanze minime di sicurezza dai centri abitati: 100 m per condotte con pressioni massime di esercizio superiori a 24 bar (D.M. 17 aprile 2008). Per quanto riguarda le linee di flusso, nel rapporto di sicurezza, è quindi importante descrivere: percorsi e caratteristiche costruttive; intercettazione - blocco - sistemi di sicurezza.

Un altro aspetto da tenere in debita considerazione, per valutare correttamente la sicurezza delle linee di flusso, è la formazione di idrati che potrebbero ostruire la condotta.

Gli idrati sono composti di molecole di acqua libera e/o di condensa in condotta e gas naturali che cristallizzano in particolari condizioni di pressione e temperatura.

Per contrastare la formazione di idrati, vengono utilizzati inibitori come metanolo o glicole per spostare la curva di stabilità.

La valutazione della formazione di idrati che può portare a variazioni di pressione o temperatura deve essere effettuata in tutte le condizioni dell'impianto (normale funzionamento, fermata, attività di manutenzione). Occorre poi mettere in atto la procedura per la formazione degli idrati e le istruzioni di emergenza se si verifica il fenomeno.

Per quanto attiene alla sicurezza NA-TECH, nei casi tipici di eventi geofisici e fulminei, dissesto idrogeologico, ecc., un'analisi di rischio Na-Tech mostra, ad esempio, se parti dell'impianto non sono sufficientemente sicure.

Una corretta analisi di sicurezza deve identificare: Le azioni da attuare attraverso un piano di adeguamento per rendere sicuro lo stabilimento; La valutazione del rischio attraverso l'individuazione di possibili scenari di incidente e delle relative aree di danno Misure di prevenzione/protezione che garantiscono la sicurezza dell'impianto.

2.2 Analisi dei rischi per gli impianti di superficie

Per l'identificazione degli eventi e dei conseguenti scenari incidentali è possibile fare riferimento alle tecniche tipiche come esperienza storica, analisi what-if, FMEA-FMECA, HazOp.

L'analisi si sviluppa come segue: Analisi storica interna. Copre: individuazione delle cause di incidenti, mancati incidenti, anomalie avvenute all'interno dell'impianto e, successivamente, incendi, esplosioni, avvenute emissioni di sostanze pericolose, formazione di idrati; Analisi storica esterna degli eventi, avvenuti in stabilimenti simili, attraverso la consultazione di banche dati aggiornate (MHIDAS, FACTS, eMARS, ecc.); Analisi dell'esperienza storica dei "punti di consegna" o "nodi" della rete nazionale di distribuzione del gas naturale. Questi "nodi", che sono strettamente interconnessi con gli impianti, sono localizzati in aree adiacenti allo stabilimento.

Occorre prestare attenzione alle banche dati di riferimento e alle misure impiantistiche e/o gestionali per prevenire eventi o limitarne la probabilità e le conseguenze.

Per la valutazione della frequenza di eventi e scenari, l'identificazione dei tassi di guasto differisce a seconda dei sistemi complessi (analisi dell'albero dei guasti) o dei guasti "casuali" di un singolo componente (apparecchiature, sistemi, tubazioni).

I tassi di guasto sono presi da database di affidabilità (Oreda, EIGIG, HSE, TNO Purple Book, EIGH, ecc.), che hanno il seguente limite: attribuire ad un componente ben identificato i risultati riscontrati su altri componenti identici, ma le cui caratteristiche di utilizzo e condizioni ambientali di esercizio possono essere sostanzialmente differenti. È importante dimostrare che i dati sono rappresentativi dello specifico impianto e che i tassi di guasto scelti possono essere considerati conservativi.

Negli impianti di stoccaggio del gas interrati, il guasto casuale delle tubazioni è alla base (Top-Event) degli eventi più significativi (aree di danno più estese).

Nel caso particolare delle tubazioni fuori terra [3, 4], le linee guida effettuano un confronto tra banche dati (HSE Failure Rate/TNO Purple Book 2005), fornendo valori di frequenza generali per la rottura delle tubazioni in un intervallo di 10^{-5} – 10^{-7} occ/a*m (Figura 1).

Pipe Diameters Rupture Diameter	0"-2"		2"-6"		6"-11"		11"-19"		19"-39"	
	HSE	TNO	HSE	TNO	HSE	TNO	HSE	TNO	HSE	TNO
1/9"	$1 \cdot 10^{-6}$		$2 \cdot 10^{-6}$							
1/6"					$1 \cdot 10^{-6}$		$8 \cdot 10^{-7}$		$7 \cdot 10^{-7}$	
1"	$5 \cdot 10^{-6}$		$1 \cdot 10^{-6}$		$7 \cdot 10^{-7}$		$5 \cdot 10^{-7}$		$4 \cdot 10^{-7}$	
10% DN		$5 \cdot 10^{-6}$		da $2 \cdot 10^{-6}$ a $5 \cdot 10^{-6}$		$5 \cdot 10^{-7}$		$5 \cdot 10^{-7}$		$5 \cdot 10^{-7}$
Total Rupture	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	da $3 \cdot 10^{-7}$ a $1 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$

Figura 1. Valori di frequenza generali per guasto della tubazione [occ/(y*m)]

Per i tubi interrati, un riferimento importante è il Rapporto European Gas Pipeline Incident Data Group (EGIG) [5].

Le linee guida suggeriscono, tuttavia, che le frequenze di guasto indicate nel Rapporto EGIG possano essere prese come riferimento per le tubazioni del gas naturale (interrate o non interrate, anche in stabilimento) [6].

Un'ultima considerazione va fatta sull'incidenza delle diverse cause di guasto sulla frequenza. Ad esempio, il Rapporto CONCAWE identifica la percentuale di cause di guasto per tubazioni interrate che trasportano prodotti petroliferi caldi o freddi (periodo 2011-2016) come di seguito: corrosione (90% - prodotti caldi; 20% prodotti freddi), errori operativi (10% - freddo) e cause meccaniche (20% - freddo) [7].

In merito al calcolo della frequenza, nell'ambito di un approccio integrato alla valutazione del rischio, la riduzione delle frequenze di accadimento attraverso un'analisi integrata che combina l'analisi dei rischi con il Sistema di Gestione della Sicurezza (SGS) consente di quantificare gli effetti positivi del sistema al fine di prevenire incidenti rilevanti.

Se è stato preparato un piano di ispezione delle apparecchiature e delle tubazioni basato sull'analisi dei rischi, è possibile tener conto della sua efficacia nella preparazione di un'analisi integrata al fine di ridurre la frequenza degli incidenti. Si suggerisce l'utilizzo di metodologie per la redazione di un piano di ispezione risk based come lo standard API 581:2016 [8].

Lo standard API è stato sviluppato dall'American Petroleum Institute per definire, implementare e gestire un programma di ispezione basato sull'analisi dei rischi. Se questo standard viene utilizzato in modo improprio e parziale (es. prendendo in considerazione in modo generico solo le procedure SMS) i risultati che si ottengono saranno errati, perché si avrà una riduzione di almeno un ordine di grandezza delle frequenze generali degli apparati e guasto del tubo.

Esistono metodologie per l'integrazione delle tecniche di analisi del rischio, con benefici in termini di riduzione della frequenza degli eventi incidentali, derivanti dall'implementazione di un SMS. Possono agire sulle cause di guasto, sui modi per prevenirle e sulle misure che possono ridurre la frequenza di una determinata causa e la successiva frequenza totale.

Queste metodologie consentono la riduzione delle frequenze massime per sistemi complessi - Fault Tree Analysis [9], e in particolare per guasti casuali di tubazioni [10]. Prendendo ad esempio il parametro "corrosione esterna", come causa di guasto principale come sopra indicato, il piano di ispezione mirato a questo problema riduce la frequenza di guasto delle tubazioni. La quantificazione di tale riduzione si ottiene applicando le metodologie indicate [11].

Per il calcolo della frequenza degli scenari utilizzando l'albero degli eventi è infine importante ricordare che i valori di probabilità di innesco (innesco immediato o ritardato) devono essere pertinenti alla realtà dell'impianto o stimati cautamente a favore della sicurezza [3, 12]. Di seguito è riportato un esempio di albero degli eventi in caso di impianti antincendio e blocchi per sgancio in fase gas (Figura 2).

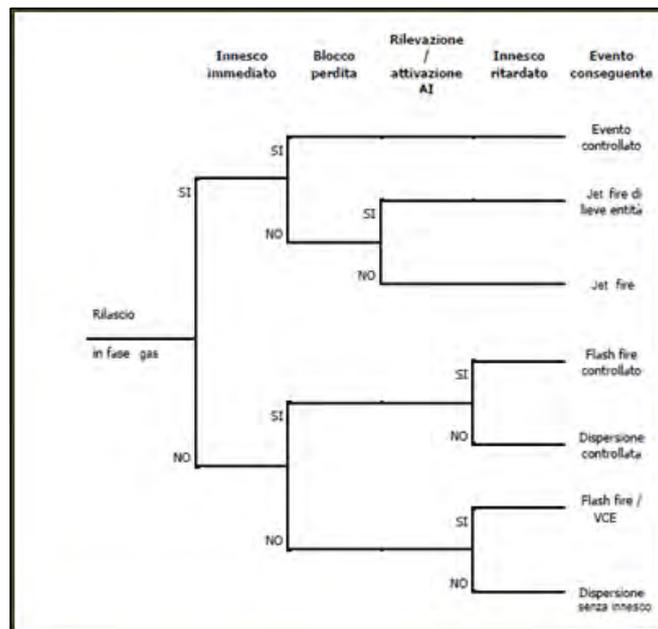


Figura 2. Albero degli eventi in caso di impianti e blocchi di sicurezza antincendio

Per il calcolo delle conseguenze, è necessario modellare i fenomeni fisici di rilascio di metano in condizioni di alta pressione. Queste sono le fasi di rilascio (Figura 3):

- Fase 1: espansione dalla pressione iniziale alla pressione del foro
- Fase 2: espansione fino alla pressione atmosferica
- Fase 3: diluizione iniziale

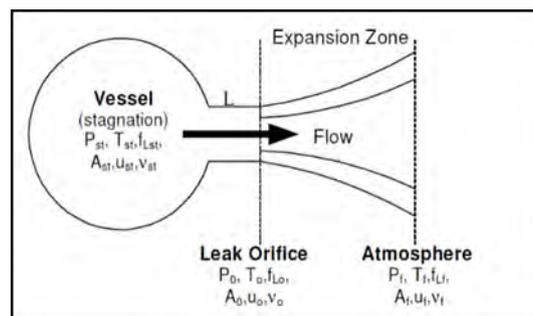


Figura 3. Modellazione di un rilascio di metano ad alta pressione

Il metano rilasciato è in condizioni supercritiche, cioè un fluido si trova a temperatura e pressione superiori a quelle critiche (nessuna distinzione tra fase gassosa e fase liquida). Le proprietà sono intermedie tra quelle di un gas e di un liquido e la sua densità può essere maggiore di quella dei gas in condizioni ordinarie.

La densità del metano influenza proporzionalmente la velocità di rilascio e quindi la velocità di rilascio del gas deve essere calcolata tenendo conto della densità del gas in condizioni supercritiche.

I possibili scenari di incidente in caso di rilascio di metano nelle condizioni sopra indicate sono:

- Flash Fire. Incendio di una nube di gas infiammabile che si disperde nell'atmosfera sotto forma di gas neutro leggero; i fattori che influenzano la modellazione sono densità, condizioni meteorologiche, durata del rilascio, diluizione della nuvola, rugosità. In caso di sistemi di intercettazione, la durata del rilascio e la quantità rilasciata saranno inferiori: la frequenza dello scenario di flash fire potrebbe essere ridotta, poiché la nuvola più piccola ha meno probabilità di correre verso una fonte di innesco. Pertanto, i tempi di intervento ipotizzati devono essere coerenti con le procedure di emergenza ed essere verificati attraverso sopralluoghi in campo.
- Jet Fire. Il rilascio di un gas in pressione con accensione immediata e fuoco di una nuvola; i fattori che influenzano la modellazione sono la densità del gas, la direzione del getto, la portata di rilascio. Le aree di danno da jet fire sono normalmente incluse nelle aree di danno per i corrispondenti scenari di flash fire: devono essere considerate soprattutto ai fini della valutazione di un possibile effetto domino.
- Vapour Cloud Explosion (VCE). Si verifica quando un confinamento della massa di vapori infiammabili viene miscelato con l'aria al momento dell'accensione. È necessario valutare se la miscela aria/gas naturale può rientrare nel range di infiammabilità, calcolando la quantità di miscela infiammabile tra LFL (Limite Inferiore di Infiammabilità) e UFL (Limite Superiore di Infiammabilità). Condizioni che facilitano il verificarsi di un VCE sono i rilasci in aree ad alto grado di confinamento o in ambienti chiusi.

La verifica dei modelli computazionali scelti per la stima delle conseguenze deve essere adeguata alla realtà del fenomeno fisico: alcuni modelli non tengono conto delle "condizioni supercritiche" del metano.

In particolare, esistono software che non tengono automaticamente conto dell'espansione e diluizione iniziale del getto di metano. È quindi necessario applicare un fattore di diluizione al range di rilascio (circa 1/10): il valore della portata ricalcolata deve essere utilizzato come dato di input per qualsiasi modello di dispersione gaussiana, poiché per questo modello la concentrazione del gas è direttamente proporzionale al flusso di rilascio.

Ai soli fini della redazione delle linee guida, i modelli computazionali sono stati testati come segue: Phast®-DNV GL (versione 7.11). Tiene conto della diluizione iniziale della nube dovuta all'alta velocità e quindi al rilascio di turbolenze (condizioni supercritiche del metano); Effects®-TNO (versione 10). Il modello di dispersione gaussiana non tiene conto della diluizione iniziale del gas e quindi dà risultati più conservativi.

Per i sistemi di sicurezza, le principali misure di prevenzione e protezione volte a ridurre la frequenza e/o l'entità delle conseguenze degli eventi incidentali sono: Sistemi di chiusura per mettere in sicurezza gli impianti: a) ESD (Emergency Shut Down): chiusura di tutte le valvole di sezionamento dell'impianto e apertura delle valvole di blow down con conseguente depressurizzazione dell'impianto; b) PSD (Process Shut Down): arresto della produzione mediante chiusura delle valvole di sezionamento (SDV) e messa in sicurezza dell'unità; c) LSD (Local Shut Down): blocco e messa in sicurezza dell'unità, o

intercettazione e arresto delle singole apparecchiature; Misure e sistemi di prevenzione incendi.

2.3 Conclusioni sulla valutazione del rapporto di sicurezza

Ai soli fini della redazione delle linee guida, di seguito è riportato un esempio di pianificazione di emergenza esterna (Figura 4).



Figura 4. Esempio di pianificazione di emergenza esterna tramite georeferenziazione della valutazione delle conseguenze

Questo esempio numerico può essere utile per comprendere le condizioni di utilizzo dei modelli computazionali commerciali per lo studio delle conseguenze in caso di rilascio di metano in condizioni supercritiche.

In particolare, mediante georeferenziazione della valutazione delle conseguenze, è stato sviluppato un flash fire, causato dal cedimento di una tubazione del gas naturale (foro 152 mm) ad una pressione di esercizio di 140 bar (top-event). Il calcolo è stato effettuato nelle seguenti condizioni meteorologiche nell'area: classe di stabilità atmosferica di Pasquill D5 (neutro) con velocità del vento di 5 m/s.

Le distanze di danno risultanti sono 284,91 m (corrispondente alla soglia "LFL") e 435,88 m (corrispondente alla soglia "1/2 LFL").

3. Conclusioni

Scopo del documento è fornire un supporto tecnico di riferimento alla valutazione dei Rapporti di Sicurezza degli impianti di stoccaggio del gas naturale sotterraneo, al fine di perseguire una maggiore uniformità di valutazione su tutto il territorio nazionale. Sebbene ogni installazione possa presentare aspetti impiantistici e territoriali strettamente site specific, esistono comunque elementi che accomunano tutte le installazioni.

Le "Linee guida per la valutazione del rapporto di sicurezza degli stoccaggi sotterranei di gas naturale" forniscono indicazioni e approfondimenti specifici, con l'obiettivo di supportare e indirizzare le attività relative alla valutazione dei rischi di incidente rilevante. Il D.Lgs. 105/15 definisce criteri, dati, riferimenti, informazioni per la redazione del Rapporto di Sicurezza e affida al responsabile il compito di individuare i pericoli di incidenti rilevanti e le misure; di conseguenza, spetta al gestore scegliere la metodologia da utilizzare per l'identificazione sistematica degli incidenti, la valutazione di probabilità/frequenze e il calcolo delle conseguenze, poiché tale metodologia deve essere giustificata e tecnicamente giustificata nel Rapporto di Sicurezza.

Spetta invece all'Autorità competente «assicurare che la descrizione di ciascuno scenario, corredata delle evidenze a supporto, sia formulata in modo da evidenziare la coerenza tra lo scenario individuato e le misure adottate».

L'approccio utilizzato per la redazione delle linee guida prevedeva inizialmente la ricerca dei riferimenti delle normative tecniche applicabili allo stoccaggio sotterraneo di gas, includendo una panoramica degli approcci adottati in alcuni paesi europei per la valutazione del rischio di incidente rilevante; successivamente sono state esaminate le problematiche relative al giacimento e ai pozzi, per finire con un approfondimento delle caratteristiche peculiari degli impianti di superficie, considerando i relativi aspetti di sicurezza con riferimento agli incidenti rilevanti.

Le linee guida hanno raggiunto i seguenti obiettivi:

- L'individuazione delle norme applicabili agli impianti di stoccaggio del gas naturale e dei rispettivi ambiti di applicazione e modalità di coordinamento
- L'identificazione di specifici aspetti di sicurezza individuali relativi a serbatoi, impianti di superficie e linee di flusso
- Criteri per la scelta di banche dati sugli incidenti all'avanguardia e fonti di dati di affidabilità
- Condizioni di fattibilità della norma API 581 (RBI) nell'analisi dei rischi dei rapporti di sicurezza
- Condizioni di utilizzo di modelli computazionali commerciali per lo studio delle conseguenze per i rilasci di metano in condizioni supercritiche
- Uniformità della valutazione dei rischi su tutto il territorio nazionale

Alcune indicazioni emerse per migliorare il quadro normativo nazionale:

- Definire una metodologia validata di analisi dei rischi integrata al fine di quantificare l'effetto del sistema di gestione della sicurezza
- Stabilire le procedure necessarie sia per ridurre la probabilità di accadimento sia per ridurre l'entità delle conseguenze degli incidenti rilevanti
- Identificare le soglie di credibilità per gli eventi di incidente, come in altri paesi in Europa
- Riconoscere i modi per eseguire analisi dei rischi Na-Tech
- Mettere in atto misure per contenere le emissioni di metano (gas serra) in condizioni diverse dal normale funzionamento

Bibliografia

[1] MATTM. (2018, October). Gli stoccaggi sotterranei di gas naturale - Linee Guida per la valutazione dei Rapporti di Sicurezza. Coordinamento per l'uniforme applicazione sul territorio nazionale di cui all'art. 11 del decreto legislativo 26 Giugno 2015 n. 105.

[2] MATTM and ISPRA (2018, October). Inventario nazionale degli stabilimenti suscettibili di causare incidenti rilevanti ai sensi dell'art. 5, comma 3 del Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105.

[3] TNO. (1999-2005). Committee for the Prevention of Disasters, CPR. doc CPR 18 E. "Guidelines for quantitative risk assessment – Purple Book".

[4] HSE. (2008, December). Research Report RR671 "Failure rates for underground gas storage".

[5] EGIG. (2018, March). Doc. number VA 17.R.0395. European Gas Pipeline Incident Data Group. "10th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970 – 2016)".

[6] RIVM. (2011). Report 620550004/2011. "On-site natural gas piping - scenarios and failure frequencies".

- [7] CONCAWE. (2018, March). Report No. 6/18. "Performance of European cross-country oil pipelines – Statistical summary of reported spillages in 2016 and since 1971".
- [8] API. (2016, April). American Petroleum Institute. "API RP 581 - Risk Based Inspection Methodology". Third edition
- [9] EC. 2000, September. "I-RISK: A quantified integrated technical and Management risk control and monitoring methodology". EUR-19320.
- [10] Milazzo et al. 2010, January. "The Influence of Risk Prevention Measures on the Frequency of Failure of Piping". International Journal of Performability Engineering. Vol.6.
- [11] Goodfellow et al. (2018, February). "UKOPA Pipeline Product Loss Incidents and Faults Report (1962 – 2016)". Report Number: UKOPA/17/002, Issue: 1.1.
- [12] Spencer et al. (1997). "Ignition Probability of Flammable Gases (Phase1)". HSE Contractor Report RSU8000/081, HSE Books
- [13] GU. (2015, July). DECRETO LEGISLATIVO 26 giugno 2015, n. 105. SO n. 161 del 14 luglio 2015 "Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose". (Gazz. Uff. 14 luglio 2015, n. 161, S.O.).
- [14] GU. (2008, May). D.M. 17 aprile 2008 "Regola tecnica per la progettazione, costruzione, collaudo, esercizio e sorveglianza delle opere e degli impianti di trasporto di gas naturale con densità non superiore a 0,8" (Gazz. Uff. 8 maggio 2008, n. 107, S.O.).

Sistemi di rilevamento gas tossici e funzioni strumentate di sicurezza in impianti a rischio di incidente rilevante

G. Clerici¹, V. Prete², G. Gorrino³, I. Oliaro¹, E. Portigliatti¹

¹ Studio Sirio Srl

² Inail - Uot di Alessandria

³ Inail - Uot di Roma

Sommario

Al fine di mitigare i rilasci di gas e liquidi tossici in impianti a rischio di incidente rilevante e garantire la compatibilità territoriale, può risultare necessaria l'installazione di un sistema di rilevamento che attivi tempestivamente azioni di mitigazione, diventando quindi una funzione strumentata di sicurezza. I riferimenti normativi applicabili non forniscono indicazioni di dettaglio sulla modalità di determinazione della consistenza del sistema di rilevamento.

La metodologia di progettazione proposta richiede di definire una modalità di rilascio di riferimento, identificare le principali sorgenti di rilascio all'interno della struttura e le direzioni principali del vento, stabilire le soglie di attivazione dei sensori, proporre una disposizione preliminare degli stessi nello spazio ed applicare estensivamente i modelli di simulazione della dispersione per ricavare dei profili di iso-concentrazione (mappatura di riferimento). Il grado di difficoltà viene elevato nel caso di rispetto di un livello SIL 2 per una funzione strumentata di sicurezza, di limitazione fisica della struttura, di aree congestionate, di interazione con sistemi di rilevamento già esistenti. Lo spostamento della mappatura di riferimento in corrispondenza dei punti di rilascio consente di verificare il grado di copertura garantito e ottimizzare numero e posizione dei sensori, bilanciando vincoli di prestazione richiesti e impatto economico dell'investimento.

L'adozione di tale metodologia, basata su modelli di simulazione, consente una riduzione del livello di rischio meglio giustificabile e favorisce il confronto con i gruppi di lavoro nominati dal CTR per l'istruttoria sui RdS.

Verranno presentati due casi rappresentativi reali, un impianto di rilevazione da realizzare ex novo e uno esistente da potenziare e migliorare.

1. Sistemi di rilevamento gas tossici

Per gli impianti a rischio di incidente rilevante soggetti al D. Lgs. 105/15 [1], vengono elaborate analisi degli incidenti per identificare gli eventi incidentali, valutarne la frequenza di accadimento, determinare i possibili scenari, in termini di tipologia (incendio di pozza, incendio di getto ad alta velocità, esplosione di una nube, flashfire, rilascio tossico) ed anche in termini di quantità di sostanza rilasciata / durata dello scenario.

Nell'ambito dei rilasci tossici, quando si devono studiare fuoriuscite di gas/vapori di elevata tossicità (ad esempio, cloro, acido cloridrico anidro, acido fluoridrico, ammoniaca anidra, idrogeno solforato), a causa della perdita di contenimento da un'apparecchiatura o una tubazione, è probabile che la modellazione della dispersione comporti la formazione di nubi di consistente estensione, con profili di iso-concentrazione in grado di raggiungere e superare anche i confini dello Stabilimento.

In questo caso la tempestività della rilevazione del rilascio di sostanza pericolosa e dell'intervento di intercettazione è fondamentale per mitigare le conseguenze e raggiungere un livello di rischio accettabile.

Parimenti deve essere assicurata un'adeguata disponibilità del sistema di rilevamento e delle relative azioni (chiusura valvole su linee di processo, fermata pompa di trasferimento, apertura valvole di alimentazione acqua a sistemi a diluvio o barriere in grado di assorbire i gas / vapori, apertura valvola/e su linee di scarico del liquido in recipiente di accumulo per emergenza etc.).

Per combinare adeguatamente tempestività e disponibilità, la progettazione del sistema di rilevamento riveste quindi una fondamentale importanza e richiede un'attività di studio e valutazione che va oltre quanto richiesto o suggerito dalle norme tecniche disponibili.

Vi sono in particolare due aspetti fondamentali per valutare l'adeguatezza di un sistema di rilevamento:

- il numero dei sensori
- la disposizione dei sensori

per i quali cercare riferimenti normativi e/o definire un metodo di supporto alla progettazione.

2. Norme tecniche su sistemi di rilevamento gas

Attualmente sono utilizzabili le seguenti norme tecniche:

- UNI10752 [2] - Sicurezza attiva per impianti industriali – Sistemi di rilevamento di fluidi pericolosi – Requisiti e criteri di installazione
- CEI EN 50402 [3] – Prescrizioni per la sicurezza funzionale dei sistemi fissi di rilevazione gas

Nella UNI 10752 sono specificati i requisiti ed i criteri generali del sistema di rilevamento, per poter iniziare ad impostare correttamente una progettazione:

- Posizionamento all'interno o all'esterno di edifici
- Tipologia delle sorgenti potenziali di gas
- Natura e caratteristiche dei gas presenti
- Presenza di personale
- Tipologia delle strutture da proteggere
- Topografia dei luoghi
- Movimenti di aria dovuti al vento
- Movimenti di aria all'interno di edifici, dovuti ad esempio a ventilazioni meccaniche
- Distanza dai possibili punti di emissione
- Modalità di dispersione

Le indicazioni della norma costituiscono però solo il punto di partenza; è poi in fase di progettazione che si deve effettuare un approfondimento tecnico per poter rispondere alle domande fondamentali riguardanti il numero e la disposizione dei sensori.

Il livello di difficoltà nella progettazione aumenta significativamente se si introduce anche la sicurezza funzionale.

La norma CEI EN 50402 si occupa della caratterizzazione di un sistema di rilevamento gas tramite una SIL capability, per permettere all'utilizzatore di incorporare il sistema di rilevamento gas in un sistema di sicurezza globale, in accordo con i livelli di integrità ai fini della sicurezza della IEC 61508 [4].

Questa norma tecnica è da intendersi come standard di prodotto basato sulla IEC 61508 [4] ed include requisiti aggiuntivi della EN ISO 13849-1 [5]; non specifica però i requisiti per l'installazione e la manutenzione di sistemi di rilevamento gas; non fornisce inoltre indicazioni in merito al posizionamento dei sensori.

È bene ricordare inoltre che è applicabile solo per sistemi di rilevamento gas che attivino una funzione strumentata di sicurezza, per la quale sia richiesto un livello di integrità SIL.

La CEI EN 50402 è in vigore da 14 anni e viene anche richiamata in occasione di istruttorie su Rapporti di sicurezza o in pareri di Comandi dei VVF a chiusura di esami progetto di modifiche o nuove installazioni in Stabilimenti chimici.

Nell'ambito della valutazione di rischio di un nuovo impianto con presenza di gas pericolosi, al gestore è quindi fortemente raccomandato di:

- stabilire la necessità di implementazione di un sistema di rilevamento gas/vapori,
- determinare l'obbligo/opportunità di introdurre una funzione strumentata di sicurezza basata sul sistema di rilevamento gas,
- definire il livello di integrità richiesto,
- progettare il proprio sistema di rilevamento in base a tale livello e quindi con una ricaduta importante su numero, disposizione e SIL capability dei sensori,
- realizzare l'impianto in modo da garantire il SIL richiesto,
- garantire nel tempo il mantenimento del livello SIL del sistema di rilevamento.

3. Definizione di un metodo

Per affrontare la fase di progettazione di un impianto di rilevazione di un gas pericoloso, in particolare tossico, a seguito dell'esecuzione di studi applicativi successivi si è giunti alla definizione di un metodo, che si sviluppa e si arricchisce con l'accumularsi delle esperienze. Nel presente articolo si considera l'ipotesi di un rilascio di gas tossico all'interno di un impianto chimico ubicato all'aperto, su impalcatura metallica, con prevista installazione di un sistema di rilevazione costituito da rilevatori puntiformi.

Si illustra di seguito uno schema di flusso:

- a) analisi incidenti e necessità di introduzione di una SIF basata su rilevamento gas;
- b) determinazione del livello di integrità SIL della SIF;
- c) acquisizione documenti tecnici dell'impianto (piante e viste della struttura, indicazione posizione apparecchi e tubazioni, piping layout);
- d) caratterizzazione del gas e modalità di esercizio (fase gassosa, fase mista, fase liquida, più o meno pesante dell'aria, concentrazioni tossiche di riferimento);
- e) identificazione condizioni ambientali di riferimento (due condizioni ben differenti: diurno, classe D e relative velocità del vento e temperatura ambiente; notturno, classe F e relative velocità del vento e temperatura ambiente; direzioni principali del vento);
- f) identificazione dei punti potenziali di rilascio all'interno della struttura e soprattutto più vicini al perimetro della stessa (posizione di flange, valvole, tenute pompe o sfiato da tenute compressore);
- g) proposta preliminare di disposizione dei sensori di gas nel volume dell'installazione; lo svolgimento delle attività di cui ai punti d) ed e) consente al progettista di identificare aree e posizioni più critiche; le simulazioni di rilascio elaborate in fase di sviluppo analisi degli incidenti gli permettono di valutare se la gravità potenziale degli impatti varia consistentemente con la quota del rilascio. Anche il percorso di accesso dell'operatore all'interno della struttura durante il giro di ispezione può fornire un'indicazione. In caso di un impianto esistente, risultano utili le informazioni tratte dagli operatori, in merito al rilevamento, nel tempo, di punti preferenziali di perdita;
- h) identificazione modalità di rilascio di riferimento; è un punto particolarmente delicato e correlato con le assunzioni adottate nell'analisi incidenti. La necessità del sistema di rilevamento potrebbe derivare da un'ipotesi di area di efflusso elevata, in grado di generare un ampio profilo di iso-concentrazione; ciò comporta una maggiore probabilità di coinvolgimento di più sensori e porta a stimare un numero minimo relativamente basso. Conservativamente si può adottare un'area di efflusso di minore

estensione, più commisurata ad una “normale” rottura random (ad esempio, perdita da flangia con area di efflusso dell'ordine di 1-3 mm²).

Bisogna inoltre verificare la necessità di configurare rilasci in fase liquida e rilasci in fase gas/vapore, stante la distribuzione potenzialmente disuniforme della sostanza nella struttura d'impianto.

- i) simulazione del rilascio mediante PHAST Professional;
- j) determinazione profili di iso-concentrazione per il rilascio di riferimento. La simulazione viene svolta per la prima soglia di attivazione dei sensori.
- k) posizionamento dei profili in corrispondenza dei punti di rilascio;
- l) verifica del numero di sensori raggiunti dai profili;
- m) 1° step di iterazione: riposizionamento e/o introduzione nuovi sensori per coprire adeguatamente le aree;
- n) seconda verifica del numero di sensori raggiunti dai profili;
- o) fine iterazione: proposta verificata di disposizione planimetrica dei sensori;
- p) revisione critica della proposta con i Servizi Tecnici di Stabilimento;
- q) implementazione modifiche ed affinamenti;
- r) emissione relazione di progetto con indicazione numero e posizione dei sensori; revisione dei disegni con aggiunta della posizione di sirene, lampeggianti e pulsanti locali, la cui posizione è stabilita in collaborazione con i responsabili di conduzione del reparto.

4. Casi di studio

4.1 Studio per il sistema di rilevamento gas/vapori tossici di una nuova sezione di impianto

Il primo caso proposto tratta di un impalcato di dimensioni limitate, in cui è stata inserita una nuova sezione di impianto, ove si riscontra la presenza di gas tossico e di una fase liquida ricca in sostanze che, idrolizzando con l'aria, liberano vapori tossici.

Durante la fase di analisi incidenti, i rilevatori sono stati posizionati in prossimità delle sorgenti di rilascio, a circa 1.5 m dal piano di calpestio. Effettuando le simulazioni con il programma Phast Professional della DNV, sono stati riscontrati i seguenti aspetti:

- nella zona al di sotto del reattore, ove è presente la pozza di liquido, il pavimento ha una pendenza verso un pozzetto di raccolta, per cui la nube, essendo pesante, non verrebbe rilevata prontamente dai sensori posizionati a 1.5 m da terra.
- per i rilasci in quota, soprattutto se direzionati verso il basso, i rilevatori posizionati attorno alla testa del reattore sono troppo vicini per poterli rilevare. Si rende quindi necessario analizzare le strutture e gli impalcati circostanti per trovare un punto dove posizionare i sensori a una distanza tale da intercettare il rilascio quando esso è abbastanza consistente.

Il profilo di iso-concentrazione di un rilascio da un foro di piccole dimensioni (1 – 3 mm²), anche in caso di una pressione non eccessiva (meno di 2 bar g), può essere raffigurato, in piano, mediante una ellisse che, alle estremità, è di estensione limitata. Allontanandosi dalla quota del rilascio, l'ellisse che rappresenta il profilo di isoconcentrazione si allontana a sua volta dal punto di emissione.

Si riportano, a titolo di esempio, i grafici che illustrano un rilascio di gas tossico da flangia. Il punto di rilascio è a 6.5 m di quota, mentre i rilevatori si trovano a 8 m, 6.5 m e 1.5 m di quota da terra. A titolo di esempio, si riportano soltanto i rilasci in orizzontale e alle quote più elevate.

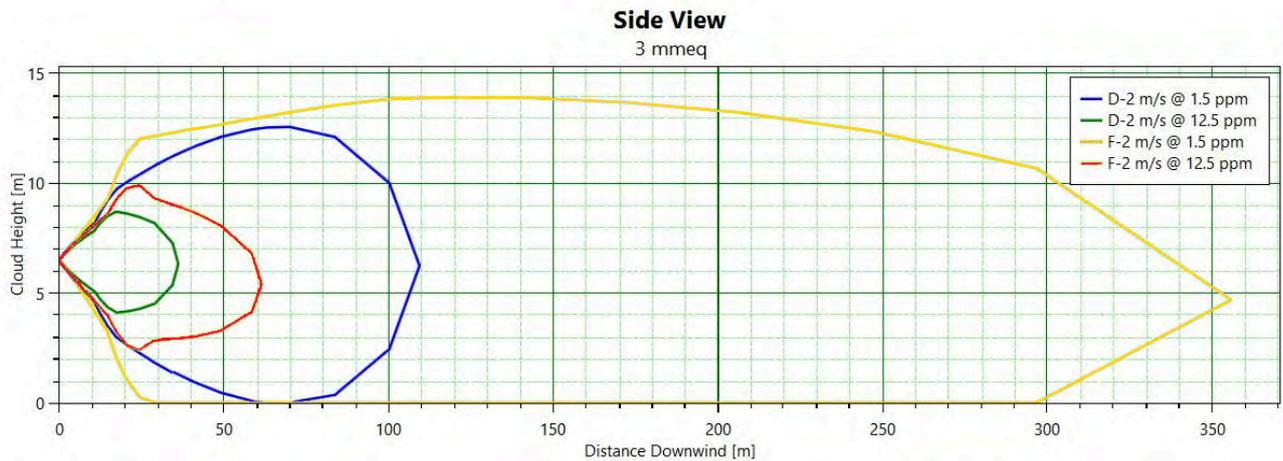


Figura 1. Rilascio di gas tossico da flangia, in orizzontale, vista laterale

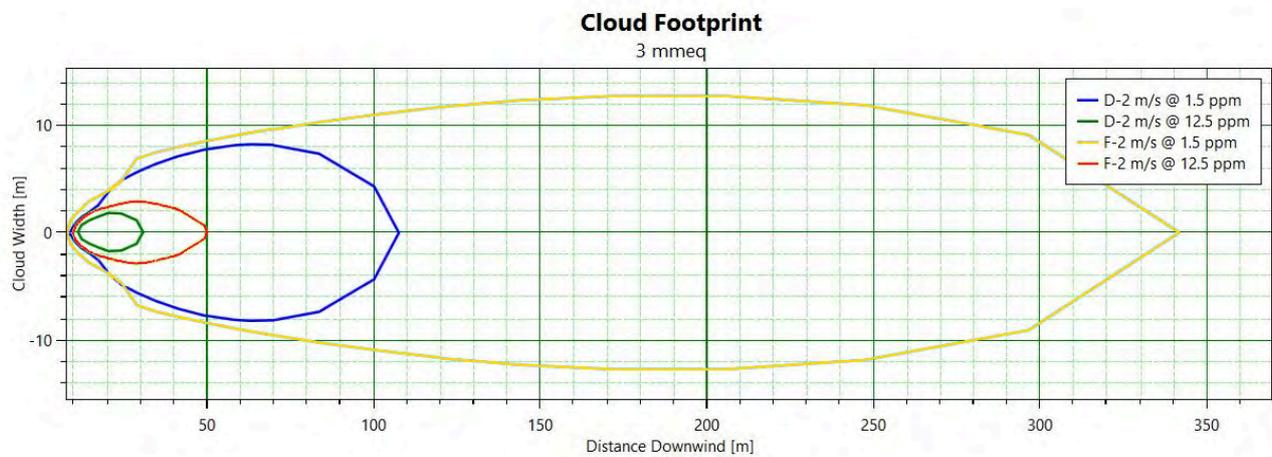


Figura 2. Rilascio di gas tossico da flangia, in orizzontale, vista in pianta, sezione a 8 m

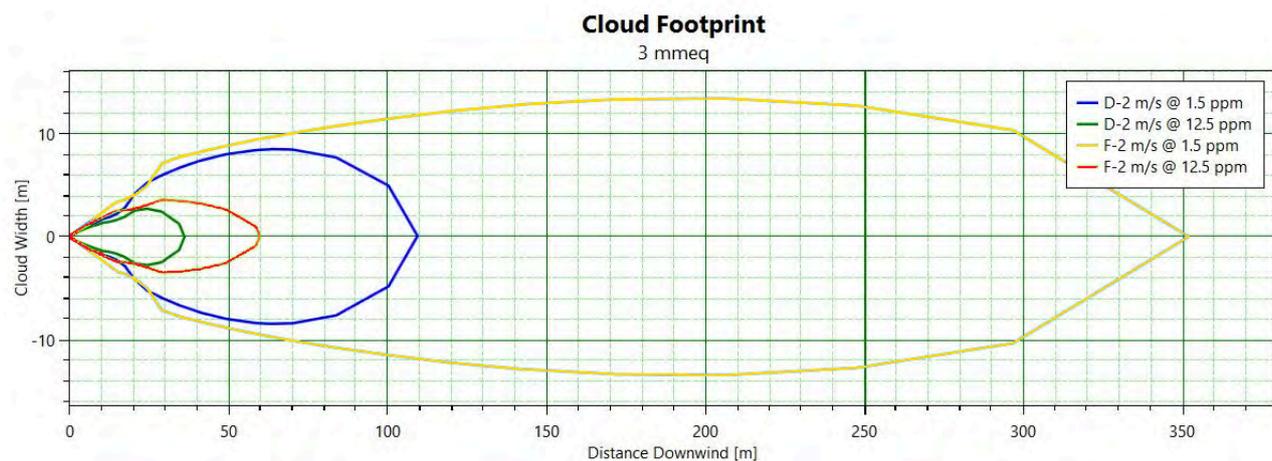


Figura 3. Rilascio di gas tossico da flangia, in orizzontale, vista in pianta, sezione a 6.5 m

Tracciando i rilasci sulla planimetria, si ottiene il seguente risultato (in questi disegni, i sensori sono posizionati su due livelli: quelli attorno al reattore sono a 8 m di quota, mentre i restanti sono a 6.5 m):

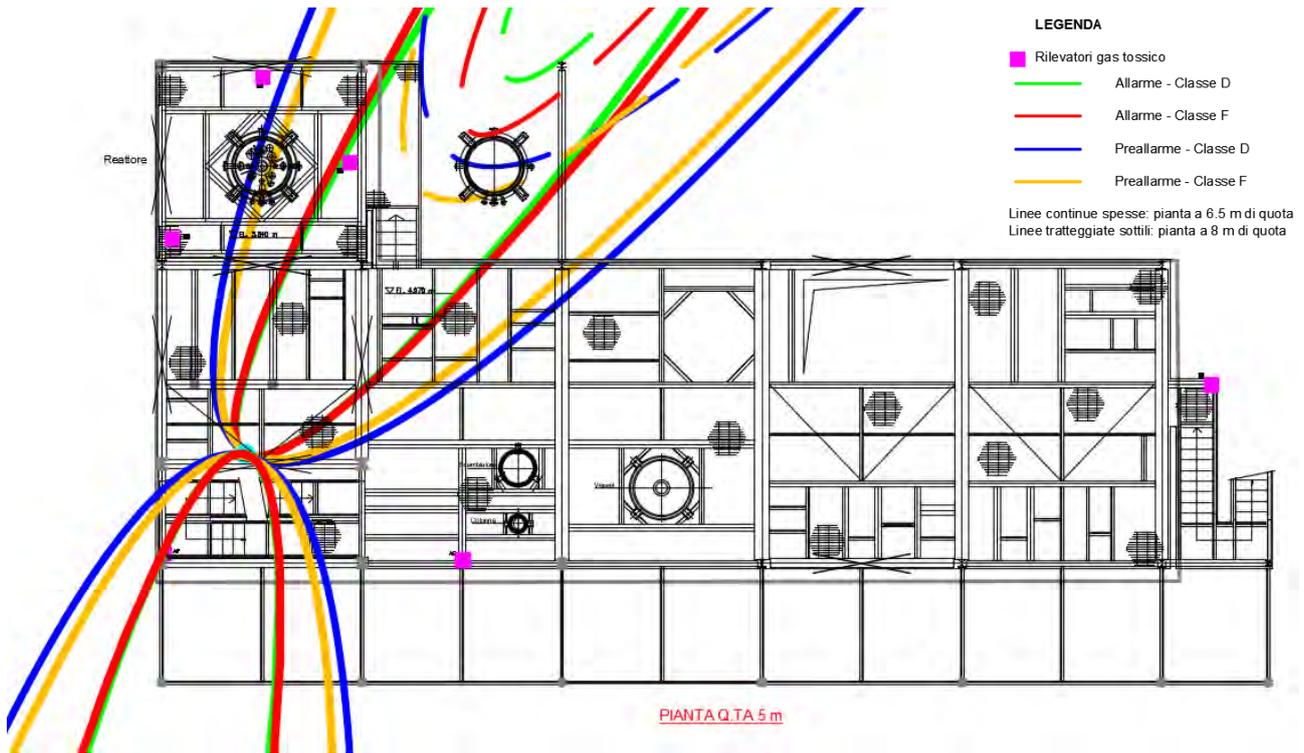


Figura 4. Rilascio di gas tossico da flangia, in orizzontale, pianta del rilascio a 6.5 m di quota (linee continue) e a 8 m di quota (linee tratteggiate) nelle principali direzioni del vento

Procedendo analogamente per il rilascio verso il basso, si ottiene il seguente risultato (riportato direttamente sulla planimetria)

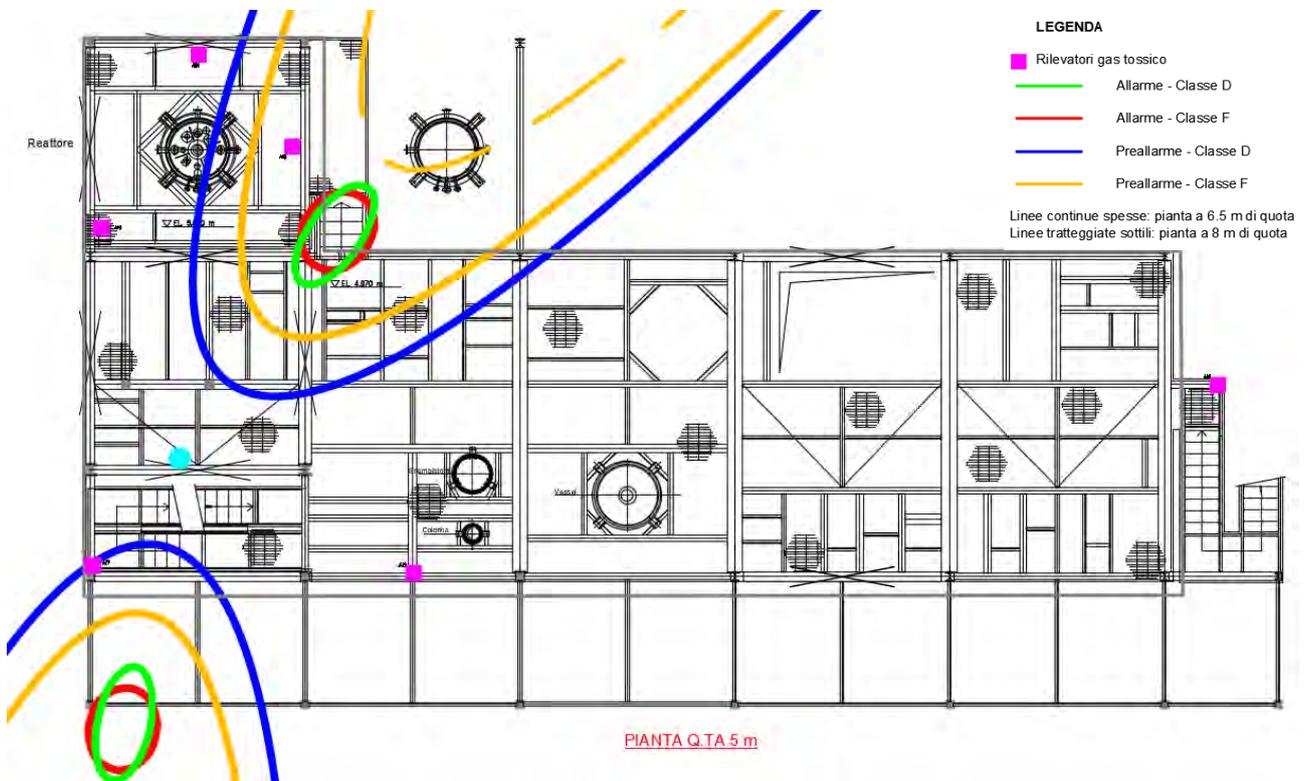


Figura 5. Rilascio di gas tossico da flangia, verso il basso, pianta del rilascio a 6.5 m di quota (linee continue) e a 8 m di quota (linee tratteggiate) nelle principali direzioni del vento

In questi disegni sono state rappresentate le principali direzioni del vento. Ruotando le ellissi, facendo perno sul punto del rilascio, si verifica inoltre quali altri sensori possano essere efficaci per rilevare la perdita in esame. In questo caso, viste le dimensioni limitate dell'impalcato, è stato utile posizionare un rilevatore sull'edificio adiacente quello di interesse, alla quota del primo piano.

In casi complessi come il presente, con molti rilevatori, posti a quote differenti e con diverse sorgenti di rilascio da considerare, può essere utile creare una matrice ove si evidenzia, per ogni rilascio, quanti e quali rilevatori intervengano. In tal modo, è anche possibile verificare che, per ogni rilascio ci siano almeno 2 rilevatori efficaci, in modo da garantire la ridondanza del sistema, condizione necessaria per l'implementazione di una funzione strumentata di sicurezza per la quale assicurare un livello SIL.

Per quanto riguarda invece i rilasci di liquido tossico (che liberano vapori tossici, per evaporazione o per idrolisi con l'umidità dell'aria) precedentemente citati, è più efficace rappresentare il rilascio in sezione:

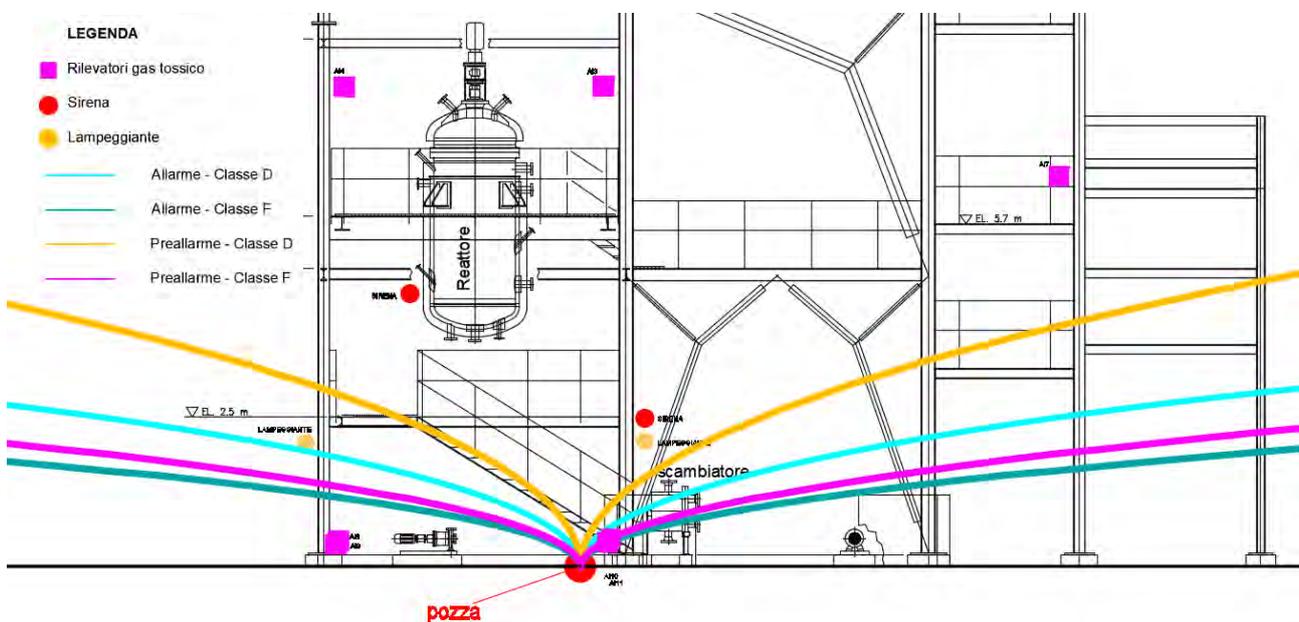


Figura 6. Rilascio di vapori tossici da pozza, vista 1

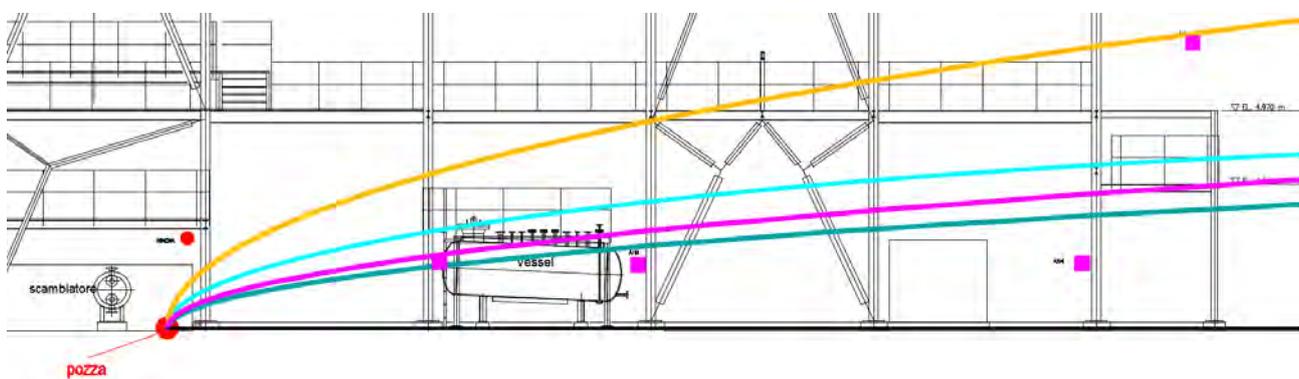


Figura 7. Rilascio di vapori tossici da pozza, vista 2

Come si può vedere, in prossimità della pozza, che si accumula in un punto basso della pavimentazione dell'impalcato, i rilevatori a 1.5 m di quota non sarebbero efficaci, mentre, allontanandosi dal punto del rilascio, la nube di vapori si amplia e viene rilevata anche dai sensori più in alto.

Nella realtà, in caso di ricaduta del liquido dall'alto, si genererebbero ulteriori sorgenti di dispersione di vapori per contatto del liquido con apparecchiature, tubazioni, strutture di supporto, facilitando la rilevazione da parte dei sensori a 1.5 m di altezza.

4.2 Studio per il miglioramento del sistema di rilevamento in una sezione di processo esistente

Nel caso di una sezione esistente, già dotata di alcuni rilevatori di gas, lo studio specifico condotto ha permesso di implementare in modo efficace i nuovi sensori e anche di valutare l'idoneità della posizione di quelli già presenti.

Si prenda ad esempio il caso della Figura 8: si tratta di un impianto ove viene trattato un gas tossico (sono state evidenziate le apparecchiature contenenti la sostanza chiave). Sono stati rappresentati i sensori esistenti e quelli nuovi con diversi colori (verde per gli esistenti, azzurro per i nuovi / rilocati). Come nel caso precedente, sono state tracciate le curve nelle due direzioni principali del vento.

In questo caso, il sensore in alto a sinistra era già esistente e posizionato in area più centrale (la posizione originaria è indicata in rosso). Verificando tutti i punti di rilascio principali (colonne di distillazione, compressori, serbatoio di accumulo), lo studio ha evidenziato che, nella posizione originale, il sensore non era molto efficace e si è deciso di rilocarlo su una delle colonne del rack, in area periferica, verso i limiti di batteria dell'impianto.

In tale punto questo sensore risulta utile anche nel caso di rilascio dalle colonne di distillazione alloggiato sui piani superiori dell'impalcato (si veda la Figura 9). In tal caso, infatti, non si ha la disponibilità di un edificio vicino su cui posizionare uno o più sensori, come nel caso precedente, per cui si è studiata la ricaduta della nube per individuare un punto a piano terra che permettesse di segnalare anche i rilasci ai piani superiori.

In fase di sopralluogo, si è deciso di non eccedere la quota di 2 m dal piano di calpestio, per agevolare anche gli operatori incaricati dei test periodici e manutenzioni dei sensori.

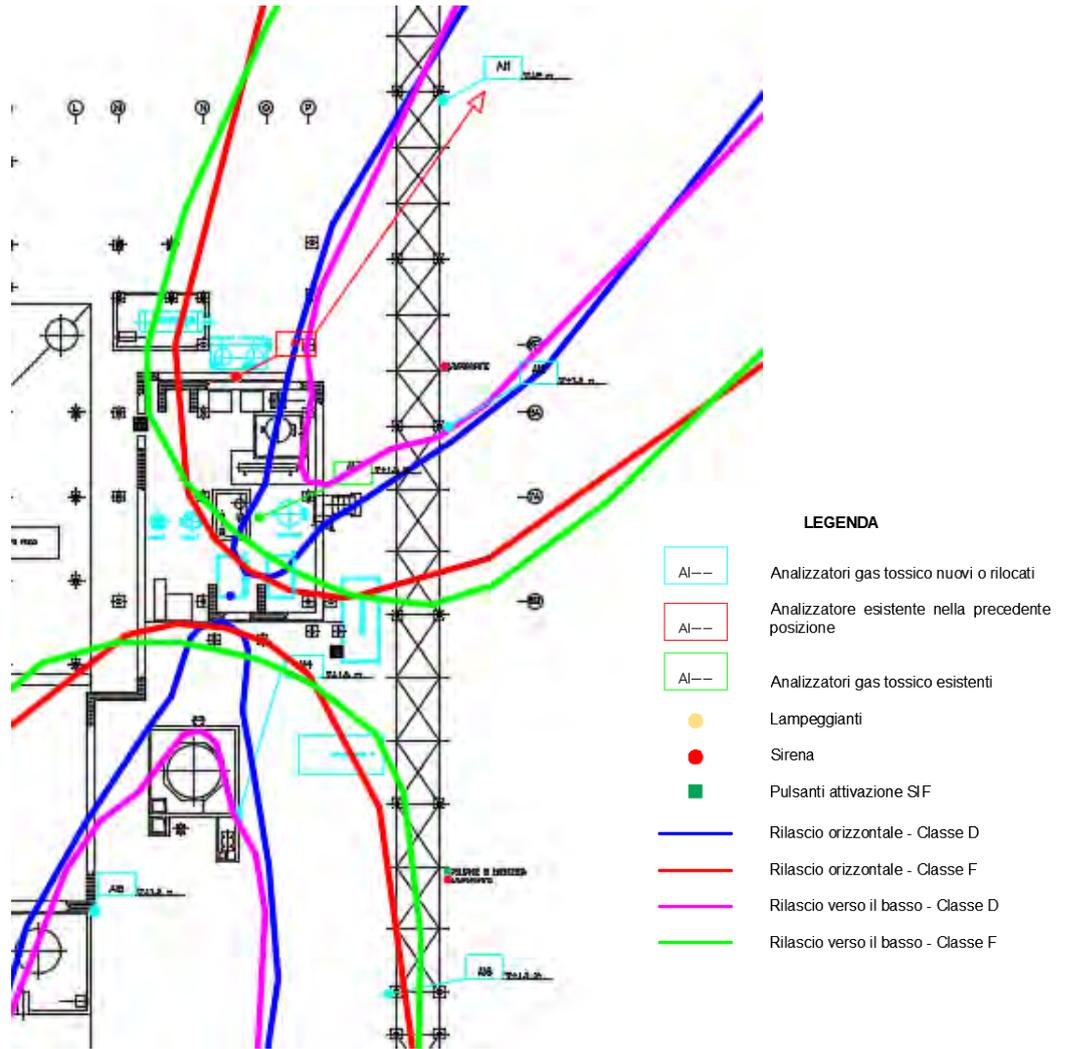


Figura 8. Rilascio di gas tossico da compressore, vista in pianta a 1.5 m di quota

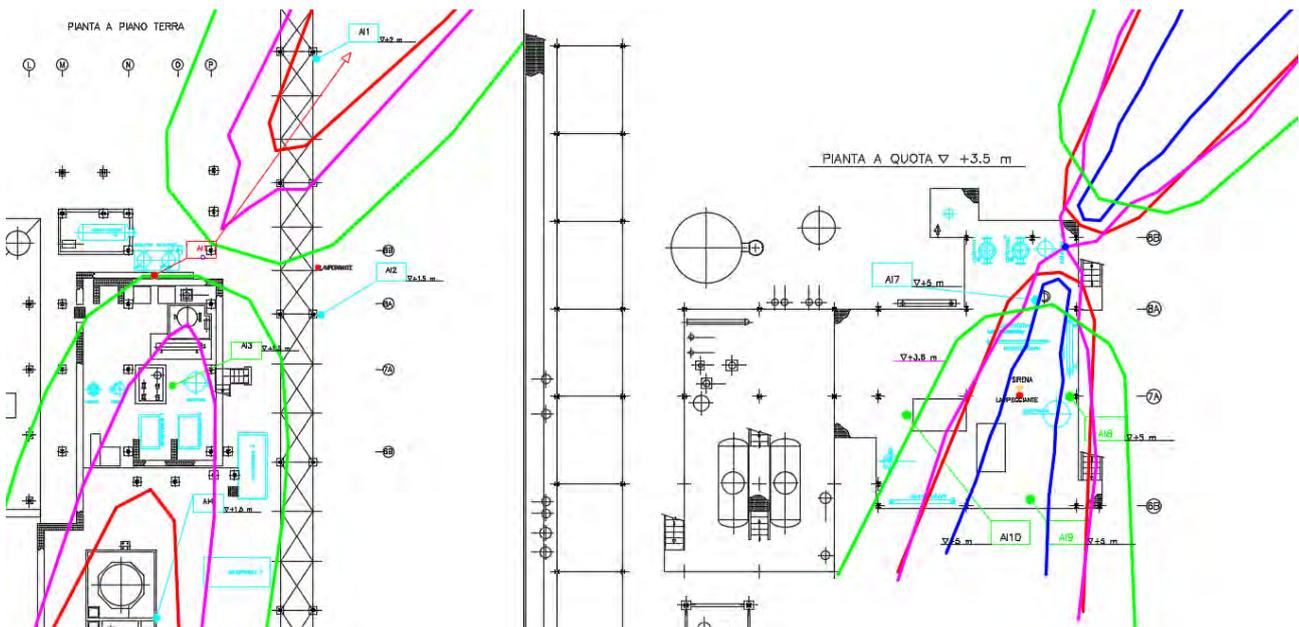


Figura 9. Rilascio di gas tossico da colonna di purificazione, viste in pianta a 1.5 m e a 5 m di quota

5. Conclusioni

La progettazione di un impianto di rilevamento gas pericoloso, in particolare tossico, presso un impianto all'aperto, comporta difficoltà significative per giungere alla determinazione del numero minimo di sensori e della loro relativa posizione.

Il numero di parametri da considerare è elevato e l'approfondimento richiesto viene ulteriormente incrementato per consentire l'introduzione di funzioni strumentate di sicurezza aventi un livello SIL, attivate dal sistema di rilevamento.

L'adozione di un metodo basato sull'identificazione delle sorgenti rappresentative, in termini di ubicazione e di area di efflusso, con applicazione estesa dei modelli di simulazione della dispersione di gas normalmente adottati nelle valutazioni di rischio di incidente rilevante, ha consentito di raggiungere un buon livello di accuratezza, a cui far seguire verifiche iterative per definire una proposta ottimizzata di disposizione dei sensori nello spazio dell'impianto e aree limitrofe.

Lo studio completo diventa poi il documento di base di tutta l'attività di progettazione di dettaglio e di realizzazione dell'intervento migliorativo ai fini della prevenzione dei pericoli di incidente rilevante, oltre che un supporto necessario per le verifiche condotte nel corso delle istruttorie sui RdS delle aziende a rischio di incidente rilevante.

Nel caso specifico si possono anche prevedere evoluzioni significative nel prossimo futuro, dettate da miglioramenti tecnologici dei sistemi di rilevamento (puntuali, lineari, a più alta disponibilità etc.) e dal ritorno di esperienza derivante dall'accumularsi delle applicazioni, ad esempio in merito alla gestione di eventuali guasti di sensori, alle esigenze di override di processo, all'interazione fra sistemi di rilevamento distinti dello stesso gas, ma che operano su aree adiacenti.

6. Bibliografia

[1] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105, Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose

[2] UNI 10752, Sicurezza attiva per impianti industriali - Sistemi di rilevamento di fluidi pericolosi - Requisiti e criteri di installazione

[3] CEI EN 50402, Apparecchiature elettriche per la rilevazione e la misura di gas o vapori combustibili o tossici, o di ossigeno. Prescrizioni per la sicurezza funzionale di sistemi fissi di rilevazione gas

[4] IEC 61508, Sicurezza funzionale dei sistemi elettrici, elettronici ed elettronici programmabili per applicazioni di sicurezza

[5] EN ISO 13849-1, Sicurezza del macchinario - Parti dei sistemi di comando legate alla sicurezza - Parte 1: Principi generali per la progettazione

Ringraziamenti: Solvay Specialty Polymers Italy SpA

Incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose: criteri di scelta, requisiti di conformità e modalità di gestione degli APVR secondo la norma UNI 11719:2018 in applicazione alla UNI EN 529:2006

M.P. Gatto¹, M. del Gaudio¹, P. Castellano², R. D'Eliseo³

¹ Inail - Uot di Avellino

² Inail Dimeila

³ Comando VVF, Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, Caserta e Salerno

Sommario

Ai sensi dell'art. 75 del D. Lgs. 81/2008, l'utilizzo dei dispositivi di protezione individuale (DPI) è sempre subordinato all'attuazione di tutti i possibili accorgimenti tecnici e organizzativi per eliminare o limitare il rischio, obiettivo limitatamente raggiungibile nel caso di incidente rilevante con sostanze pericolose. Se permane un rischio residuo, è, quindi, essenziale rendere disponibili, per ogni singolo scopo specifico, gli idonei DPI e assicurarne in modo appropriato l'uso, l'immagazzinamento e la manutenzione. Il presente contributo ha analizzato il quadro tecnico-normativo vigente con lo scopo di approfondire tutti gli aspetti inerenti ai criteri di scelta, requisiti di conformità e modalità di gestione previsti per gli APVR (apparecchi protezione vie respiratorie) nel caso di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.

L'estrema varietà di inquinanti aerodispersi che possono svilupparsi nel caso di incidenti rilevanti richiede una scelta attenta e consapevole dell'APVR idoneo, in funzione di una serie di variabili da considerare sull'efficienza e/o capacità dell'apparecchio, nonché sulla natura e concentrazione dei contaminanti stessi, sulle condizioni di temperatura e di umidità e sulla durata dell'attività lavorativa nell'area inquinata.

La necessità che il personale sia addestrato relativamente all'utilizzo degli opportuni DPI in funzione della tipologia di incidente è, altresì, esplicitata in Appendice 3 del D. Lgs. 105/2015 "Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose", con il quale è stata recepita in Italia la direttiva 2012/18/UE. I principi ivi esaminati, forniti dalla norma UNI 11719:2018, possono essere un valido ausilio per l'uso, la cura e la manutenzione degli APVR in caso di incidenti rilevanti.

1. Introduzione

Con il recepimento della Direttiva Seveso Ter (2012/18/UE) [1], relativa alle politiche in materia di prevenzione di grandi rischi industriali, l'Italia ha emanato il D. Lgs. 105/2015 "Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose" [2], norma di riferimento in materia di gestione della sicurezza in attività a rischio di incidente rilevante (RIR). Il gestore di un'azienda RIR deve redigere il documento sulla politica di prevenzione degli incidenti rilevanti, indicando gli obiettivi che intende perseguire nel campo della prevenzione e del controllo degli incidenti rilevanti, per la salvaguardia della salute umana, dell'ambiente e dei beni, e che costituiscono, nel loro insieme, la politica di prevenzione degli incidenti rilevanti (PPIR) del gestore in materia.

Tra gli obiettivi del D. Lgs. 105/2015, oltre alla implementazione delle misure necessarie a garantire il maggior numero di informazioni al pubblico e a permettere la partecipazione ai processi decisionali, rientra anche quello, oggetto del presente contributo, relativo all'impegno verso il continuo miglioramento del controllo dei pericoli di incidenti rilevanti e quindi anche alla scelta e gestione degli opportuni DPI, specificando, inoltre, la necessità

che il personale sia addestrato relativamente al loro utilizzo in funzione della tipologia di incidente (Appendice 3). Il D.lgs. 105/2015 obbliga il gestore ad adottare tutte le misure idonee a prevenire gli incidenti rilevanti e a limitarne le conseguenze per la salute umana e per l'ambiente. Con l'invio della "notifica" si avvia il processo di coinvolgimento dei vari Enti e della popolazione per giungere a regime all'attuazione del SGS (sistema di gestione della sicurezza) ed in particolare all'organizzazione del piano di emergenza interno (PEI) e del piano di emergenza esterno (PEE), con cui gestire gli eventuali incidenti. Per valutare possibili adeguamenti al SGS, il gestore deve aggiornare i principali documenti, rispettando la periodicità minima ed eventuali modifiche o avvenimenti straordinari.

Ai fini della sicurezza degli addetti e di coloro che accedono agli stabilimenti, tenendo conto delle disposizioni dettate in materia per la tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori sul luogo di lavoro dal D. Lgs. 81/2008 "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro" [3], è essenziale definire le attività necessarie al raggiungimento e al mantenimento di tali requisiti di salute e sicurezza, anche in termini di qualificazione professionale e di capacità operative. In conformità a quanto definito nell'allegato B al D. Lgs. 105/2015, "Linee guida per l'attuazione del Sistema di Gestione della Sicurezza (SGS) per la prevenzione degli incidenti rilevanti", il SGS deve stabilire le misure necessarie per garantire, a qualsiasi livello, un adeguato grado di competenza e consapevolezza nella gestione dei pericoli di incidenti rilevanti. Pertanto, deve definire i requisiti minimi di formazione, informazione e addestramento per tutto il personale coinvolto in attività rilevanti ai fini della sicurezza, proprio o di terzi, fisso od occasionale, e garantire la disponibilità e l'impiego del relativo equipaggiamento di protezione.

Le modalità di informazione, addestramento ed equipaggiamento di coloro che lavorano nelle attività RIR devono essere individuate dal gestore nell'ambito del proprio sistema di gestione della sicurezza, attuato ai sensi dell'art. 14 del D. Lgs. 105/2015 e poste in atto mediante apposite procedure scritte, previa consultazione con i rappresentanti dei lavoratori per la sicurezza. Tali procedure devono, in particolare, prevedere la designazione di personale adeguatamente informato, qualificato e preparato, nonché l'approntamento e la gestione di mezzi idonei alla protezione del personale in caso di incidente rilevante. La norma tecnica UNI 10617, entrata in vigore il 28 novembre 2019 in sostituzione della precedente versione del 2012 "Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante – Sistemi di gestione della sicurezza – Requisiti essenziali" [4] sottolinea, ancora una volta, come solo un approccio sistemico ben congegnato e solido intorno a principi ineludibili possa garantire il corretto funzionamento del SGS previsto dal D. Lgs. 105/2015.

2. Metodi

È stato esaminato il quadro tecnico-normativo vigente (Tab.1), con lo scopo di approfondire tutti gli aspetti inerenti ai criteri di scelta, ai requisiti di conformità e alle modalità di gestione, ovvero uso, manutenzione, formazione e addestramento, previsti per gli APVR destinati alla protezione delle vie respiratorie contro aerosol solidi, liquidi o contro gas irritanti, pericolosi, tossici o radiotossici nel caso di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose, con particolare riferimento alla norma UNI 11719:2018 in applicazione alla UNI EN 529:2006.

Norma	Titolo
UNI EN ISO 16972:2020	Apparecchi di protezione delle vie respiratorie - Vocabolario e segni grafici
UNI EN 13274-2:2019	Apparecchi di protezione delle vie respiratorie - Metodi di prova - Parte 2: Prove pratiche di impiego
UNI EN 13274-7:2019	Dispositivi di protezione delle vie respiratorie - Metodi di prova - Parte 7: Determinazione della penetrazione dei filtri antipolvere
UNI 11719:2018	Guida alla scelta, all'uso e alla manutenzione degli apparecchi di protezione delle vie respiratorie, in applicazione alla UNI EN 529:2006.
UNI EN 1827:2009	Dispositivi di protezione delle vie respiratorie - Semimaschere senza valvole di inspirazione e con filtri smontabili per la protezione contro gas o gas e particelle o solamente particelle - Requisiti, prove, marcatura
UNI EN 149:2009	Dispositivi di protezione delle vie respiratorie - Semimaschere filtranti antipolvere - Requisiti, prove, marcatura
UNI EN 405:2009	Dispositivi di protezione delle vie respiratorie - Semimaschere filtranti antigas o antigas e antipolvere dotate di valvole - Requisiti, prove, marcatura
UNI EN 12941:2009	Dispositivi di protezione delle vie respiratorie - Elettrorespiratori a filtro completi di elmetto o cappuccio - Requisiti, prove, marcatura
UNI EN 12942:2009	Dispositivi di protezione delle vie respiratorie - Elettrorespiratori a filtro completi di maschere intere, semimaschere o quarti di maschere - Requisiti, prove, marcatura
UNI EN 14387:2008	Dispositivi di protezione delle vie respiratorie - Filtri antigas e filtri combinati - Requisiti, prove, marcatura
UNI EN 143:2007	Apparecchi di protezione delle vie respiratorie - Filtri antipolvere - Requisiti, prove, marcatura
UNI EN 529:2006	Dispositivi di protezione delle vie respiratorie - Raccomandazioni per la selezione, l'uso, la cura e la manutenzione - Documento guida

Tabella 1. Elenco (non esaustivo) delle norme UNI di riferimento

3. Risultati

Si elencano di seguito le fasi secondo le quali deve essere articolato il programma di protezione delle vie respiratorie:

- a) definizione dei ruoli e delle responsabilità;
- b) elaborazione del registro del programma di protezione delle vie respiratorie;
- c) scelta degli APVR e determinazione della loro adeguatezza e idoneità;
- d) programma di formazione, informazione e addestramento all'uso corretto;
- e) immagazzinamento e manutenzione.

Il DL ha l'obbligo di mettere a disposizione dispositivi di protezione per le vie respiratorie conformi alle norme tecniche e alle procedure di certificazione imposte dalla legge. Questa conformità si traduce nella marcatura CE, seguita da un codice di quattro cifre identificativo dell'Organismo Notificato di certificazione (paragrafo 3.2). Gli APVR devono riportare, inoltre, i dati del produttore, del modello e della taglia, i simboli dei rischi da cui proteggono con il corrispondente grado di protezione e le normative EN specifiche di riferimento.

È fatto obbligo, altresì, al DL di conservare copia della documentazione relativa a:

- la valutazione dei rischi;
- il programma di protezione delle vie respiratorie;

- il superamento della prova di adattabilità al viso del portatore, *fit test* (figura 2);
- i dati relativi ai singoli APVR, comprensivi di data di scadenza e di immagazzinamento;
- la valutazione della adeguatezza e idoneità dei singoli APVR;
- le informazioni circa la manutenzione effettuata e su eventuali riparazioni;
- i dettagli dell'addestramento fornito ai portatori, ai supervisori e alle persone addette alla manutenzione dei dispositivi.

Il lavoratore, a sua volta, per indossare e utilizzare correttamente l'APVR, deve attenersi alle istruzioni contenute all'interno del libretto d'uso e manutenzione consegnato dal fornitore. Gli APVR non devono, inoltre, essere modificati dagli utilizzatori, pena la perdita della loro presunzione di conformità.

3.1. Criteri di scelta

L'estrema varietà di rischi che possono presentarsi nelle aziende RIR richiede una scelta attenta e consapevole dell'APVR idoneo, in funzione di una serie di variabili da considerare sull'efficienza e/o capacità dell'apparecchio, sulla perdita del facciale, nonché sulla natura (gas, vapori, polveri ecc.), classe chimica e concentrazione dell'inquinante nello specifico ambiente di lavoro dell'inquinante, sui valori limite di soglia per l'esposizione occupazionale a/agli inquinante/i (VLEP), oltre alle caratteristiche relative alla durata dell'attività lavorativa nell'area inquinata. Pertanto, la scelta dell'APVR opportuno è il frutto di uno studio delle caratteristiche del posto di lavoro e dell'attività lavorativa, che deve portare a una chiara definizione delle condizioni di impiego e alla valutazione, più precisa possibile, di: 1) concentrazione di ossigeno; 2) natura (gas, vapori, polveri ecc.) e speciazione chimica dei contaminanti; 3) tossicità dell'inquinante e valutazione dei relativi VLEP (se questi sono previsti); 4) concentrazioni dell'inquinante in aria nelle peggiori condizioni; 5) dimensioni del particolato, se si tratta di polveri, ovvero valutazione della frazione di particelle grossolane aerodisperse aventi il diametro aerodinamico pari a una certa dimensione, generalmente espressa in μm ; 6) condizioni di temperatura e umidità; 7) attività fisica svolta dall'utilizzatore nel compimento del proprio lavoro; 8) durata dell'attività lavorativa che richiederebbe di indossare il dispositivo di protezione; 9) eventuali altri rischi presenti (schizzi di liquidi, incendio ecc.) [5]. L'analisi di questi elementi permetterà di optare consapevolmente per dispositivi in grado di garantire il massimo livello di protezione nelle condizioni date. In linea generale, si possono utilizzare apparecchi filtranti se si verificano tre condizioni: 1) è nota la composizione delle sostanze aerodisperse; 2) la loro concentrazione è al sotto di determinati livelli di VLEP; 3) la concentrazione di ossigeno è compresa tra il 17 e il 21% in volume. Per il principio di precauzione, durante un evento accidentale di un'attività RIR dovuto a sviluppi incontrollati, quale, ad esempio, un'emissione in atmosfera, un incendio, un'esplosione, non avendo certezze, spesso, circa il rispetto dei tre requisiti di cui sopra, è necessario utilizzare apparecchi isolanti al posto di quelli filtranti.

Riassumendo, quindi, gli APVR proteggono il lavoratore dai rischi per la salute e la sicurezza dovuti sia alla insufficienza di ossigeno sia alla presenza di sostanze pericolose nell'aria ambiente. Nel primo caso, concentrazioni di ossigeno nell'aria inferiori al 17 % portano alla insufficienza di ossigeno nelle cellule del corpo umano e, di conseguenza, ostacolano importanti funzioni vitali, con possibili danni irreversibili la cui entità dipende da diversi fattori, quali la concentrazione di ossigeno residuo nell'aria inspirata, la durata degli effetti dovuti all'insufficienza di ossigeno, la frequenza e il volume di respirazione, nonché la specifica condizione fisica della persona. Nel secondo caso, a seguito della esposizione a sostanze pericolose per via inalatoria possono aversi malattie polmonari, intossicazioni acute o croniche, lesioni da radiazioni; il danno, in questo caso, dipende generalmente dalla concentrazione e dalla durata dell'effetto della sostanza pericolosa alla salute, dalle proprietà tossicologiche della sostanza e, quindi, anche dalla via per la quale essa agisce

con il corpo (per esempio deposizione nei polmoni, assorbimento nel sangue), dall'affaticamento dovuto al lavoro svolto, dalla frequenza e dal volume di respirazione nonché dalla specifica condizione fisica della persona. Una attenta e specifica valutazione del rischio, attraverso la determinazione della natura dell'inquinamento, appurando se esso sia dovuto a particolato, a gas, a vapori, ad insufficienza di ossigeno o ad una combinazione di questi fattori, permette di identificare l'APVR più idoneo. Si ribadisce, poi, l'importanza della conoscenza delle condizioni di temperatura e di umidità dell'ambiente di lavoro. In particolare, nel caso di sviluppi incontrollati che si verificano durante un'attività RIR, si deve tener conto delle condizioni effettive di esposizione a calore o fiamma in relazione all'uso previsto, per poter scegliere APVR aventi un adeguato livello di resistenza a calore o fiamma. Analogamente, in atmosfere potenzialmente esplosive si devono utilizzare APVR dichiarati idonei dal fabbricante. Infine, in presenza di gas corrosivi, non è raccomandabile la combinazione di una semimaschera o di un quarto di maschera con DPI per gli occhi: in questo caso si dovrebbe usare almeno una maschera intera. In figura 1 è mostrato un flow-chart per la scelta dell'APVR idoneo.

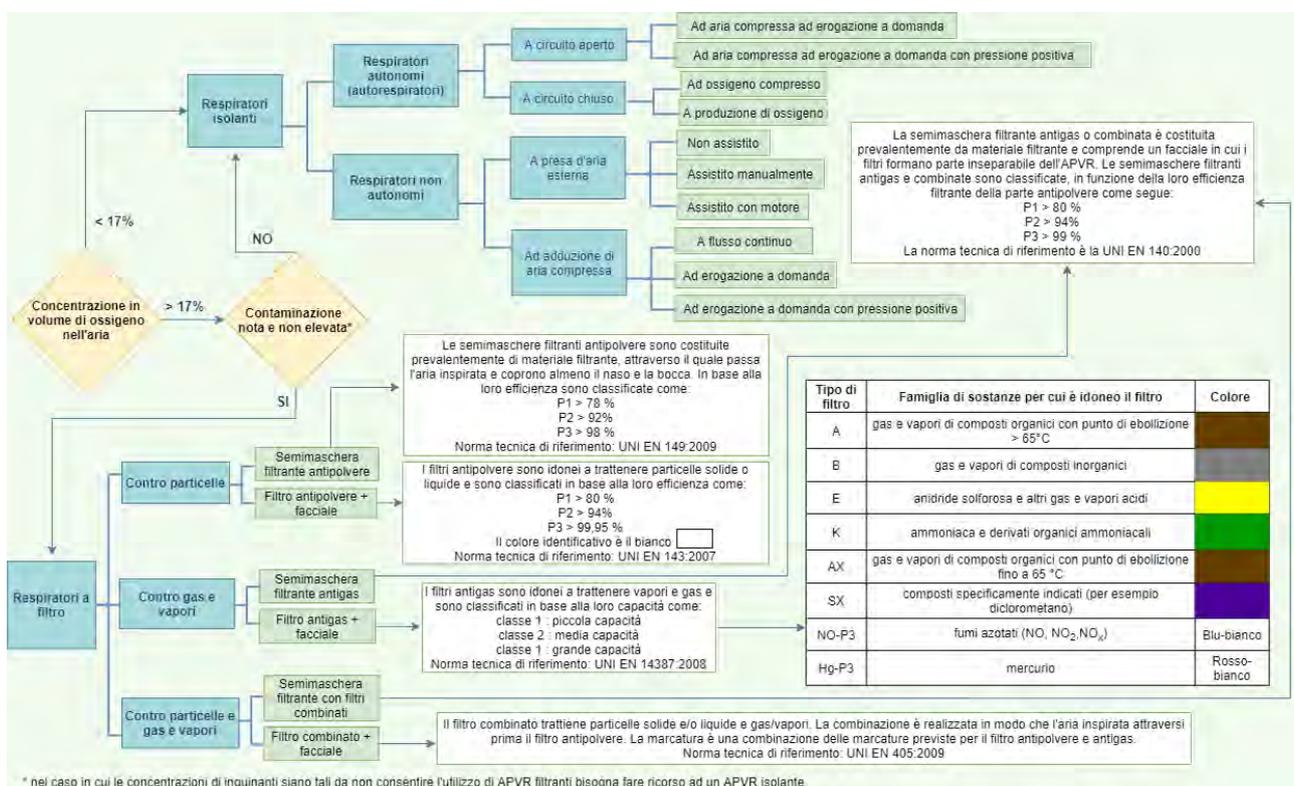


Figura 1. Flow chart realizzato secondo la norma tecnica UNI EN 11719:2018 relativa alla scelta, all'uso e alla manutenzione degli APVR. Fonte: *Fact sheet* "I dispositivi di protezione individuale per il rischio agenti chimici nel settore dell'edilizia" di P. Castellano e M.P. Gatto, Tipolitografia Inail di Milano • Edizione 2021, ISBN 978-88-7484-672-6, <https://www.inail.it/cs/internet/docs/alg-pubbl-dpi-individuali-rischio-chimico-edilizia.pdf>

Un facciale a tenuta (quarto di maschera, semimaschera, maschera intera e semimaschera filtrante) fornisce la protezione stimata solo se è assicurata la tenuta sul viso: è possibile, pertanto, che una sola misura o modello non si adatti a tutti i portatori. La tenuta del dispositivo viene misurata in termini di percentuale di perdite di inquinante verso l'interno del facciale: i valori di prestazione da raggiungere sono descritti nelle norme UNI EN 12941:2009 e UNI EN 12942:2009 (tabella 1). La valutazione del corretto adattamento è, dunque, parte fondamentale del processo di selezione. A tal proposito, con la norma UNI 11719:2018 sono stati introdotti alcuni aspetti innovativi: assieme al concetto di programma

di protezione delle vie respiratorie, ovvero una serie di attività, ben definite all'interno della norma (cap.5), volte a garantire una corretta, adeguata ed idonea protezione, è prevista la verifica dell'adattabilità dei facciali a tenuta al viso del portatore (*fit test*) secondo quanto indicato nell'allegato A.

Le prove di adattamento possono essere qualitative o quantitative. Un *fit test* qualitativo (QLFT) può essere utilizzato solo per facciali filtranti e semimaschere (con filtri anti particolato o combinati). I metodi qualitativi possono essere idonei per le maschere complete secondo alcune norme per i *fit test* e solo in alcune circostanze. Ciascun metodo QLFT si serve di sette esercizi, eseguiti per 1 minuto ciascuno:

1. respirazione normale;
2. respirazione profonda;
3. spostamento della testa da un lato all'altro;
4. sollevamento e abbassamento della testa;
5. piegamento sulla vita;
6. leggere/parlare a voce alta;
7. respirazione normale ancora una volta.

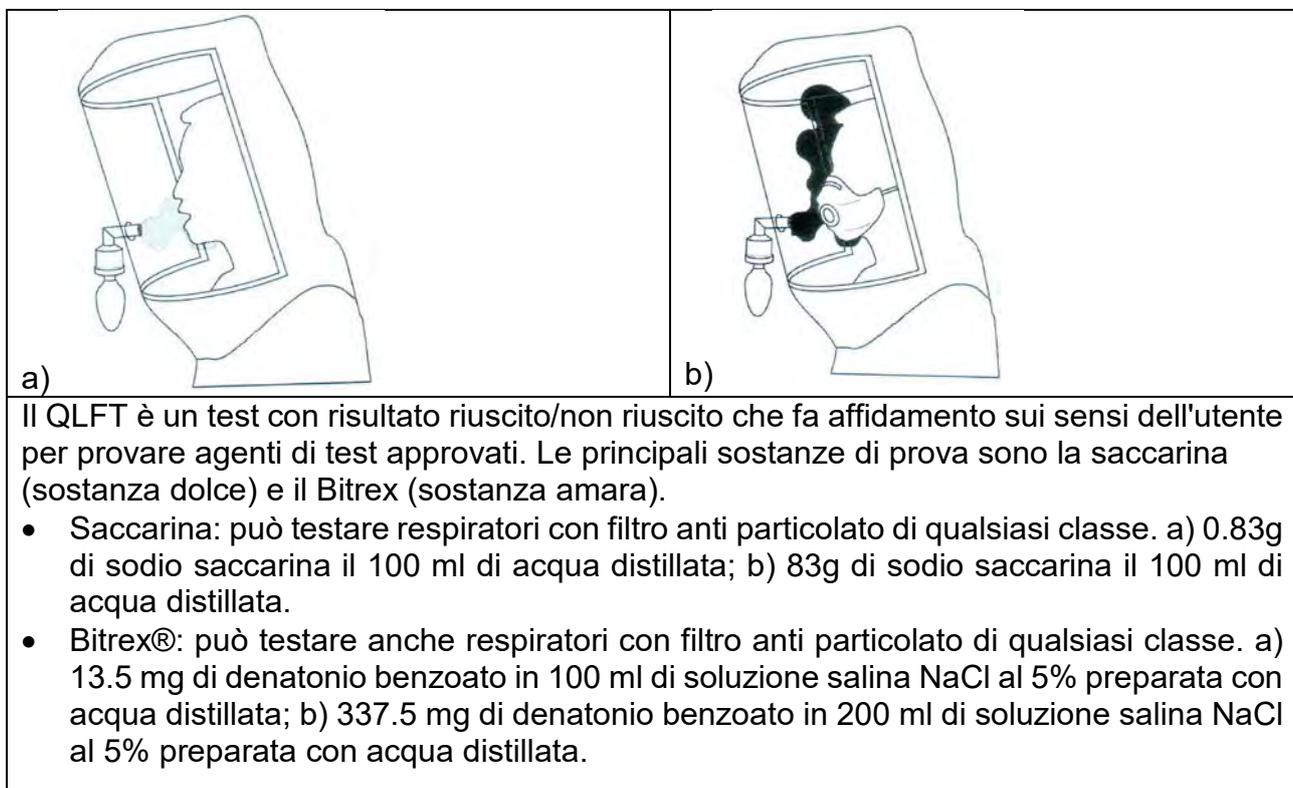


Figura 2. *Fit test* qualitativo: a) test di sensibilità per la prova e b) prova di tenuta mediante sostanza amara o dolce.

Un *fit test* quantitativo (QNFT) prevede l'utilizzo di uno strumento per misurare le perdite intorno al volto e produce un risultato numerico chiamato *fit factor*. Esistono tre protocolli di test QNFT comunemente accettati:

- ✓ l'aerosol generato utilizza un aerosol non pericoloso, come il sale comune (NaCl) generato in una camera di test.
- ✓ il contatore dei nuclei di condensazione (CNC) utilizza l'aerosol ambientale e non richiede una camera di test.
- ✓ la pressione negativa controllata (CNP) utilizza un test che crea un vuoto bloccando temporaneamente l'aria.

Anche per le prove relative al QNFT si eseguono i sette esercizi previsti per il test QLFT; queste prove dovranno essere ripetute periodicamente, per esempio annualmente, e in occasione di ogni modifica del dispositivo o di cambiamento delle condizioni fisiche del lavoratore, quali ad esempio dimagrimento, cicatrici, modifiche dei denti etc.

3.2. Requisiti di conformità

Il nuovo Regolamento (UE) 2016/425 [6], che ha abrogato la Direttiva 89/686/CEE a partire dal 21 aprile 2018, impone norme chiare e dettagliate applicate integralmente in tutti gli Stati membri dell'UE e mira a stabilire prassi di alto livello su salute e sicurezza, protezione degli utenti e concorrenza leale. Il Regolamento 2016/425 non fissa alcun obbligo specifico per l'utilizzatore, per il quale restano in vigore gli articoli specifici del d.lgs. 81/2008 in materia di DPI, in particolare, ai sensi dell'art. 76, è obbligo del datore di lavoro quello di verificare che sia disponibile tutta la documentazione prevista, costituita da:

- marcatura CE seguita dal numero di quattro cifre identificativo dell'Organismo Notificato preposto alla valutazione di conformità (per i DPI di III categoria). L'elenco completo degli Organismi europei accreditati per il Regolamento (UE) 425/2016 è contenuto nel database della Commissione Europea NANDO. <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/index.cfm?fuseaction=notifiedbody.main>;
- presenza di istruzioni di utilizzo chiare, in lingua italiana o comunque in lingua comprensibile dal lavoratore;
- adeguatezza del DPI al rischio da prevenire senza comportare di per sé un rischio maggiore;
- adeguatezza del DPI alle condizioni di lavoro;
- adeguatezza del DPI alle esigenze ergonomiche e di salute del lavoratore e adattabilità alle necessità dell'utilizzatore (figura 2).

3.3. Modalità di gestione: uso e manutenzione, formazione e addestramento.

Per una corretta gestione degli APVR, è opportuno predisporre un programma sull'uso e la manutenzione degli apparecchi in funzione del tipo, dell'ambiente di lavoro, delle condizioni lavorative e dei rischi presenti. Tale programma deve essere effettuato in conformità alle istruzioni del fabbricante, in particolare per quanto concerne:

- ✓ le procedure da seguire;
- ✓ i ricambi da utilizzare;
- ✓ la tipologia di utensili e attrezzature da utilizzare;
- ✓ la tipologia di strumenti di prova e la loro taratura;
- ✓ la necessità di disporre di eventuali attestati di partecipazione a percorsi formativi specifici;
- ✓ la limitazione di abilitazione ad eseguire interventi complessi (per alcuni di questi il fabbricante potrebbe richiederne l'esecuzione solo da parte di centri specializzati autorizzati);
- ✓ il corretto immagazzinamento, che non deve provocare modificazioni agli APVR e proteggerli dalla polvere, dall'olio, dai raggi solari, dal calore e dal freddo eccessivi, dalla elevata umidità e/o da sostanze chimiche che possano danneggiarli;
- ✓ la previsione di contenitori dedicati, provvisti di chiusura, sul luogo di lavoro al fine di recuperare facciali filtranti o i filtri dopo l'uso. In funzione della natura degli inquinanti, essi dovranno essere smaltiti in modo appropriato.

Gli APVR sono DPI di terza categoria, e cioè dispositivi, singoli o insieme di attrezzature, destinati a salvaguardare il lavoratore da lesioni gravi che possono portare anche alla morte, per i quali il DL è tenuto ad adempiere agli obblighi in informazione, formazione e addestramento dei lavoratori circa le modalità del corretto impiego a cui il lavoratore non

può sottrarsi (art. 78). La formazione e il suo aggiornamento devono essere affidati a persone competenti. È da considerare competente una persona che, a tal fine, abbia a sua volta ricevuto una speciale formazione e che, ad intervalli opportuni, segua un corso di aggiornamento.

Si definiscono:

- ✓ *Informazione*: complesso delle attività dirette a fornire conoscenze utili alla identificazione, alla riduzione e alla gestione dei rischi di incidente rilevante;
- ✓ *formazione*: processo educativo attraverso il quale trasferire ai lavoratori ed agli altri soggetti del sistema di gestione della sicurezza conoscenze e procedure utili all'acquisizione di competenze per lo svolgimento in sicurezza dei rispettivi compiti in azienda e alla identificazione, alla riduzione e alla gestione dei rischi di incidente rilevante;
- ✓ *addestramento*: complesso delle attività dirette a fare apprendere ai lavoratori l'uso corretto di attrezzature, macchine, impianti, sostanze, dispositivi, anche di protezione individuale e collettiva, le procedure di lavoro, con particolare riferimento alle procedure di sicurezza e di emergenza previste dal SGS.

Successivamente, sarà opportuno ripetere l'informazione e la formazione a intervalli regolari. Lo scopo della formazione e la durata degli intervalli per la sua ripetizione dipendono dal tipo di apparecchio e dalla frequenza dell'uso; un aggiornamento più rigoroso sarà necessario, ad esempio, per apparecchi complessi quali i respiratori isolanti. Le esercitazioni relative alla messa in atto del PEI, che devono prevedere anche prove di evacuazione, in relazione agli scenari incidentali considerati, vanno ripetute periodicamente e pianificate in modo che garantiscano l'avvicinarsi di tutti gli operatori interessati.

Conclusioni

Nel caso di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose non è sempre immediatamente possibile quantificare tipologia e livelli di concentrazione delle sostanze inquinanti aerodisperse alle quali sono potenzialmente esposti i lavoratori coinvolti; di conseguenza, appaiono di fondamentale importanza la corretta scelta e utilizzazione degli opportuni APVR. Il contributo ivi presentato, sintetizzando i punti salienti del quadro tecnico-normativo vigente e le novità introdotte dalla norma tecnica UNI EN 11719:2018, si propone quale valido ausilio per i vari soggetti deputati a garantire l'appropriata gestione degli APVR ai fini di proteggere la salute e sicurezza dei lavoratori nell'ipotesi di sviluppi incontrollati che possono verificarsi durante un'attività RIR dove è verosimile una esposizione ad agenti chimici pericolosi.

Bibliografia

[1] Direttiva 2012/18/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 4 luglio 2012, sul controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose, recante modifica e successiva abrogazione della direttiva 96/82/CE del Consiglio.

[2] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105 Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.

[3] D. Lgs. 9 aprile 2008, n. 81. Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro pubblicato nella Gazzetta ufficiale n. 101 del 30 aprile 2008 - Supplemento ordinario n. 108.

[4] UNI 10617:2019, Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Requisiti essenziali.

[5] Rotella A. Scelta e uso dei DPI filtranti per le vie respiratorie. ISL Igiene & Sicurezza del Lavoro 5/2015.

[6] Regolamento (UE) n. 425/2016. Regolamento del Parlamento europeo e del Consiglio del 9 marzo 2016 sui dispositivi di protezione individuale e che abroga la direttiva 89/686/CEE del Consiglio.

La comunicazione in attività a rischio d'incidente rilevante

M. del Gaudio¹, G. Russo², D. Cerrone³

¹ Inail - Uot di Avellino

² Comando Vigili del Fuoco Napoli

³ Direzione Regionale Vigili del Fuoco Campania

Sommario

Nelle attività a rischio di incidente rilevante (D.Lgs. 105/2015) [1] una comunicazione efficace, durante l'attività ordinaria e soprattutto durante una emergenza, rappresenta una delle principali azioni di prevenzione. Il Gestore dell'impianto deve garantire che i contatti con gli Enti di controllo siano costanti, che la diffusione delle procedure operative tra tutti i gli operatori dell'azienda sia continua, che i messaggi di allarme siano inequivocabili ed efficaci e che sia sempre possibile contattare i soccorsi esterni e coordinare le squadre di emergenza.

I tecnici Inail e dei Vigili del Fuoco che collaborano, con quelli dell'Agenzia Regionale per L'Ambiente, all'approvazione dei Rapporti di Sicurezza nei Comitati Tecnici Regionali e che partecipano alle ispezioni dei siti, hanno maturato una notevole esperienza in materia tanto da permettere ad essi di dare indicazioni sui sistemi di comunicazione migliori da adottare ed eventualmente imporre prescrizioni in sede d'indagine.

Le modalità con cui comunicare in un sito RIR (a rischio d'incidente rilevante) non possono essere sempre le stesse, ma devono tener conto dell'attività svolta, delle caratteristiche strutturali degli impianti e delle costruzioni, e anche delle capacità e della preparazione specifica dei lavoratori impegnati. Durante le esercitazioni periodiche occorrerà sempre controllare che le informazioni sulla gestione della sicurezza abbiano raggiunto tutti e che i sistemi di comunicazione rapida siano efficaci.

1. Attività a rischio di incidente rilevante

Le attività a rischio d'incidente rilevante sono quelle in cui sussiste il rischio che un'emissione, un incendio o un'esplosione di grande entità, a causa di sviluppi incontrollati in cui intervengano una o più sostanze pericolose, possano dar luogo, all'interno o all'esterno dello stabilimento, a un pericolo grave, immediato o differito, per la salute umana o per l'ambiente. Queste attività sono soggette alle indicazioni del D.Lgs. 105/2015 che, in base alla quantità di sostanze pericolose detenute, classifica le attività in due categorie di assoggettabilità: "Stabilimenti di soglia inferiore" e "Stabilimenti di soglia superiore".

Il Gestore (persona fisica o giuridica che detiene o gestisce l'impianto direttamente o per procura con poteri di spesa) è tenuto a denunciare l'apertura di una tale attività inviando la "notifica" al CTR, alla Regione e al soggetto da essa designato, al Ministero della transizione ecologica tramite l'ISPRA,

alla Prefettura, al Comune, al Comando provinciale dei Vigili del fuoco secondo la tempistica prevista per le nuove attività o per quelle che, in seguito a modifiche, sono diventate assoggettabili al D.Lgs. 105/2015.

Il gestore dovrà obbligatoriamente adottare un sistema di gestione della sicurezza con l'obiettivo di prevenire gli incidenti "rilevanti". La continuità nell'aggiornamento dei documenti e nell'applicazione delle procedure viene verificata, normalmente, secondo la tempistica stabilita dal Decreto il quale recita testualmente che ".....L'intervallo tra due visite

consecutive in loco è stabilito in base alla valutazione sistematica dei pericoli di incidente rilevante relativi agli stabilimenti interessati; nel caso in cui tale valutazione non sia stata effettuata, l'intervallo tra due visite consecutive in loco non è comunque superiore ad un anno per gli stabilimenti di soglia superiore e a tre anni per gli stabilimenti di soglia inferiore.....". Le visite ispettive sono effettuate da una commissione composta da Vigili del Fuoco, ARPA e Inail. Le ispezioni delle sole attività sotto soglia sono di competenza della Regione che può avvalersi della collaborazione di altri Enti, previa consultazione.

Di seguito sono riportate le principali attività necessarie per gestire una attività RIR

1.1 Stabilimenti di soglia inferiore

- Compilazione "Notifica da inviare al CTR, alla Regione, Ministero della transizione ecologica, alla Prefettura, al Comune al Comando VV.F.
- Compilazione politica di prevenzione
- Analisi del rischio
- Redazione Piano di Emergenza Interna PEI
- Predisposizione anali del rischio per la Redazione del Piano di Emergenza Esterna (PEE) da parte della Prefettura sulla scorta delle informazioni fornite dal gestore ai sensi del D.lgs. 105/2015 articoli 19, comma 3, e 20, comma 4, e delle conclusioni dell'istruttoria di cui all'articolo 17 del D.lgs. 105/2015.
- Comunicazione eventuali situazioni di aggravio del rischio

1.2 Stabilimenti di soglia superiore

- Compilazione "Notifica da inviare al CTR, alla Regione, Ministero della transizione ecologica, alla Prefettura, al Comune e al Comando VV.F.
- Compilazione politica di prevenzione
- Redazione Piano di Emergenza Interna PEI
- Predisposizione anali del rischio per la Redazione del Piano di Emergenza Esterna (PEE) da parte della Prefettura sulla scorta delle informazioni fornite dal gestore ai sensi del D.lgs. 105/2015 articoli 19, comma 3, e 20, comma 4, e delle conclusioni dell'istruttoria di cui all'articolo 17 del D.lgs. 105/2015.
- Comunicazione eventuali situazioni di aggravio del rischio
- Rapporto di sicurezza da inviare al CTR per la valutazione



Figura 1. Attività RIR (Banca Dati Immagini Inail)

2. Le modalità di comunicazione in un sito RIR

2.1 Comunicazione con gli Enti

La legge 334/99 richiedeva la trasmissione diretta dei documenti tra Gestore ed Enti preposti alle autorizzazioni che avveniva in forma cartacea ma, ormai da qualche anno, come peraltro previsto dalla normativa oltre che dalla tecnologia, le comunicazioni avvengono in modalità telematica. La “notifica”, che è il primo atto che il Gestore deve inviare al Ministero della transizione ecologica, deve essere trasmesso utilizzando esclusivamente l’applicativo “Seveso III.0” che permette di fornire una precisa descrizione dell’attività e anche di inviare contemporaneamente una copia via PEC (Posta Elettronica Certificata) agli altri Enti Coinvolti: CTR, alla Regione, Ministero della transizione ecologica, alla Prefettura, al Comune e al Comando VV.F.

L’applicativo permette, inoltre, di rendere disponibili on line, con l’applicativo “Seveso Query”, i dati secondo tre livelli di accesso:

Sezione Riservata: in sola lettura agli Enti dotati di credenziali.

Sezione pubblica: accessibile a tutti i cittadini, contenente le informazioni relative alle sezioni A1, D, F, H, e L delle notifiche inviate ai sensi del D.Lgs. 105/2015.

Sezione di amministrazione: per lettura e inserimento dati, riservata ad Ispra per assistenza all’utilizzo e ricerca delle informazioni necessarie alle attività di controllo.

Il Gestore, inoltre, solo per le attività di soglia superiore, deve utilizzare la posta certificata per inviare alla Prefettura le informazioni necessarie per la redazione del piano di emergenza esterna (PEE) e per chiedere al Comitato Tecnico Regionale CTR l’approvazione del “Rapporto di sicurezza”.

2.2 Comunicazione al pubblico

Come indicato all’art. 21 del D.lgs. 105/2015, la popolazione che risiede o lavora nei pressi dell’attività a rischio d’incidente rilevante deve essere coinvolta nel processo di progettazione e modifica dei siti RIR, nella redazione dei relativi piani d’emergenza e deve essere tempestivamente informata dei procedimenti in corso secondo quanto previsto dal Decreto 29 settembre 2016, n. 200. La popolazione, peraltro, può chiedere di accedere ai dati posseduti dalle Autorità, salvo i casi previsti dall’art. 5 del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 195.

Ai sensi del comma dell’art. 23 del D. Lgs. 105/2015 il Comune deve pubblicare sul proprio sito Web le informazioni minime estratte dalla notifica trasmessa dal Gestore, fermo restando che tali informazioni dovranno includere almeno i contenuti minimi riportati nelle sezioni informative A1, D, F, H, L del modulo di cui all’allegato 5, rendendole eventualmente più comprensibili. Il Gestore può chiedere di non diffondere quelle parti della notifica, come l’inventario delle sostanze pericolose, che possono in qualche modo pregiudicare il segreto industriale. I cittadini possono accedere all’inventario delle attività RIR in soglia inferiore e in soglia superiore utilizzando l’applicativo “SEVESO QUERY” al link: <https://www.rischioindustriale.isprambiente.gov.it/seveso-query-105/Default.php> .

Utilizzando questo sito è possibile ricercare le attività presenti in ciascuna provincia e reperire le principali informazioni fornite dal Gestore con la “notifica”.

Le informazioni di cui al comma 6, comprensive di informazioni chiare e comprensibili sulle misure di sicurezza e sul comportamento da tenere in caso di incidente rilevante, sono fornite d’ufficio dal sindaco, nella forma più idonea, a tutte le persone ed a qualsiasi struttura

e area frequentata dal pubblico, compresi scuole e ospedali, che possono essere colpiti da un incidente rilevante verificatosi in uno degli stabilimenti, nonché a tutti gli stabilimenti ad esso adiacenti soggetti a possibile effetto domino. Quando purtroppo si verifica un incidente, la popolazione deve essere immediatamente informata dal Sindaco della presenza del rischio in atto e soprattutto su come bisogna comportarsi. Le dimensioni del territorio coinvolto sono importanti. In un piccolo borgo potrà essere utilizzato un sistema “porta a porta” (auto munite di altoparlanti, visite dei vigili urbani o di volontari) mentre in paesi o città densamente abitate occorrerà necessariamente coinvolgere più mezzi di comunicazione tra cui sicuramente radio, tv locali, siti web per comunicare ai cittadini le indicazioni diramate dagli organi competenti.

Anche in questo caso la tecnologia può venirci incontro, perché, ad esempio, è possibile inviare sms a tutti i residenti nell'area interessata (senza però dimenticare che ci possono essere persone poco avvezze all'uso dei dispositivi elettronici o residenti in zone non coperte dalle reti telefoniche per i quali è necessario provvedere ad una informazione diretta) [2].

2.3 Comunicazioni ai dipendenti

La frequente attività di formazione a cui debbono partecipare i lavoratori dipendenti dell'azienda è una occasione di continua comunicazione, ma è difficile avere riscontro di quanto effettivamente il dipendente abbia appreso. Anche per diffondere gli aggiornamenti delle procedure o le informazioni occasionali può risultare difficoltoso individuare la modalità più efficace. L'affissione in bacheca di documenti voluminosi (ad esempio nuovo PEI, nuova Politica ecc.) è di solito scarsamente efficace mentre l'invio telematico con mail, messaggi sms o messaggi WhatsApp permette di avere la certezza del recapito ma non che l'informazione sia stata effettivamente recepita. La scelta è anche legata al tipo di attività; in una azienda con pochi dipendenti è possibile riunirsi anche nella modalità “pausa caffè”, ma in quelle di dimensioni maggiori può essere più difficile raggiungere tutti i dipendenti che potrebbero lavorare in siti variamente distribuiti sul territorio.

Quando è possibile, la notifica *ad personam* è forse quella più efficace perché prevede uno scambio diretto delle informazioni ed un riscontro anche su ciò che il dipendente ha effettivamente recepito.

2.4 Comunicazioni agli ospiti

In un sito RIR accedono vari soggetti tra cui i fornitori, i lavoratori di altre ditte che svolgono stabilmente attività all'interno del sito o che svolgono lavori occasionali, funzionari di Enti addetti ai controlli ecc.

Per chi lavora continuamente nel sito (ad esempio i fornitori che accedono sempre con gli stessi autisti o che svolgono attività esternalizzate di manutenzione ecc.) esiste un flusso continuo di informazioni che dovrebbe garantire che tutti sia informati sui rischi esistenti e sui comportamenti da tenere. Normalmente il sistema di gestione della sicurezza prevede che con questi soggetti ci sia un continuo scambio di informazioni e soprattutto che venga somministrata direttamente la formazione specifica o che vengano acquisite le attestazioni relative alla formazione svolta presso la propria azienda.

Diverso è il caso di chi accede occasionalmente al sito e che potrebbe non percepire che sta entrando in uno stabilimento in cui occorre seguire delle regole “speciali”. Per alcune categorie, tra cui in particolare i conducenti di mezzi per la consegna di materiali, può essere necessario fornire una informazione che tenga conto anche della difficoltà a comprendere chiaramente la lingua italiana.

Alcune aziende hanno installato, nell'area d'accesso, dei totem interattivi che, dopo la riproduzione di un video, somministrano un test al visitatore oppure, molto più spesso, l'accompagnatore, anche utilizzando sistemi audio visivi, organizza un breve briefing per descrivere i rischi presenti in azienda indicando in particolare la tipologia ed il significato dei segnali acustici o di altro tipo, con cui si comunica uno stato di allarme ed i relativi comportamenti da seguire, sempre sotto il controllo dello stesso accompagnatore.

2.5 Le comunicazioni in emergenza

Durante le attività formative il personale coinvolto nelle emergenze riceve precise istruzioni su cosa fare durante l'emergenza. Il Gestore deve valutare con cura la composizione della squadra deputata all'emergenza ed assicurarsi che abbia le capacità di assolvere al compito. La massima attenzione deve essere prestata alla scelta del lavoratore incaricato di interfacciarsi, durante l'emergenza, normalmente per via telefonica, con le Autorità esterne. Per analogia tale compito viene assolto dall'addetto al centralino che, però, potrebbe non essere un soggetto in grado di mantenere la calma e di descrivere con competenza quanto sta accadendo. Spesso è utile fornire una procedura di riferimento che riporti le frasi con cui l'operatore deve trasmettere le informazioni necessarie onde evitare che siano tralasciate notizie importanti e che siano contattati tutti gli attori da coinvolgere.

Se si sono potute svolgere delle esercitazioni in collaborazione con gli Enti esterni, questi dovrebbero già sapere come raggiungere il sito e, forse, anche i punti critici dello stesso, ma è importante che il percorso per accedere all'area d'intervento sia facilmente individuabile. Nel caso di grossi stabilimenti potrebbe essere necessario orientare i soccorsi provenienti da altri territori regionali o nazionali già a partire dalle strade di grande comunicazione come le autostrade e le strade nazionali. Anche qui la tecnologia potrebbe essere d'aiuto se ai soccorritori fossero fornite, oltre all'indirizzo, le coordinate geografiche da inserire nei sistemi di navigazione ormai disponibili su tutti i telefoni cellulari muniti di GPS.

2.6 Dispositivi per la comunicazione in emergenza

La gestione dell'emergenza all'interno ed all'esterno del sito RIR fa uso di strumenti tecnologici sempre più avanzati. Dall' utilizzo della normale linea telefonica fissa si è passati alla rete telefonica mobile con messaggi in fonia o con testi scritti, o addirittura a reti satellitari. Per le comunicazioni interne al sito vengono sovente utilizzati cellulari aziendali, ricetrasmittenti o anche linee telefoniche fisse. Possono, però, esistere delle specifiche limitazioni legate alla difficoltà di collegarsi alla rete cellulare o di trasmettere segnali radio per l'effetto schermante di strutture e di apparecchiature. In presenza di rischio di esplosione è necessario, inoltre, utilizzare apparecchiature e quindi anche telefoni cellulari o ricetrasmittenti di tipo antideflagrante utilizzabili in aree ATEX (ATmosphere EXplosive).

Anche i telefoni fissi utilizzati durante l'emergenza debbono essere direttamente collegati alla rete e non possono essere utilizzati quindi centralini o cordless che possono essere inefficaci se subentrano interruzioni dell'elettricità durante l'emergenza.

Per le comunicazioni all'interno del sito, soprattutto in presenza di un significativo rumore di fondo, vengono utilizzati sistemi di segnalazione codificati del corpo o con voce amplificata, ma molto efficaci sono le sequenze codificate dei suoni di sirene in modalità "suono continuo", "suono discontinuo" o altre possibili combinazioni.



Figura 2. Comunicazioni via radio (Banca Dati Immagini Inail)

3. Esperienze delle visite ispettive

In occasione delle visite ispettive da parte delle commissioni di cui agli artt. 10 e 27 del D. Lgs.105/2005 è possibile evidenziare le criticità più frequenti materia di comunicazione presenti nei siti RIR. Nella tabella vengono riportati i dati di 7 visite ispettive recentemente svolte dagli autori di questo contributo scientifico, in varie regioni italiane, evidenziando le criticità riscontrate collegabili a difetti di comunicazione e che sono state oggetto di raccomandazioni o proposte di prescrizioni.

Criticità	Visite ispettive						
	Dep GPL	Dep. GPL	Dep GPL	Raff. petrolio	Dep. P. Chim.	Galvanica	Dep. P. Chim.
Comunicazioni con gli Enti	x	x	x	x		x	x
Comunicazione alla popolazione.	x	x	x		x	x	x
Comunicazioni ai lavoratori			x		x	x	x
Comunicazione a ospiti	x		x		x	x	x
Comunicazioni con l'esterno in emergenza	x	x	x			x	x
Udibilità segnali d'allarme	x		x		x	x	x
Allarmi e controlli da remoto			x		x	x	
Affidabilità degli apparecchi di comunicazione in emergenza	x	x	x		x	x	x

Tabella 1. Criticità riscontrate in fase di visita ispettiva relativamente a procedure di comunicazione

Il difetto di comunicazione è spesso motivo di prescrizione/raccomandazione da parte della commissione ispettiva e le maggiori criticità riguardano;

- lo scambio di informazioni con gli Enti
- la mancata informazione alla popolazione per difetti di flussi informativi fra Gestore, Prefettura e Comune.
- la comunicazione agli ospiti
- le comunicazioni in emergenza con l'esterno
- le difficoltà a comunicare l'emergenza con i segnali d'allarme o i mezzi di comunicazione.

Relativamente meno frequenti solo le prescrizioni/raccomandazioni relative ai sistemi di controllo da remoto (non sempre presenti) e alle comunicazioni al personale.

4. Discussione

La comunicazione in un sito RIR deve essere particolarmente curata. L'esperienza maturata durante le visite ispettive permette di evidenziare le criticità più frequentemente riscontrate e di sperimentare le azioni necessarie ad evitare che da una mancanza di comunicazione si possa generare un evento sgradito e capace di evolvere in incidente rilevante.

A seconda delle dimensioni dell'azienda l'aggiornamento del sistema di gestione della sicurezza può essere affidato alla stessa persona che si occupa della salute e sicurezza dei lavoratori o a specifiche professionalità. Non è scontato, infatti, che il Responsabile del Servizio di Prevenzione e Sicurezza abbia le competenze necessarie per adempiere anche alle incombenze della Direttiva Seveso e che le dimensioni dell'azienda permettano di farsi carico di tutte le incombenze del caso. Se le due problematiche sono demandate a due soggetti diversi è comunque necessario un interscambio di informazioni, magari creando un database accessibile ad entrambi. L'interazione con le Istituzioni viene spesso mortificata nei rapporti con le amministrazioni comunali. Le attività RIR sono spesso ubicate nel territorio di piccoli Comuni che non sempre riescono a gestire questo tipo di attività con le risorse tecniche ed umane disponibili. In questo caso il Gestore deve rendersi disponibile a supportare l'amministrazione con l'obiettivo di concludere rapidamente l'iter burocratico e fornendo la massima collaborazione anche perché la presenza di un'attività RIR può influire sulla caratterizzazione urbanistica dell'area circostante la stessa attività.

Come è nello spirito dei Sistemi di Gestione e Sicurezza il continuo aggiornamento dei documenti obbliga, di fatto, i tecnici incaricati e quindi il Gestore a garantire l'efficienza degli impianti del sito, sia quelle dedicate alla produzione che quelle necessarie a garantire la sicurezza interna ed esterna. L'innovazione tecnologica ha migliorato questa attività di aggiornamento perché i documenti vengono direttamente notificati ai vari soggetti, sono più facilmente consultabili ed è sempre possibile ricostruire i vari passaggi avendo contezza di quanto è stato approvato.

La presenza di un sito RIR evoca sempre un certo timore nella popolazione anche se, per i siti più vecchi, che col tempo sono stati inglobati dal tessuto urbano, può subentrare una certa assuefazione alla vista per cui entrano a far parte del paesaggio e per questo suscitano meno interesse. Per questo motivo tutte le forme di pubblicità che dovrebbero garantire alla popolazione che si sta lavorando in sicurezza e che si sta progettando secondo le norme le attività RIR potrebbero, paradossalmente, rallentare l'azione autorizzatoria degli enti locali o la comunicazione della stessa azienda, in quanto si teme che la pressione mediatica possa essere controproducente come tutto ciò che attira l'attenzione sul sito.

Ad esempio l'accensione di una torcia in un impianto di produzione di idrocarburi, dovrebbe dimostrare l'efficacia dei sistemi di sicurezza, ma dalla popolazione invece può essere invece interpretata come il verificarsi di una criticità. Ancor peggio nei siti ove il rischio è ancor meno visibile come sono, ad esempio, quelle ove sono detenute sostanze tossiche.

La comunicazione ai dipendenti avviene normalmente lasciando traccia dell'avvenuta notifica attraverso un foglio firma o una ricevuta di notifica elettronica. Non esiste un sistema infallibile per avere la certezza che l'informazione sia stata effettivamente compresa o che invece si sia solo semplicemente "messa a posto" la documentazione da mostrare in occasione dei controlli. Probabilmente l'obiettivo sarà raggiunto solo se il Gestore sarà stato capace di far capire al lavoratore che le nozioni fornite sono utili per garantire la sicurezza del sito e dei lavoratori stessi.

L'accesso di personale esterno deve sempre essere particolarmente curato perché non tutti gli ospiti percepiscono che il sito RIR è molto diverso dagli altri. Per i fornitori o le ditte provenienti da altre nazioni è importante verificare la comprensione della lingua o fornire una adeguata traduzione almeno in lingua inglese. I fornitori e le ditte esterne che effettuano lavori manutentivi non svolgono sempre le loro attività esclusivamente in siti RIR e possono non avere consapevolezza dei possibili effetti nefasti che le loro attività potrebbero provocare in tali stabilimenti. I danni derivanti dalla movimentazione delle merci, l'uso di fiamme libere sono spesso sottovalutate quando la compilazione del permesso di lavoro (in cui si valuta l'impatto dell'attività) viene assolto come mero atto burocratico o se i contenuti non vengono portati a conoscenza di tutta la squadra impegnata nell'attività manutentiva. Gli ospiti devono sempre essere affidati ad un referente interno che dovrà sorvegliare le loro azioni e farsi carico della sicurezza dei lavoratori in occasione delle emergenze.

L'efficienza degli apparecchi per la comunicazione deve essere sempre testata in simulazioni d'emergenza. Il mancato funzionamento in assenza di energia elettrica, le difficoltà a trasmettere segnali radio dai punti più remoti del sito, ad esempio, sono criticità che non devono essere rilevate solo durante l'emergenza. Gli impianti fissi come altoparlanti o sirene debbono essere testati continuamente per verificare che non perdano di efficacia a causa di guasti o modifiche del ciclo produttivo.

5. Conclusioni

In una attività a rischio di incidente rilevante è fondamentale che ci sia un continuo scambio di informazioni. Nella prima fase di progettazione del sito sarà prevalente la comunicazione con gli Enti di verifica e controllo e l'innovazione tecnologica ha sicuramente migliorato le modalità per l'invio della documentazione da parte del Gestore. La piattaforma che per ora è utilizzata solo per l'invio della "notifica" potrà essere implementata per creare un flusso di comunicazioni in entrambe le direzioni con la creazione di un data base di documenti consultabili in ogni momento. Anche la popolazione può acquisire più facilmente le informazioni accedendo all'archivio delle attività RIR attraverso il portale del Ministero della transizione ecologica e reperire le informazioni contenute nella notifica inviata dal Gestore. Attraverso il sito istituzionale delle Prefetture, inoltre, è possibile, per tutti i cittadini, prendere visione dei piani di emergenza esterna. La migliore forma di coinvolgimento è comunque sempre rappresentata dalle esercitazioni periodiche. Queste ultime, realizzate insieme agli addetti alle emergenze (lavoratori del sito, vigili del fuoco, soccorritori, e volontari) permettono di verificare che le attività previste nel piano di emergenza esterna siano attuabili dimostrando alla popolazione che sono state previste delle azioni efficaci ove si dovesse verificare un incidente.

La formazione dei dipendenti costituisce il principale mezzo di prevenzione ma occorre che questa non si riduca ad un assolvimento formale. I voluminosi documenti scoraggiano alla lettura ma se la formazione viene realizzata con modalità interattive e non passive può rivelarsi addirittura costruttiva perché i lavoratori possono direttamente segnalare azioni di miglioramento sulla base della loro esperienza di tutti i giorni. Conoscere bene il sito e i piani da attuare permette, inoltre, di agire con immediatezza quando si verifica un malfunzionamento e prima che questo diventi un incidente.

Quando l'incidente si è verificato la comunicazione con l'esterno è importantissima. I soggetti che debbono attuarla devono aver fatto numerose simulazioni. È sempre meglio affidare questo compito al responsabile dell'emergenza e non a personale amministrativo solo perché più vicino al telefono.

Molti incidenti possono essere evitati se tutti ricevono correttamente le informazioni per svolgere bene il proprio lavoro e questo si ottiene solo se tutti comprendono l'utilità di quanto si "trasmette".

6. Bibliografia

[1] G.U. 161 del 14 luglio 2015 DECRETO LEGISLATIVO 26 giugno 2015, n. 105. Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.

[2] M. del Gaudio "Attività a rischio di incidente rilevante ed impatto sui cittadini" Atti del Convegno INAIL, Settore Ricerca, Certificazione e Verifica.: "SAFAP 2012 Sicurezza ed affidabilità delle Attrezzature a pressione". Napoli Hotel Royal 14-15 giugno 2012. Codice ISBN 978-88-7484-230-8.

[3] M. Lombardi. (1995). Comunicazione sui rischi di incidenti rilevanti: credibilità e percezione di informatori qualificati in una città italiana. *Prevenzione e gestione delle catastrofi*, 4,4-14.

[4] M. ANDERSON. BEHAVIOURAL SAFETY AND MAJOR ACCIDENT HAZARDS Magic Bullet or Shot in the Dark? Trans IChemE, Part B, March 2005 Process Safety and Environmental Protection, 83(B2): 109–116 doi: 10.1205/psep.04230

Fonte immagini: Banca Dati Immagini Inail

Analisi congiunta dei settori “Seveso” e “Attrezzature a pressione”: esame e approfondimento statistico dei dati istituzionali

A. Di Francesco¹, P. Iacono², A. Nebbioso¹, G. Saputi³, C. Simeoni¹

¹ Inail –Dit

² Inail – Segreteria tecnica del Presidente, Vice Presidente e CDA

³ Inail – Direzione centrale ricerca

1. Sommario

In continuità con quanto già realizzato e presentato nell’ambito di precedenti edizioni del convegno Safap, il settore delle attrezzature a pressione verrà analizzato dalla prospettiva “Seveso”. Infatti, attraverso l’adattamento di una metodologia utilizzata per la caratterizzazione statistica degli stabilimenti rientranti nell’ambito di applicazione del D.lgs. 105/2015, verranno presentati i risultati dell’analisi condotta solo su quelli che rientrano contemporaneamente in entrambi i settori: “Seveso” e “Pressione”. L’analisi farà riferimento al quinquennio 2012-2016 e fornirà informazioni di sintesi su molti degli aspetti che rientrano nelle competenze dell’Inail, soprattutto in relazione alle denunce di infortunio, ponendo, ancora una volta, l’attenzione sul lavoratore e sulla sua sicurezza. Verranno inoltre forniti dati riguardanti il numero delle verifiche effettuate su alcune specifiche tipologie di apparecchi a pressione dai tecnici afferenti al Dipartimento innovazioni tecnologiche e alle Uot aggiornando quelli presentati in occasione del Safap 2016.

2. Introduzione

Le Direttive “Seveso”, a livello europeo, hanno da sempre indicato le misure per la prevenzione e il controllo del rischio di accadimento di incidenti rilevanti e dei rischi connessi alle caratteristiche di determinate sostanze. Ad oggi la Direttiva di riferimento è la cosiddetta Seveso III, entrata in vigore il 1° giugno 2015, abrogando le precedenti. In Italia è stata recepita dal Decreto Legislativo n. 105 del 26 giugno 2015 che ha confermato l’Inail quale organo tecnico ai fini dell’applicazione della normativa in tale materia. Partendo dai dati e dalle informazioni che derivano dallo svolgimento di tale attività istituzionale, è stata sviluppata e messa a punto negli anni una metodologia che ha consentito lo studio e la categorizzazione del settore Seveso attraverso una analisi che si concentra sul punto di vista infortunistico e non su quello ambientale e/o impiantistico tipico della letteratura di riferimento del settore. Come dettagliatamente descritto nei paragrafi successivi, tale analisi ha consentito non solo una valutazione quantitativa della composizione dei lavoratori coinvolti, ma, mediante una puntuale strutturazione e organizzazione dei dati, anche eventuali valutazioni e possibili monitoraggi.

Sono state altresì superate le difficoltà indotte dalla trasversalità del settore Seveso, riuscendo ad individuare quale fosse la sua effettiva dimensione. Le sostanze pericolose indicate nella Direttiva Seveso, infatti, sono presenti in numerosi processi industriali che ricadono in diversi settori di attività economica che vengono classificate secondo codici ATECO e non tutte, ovviamente, soggette alla normativa di settore. In più, va sottolineato che sono gli stabilimenti a ricadere nel settore Seveso ed essi sono unità definite dai propri limiti fisici, mentre i codici ATECO si applicano alle Aziende, che sono realtà organizzative non necessariamente legate ad un’unica struttura fisica.

La sovrapposizione dei dati appartenenti simultaneamente al settore Seveso così categorizzato e il settore “Pressione” ha permesso di evidenziare trend e informazioni utili per analizzare e descrivere una attività istituzionale molto specifica così da supportare

l'azione di ricercatori e tecnici che, a vario titolo coinvolti, mirano ad identificare e implementare strumenti e misure finalizzati al miglioramento della sicurezza e della salute dei lavoratori che svolgono la propria attività nel settore Pressione e con presenza di pericolo di incidente rilevante.

3. Materiali e metodi

Partendo dalla metodologia consolidata con i lavori precedenti, per il recupero delle informazioni¹, sono state analizzate diverse fonti di dati a partire dall'Inventario nazionale degli stabilimenti a rischio di incidente rilevante messo a disposizione dal Ministero della Transizione ecologica (MiTE). Dall'unione delle informazioni desunte da quest'ultimo, dal Registro Nazionale delle Imprese e dall'applicativo istituzionale CIVA è stato possibile ottenere l'identificativo delle singole attività per il recupero delle relative informazioni dalle banche dati Inail. La Consulenza Statistica Attuariale dell'Istituto ha fornito i dati sulle denunce di infortunio, necessari alla caratterizzazione del settore.

Il MiTE, mette a disposizione i dati aggiornati sul numero di stabilimenti notificati ai sensi del D.lgs. 105/15. L'inventario è periodicamente aggiornato dall'ISPRA sulla base delle notifiche e denotifiche degli stabilimenti assoggettati alla normativa, classificandoli in due gruppi distinti sulla base delle quantità di sostanze pericolose detenute ai sensi dell'Allegato 1 del Decreto (soglia superiore ed inferiore). Le informazioni contenute nell'inventario riguardano: Provincia, Comune, località, codice ministero, ragione sociale e tipologia di attività.

L'Inail, nell'ambito del processo di valorizzazione del proprio patrimonio informativo, mette a disposizione dei cittadini un set di dati e, nella logica dell'open data (Direttiva 2003/98/CE del 17 novembre 2003 recepita dall'ordinamento italiano con il Decreto Legislativo 24 gennaio 2006 n. 36; Codice dell'Amministrazione Digitale - Decreto Legislativo 7 marzo 2005 n. 82), rende pubblici:

- dataset statistici con dati elementari, relativi al singolo caso di infortunio e di malattia professionale, corredati da metadati, vocabolario e thesaurus, "modello di lettura" (definito su una struttura di tabelle);
- dataset statistici con dati aggregati, che propongono, su temi particolari, dati statistici aggregati, ma manipolabili;
- dataset gestionali, che riportano informazioni sulle sedi dell'Inail e sui Centri Operativi Regionali.

I dati in possesso dell'Istituto sono relativi alla popolazione degli assicurati Inail (non vi rientrano, per esempio, gli agenti di commercio, i giornalisti, il personale di volo, i Vigili del Fuoco, il personale delle Forze di Polizia e delle Forze armate); sono disponibili in formato aperto e liberamente consultabili e riutilizzabili dal cittadino e dalle imprese con licenza IODL v2.0.

Il periodo temporale di riferimento è il quinquennio dal 2012 al 2016. Ai fini dell'allineamento temporale dell'inventario nazionale degli stabilimenti RIR con le banche dati Inail, sono stati considerati gli elenchi regionali degli stabilimenti Seveso notificati all'anno 2017, in quanto i dati relativi alle denunce di infortunio erano riferibili al quinquennio sopra citato.

¹ A. Nebbioso, C. Simeoni, P. Iacono, G. Saputi, *Caratterizzazione statistica del "Settore Seveso"*. Atti del convegno SAFAP 2016, Milano 15/16 novembre 2016, Inail ISBN 978-88-7484-520-0. Alessandro Di Francesco, Piero Iacono, Annalisa Nebbioso, Annalisa Pirone, Gianluca Saputi, Carla Simeoni, Maria Rosaria Vallerotonda, *Settore Seveso: contesto normativo e caratterizzazione statistica degli infortuni*. Inail Quaderni della Ricerca n.18, maggio 2020, ISBN 978-88-7484-621-4.

I dati fanno riferimento agli infortuni in occasione di lavoro e senza mezzo di trasporto e sono associati alle aziende e non ai singoli stabilimenti. Non in tutti gli stabilimenti appartenenti all'inventario si sono verificati infortuni, per cui loro numero risulta essere inferiore rispetto a quello derivante dall'inventario del MiTE.

Dalla classificazione indicata nell'inventario nazionale, è stata identificata l'attività produttiva svolta all'interno di ogni stabilimento e in applicazione della metodologia messa a punto, sono stati delineati quattro macrosettori:

- produzione e trasformazione metalli e minerali;
- industria chimica;
- stoccaggio, deposito e distribuzione;
- altre attività.

Ai fini della caratterizzazione del settore Seveso/Pressione, dai dati ottenuti mediante la metodologia indicata, sono stati estrapolati quelli relativi agli stabilimenti che contemplano, nel processo produttivo, l'utilizzo di strumentazioni in pressione.

In particolare, nella tabella 1, sono riportate le attività considerate con le rispettive classi Ateco.

Classe	Descrizione
C 11	Industria delle bevande
C 13	Industrie tessili
C 17	Fabbricazione di carta e di prodotti di carta
C 19	Fabbricazione di coke e prodotti derivanti dalla raffinazione del petrolio
C 20	Fabbricazione di prodotti chimici
C 21	Fabbricazione di prodotti farmaceutici di base e di preparati farmaceutici
C 24	Metallurgia
C 25	Fabbricazione di prodotti in metallo (esclusi macchinari e attrezzature)

Tabella 1. Codice classe ATECO 2007 e descrizione

Le variabili considerate descrivono gli aspetti caratteristici della *mission* istituzionale relativamente al fenomeno infortunistico.

Gli infortuni sono stati analizzati in relazione alla tipologia di conseguenze riportate, e suddivisi in tre categorie in base al grado di menomazione² riconosciuto da INAIL e che esprime la percentuale "p" con cui si misura il livello di menomazione dell'integrità psicofisica in conseguenza di infortunio:

- $p \leq 5\%$: contiene i casi di assenza di menomazione e gli infortuni con menomazione fino al 5%
- $p \geq 6\%$: sono aggregate le frequenze delle classi con grado di gravità menomazione dal 6% al 100%.
- *Mortali*: sono conteggiati gli infortuni mortali.

Inoltre stati analizzati la natura della lesione, la parte di corpo colpita, la distribuzione degli infortuni per classe di età e per professione.

È stata condotta una analisi degli accadimenti delle cause degli eventi infortunistici occorsi attraverso l'utilizzo delle variabili ESAW, basate su codici riconosciuti e definiti a livello europeo per la registrazione dei dati degli infortuni.

In particolare, la variabile "deviazione" ESAW che descrive l'evento più recente verificatosi nelle circostanze immediatamente precedenti l'infortunio, che deviando dalla norma conduce all'infortunio e la variabile "contatto ESAW" che descrive le modalità della lesione, ovvero l'azione che effettivamente provoca la lesione in seguito alla deviazione.

4. Risultati

Di seguito si propongono una serie di grafici e tabelle utili alla descrizione del settore analizzato nonché una sintesi degli esiti che si è ritenuto più opportuno evidenziare.

Nel lasso di tempo considerato e rispetto alla classificazione ATECO, gli infortuni definiti positivi subiscono una diminuzione più accentuata nel C24 (metallurgia), dove, però, rimangono pressoché costanti tra il 2015 e il 2016. Per gli altri settori, invece, non si riscontrano variazioni di rilievo nel corso degli anni. Ciò si rispecchia anche nella suddivisione in macrosettori prevista dalla metodologia descritta nei paragrafi precedenti.

Per quanto concerne la natura della lesione, è la contusione ad essere la principale con il 30,7%, seguita dalla lussazione e distorsione con il 23,7%. È, però, la frattura a comportare gli infortuni più gravi e mortali.

Le sedi del corpo maggiormente interessate dagli infortuni sono gli arti (superiori e inferiori); tra l'altro tali infortuni presentano anche il grado di gravità maggiore. La testa, il torace e gli organi interni e la colonna vertebrale sono, invece, le sedi in cui gli infortuni hanno causato il maggior numero di morti.

La variabile "contatto ESAW", che descrive la modalità della lesione, mostra come modalità con percentuale maggiore il contatto con materiale tagliente, appuntito, duro, abrasivo (25%), ma è la modalità Schiacciamento contro oggetto immobile quella che presenta conseguenze con gravità maggiore.

In riferimento alla "Deviazione ESAW", la perdita di controllo totale o parziale di una macchina è l'evento più frequente, 21,8%, mentre lo scivolamento o inciampamento è quello che comporta la percentuale maggiore di cause gravi. Da osservare, inoltre, che la modalità "sorpresa, sbigottimento" è una delle meno frequenti, ma è quella in cui si registra una delle percentuali maggiori di infortuni gravi.

La classe di età con la percentuale maggiore di infortuni è quella da 35 a 45 (che presumibilmente è quella con il numero maggiore di addetti), la percentuale più elevata di infortuni gravi e mortali è presente nella fascia di età oltre i 45 anni.

Per quanto riguarda le professioni, dalla banca dati Inail, sono stati estrapolati i dati sugli infortuni occorsi ai lavoratori assicurati presso l'Istituto disponibili a partire dall'anno 2013

L'analisi sugli infortuni condotta rispetto alle professioni coinvolte, evidenzia che la categoria con una percentuale maggiore di infortuni pari al 34,35% è "Conduttori di impianti industriali" che nella banca dati Inail è definita come "professioni che comportano la conduzione di impianti o macchinari industriali automatizzati che operano lungo l'intero processo produttivo o su singole fasi dello stesso nelle attività di estrazione e di trattamento dei minerali, di trasformazione e lavorazione dei metalli, del vetro, della ceramica, del legno e della carta e di produzione di derivati della chimica e del petrolio".

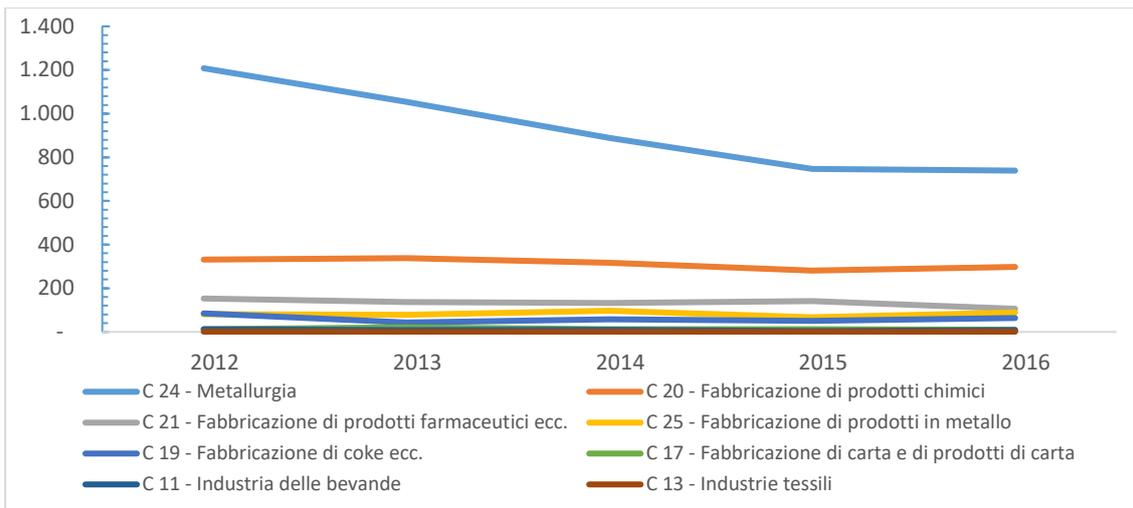


Grafico 1. Infortuni definiti positivi per settore ATECO - valori assoluti anni 2012/2016 - Fonte dati Inail

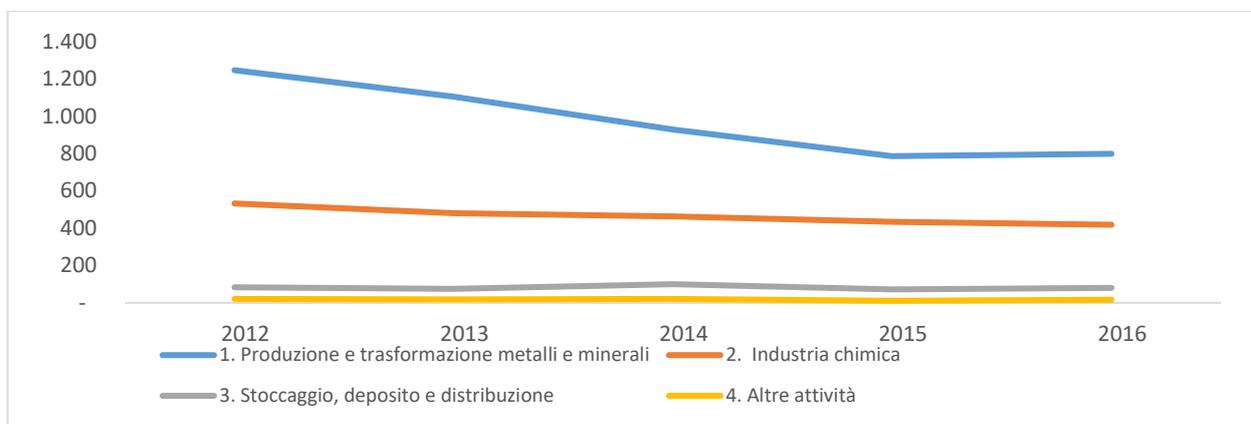


Grafico 2. Infortuni definiti positivi in aziende Seveso per Macrosettore anni 2012/2016 - Fonte dati Inail

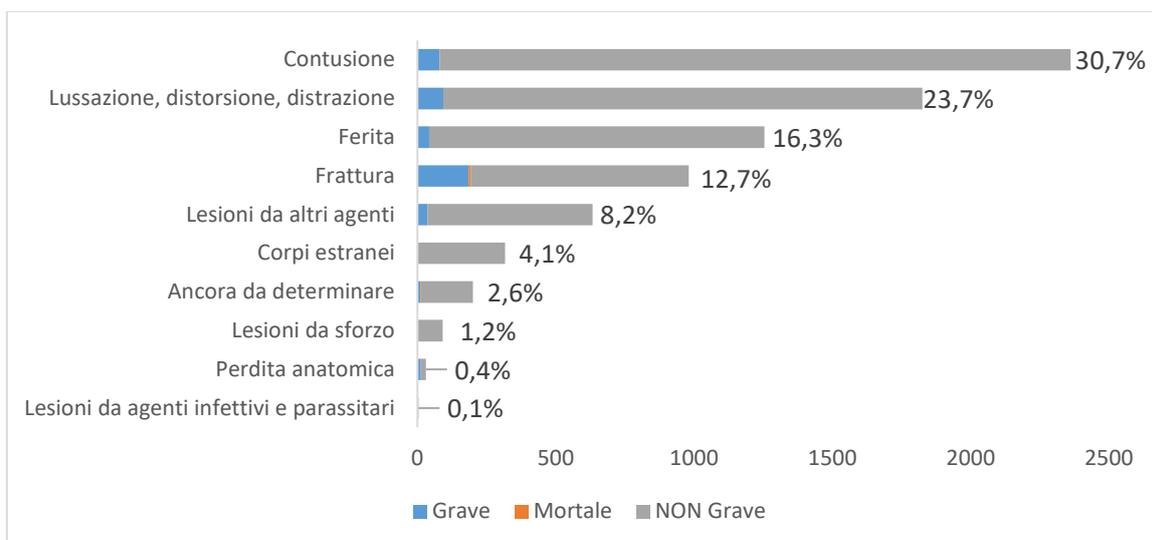


Grafico 3. Natura Lesione per gravità infortunio - Infortuni definiti positivi anni 2012/2016 - Fonte dati Inail

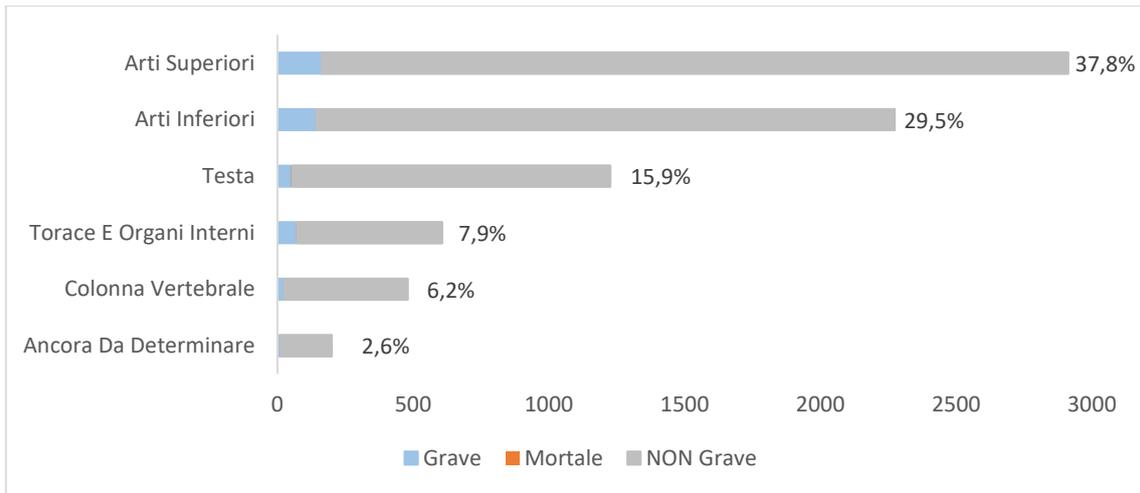


Grafico 4. Sede Lesioni per gravità infortunio - Infortunati definiti positivi anni 2012/2016 - Fonte dati Inail

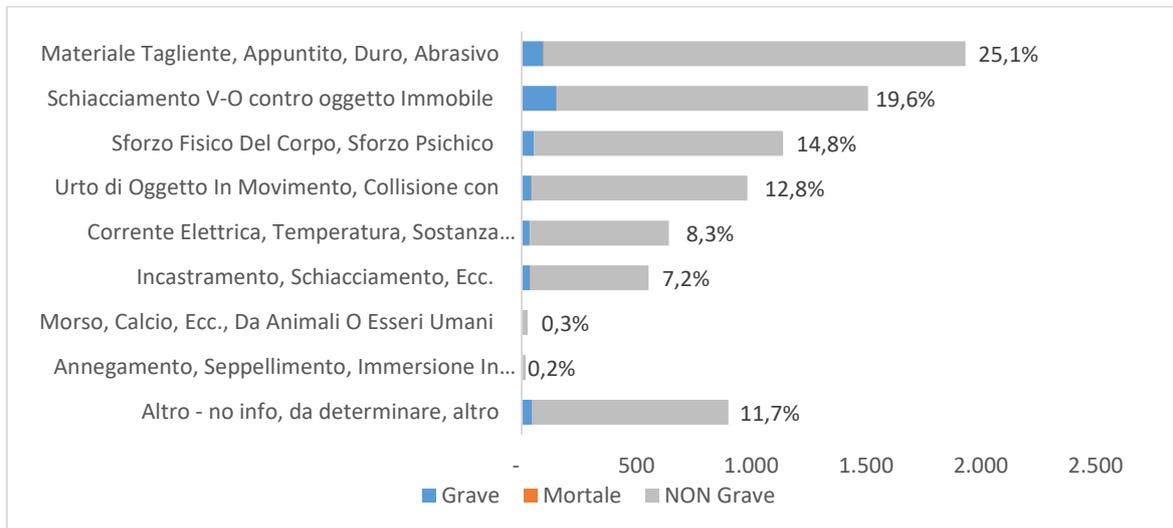


Grafico 5. Contatto ESAW per gravità infortunio - Infortunati definiti positivi anni 2012/2016 - Fonte dati Inail

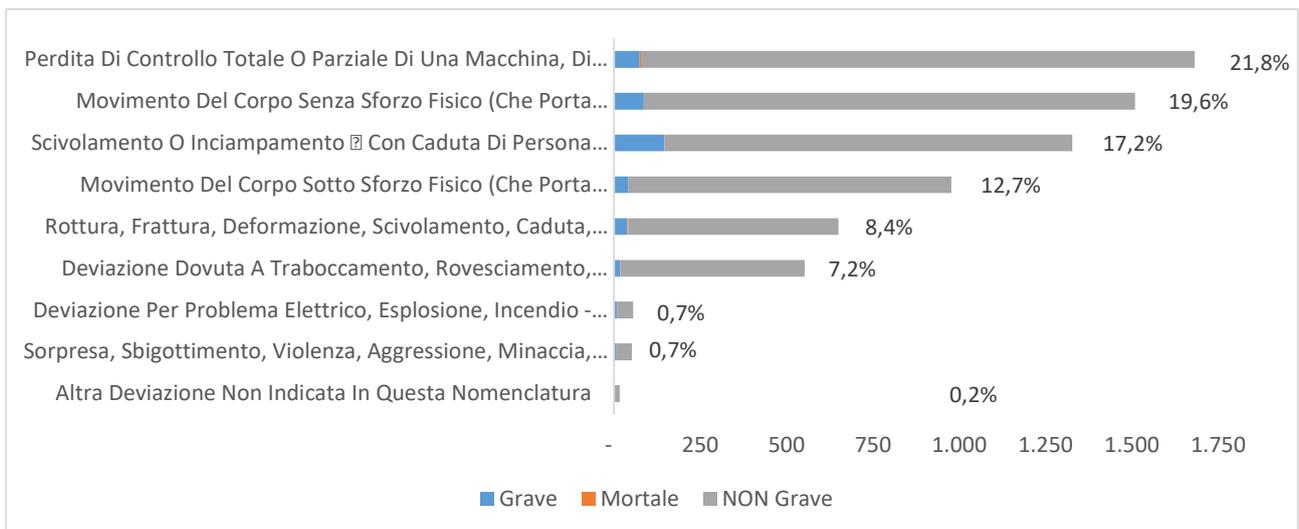


Grafico 6. Deviazione ESAW per gravità infortunio - Infortunati definiti positivi anni 2012/2016 - Fonte dati Inail

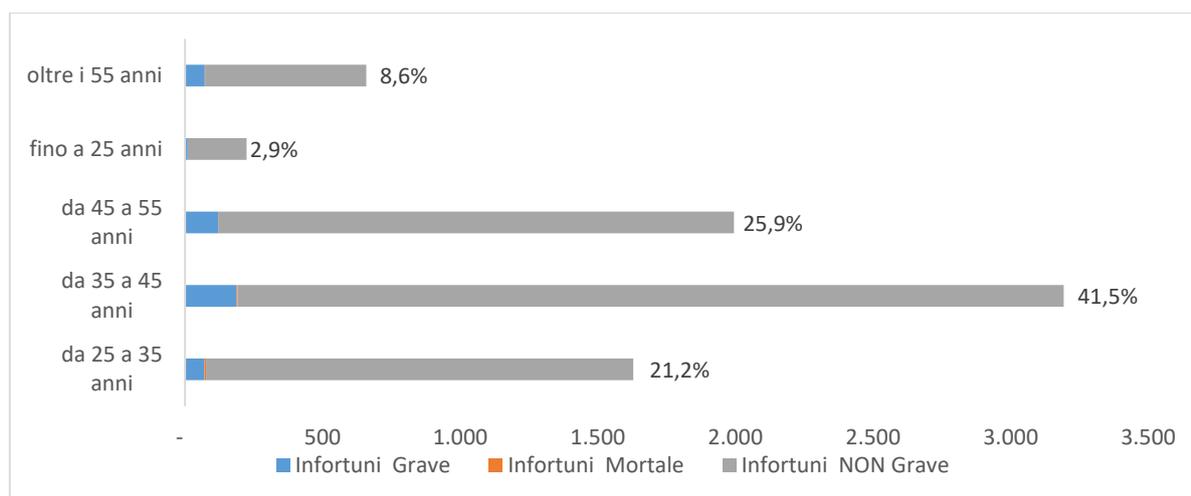


Grafico 7. Classe di età per gravità infortunio - Infortuni definiti positivi anni 2012/2016 - Fonte dati Inail

Professioni (CP2011)	n.	%
7.1 - Conduttori di impianti industriali	1943	34,35%
6.2 - Artigiani ed operai metalmeccanici specializzati e installatori e manutentori di attrezzature elettriche	1177	20,81%
7.4 - Conduttori di veicoli, di macchinari mobili e di sollevamento	547	9,67%
8.4 - Professioni non qualificate nella manifattura, nell'estrazione di minerali e nelle costruzioni	367	6,49%
7.2 - Operai semiqualeficati di macchinari fissi per la lavorazione in serie e operai addetti al montaggio	352	6,22%
3.1 - Professioni tecniche in campo scientifico, ingegneristico e della produzione	301	5,32%
8.1 - Professioni non qualificate nel commercio e nei servizi	219	3,87%
6.3 - Artigiani ed operai specializzati della meccanica di precisione, artigianato artistico, stampa ed assimilati	169	2,99%
3.3 - Professioni tecniche nell'organizzazione, amministrazione e nelle attività finanziarie e commerciali	133	2,35%
2.1 - Specialisti in scienze matematiche, informatiche, chimiche, fisiche e naturali	96	1,70%
4.3 - Impiegati addetti alla gestione amministrativa, contabile e finanziaria	95	1,68%
4.1 - Impiegati addetti alle funzioni di segreteria e alle macchine da ufficio	80	1,41%
6.1 - Artigiani e operai specializzati dell'industria estrattiva, dell'edilizia e della manutenzione degli edifici	54	0,95%
5.1 - Professioni qualificate nelle attività commerciali	29	0,51%
Altre professioni	95	1,68%
Totale	5657	100,00%

Tabella 2. Infortuni definiti positivi per Professioni – anni 2013/2016
Fonte dati Inail

5. CIVA

Il sistema CIVA dell'INAIL gestisce, attraverso servizi telematizzati, tutte le informazioni a livello nazionale sia dal punto di vista tecnico che da quello legato allo storico delle verifiche sugli apparecchi/impianti effettuate da parte dell'Istituto. CIVA raccoglie, inoltre, i dati relativi alle attrezzature di lavoro classificate nei macro settori "Pressione, Riscaldamento, Sollevamento e Terra", nonché la loro dislocazione sul territorio e ciò ha consentito di individuare le informazioni relative al settore Seveso/Pressione sintetizzate nelle tabelle descritte nel prosieguo della presente memoria.

Di conseguenza, i dati estrapolati dalla banca dati CIVA fanno riferimento agli anni 2012-2016 ed alle attività appartenenti al sopra citato settore.

Apparecchiature a pressione	n.	%
Recipienti di gas	9.763	68,8%
Tubazioni	2.758	19,4%
Insiemi a pressione UI (unità indivisibile)	1.249	8,8%
Recipienti di vapore	223	1,6%
Insiemi a pressione	93	0,7%
Generatori di vapore d'acqua	92	0,6%
Forni	10	0,1%
Totale	14.188	100,0%

Tabella 3. Apparecchiature a pressione - dati nazionali
anni 2012/2016 - Fonte dati Inail (CIVA)

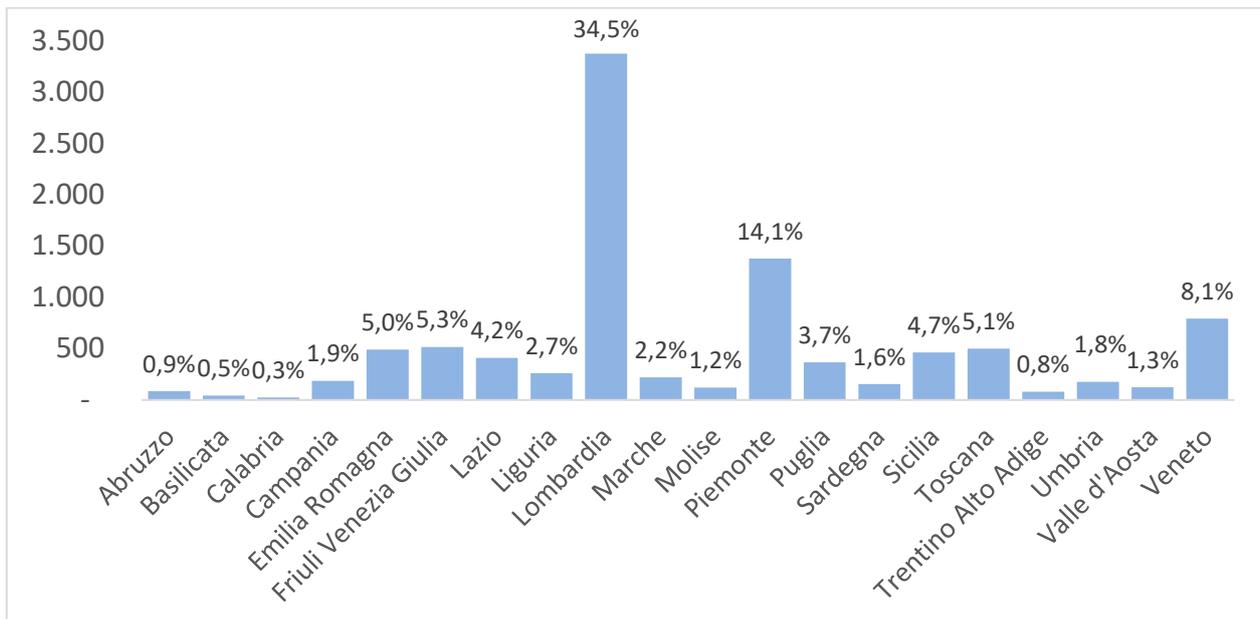


Grafico 8. Recipienti di gas per regione anni 2012/2016 - Fonte dati Inail (CIVA)

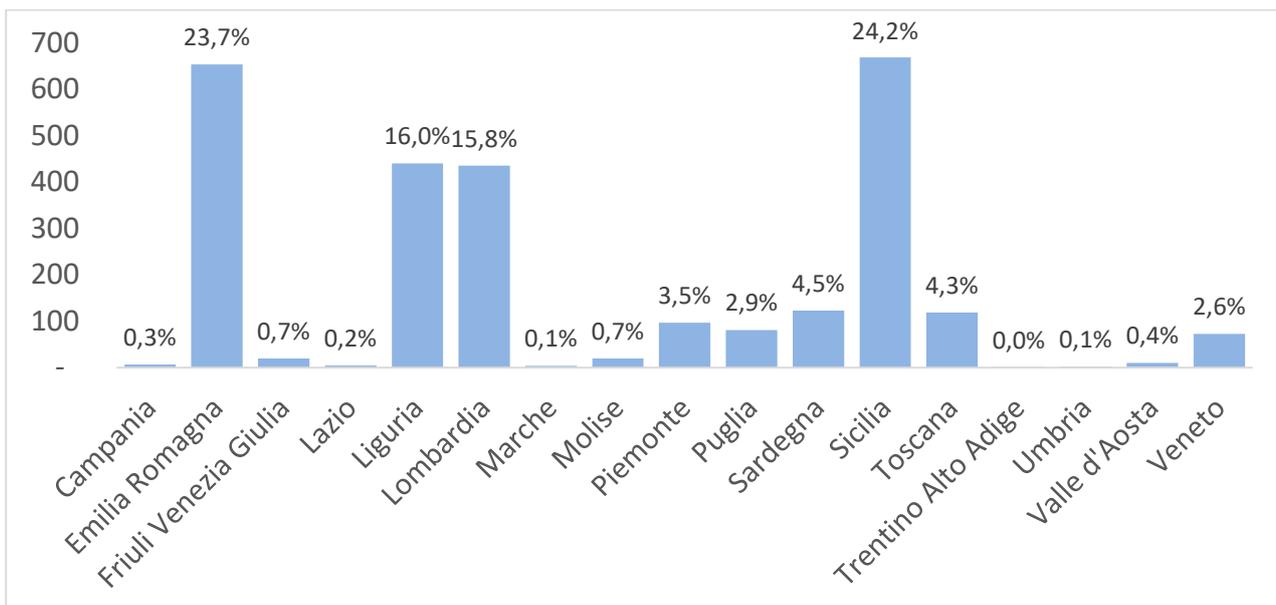


Grafico 9. Tubazioni per regione anni 2012/2016 - Fonte dati Inail (CIVA)

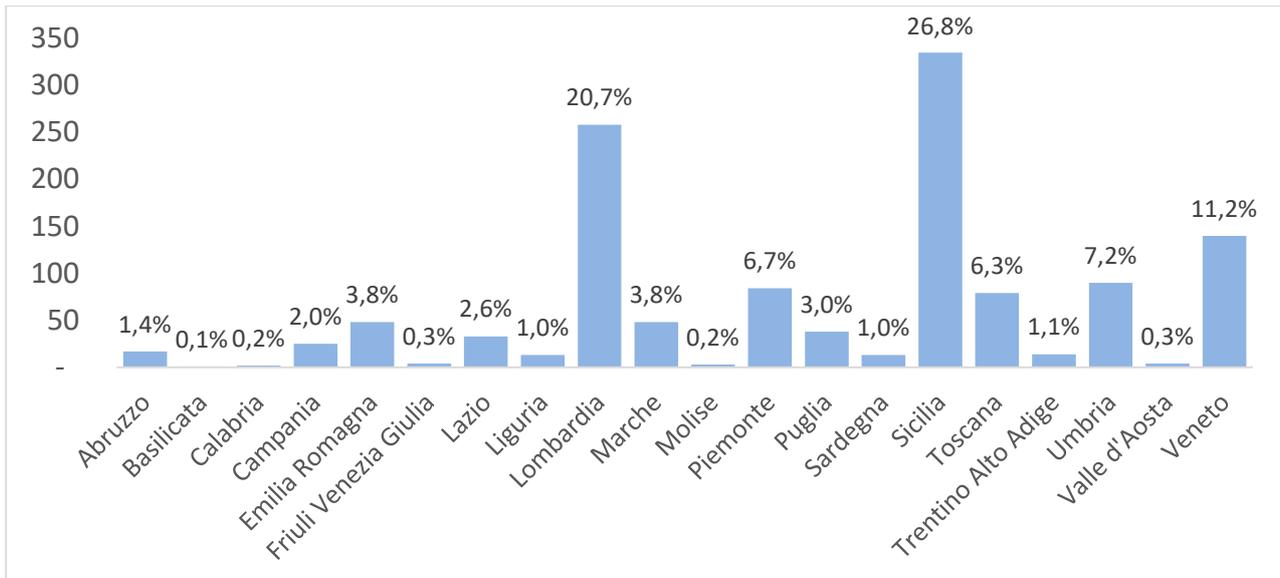


Grafico 10. Insiemi a pressione (unità indivisibile) per regione anni 2012/2016
- Fonte dati Inail (CIVA)

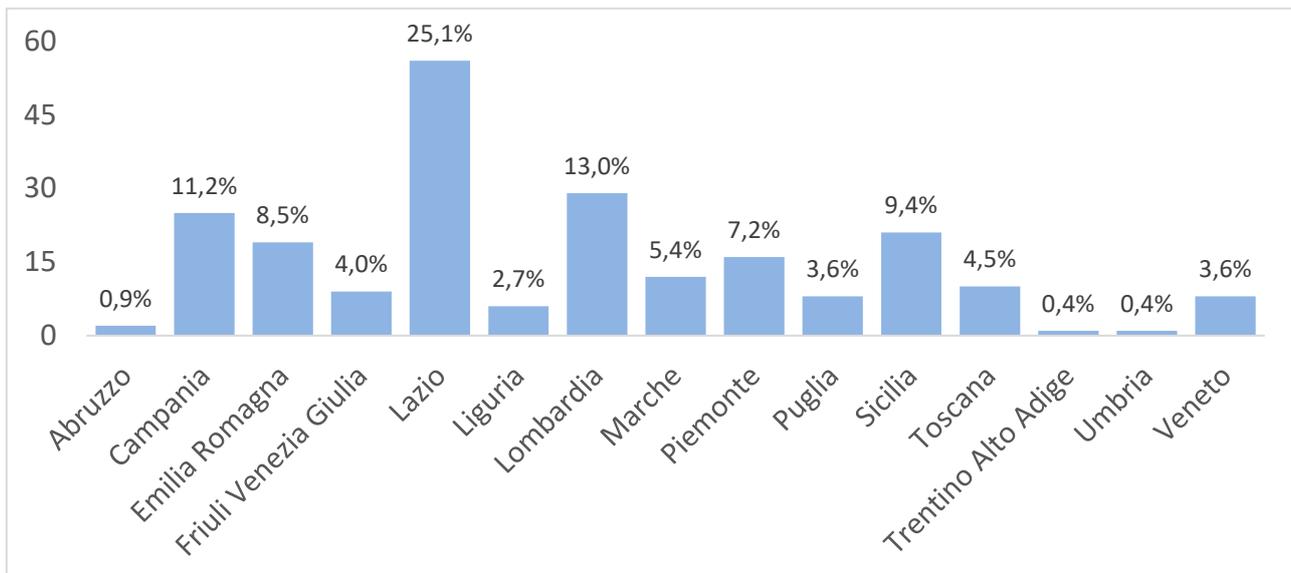


Grafico 11. Recipienti di vapore per regione anni 2012/2016 - Fonte dati Inail (CIVA)

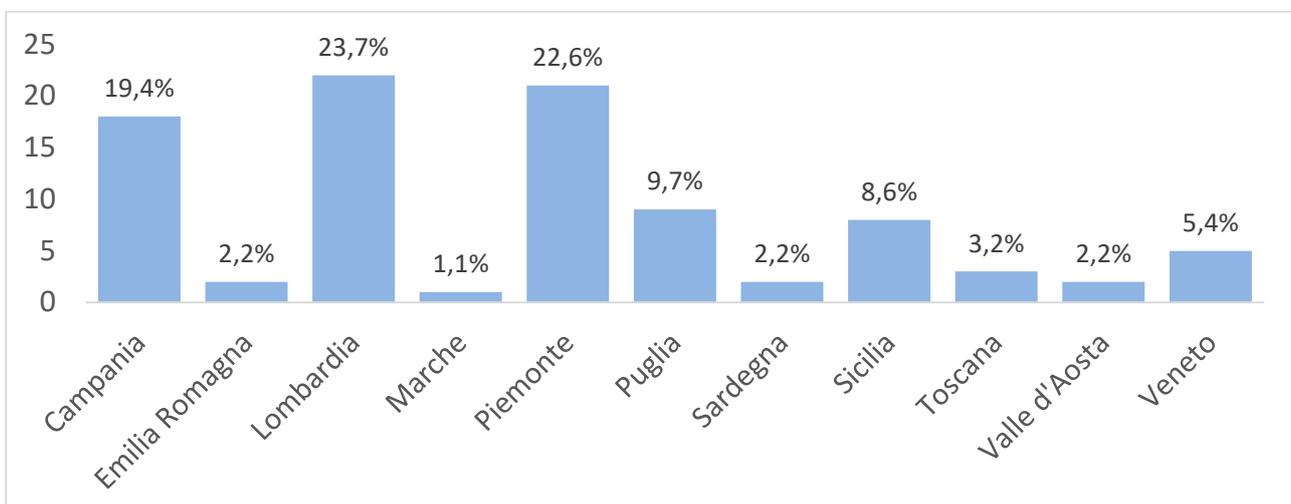


Grafico 12. Insiemi a pressione per regione - anni 2012/2016 - Fonte dati Inail (CIVA)

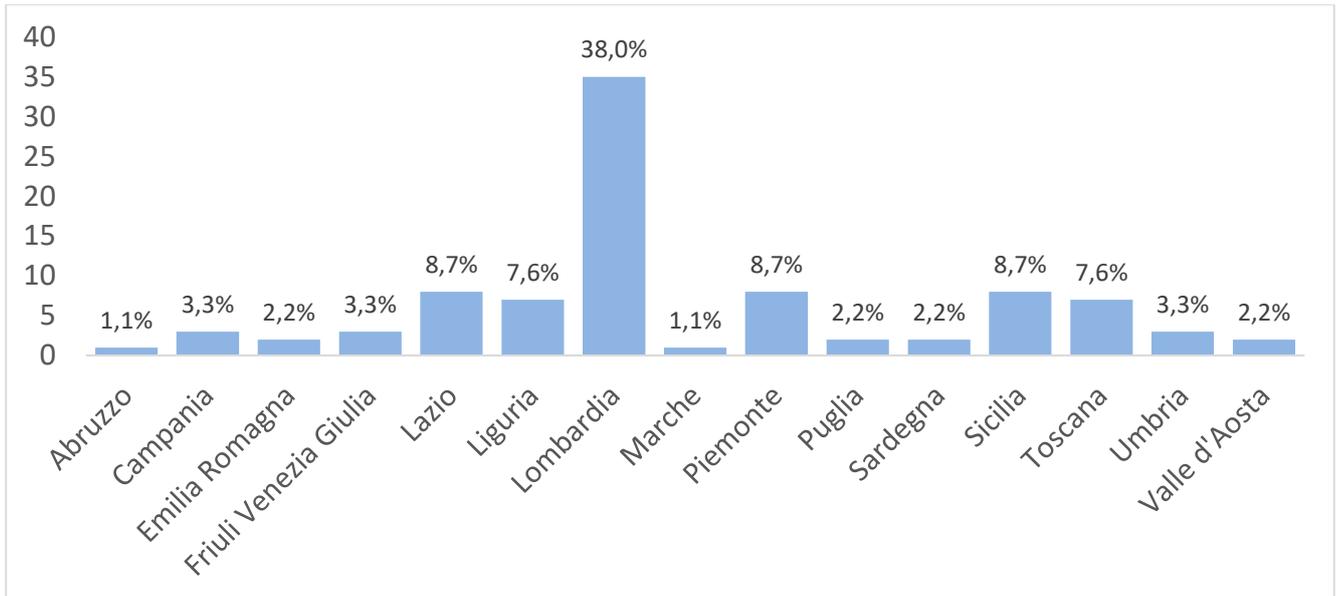


Grafico 13. Generatori di vapore d'acqua per regione anni 2012/2016
- Fonte dati Inail (CIVA)

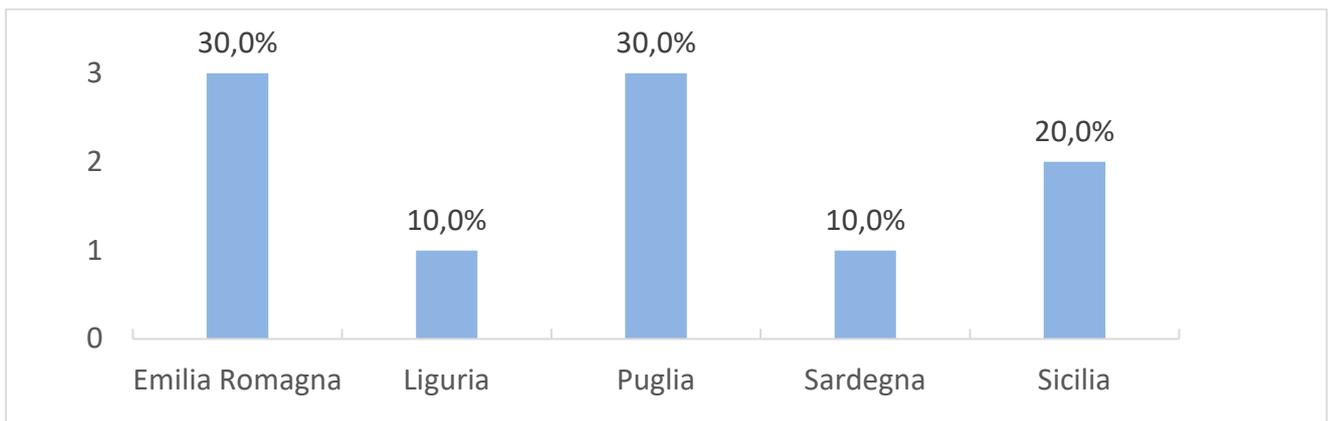


Grafico 14. Forni per regioni anni 2012/2016
- Fonte dati Inail (CIVA)

6. Conclusioni

In continuità con i lavori redatti in passato, di cui alcuni presentati anche in ambito Safap, il presente articolo si concentra sullo studio ed analisi di un settore appositamente delineato, c.d. Seveso/Pressione. L'attenzione viene posta sul lavoratore ed in particolare sull'aspetto infortunistico sintetizzando le informazioni secondo un approccio tipicamente istituzionale.

Sono obbligatorie alcune osservazioni al fine di una corretta lettura dei dati.

Non è possibile distinguere se l'infortunio è accaduto a livello operativo e/o sul campo o se è avvenuto all'interno degli uffici gestionali in quanto i codici fiscali o le partite IVA individuano l'azienda di appartenenza dello stabilimento e non lo stabilimento stesso. Ciò rende difficile individuare la realtà lavorativa in cui l'infortunio si è verificato.

Inoltre, non è possibile condurre analisi comparative con i lavori precedenti poiché si dispone del numero dei lavoratori solo in forma aggregata. Un eventuale variazione degli infortuni, infatti, potrebbe eventualmente dipendere anche da una riduzione o da un aumento di tale numerosità.

Da sottolineare anche che nell'arco temporale osservato ricade il passaggio dal D.lgs. 334/99 e s.m.i e relativi decreti attuativi al nuovo D.lgs. 105/15, considerato un vero e proprio "testo unico" in ambito Seveso. La nuova pianificazione dell'attività ispettiva e la raccolta di indicazioni di tipo tecnico ed operativo negli allegati rappresentano le principali novità di questo decreto, obbligatorio per tutti i Gestori, indipendentemente dalla dimensione ed organizzazione dello stabilimento. Considerando che il numero delle aziende facenti parte del settore Seveso/Pressione rimane pressoché costante nel corso degli anni, le analisi future, effettuate con la metodologia proposta nel presente lavoro, potranno eventualmente affiancare valutazioni circa l'efficacia delle misure di controllo previste dalla nuova normativa anche in termini di sicurezza sul lavoro.

Ad oggi, si può affermare che il settore Seveso/Pressione presenta probabilità di accadimento di infortunio gravi e mortali basse e ciò è presumibilmente correlato anche al sistema dei controlli, effettuati dalle autorità competenti e dagli organi tecnici, più strutturato ed articolato rispetto al passato.

Bibliografia

- [1] Simeoni C, Bragatto P, Cipolloni F, Morinelli G, Nebbioso A, Saputi G. Valutazioni statistiche sui lavoratori degli impianti a rischio di incidente rilevante SAFAP 14-15 Ottobre 2014 Roma.
- [2] Hough P. Worker safety and human security: the case for global governance. E-Journal of International and Comparative Labour Studies. 2012;1:3-4.
- [3] <http://dati.INAIL.it/opendata/default/Qualidati/index.html>
- [4] <http://bancadaticsa.INAIL.it/bancadaticsa/login.asp>
- [5] http://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/rapporti/rapporto_181_2013.pdf
- [6] <http://www.minambiente.it/pagina/inventario-nazionale-degli-stabilimenti-rischio-di-incidente-rilevante-0>
- [7] <http://dati-censimentoindustriaeservizi.istat.it/>
- [8] Pittiglio P, Bragatto P, Delle Site C. Updated failure rates and risk management in process industries Energy Procedia. 2014;45:1364-137
- [9] <http://demo.istat.it/index.html>
- [10] Ciriello G, De Felice M, Mosca R, Veltroni M. Infortuni sul lavoro. Un modello di lettura (della numerosità) su "open data" dell'INAIL, Roma, INAIL, Quaderni di ricerca, 1-maggio 2013.
- [11] Di Francesco A., Iacono P., Nebbioso A., Pirone A., Saputi G., Simeoni C., Vallerotonda M.R. Settore Seveso: contesto normativo e caratterizzazione statistica degli infortuni. Inail Quaderni della Ricerca n.18, maggio 2020, ISBN 978-88-7484-621-4

La Root Cause Analysis – Un esempio di applicazione diffusa in Stabilimento per l'analisi di anomalie e quasi incidenti

G.A. Zuccarello¹, M. Puccetti², A. Lambertini³

¹ Inail – Uot di Bologna

² BASF Italia S.p.A.

³ ARPAE Emilia-Romagna PTR-RIR

Sommario

Imparare dagli eventi incidentali è fondamentale per il miglioramento continuo della sicurezza in ogni ambito.

Tramite un processo articolato nelle fasi di segnalazione dell'incidente, analisi per la determinazione delle cause di radice, individuazione delle azioni correttive e/o preventive e infine di condivisione delle "lessons learned", si è perseguito lo scopo di definire un programma di analisi di qualsiasi tipo di anomalia, che ha permesso nel tempo di monitorare l'andamento degli eventi incidentali e quindi anche, in ultima istanza, della qualità del processo stesso.

Nel modello adottato in BASF, particolare enfasi è stata posta sugli eventi non gravi, near misses e/o pericoli potenziali, che costituiscono la base della piramide degli incidenti, sui quali è più semplice intervenire, ma anche sui quali l'azione preventiva diventa più efficace. Inoltre, l'utilizzo di un mezzo di facile accessibilità e fruizione come l'Intranet aziendale per la creazione della "segnalazione di incidente" ha consentito di raggiungere tutti i livelli della popolazione aziendale, compresi i contractors esterni, e di raccogliere nel triennio 2017-2019 circa 500 segnalazioni all'anno, tramite le quali sono state portate all'attenzione dell'azienda sia anomalie che semplici proposte di miglioramento.

L'analisi dei dati raccolti ha consentito di monitorare l'efficacia del sistema, ma soprattutto di individuare le aree operative, le installazioni e le procedure sulle quali è risultato prioritario intervenire a seguito delle segnalazioni riportanti la medesima anomalia.

L'azione svolta sull'effettiva causa che aveva generato le segnalazioni, ha consentito di prevenire il futuro ripetersi di tali eventi, evitando di doverne gestire le conseguenze.

1. Introduzione

La legislazione in tema di salute e sicurezza sul lavoro (D.Lgs. 81/2008) e prevenzione dei rischi di incidenti rilevanti (D.Lgs. 105/2015) individua nell'ambito dei requisiti cogenti dei sistemi di gestione della sicurezza la necessità per le imprese di implementare e mantenere attive procedure per la registrazione, l'investigazione e l'analisi degli incidenti, allo scopo di individuare carenze gestionali ed altri fattori che possano causare o contribuire all'accadimento di incidenti. Anche le norme tecniche volontarie sui sistemi di gestione (ISO 45001, ISO 9001, ISO 14001) impongono alle organizzazioni, in un'ottica di miglioramento continuo del sistema, di individuare opportunità di miglioramento da incidenti, "near miss" o, più in generale, non conformità ed anomalie, al fine di sviluppare azioni correttive da porre in essere per evitarne il ripetersi.

L'obiettivo dell'analisi degli incidenti è individuare ulteriori barriere di protezione di tipo preventivo o mitigativo o azioni di miglioramento al fine di eliminare le cause organizzative, procedurali o tecniche che hanno portato all'incidente in modo da evitare non solo il ripetersi solo dello stesso evento, ma anche di incidenti simili, estendendo il campo di applicazione delle lezioni apprese ad altri impianti e processi dello stabilimento o anche ad altri siti.

Una ricostruzione precisa degli elementi che hanno determinato l'evento incidentale può essere ottenuta solamente adottando un approccio strutturato e con un livello di approfondimento crescente. Le metodologie di analisi degli incidenti, quasi-incidenti e anomalie più diffuse sono: Root Cause Analysis (RCA), Tripod Beta e Barrier Failure Analysis (BFA). Queste metodologie, oggi largamente utilizzate nell'industria chimica e petrolchimica e nei settori dell'energia e dei trasporti, si basano su schematizzazioni di tipo grafico che consentono un'immediata visualizzazione degli eventi e delle potenziali relazioni causa-effetto tra questi. [1]

Ai fini di un'attività di prevenzione efficace, tuttavia, è importante analizzare in dettaglio non solo gli incidenti accaduti in cui si sono verificati danni alle persone e/o alle strutture, ma anche le situazioni potenzialmente pericolose e i comportamenti non sicuri, che risultano essere di numero notevolmente maggiore e più difficilmente segnalati e registrati, come ben illustra la metafora dell'iceberg o la piramide degli incidenti.

1.1 La piramide degli incidenti

La piramide degli incidenti o piramide della sicurezza è la rappresentazione grafica di una teoria della prevenzione degli incidenti industriali che cerca di individuare una correlazione tra incidenti mortali, incidenti minori e quasi incidenti. Dopo H.W.Heinrich, che la propose per la prima volta nel 1931, e F.E. Bird Jr. che la riprese negli anni '70, vari autori si sono cimentati nell' analisi statistica degli incidenti. Al di là delle diversità nei numeri pubblicati, che dipendono ad esempio dal campione di riferimento, dai criteri di classificazione degli eventi o dal periodo di riferimento, la distribuzione a piramide mostra comunque che il numero delle anomalie e dei comportamenti pericolosi è notevolmente superiore a quello degli incidenti gravi o mortali, e che esiste una relazione di proporzione tra le varie tipologie di eventi [3].

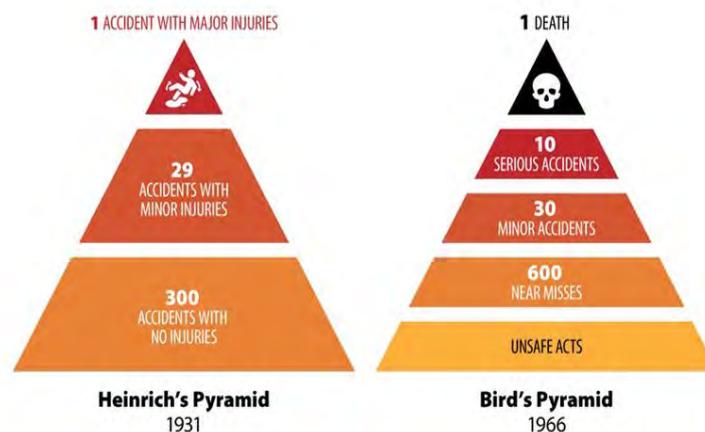


Figura 1. Piramidi di Heinrich e di Bird a confronto [4]

2. La gestione degli incidenti – l'approccio

Imparare dagli eventi incidentali è fondamentale per il miglioramento continuo della sicurezza in ogni ambito. Su questo principio e sulla teoria della "Piramide degli incidenti" si basa l'intera filosofia per la gestione degli incidenti dell'azienda presa in esame, che ha adottato a livello globale una serie di linee guida in cui sono descritti i pilastri su cui è fondato l'intero processo e che ogni collaboratore deve applicare, riportati in Tabella 1.

	Fai del tuo meglio per evitare che gli incidenti accadano
	Se un incidente accade, attiva subito le azioni necessarie e preserva le evidenze. Riporta ogni tipo di incidente
	Classifica gli incidenti secondo il loro rischio reale e potenziale utilizzando la matrice di rischio
	Assicura che venga investigato ogni incidente, e che l'analisi sia effettuata dal personale con il giusto grado di esperienza e formazione. Seleziona contromisure adeguate a ridurre il rischio associato alla causa di radice individuata e implementale nei tempi e modi stabiliti.
	Condividi i risultati dell'analisi degli incidenti di elevata severità Aggiorna le valutazioni di rischio

Tabella 1. Pilastri del processo di gestione incidenti [5]

2.1 La “segnalazione” di incidente

La facile fruibilità e l' idoneità alla comunicazione di anomalie di qualsiasi natura sono i cardini che stanno alla base di un efficace sistema di analisi degli incidenti, che sia in grado nel tempo di monitorare l'andamento degli eventi incidentali stessi e di raccogliere e archiviare informazioni per prevenirne il ripetersi.

Allo scopo di facilitare e incentivare il più possibile la comunicazione degli eventi incidentali da parte dei propri collaboratori, nel 2017, la società ha completamente digitalizzato il processo di creazione della cosiddetta “segnalazione di incidente”, ossia il modulo da compilare tramite il quale viene portata all'attenzione dell'azienda una qualsiasi anomalia. Il modulo, in precedenza cartaceo, è stato reso disponibile online sulla Intranet aziendale alla quale chiunque in qualsiasi momento può accedere da un PC con accesso alla rete privata dell'azienda, su un portale dedicato chiamato “SicuraMente” e utilizzato da tutti i siti appartenenti alla regione Italia. In figura 2 si riporta la schermata di accesso, costituita da tre sezioni principali:



Figura 2. Schermata di accesso al portale “SicuraMente” per le segnalazioni di incidente

Nella sezione “OSSERVA” il portale fornisce alcune indicazioni e definizioni che possono aiutare il collaboratore nella fase successiva e nell’eventuale individuazione di proposte di miglioramento.

Nella sezione “SEGNALA” viene creata la segnalazione di incidente vera e propria; una serie di campi da compilare e menu a tendina guidano l’utente nella compilazione del modulo. La finalità è doppia: raccogliere il maggior numero possibile di informazioni che saranno poi fondamentali durante il processo di individuazione delle cause di radice che hanno portato all’evento (ad.es. operazioni che l’operatore stava svolgendo, malfunzionamenti di strumentazione, sostanze coinvolte, prassi nascoste) e invogliare il segnalatore a proporre possibili soluzioni o suggerimenti che possano prevenirne il ripetersi. Il contributo del collaboratore non è più quindi solo nella creazione della segnalazione ma diventa anche di natura tecnica: sfruttando la sua particolare esperienza operativa può fornire indicazioni sul modo più semplice per ridurre o eliminare un rischio.

La segnalazione viene poi inviata ad una casella di posta dedicata, in attesa di essere classificata e assegnata a una persona responsabile del suo processamento. Il portale quindi consente di raccogliere tutte le segnalazioni in un unico canale rendendo più efficiente e veloce anche il processo di categorizzazione rispetto al sistema cartaceo precedente.

Infine, nella sezione “SEGUI” ciascun collaboratore può seguire in ogni momento lo stato di avanzamento delle proprie segnalazioni di incidente, verificando se sono state prese in carico e chiuse.

In Figura 3 è riportata la schermata da compilare, dove i campi obbligatori sono evidenziati con asterisco.

Registrato da *	<input type="text"/> Inserire proprio Cognome e Nome.
Sito *	PONTECCHIO-MARCONI ▼
Luogo *	<input type="text"/> (Area, Edificio, Piano - Se utile indicare Apparecchiatura)
Data Segnalazione *	18/06/2021 <input type="text"/> 23: <input type="text"/> 00: <input type="text"/> Data in cui si è verificato l'evento
Descrizione *	<input type="text"/> Descrivere dettagliatamente la situazione o evento.
Sostanza	<input type="text"/> Indicare Sostanza e quantità coinvolta
Conseguenze	<input type="text"/> ▼
Ambito applicazione *	Sicurezza occupazionale ▼ Individuare il contesto specifico dell'evento
Azioni intraprese *	<input type="text"/> Scrivere "NA" se non è necessaria alcuna azione immediata
Suggerimenti	<input type="text"/> Cosa si propone di fare per migliorare?

Figura 3. Campi da compilare per la segnalazione di incidente

Con lo scopo di sfruttare il più possibile le potenzialità di questo sistema di creazione di segnalazioni e rendere la raccolta di informazioni più capillare possibile, sul portale possono

essere caricati eventi segnalati non solo dai collaboratori interni all'azienda, ma anche dai cosiddetti *contractors esterni*, ossia da parte di tutti i lavoratori che, pur non facendo parte dell'organico aziendale, operano normalmente all'interno del sito per operazioni prevalentemente di montaggio meccanico e manutenzione.

2.2 Classificazione delle segnalazioni di incidente

Allo scopo di identificare il processo di analisi più corretto, ogni evento registrato sul portale subisce un duplice processo di classificazione, in base alla tipologia di evento segnalato e in base al suo rischio reale e potenziale.

Le linee guida adottate dall'azienda [6] definiscono una serie di categorie di eventi all'interno delle quali viene fatta ricadere ciascuna segnalazione, le principali delle quali sono descritte nella seguente Tabella 2. Le cifre indicate per ogni livello della piramide del rischio esprimono l'ordine di grandezza degli eventi registrati per ogni categoria.

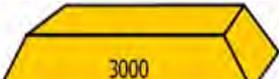
	<ul style="list-style-type: none"> - Infortunio LTI (Lost Time Injury): evento lesivo alle persone da cui deriva una inabilità temporanea al lavoro per più di 1 giornata. - "Process Safety Incident" (PSI): tutti gli incidenti di processo come incendio o esplosione o sversamento di sostanza pericolosa.
	<ul style="list-style-type: none"> - "Activation or Failure of Protective Device" (AFPD): l'attivazione o il mancato intervento di un qualsiasi dispositivo di sicurezza. - "First Aid (FA)": infortunio non LTI.
	<ul style="list-style-type: none"> - "Small Process Safety incident" (sPSI): incidenti di processo minori - "Near miss/hit", o <u>Quasi Incidenti</u>: eventi effettivamente verificatisi che non hanno prodotto danni alle persone, ma che avrebbero potuto causarli.
	<ul style="list-style-type: none"> - "Unsafe conditions/acts" o "Process Safety Events", i cosiddetti <u>Pericoli Potenziali</u>: sono carenze impiantistiche, organizzative e/o comportamentali che avrebbero potuto provocare un incidente o un infortunio.

Tabella 2. Principali categorie di eventi oggetto delle segnalazioni

La classificazione secondo queste categorie ha lo scopo principale di individuare la funzione aziendale più idonea al "processamento" della segnalazione (ad es. Process Safety, Occupational Health&Safety, Environment, Technical Service), ossia alla successiva analisi delle cause di radice e all'individuazione delle contromisure adeguate. Si precisa che sono state descritte solo le principali categorie di eventi monitorate.

Successivamente ogni incidente viene codificato secondo 4 livelli di rischio reale e potenziale: moderato, significativo, serio e catastrofico. Il rischio reale viene valutato sulla base di dati oggettivi come la pericolosità delle sostanze coinvolte, l'entità dei danni alle persone e all'ambiente e in ultima istanza dell'entità dei danni materiali. Il rischio potenziale viene invece valutato ipotizzando quello che sarebbe potuto succedere, utilizzando un'apposita matrice di rischio riportata in Figura 4. La scelta della probabilità dell'evento viene fatta considerando l'esperienza storica del sito (indicativamente P0 corrisponde a un evento che succede una o due volte l'anno mentre P4 è un evento estremamente raro che non poteva essere previsto); la severità invece varia da S1 (evento in grado di provocare degli incidenti fatali) a S4 (evento con conseguenze minime e reversibili per la salute o per l'ambiente).

L'esempio seguente aiuta a comprendere come è possibile valutare un rischio potenziale. Un operatore durante l'attività di movimentazione di contenitori mobili di materie prime danneggia un fusto contenente una sostanza classificata irritante per la pelle. La probabilità

dell'evento, analizzando i dati storici, può essere valutata come occasionale P1, mentre la severità reale risulta molto bassa, S4, in quanto la sostanza può provocare al massimo irritazioni. La valutazione del rischio potenziale invece prevede di valutare la possibilità che il fusto contenesse una sostanza più pericolosa, ad esempio tossica per inalazione, se normalmente presente nello stesso magazzino; in questo caso la severità avrebbe potuto essere S1 o S2 in funzione dell'entità dello sversamento.

		S (Severity)			
		S1	S2	S3	S4
P (Probability)					
Frequent	P0	A	B	D1	E1
Occasional	P1	A/B	B	E1	E2
Rare	P2	B	C	E2	F
Very Rare	P3	C	D2	F	F
Reasonably not to be expected	P4	E2	F	F	F

Risk Class	Incident Level
A	4-Catastrophic
B, C, D1	3-Serious
D2, E1	2-Significant
E2	1-Moderate
F	

Figura 4. Matrice di rischio per la valutazione del rischio potenziale [5]

Questa seconda classificazione ha lo scopo di definire l'urgenza o priorità con cui deve essere eseguita l'analisi dell'incidente (crescente dal basso verso l'alto) e la eventuale necessità di coinvolgimento di figure esperte esterne all'organizzazione aziendale.

2.3 Root cause analysis (analisi delle cause di radice)

L'analisi delle cause di radice (RCA) di un incidente è il procedimento tramite il quale si definiscono le cause alla radice di un problema con l'obiettivo di identificare le soluzioni più adeguate a risolverli. L'RCA parte dal presupposto che sia molto più utile e semplice prevenire e risolvere le problematiche sottostanti (lacune di processo, di progetto, comportamentali, o altro) in modo sistematico invece di trattare semplicemente i sintomi e arginare il problema caso per caso.

A tale scopo, l'azienda ha adottato a livello globale la metodologia proposta da ABS Consulting nel manuale "Root Cause Analysis Handbook: A Guide to Effective Incident Investigation" [7], che contiene la descrizione di 12 principali categorie di cause (Figura 5): supervisione del lavoro, sistema di gestione, performance personali, progettazione, formazione del personale, problemi di comunicazione, informazioni/dati di progetto, interfaccia uomo/macchine, procedure, piani di manutenzione, esecuzione dei piani di manutenzione e difficoltà varie (altro). I numeri che compaiono per ciascuna categoria indicano semplicemente la pagina del manuale a cui fare riferimento.

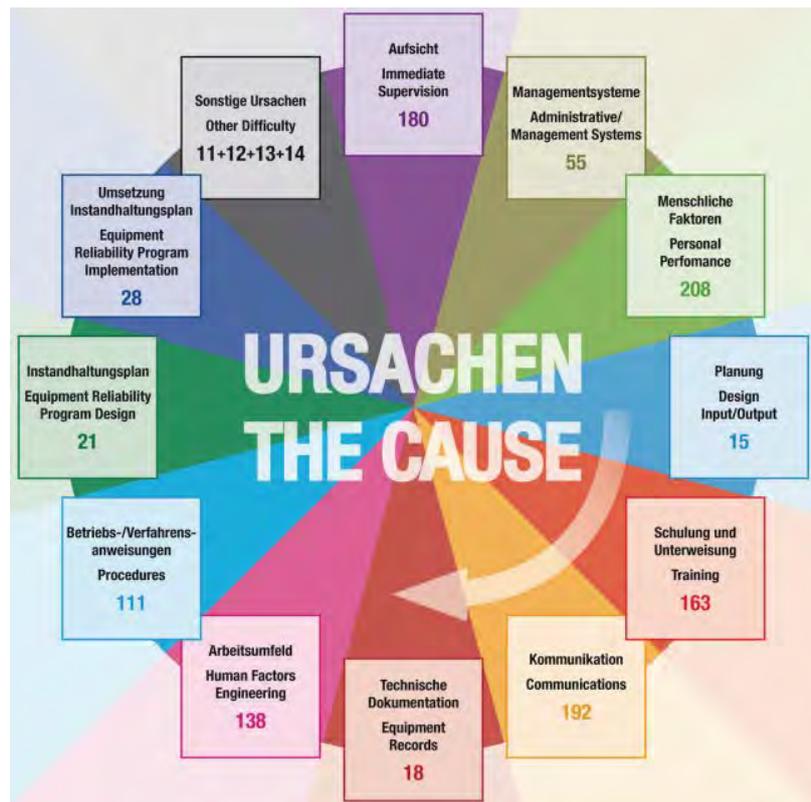


Figura 5. Categorie di cause principali oggetto della Root Cause Analysis - dal manuale "Root Cause Analysis Handbook: A Guide to Effective Incident Investigation" [7]

Per ognuna delle cause di radice descritte, il manuale propone una serie di sottocause, di domande ed esempi che guidano il team di analisi nell'individuazione della categoria e della causa di radice corrette, e suggerisce anche alcune tipiche contromisure adottabili per prevenire il ripetersi dell'incidente analizzato.

Il team di analisi e il grado di dettaglio con cui deve essere condotta l'investigazione devono essere adeguati al livello di rischio (moderato, significativo, serio o catastrofico) individuato nella fase precedente; per gli eventi seri e catastrofici in particolare viene richiesto di raccogliere tutte le informazioni disponibili (ad es. dati di progetto delle apparecchiature coinvolte, procedure operative, foto, analisi di rischio, interviste agli operatori coinvolti) e di eseguire l'analisi con un team composto da figure provenienti da tutte le aree organizzative interessate e da un facilitatore esterno all'azienda, esperto nel processo di investigazione degli incidenti, che possa garantire la maggior obiettività possibile nell'analisi. Nel caso l'evento verificatosi abbia richiesto l'intervento delle squadre di emergenza è consigliabile coinvolgere gli addetti intervenuti per identificare eventuali debolezze dei sistemi o procedure di intervento.

Gli outputs del processo sono le cause di radice che hanno portato all'evento e la lista delle contromisure da implementare al fine di prevenirne il ripetersi. La linea guida [5] definisce che le contromisure proposte devono seguire la cosiddetta "gerarchia di controllo", ossia devono essere privilegiate quelle che consentono di eliminare completamente un rischio (ad es. sostituendo una sostanza pericolosa), e solo qualora questo non sia possibile si possono adottare contromisure di tipo tecnico e in ultima istanza di tipo procedurale e/o organizzativo. Infine, per ciascuna contromisura deve essere individuata una tempistica di implementazione ragionevole ed eventuali azioni correttive temporanee di immediata applicazione per "tamponare" il rischio.

2.4 Condivisione delle “lessons learned”

Per gli incidenti più gravi lo step finale dell'investigazione è la condivisione di ciò che si è imparato, le lessons learned appunto, con tutti i siti dell'azienda a livello globale. La descrizione dell'evento, le cause di radice individuate e le contromisure adottate vengono distribuite tramite le funzioni EHS locali di sito o divisionali, allo scopo di individuare gli impianti in cui potrebbero presentarsi le medesime anomalie che hanno portato a un evento e mettere in atto preventivamente le stesse contromisure, o eventualmente individuarne altre.

3. I Risultati

L'applicazione del sistema di gestione degli incidenti descritto nei paragrafi precedenti, ha portato a raccogliere nel triennio 2017-2019 in media circa 500 segnalazioni di incidente per ogni anno; la registrazione dei dati delle segnalazioni anno per anno in un unico database di sito consente di estrapolare informazioni utili a monitorare l'andamento del sistema di gestione stesso, quali: principali cause di radice individuate, numero di persone che hanno creato almeno una segnalazione di incidente, numero di incidenti registrati per ogni categoria di eventi, numero di incidenti per ogni classe di rischio.

In termini di incidenza percentuale, le principali categorie di cause di radice che vengono più spesso identificate sono relative ad aspetti di progettazione e manutenzione in egual misura (tra il 25-30% in entrambi i casi), seguite da cause legate all'ambiente di lavoro (“Human factors engineering” o interfaccia uomo/macchine circa 10%) e a tematiche procedurali/formative (7-8%), come illustrato nel grafico 1.

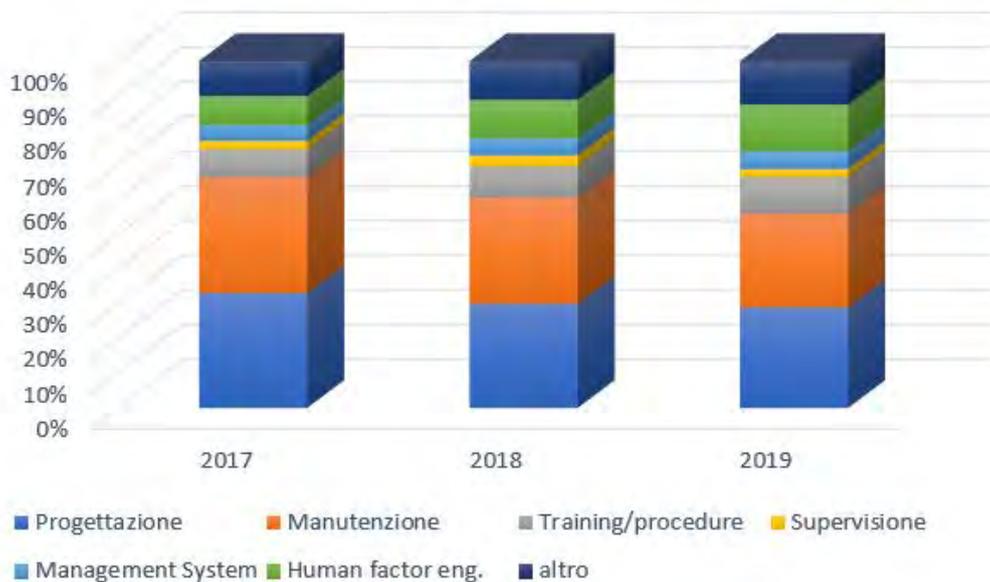


Grafico 1. Cause di radice individuate

Da un'analisi invece delle principali categorie di eventi monitorate risulta che nel corso dei 3 anni, in media, nella stragrande maggioranza dei casi, le segnalazioni di incidente effettuate riguardano “unsafe acts”, ossia pericoli potenziali derivanti da carenze organizzative e/o comportamentali che avrebbero potuto provocare un incidente o un infortunio. I dati registrati si modellano quindi in un tipico andamento a piramide (vedi grafico 2); la base molto ampia rispetto agli altri livelli conferma il profondo coinvolgimento della popolazione aziendale nel processo di controllo e gestione degli eventi. Si precisa che per

gli eventi di maggiore entità (PSI, LTI e First aids) la segnalazione è automatica a seguito dell'attivazione dei servizi di emergenza di sito.

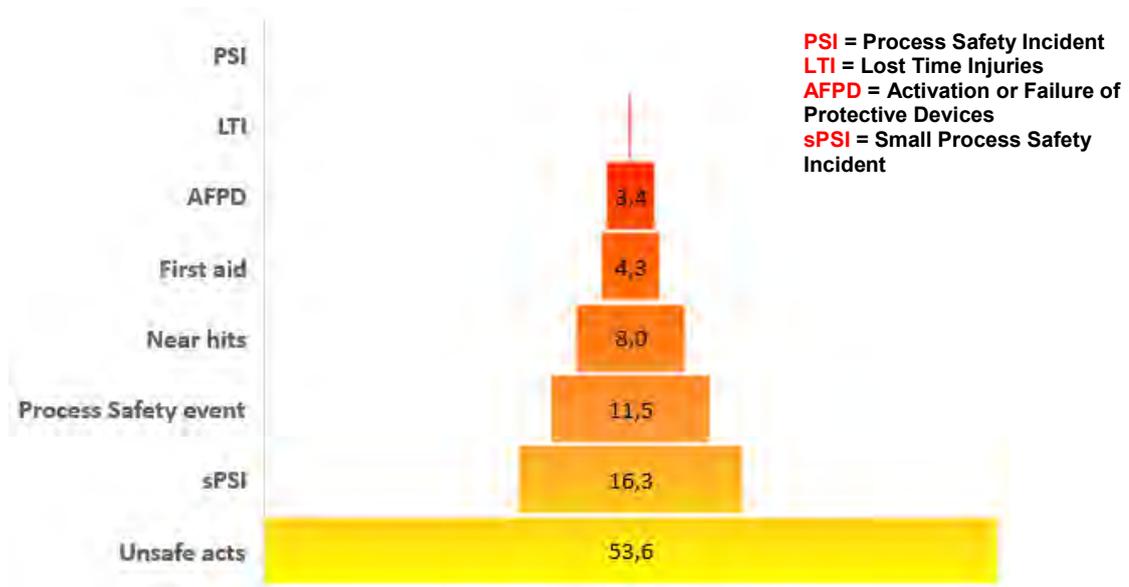


Grafico 2. Incidenza media percentuale delle categorie di eventi (periodo 2017-2019)

La raccolta dei dati in un unico database permette inoltre di portare in evidenza eventuali "cluster" di segnalazioni, cioè eventi simili fra loro che si ripetono nel tempo e in più aree dell'organizzazione. In questi casi un approccio di analisi più ampio, non focalizzato sulla singola segnalazione, consente di affrontare il problema a livello di sito e di individuare soluzioni comuni; un esempio di tale approccio è descritto nel successivo paragrafo 3.1.

3.1 Un esempio di miglioramento conseguente: un nuovo standard di installazione per le valvole di sicurezza sulle linee di vapore

Il sito di Pontecchio è dotato di una rete di distribuzione vapore per il riscaldamento delle apparecchiature di processo; dalla rete principale si diramano una serie di circuiti secondari a pressione ridotta per ottenere la temperatura operativa desiderata caso per caso. Questi circuiti sono dotati di valvole di sicurezza le cui tubazioni di sfiato venivano generalmente collettate sui tetti di reparto, in quanto luoghi identificati come sicuri perché non frequentati da personale operativo durante le normali operazioni.

Nonostante ciò, nel tempo sono state registrate varie segnalazioni di incidente che riportavano tutte la stessa anomalia, cioè la fuoriuscita di vapore misto a condense calde da alcune di queste valvole di sicurezza con il rischio per il personale presente nelle vicinanze; se infatti era possibile identificare i tetti come sicuri nelle normali operazioni non era possibile farlo per i periodi di fermata manutentiva e soprattutto per le fasi di riavvio impianti, durante le quali non essendoci prelievo di vapore da parte dei reparti risulta più probabile l'apertura di alcune valvole di sicurezza. L'analisi delle cause di radice ha evidenziato che l'elevata lunghezza delle tubazioni di sfiato (necessaria per raggiungere il tetto) provocava la formazione di piccole quantità di condensa calda che fuoriusciva in pressione insieme al vapore e che a lunga andare poteva danneggiare la valvola stessa. Analizzando il "cluster" di segnalazioni, piuttosto che trovare una soluzione caso per caso, si è optato per la scelta di adottare un nuovo standard di installazione: il tubo di sfiato si inserisce all'interno di una tubazione di diametro leggermente maggiore che consente alla condensa che si forma di raccogliersi in un bicchiere sottostante, dotato di drenaggio per il convogliamento della stessa (vedi figura 6).

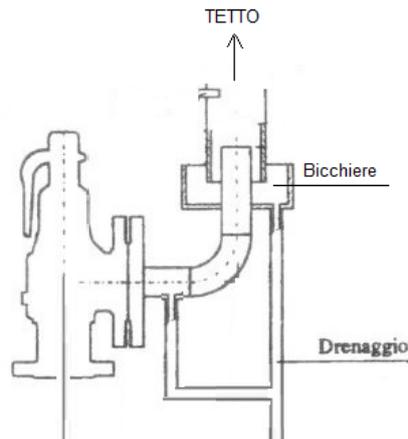


Figura 6

4. Conclusioni

Individuare le cause di radice applicando la Root Cause Analysis non solo agli incidenti, ma anche a situazioni potenzialmente pericolose e comportamenti non sicuri, e agire su di esse anziché solo superficialmente sulle conseguenze, consente di prevenirne il futuro ripetersi. Inoltre, la raccolta di tutte le informazioni di questo tipo in un unico database, consente di individuare aree operative, installazioni e procedure sulle quali risulta prioritario intervenire anche a seguito di più segnalazioni riportanti la medesima anomalia.

Un esempio pratico è fornito da quanto realizzato nel sito BASF Italia S.p.A. di Pontecchio Marconi (BO), nel quale, nel corso del triennio 2017-2019 sono state effettuate da dipendenti e da ditte terze stabilmente presenti, circa 1500 segnalazioni, di cui oltre il 50% riguardanti “unsafe acts”, ossia pericoli potenziali derivanti da carenze organizzative e/o comportamentali che avrebbero potuto provocare un incidente o un infortunio. Dall’analisi dei dati estrapolati dal database delle segnalazioni emerge che le principali cause di radice individuate sono relative ad aspetti di progettazione e manutenzione.

Sebbene risulti ancora difficile valutare complessivamente l’efficienza del sistema di gestione degli incidenti descritto in base all’andamento del numero degli eventi registrato per ogni categoria, a causa dell’espansione delle attività di sito e dei sempre più stringenti criteri di classificazione degli eventi, è comunque possibile trarre alcune utili indicazioni preliminari. A titolo di esempio si riporta l’andamento di Near Hits e Process Safety Events nel triennio 2017-2019 nel grafico 3.

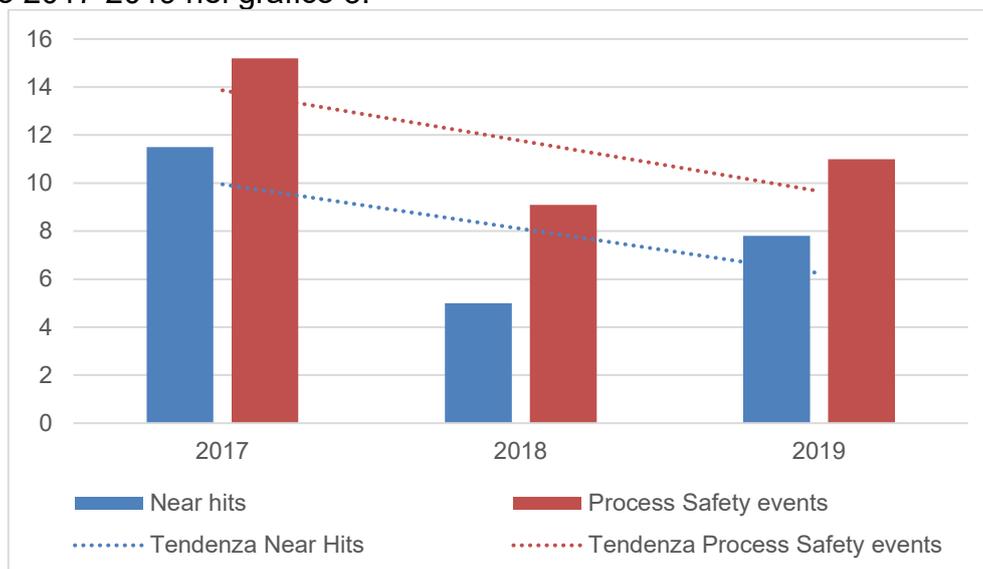


Grafico 3: Andamento percentuale Near hits e Process Safety events nel triennio 2017-2019

L'andamento decrescente che si rileva dal grafico 3 per entrambe le categorie è probabilmente indice di un miglioramento delle prestazioni in termini di prevenzione, anche se tali risultati andranno confermati con l'applicazione sistematica della metodologia anche nei prossimi anni.

Certamente, la possibilità di segnalazione di anomalie e comportamenti non sicuri, l'ampio coinvolgimento di tutti i dipendenti e dei contractors esterni, l'analisi delle cause di radice applicata a varie tipologie di eventi, la valutazione del rischio non solo reale ma anche potenziale, rappresentano punti di forza e di innovazione di tale approccio e contribuiscono positivamente alla diffusione di una cultura della sicurezza a tutti i livelli aziendali.

Inoltre, la possibilità di condivisione e trasferimento delle lezioni apprese dall'analisi delle segnalazioni alla fase di analisi dei rischi, porta non solo ad un costante aggiornamento e approfondimento delle valutazioni, ma anche al miglioramento della sicurezza complessiva dello stabilimento in modo proattivo, con l'obiettivo di eliminare alla fonte ogni situazione di potenziale pericolo.

5. Bibliografia

- [1] Fiorentini L., Sicari R., "Gestione di incidenti e non conformità metodologie e strumenti d'indagine", Ambiente e Lavoro, agosto 2018
- [2] Spada G., "Gli incidenti mancati e la consapevolezza del lavoratore", Convegno Ambiente e Lavoro, Bologna 16 ottobre 2015
- [3] Freibott B., "Sustainable safety management: incident management as a cornerstone for a successful safety culture", Safety and Security Engineering V, WIT Transactions on The Built Environment, Vol 134, WIT Press, 2013
- [4] Klatt R., "Heinrich's Pyramid - Does It Hold Up 90 Years Later?", MEMIC, 2019, <https://www.memic.com/workplace-safety/safety-net-blog/2019/october/heinrichs-pyramid-does-it-hold-up-90-years-later>
- [5] BASF Requirement "Incident Management" G-R-EHS 001, Global EHS Leadership Team, January 2019
- [6] BASF Requirement "EHS Reporting" G-R-REP 001, Reporting & Data Management – COR/OR, January 2021
- [7] ABS Consulting, "Root Cause Analysis Handbook: A Guide to Effective Incident Investigation"

Installazione di un impianto fotovoltaico in una attività R.I.R. Criticità, pianificazione e realizzazione

G. Battista¹, M.P. Gatto¹, M.M. La Veglia², J. Pardi³, G. Triunfo³

¹ Inail - Uot di Avellino

² Dir. Reg.le VVF Campania

³ Enagas S.p.A.

Sommario

Lo studio si propone di analizzare le criticità relative alla installazione di un impianto fotovoltaico all'interno di una attività R.I.R., in particolare di un deposito di GPL che già di per sé presenta criticità insite in un impianto caratterizzato da serbatoi e tubazioni in pressione.

È stato verificato in particolare che l'installazione dell'impianto fotovoltaico, posto al di sopra di una tettoia di copertura di alcuni locali tecnici, non comporti aggravio del rischio.

Proprio in considerazione della tipologia di attività in esame, l'approccio è stato multidisciplinare, ovvero:

- valutazione dell'efficacia dell'installazione dell'impianto in termini di produzione di energia elettrica (orientamento, ore di esposizione solare, ecc.);
- valutazione della riduzione dell'impatto ambientale in termini di tonnellate di CO₂ non prodotte;
- rientro dell'investimento in termini economici e di tempistica;
- valutazione dell'impatto della realizzazione dell'impianto in termini di prevenzione incendi;
- valutazione delle attività da porre in essere per garantire la piena sicurezza per la realizzazione, l'esercizio e la manutenzione dell'impianto.

Per il deposito in esame, ubicato in un sito nella zona industriale di Napoli, si esporranno le valutazioni relative all'efficienza, all'impatto ambientale ed al rientro economico dell'intervento, sulla base dell'esperienza acquisita dai partner operanti nel settore, con particolare attenzione alle valutazioni del rischio incendio e, più in generale, a quelle di tutti i rischi legati alla realizzazione dell'impianto, per verificare appunto che l'installazione dell'impianto FTV non comporti aggravio del rischio incendio; tali valutazioni avranno come riferimento sia le norme generali di prevenzione incendi che i dettami della normativa vigente per i depositi GPL (D.M. 13/10/94) e per le attività R.I.R. (D. Lgs. 105/15).

1. Cenni logistici e funzionali del sito

1.1. Informazioni generali

Il deposito è identificato come "Deposito Costiero GPL", situato nella Zona Industriale Orientale di Napoli, in un'area indirizzata a destinazione industriale, all'interno del perimetro del SIN (Sito d'Interesse Nazionale ai fini dell'inquinamento del suolo) di Napoli Orientale.

Nel raggio di 500 m dallo stabilimento le principali realtà presenti sono le seguenti:

- deposito e vendita all'ingrosso di cineserie;
- edificio per civili abitazioni;
- ex vetreria;
- altra area di proprietà ENER GAS S.p.A.;
- edificio adibito ad uffici vari;
- deposito di carburanti liquidi;

- deposito costiero di GPL;
- capannoni industriali;
- attività di deposito merci varie.

L'attività principale svolta dalla ENERGAS S.p.A. nello stabilimento in oggetto rientra tra quelle soggette a controllo di prevenzione incendi ed in particolare, con riferimento al D.P.R. 151 del 01/08/2011, viene classificata come "Deposito di gas infiammabili disciolti o liquefatti (GPL) in serbatoi fissi di capacità geometrica complessiva > 13 mc" (Attività 4.7.C) – 6900 mc di GPL in 18 Serbatoi Metallici Tumulati.

Risultano inoltre soggette a controllo di prevenzione incendi anche le seguenti ulteriori attività:

- Attività 4.3.A : Depositi di gas infiammabili disciolti o liquefatti (GPL) in serbatoi fissi di capacità geometrica complessiva da 0.3 a 5 mc – Serbatoio interrato di GPL uso riscaldamento da 1,65 mc;
- Attività 13.2.B : Distributori fissi carburanti liquidi (combustibili) per autotrazione, di tipo commerciale o privato - 2 serbatoi di gasolio interrato da 25 mc cad. per uso interno (mezzi aziendali – alimentazione motopompe antincendio);
- Attività 49.2.B: Gruppi per la produzione di energia elettrica sussidiaria con motori endotermici ed impianti di cogenerazione di potenza complessiva da 350 a 700 kW (2 Gruppo Elettrogeni, uno da 630 KVA ed uno da 100 KVA, potenza complessiva 584 kW);
- Attività 75.2.B: Autorimesse pubbliche e private, parcheggi pluripiano e meccanizzati, con superficie compresa tra 1000 mq e 3000 mq (1 Autorimessa multipiano situata accanto alla palazzina uffici).

1.2. Descrizione dell'attività del deposito

Presso il deposito in esame si effettuano attività di ricezione, stoccaggio, miscelazione e travaso di Gas di Petrolio Liquefatto (GPL), con quantitativi in deposito superiori a 200 ton, cosicché l'attività risulta soggetta alla Notifica ed alla presentazione del Rapporto di Sicurezza ai sensi degli articoli 13 e 15 del D. Lgs. n.105/15 in materia di attività a rischio di incidente rilevante.

Secondo la classificazione dell'Allegato IV del D.M. 21/02/1985 del Ministero della Sanità, il codice di attività è

"5.02 - Produzione e distribuzione di gas"

mentre il codice di classificazione di attività economica ATECO 2007 è

"C 19.20.30 – Miscelazione di gas petroliferi liquefatti (GPL) e loro imbottigliamento".

Lo stabilimento è caratterizzato dall'impiantistica propria dei depositi di GPL cioè:

- Serbatoi di stoccaggio;
- Macchinario di movimentazione (Pompe e Compressori);
- Baie di carico/scarico Autobotti;
- Piping di interconnessione tra le predette unità.

Trattandosi di un deposito costiero, è presente inoltre un gasdotto di collegamento al terminale marittimo per la scarica delle navi gasiere.

2. La normativa di riferimento

Considerato che l'attività principale del deposito (stoccaggio GPL > 200 ton) risulta soggetta anche al D. Lgs n. 105 del 26 giugno 2015, per il quale risulta classificata come "Stabilimento di soglia superiore", si riportano di seguito i riferimenti normativi e le linee guida applicabili alla fattispecie:

- D. Lgs n. 105 del 26 giugno 2015, "Attuazione della Direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo d'incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose";
- Decreto 07 Agosto 2012, "Disposizioni relative alle modalità di presentazione delle istanze concernenti i procedimenti di prevenzione incendi e alla documentazione da allegare, ai sensi dell'articolo 2, comma 7, del D.P.R. 1° agosto 2011, n. 151";
- D.P.R. 01 Agosto 2011, n. 151, "Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione incendi, a norma dell'articolo 49, comma 4-quater, del decreto legge 31 maggio 2010, n. 78, convertito, con modificazioni, dalla legge 30 luglio 2010, n. 122";
- D.M.I. 13 Ottobre 1994, "Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la costruzione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di G.P.L. in serbatoi fissi di capacità complessiva superiore a 5 mc e/o in recipienti mobili di capacità complessiva superiore a 5.000 kg";
- D.M.A. 15 Maggio 1996, "Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di gas e petrolio liquefatto";
- DM LL.PP. 09 Maggio 2001, "Requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione urbanistica e territoriale per le zone interessate da stabilimenti a rischio di incidente rilevante".
- Nota DCPREV, prot. n. 12563 del 2 Settembre 2010, "Installazione di impianti fotovoltaici in attività soggette al controllo dei Vigili del Fuoco";
- Nota prot. EM 622/867 del 18 Febbraio 2011, "Procedure in caso di intervento in presenza di pannelli fotovoltaici e sicurezza degli operatori Vigili del Fuoco";
- Nota DCPREV, prot. n. 11152 del 9 Agosto 2011, "Installazione di Impianti fotovoltaici";
- Nota DCPREV, prot. n. 1324 del 7 Febbraio 2012, "Guida per l'installazione di impianti fotovoltaici";
- Nota DCPREV, prot. n. 6334 del 4 Maggio 2012, "Chiarimenti alla nota DCPREV prot. n. 1324 del 7 Febbraio 2012 - Guida per l'installazione di impianti fotovoltaici";
- Nota DCPREV, prot. n. 12678 del 28 Ottobre 2014, "Quesiti su impianti fotovoltaici".

3. Tipologia di intervento

Alla luce di quanto esposto in premessa, dal punto di vista della prevenzione incendi l'intervento non comporta l'introduzione di ulteriori attività soggette ai sensi del D.P.R. 151/2011, pur essendo necessaria una verifica su un eventuale aggravio del livello del rischio incendio.

4. Descrizione del progetto di modifica

Il progetto di modifica realizzato, che ha previsto l'installazione di 1136 moduli fotovoltaici con potenza singola pari a 395 Wp e potenza totale dell'impianto di 391,92 kWp, è nato dall'opportunità di realizzare un impianto fotovoltaico su un'area che, per ubicazione ed estensione, era particolarmente adatta allo scopo. La tettoia per i servizi ausiliari in precedenza descritta presenta infatti un'ampia estensione e gode di una favorevole esposizione solare, con conseguente elevata efficienza dei pannelli installati.

A tale opportunità, che a fronte dell'importante investimento iniziale ha portato ad un considerevole risparmio energetico, si è aggiunta la volontà dell'azienda di dimostrare la

propria sensibilità per la questione ambientale, dando vita ad un progetto che consentirà, durante i 25 anni di vita utile dell'impianto, la riduzione delle emissioni di CO₂ equivalenti di circa 5000 tonnellate.

I pannelli sono installati lungo tutto il tratto della tettoia insistente sul muro di confine lato Nord, e sulla prima parte del tratto insistente sul lato Est, mentre gli inverter, cui sono collegati i pannelli, sono installati proprio al di sotto della tettoia interessata.

Al di sotto di tale tettoia, sulla quale sono stati dispiegati i pannelli Fotovoltaici, sono ubicati:

- la sala pompe antincendio;
- il locale compressori aria;
- alcuni magazzini;
- una cabina di trasformazione MT/BT;
- un gruppo Elettrogeno a gasoli da 630 KVA;
- un quadro Elettrico per l'avviamento soft start di pompe e compressori GPL;
- ricambi di grandi dimensioni.

L'impianto è connesso al quadro di BT destinato all'alimentazione del macchinario di movimentazione GPL, posto anch'esso sotto la tettoia con ovvio contenimento della complessità dell'impianto.

5. Valutazione dell'aggravio del Rischio Incendio

La valutazione degli effetti della realizzazione dell'impianto fotovoltaico sul deposito, in termini di prevenzione incendi, è stata svolta nel rispetto di quanto previsto dall'art. 4 comma 6 del D.P.R. 151/2011 ed è stato inoltre verificato l'eventuale "aggravio del preesistente livello di rischio da I.R." ai sensi del punto 2 dell'Allegato D al D. Lgs. 105/15, essendo lo stabilimento un'attività "di soglia superiore" secondo il medesimo decreto.

Di seguito si riportano le considerazioni e gli elementi utili per la verifica dell'incidenza della modifica per entrambi gli aspetti.

5.1. Il comma 6 dell'art. 4 del DPR 151/2011

Pur non rientrando gli impianti fotovoltaici tra le attività soggette a Controlli di Prevenzione Incendi ai sensi del D.P.R. 151/2011, la Nota DCPREV prot n. 1324 del 7 febbraio 2012 "Guida per l'installazione degli impianti fotovoltaici - Edizione Anno 2012" ha chiarito che l'installazione di tali impianti può comportare un aggravio del preesistente rischio di incendio in attività soggette, e pertanto tale eventualità va presa in considerazione secondo l'art. 4 comma 6 del citato D.P.R.; nella premessa della Guida per l'installazione si specifica la necessità di verificare se vi sia o meno:

- interferenza con il sistema di ventilazione dei prodotti della combustione (ostruzione parziale/totale di traslucidi, impedimenti apertura evacuatori);
- ostacolo alle operazioni di raffreddamento/estinzione di tetti combustibili;
- rischio di propagazione delle fiamme all'esterno o verso l'interno del fabbricato (presenza di condutture sulla copertura di un fabbricato suddiviso in più compartimenti – modifica della velocità di propagazione di un incendio in un fabbricato mono compartimento).

Appare evidente come l'installazione dell'impianto non configuri nessuna delle prime due ipotesi sopra elencate, mentre merita adeguato approfondimento la terza, ovvero la possibilità che in caso di incendio, tale evento possa propagarsi nelle aree circostanti la tettoia, sia all'interno dello stabilimento che all'esterno.

Oltre alla già citata Guida per l'installazione, per eseguire in modo esaustivo tale valutazione si è tenuto conto anche della Nota prot. n. 6334 del 4 maggio 2012, contenente i necessari chiarimenti alla suddetta Guida.

La Guida per l'installazione di cui alla nota DCPREV prot n. 1324 del 7 febbraio 2012 richiede la verifica di alcuni "Requisiti Tecnici", tra cui la conformità dei moduli fotovoltaici di cui è prevista l'installazione alle Norme CEI EN 61730-1 e CEI EN 61730-2, condizione che è rispettata dai moduli installati nell'impianto in esame.

La stessa Guida Inoltre, al fine di scongiurare il rischio di propagazione della fiamma in caso di incendio, chiede di verificare che "l'impianto fotovoltaico, incorporato in un'opera di costruzione, venga installato su strutture ed elementi di copertura e/o di facciata incombustibili (Classe 0 secondo il DM 26/06/1984 oppure Classe A1 secondo il DM 10/03/2005). Risulta, altresì, equivalente l'interposizione tra i moduli fotovoltaici e il piano di appoggio, di uno strato di materiale di resistenza al fuoco almeno EI 30 ed incombustibile (Classe 0 secondo il DM 26/06/1984 oppure Classe A1 secondo il DM 10/03/2005); in alternativa potrà essere effettuata una specifica valutazione del rischio di propagazione dell'incendio, tenendo conto della classe di resistenza agli incendi esterni dei tetti e delle coperture di tetti".

La Nota prot. n. 6334 del 4 maggio 2012 ha chiarito i parametri sui quali basare la valutazione, riassumendo anche in forma grafica la casistica sopra elencata:

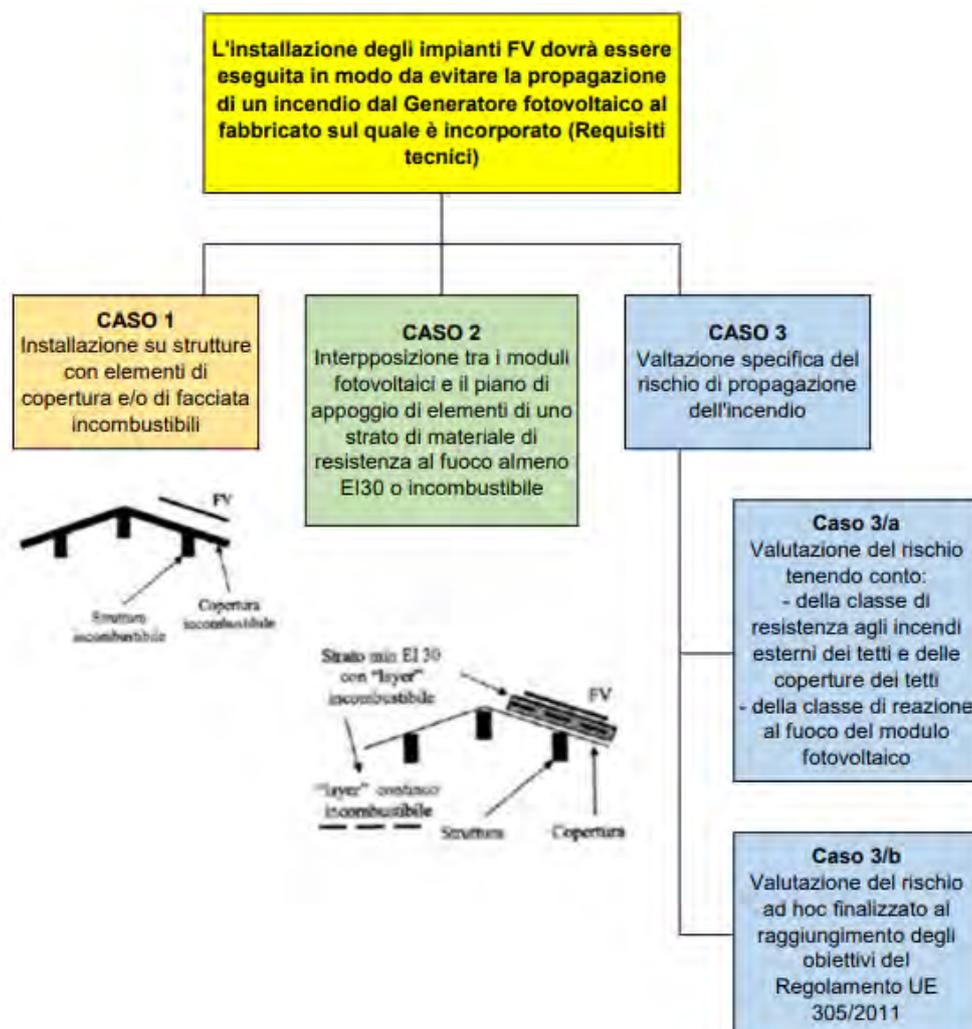


Figura 1

Poiché la tettoia sulla quale è installato l'impianto è costituita da lamiera grecata metallica, per ciò che riguarda l'installazione si fa riferimento alla "Decisione della Commissione UE del 6 settembre 2000" che attua la direttiva 89/106/CEE del Consiglio riguardo alla

resistenza esterna all'azione del fuoco dei rivestimenti per tetti, notificata con il numero C(2000) 2266.

Il materiale costituente la tettoia rientra tra quelli elencati in allegato a tale documento; essi possono essere considerati conformi a tutti i requisiti relativi alla caratteristica "Reazione all'azione esterna del fuoco" senza dover essere sottoposti a prove, a condizione che siano osservate tutte le disposizioni nazionali sulla progettazione e l'esecuzione di opere di costruzione; dalle schede tecniche relative ai pannelli utilizzati nell'impianto in oggetto, si evince che essi risultano di "Classe II" di resistenza al fuoco: di conseguenza, si può affermare che per tale impianto non vi è rischio di propagazione della fiamma in caso di incendio.

Altro Requisito Tecnico richiesto nella Guida è che l'installazione dell'impianto (pannelli ed inverter) avvenga al di fuori delle zone classificate ai sensi dell'Allegato XLIV del D. Lgs. 81/08 (atmosfere potenzialmente esplosive). A tal proposito, dalla planimetria allegata alla classificazione delle aree potenzialmente a rischio di esplosione si evince che le aree classificate come "Zona 2" non raggiungono la tettoia di copertura, né ovviamente l'area sottostante, mentre quelle classificate come "Zona 1", essendo interne alle precedenti, risultano essere ancora più distanti dalla suddetta tettoia; di conseguenza anche questo Requisito Tecnico risulta rispettato.

La Guida prevede inoltre che nei luoghi con pericolo di esplosione venga verificato il rispetto, tra gli elementi pericolosi di tali luoghi e l'impianto fotovoltaico che andrà installato (il quale potrebbe costituire fonte di innesco), delle distanze di sicurezza previste dalle norme tecniche applicabili. Per i depositi GPL la Normativa di riferimento è il D.M. 13/10/1994, "Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la costruzione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di G.P.L. in serbatoi fissi di capacità complessiva superiore a 5 mc e/o in recipienti mobili di capacità complessiva superiore a 5.000 kg". Questo decreto fornisce tutte le informazioni per progettare costruire ed installare un deposito di GPL, ed al punto 4, oltre a definire gli elementi critici, contiene tutte le distanze di sicurezza da rispettare. Dall'analisi degli "involuppi delle distanze di rispetto" dei vari elementi critici del deposito, si evidenzia che gli elementi più prossimi alla tettoia su cui è installato l'impianto sono i tumuli dei serbatoi, le due sale pompe/compressori GPL ed i punti di travaso; la tettoia si trova all'esterno delle suddette distanze di rispetto, e dunque anche questo requisito tecnico risulta rispettato.

Altro elemento da valutare, secondo la Guida per l'installazione, è la verifica della non installazione dell'impianto in "luoghi sicuri" o in luoghi che costituiscano intralcio alle vie di esodo, ed è evidente che la realizzazione dell'impianto sopra descritto rispetti tale requisito tecnico.

Infine, la Guida prevede la verifica dell'idoneità statica delle strutture portanti rispetto alla maggiorazione dei carichi derivante dalla nuova installazione; a tal proposito, la relazione di verifica statica presente tra gli elaborati del progetto ha attestato la suddetta tenuta e ha dunque certificato il rispetto anche di questo ultimo requisito tecnico.

Un ulteriore elemento da assicurare, introdotto dalla nota di chiarimenti alla Guida per l'installazione, è la sicurezza degli addetti alla manutenzione dell'impianto e degli addetti alle operazioni di soccorso, ivi compresa la sicurezza elettrica. Per quanto concerne questo ultimo aspetto, è opportuno precisare che i pannelli fotovoltaici durante le ore diurne vanno sempre considerati in tensione in quanto la presenza di luce implica la produzione di energia elettrica; per quanto concerne invece la possibilità di apporto di energia dalla rete, è stata prevista l'installazione, in posizione segnalata all'interno del locale inverter, di un interruttore generale che operi il distacco dell'impianto dai server e quindi dalla rete.

Con riferimento, invece, al rischio di caduta dall'alto, la progettazione dell'impianto in esame ha previsto la realizzazione di una scala di accesso e di una linea vita per facilitare le attività

di manutenzione e di soccorso che si rendessero eventualmente necessarie, facendo sì che anche questo requisito risulti rispettato.

5.2. Il punto 2 dell'Allegato D al D. Lgs. 105/15

Poiché il deposito si configura attività a R.I.R. ai sensi del D. Lgs. n. 105/15 (nello specifico "Stabilimento di soglia superiore), è stato necessario verificare che l'installazione dell'impianto fotovoltaico non costituisse una "modifica comportante aggravio del preesistente rischio di incidenti rilevanti" secondo quanto indicato dall'Allegato D, punto 2 del suddetto decreto, ovvero che non vi sia:

- Incremento dei quantitativi di sostanze pericolose autorizzate;
- Introduzione di ulteriori sostanze pericolose;
- Introduzione di nuove tipologie o modalità di incidenti ipotizzabili che risultino più gravose;
- Smantellamento o riduzione della funzionalità o della capacità di stoccaggio di apparecchiature e/o sistemi ausiliari di sicurezza.

Appare di immediata evidenza che l'installazione dell'impianto fotovoltaico non aumenti il quantitativo di GPL presente all'interno del deposito, né introduca nuove sostanze pericolose ai sensi del D. Lgs. n. 105/15. Del resto, la realizzazione di questo impianto non comporta lo smantellamento di alcuna attrezzatura di sicurezza o sistema di protezione. Per quanto concerne la possibilità che la modifica in progetto introduca nuove e più gravose ipotesi incidentali, si considera che le valutazioni svolte nell'ultima versione del Rapporto di Sicurezza, datata Maggio 2016, hanno evidenziato come, ai fini della verifica di compatibilità territoriale di cui al Decreto del Ministro dell'Ambiente del 15/05/1996 "Criteri di analisi e valutazione dei Rapporti di Sicurezza relativi ai depositi di GPL", il più grave incidente "credibile" da associarsi allo stabilimento sia da individuarsi nel Flash-Fire conseguente al rilascio di GPL da un foro del diametro equivalente di 2" per un tempo di 20 secondi in condizioni di stabilità atmosferica D5. In pratica l'evento origine è un rilascio di GPL da una tubazione che evolve formando una nube infiammabile soggetta ad innesco ritardato con conseguente incendio istantaneo della nube medesima. È evidente che l'installazione dell'impianto fotovoltaico non può introdurre in alcun modo eventi incidentali più gravosi di quello appena descritto; può eventualmente aggiungersi alle possibili cause di innesco della nube, in conseguenza del quale si determina la generazione del flash-fire.

In considerazione dunque delle valutazioni sopra riportate, si può affermare che l'installazione dell'impianto fotovoltaico oggetto dello studio **NON COMPORTA AGGRAVIO DEL PREESISTENTE LIVELLO DEL RISCHIO DI INCENDIO** per il deposito, ai sensi dell'art. 4 comma 6 del D.P.R. 151/2011.



Il tratteggio blu evidenzia l'area di installazione dei moduli FV

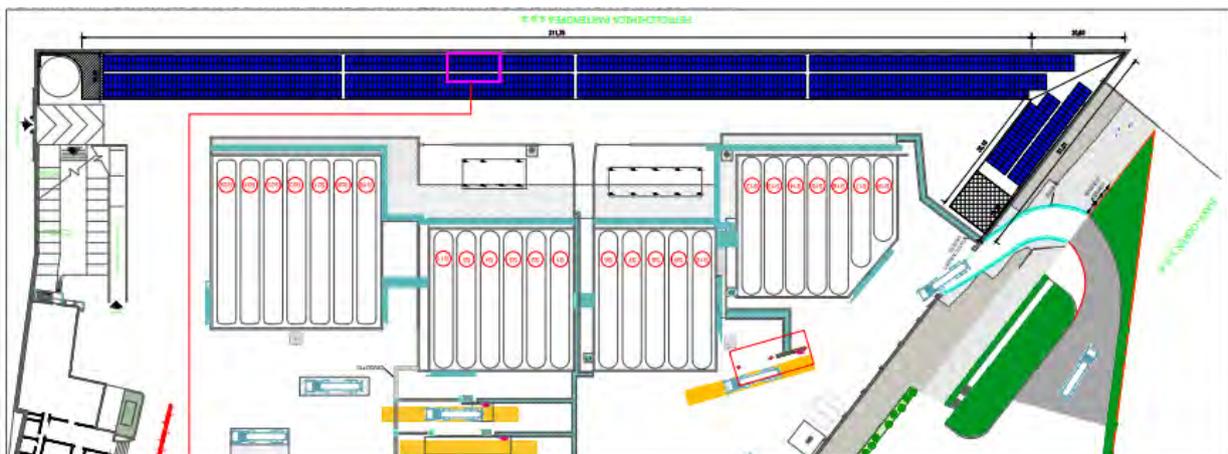


Figura 2. Stralcio planimetrico del deposito con ubicazione area pannelli fotovoltaici

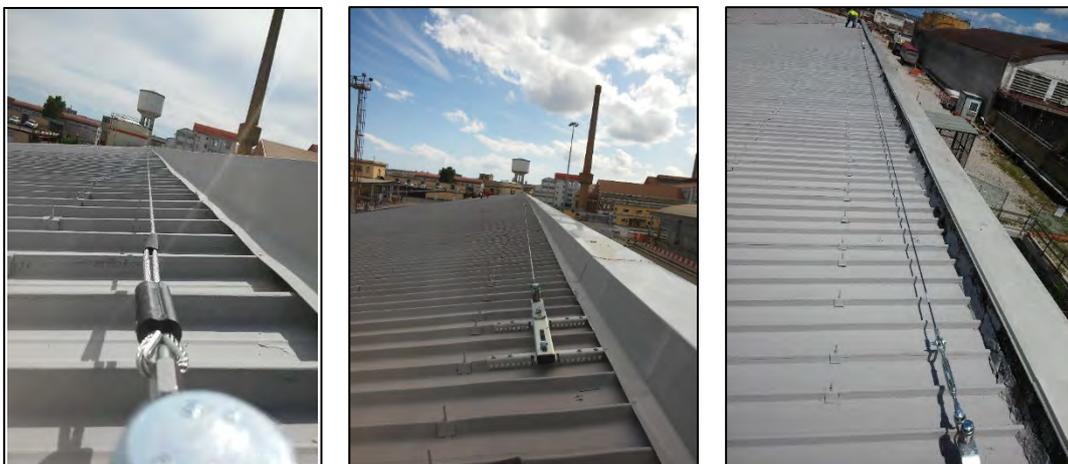


Figura 3. Installazione linea vita sulla tettoia



Figura 4. Installazione strutture di ancoraggio moduli FV

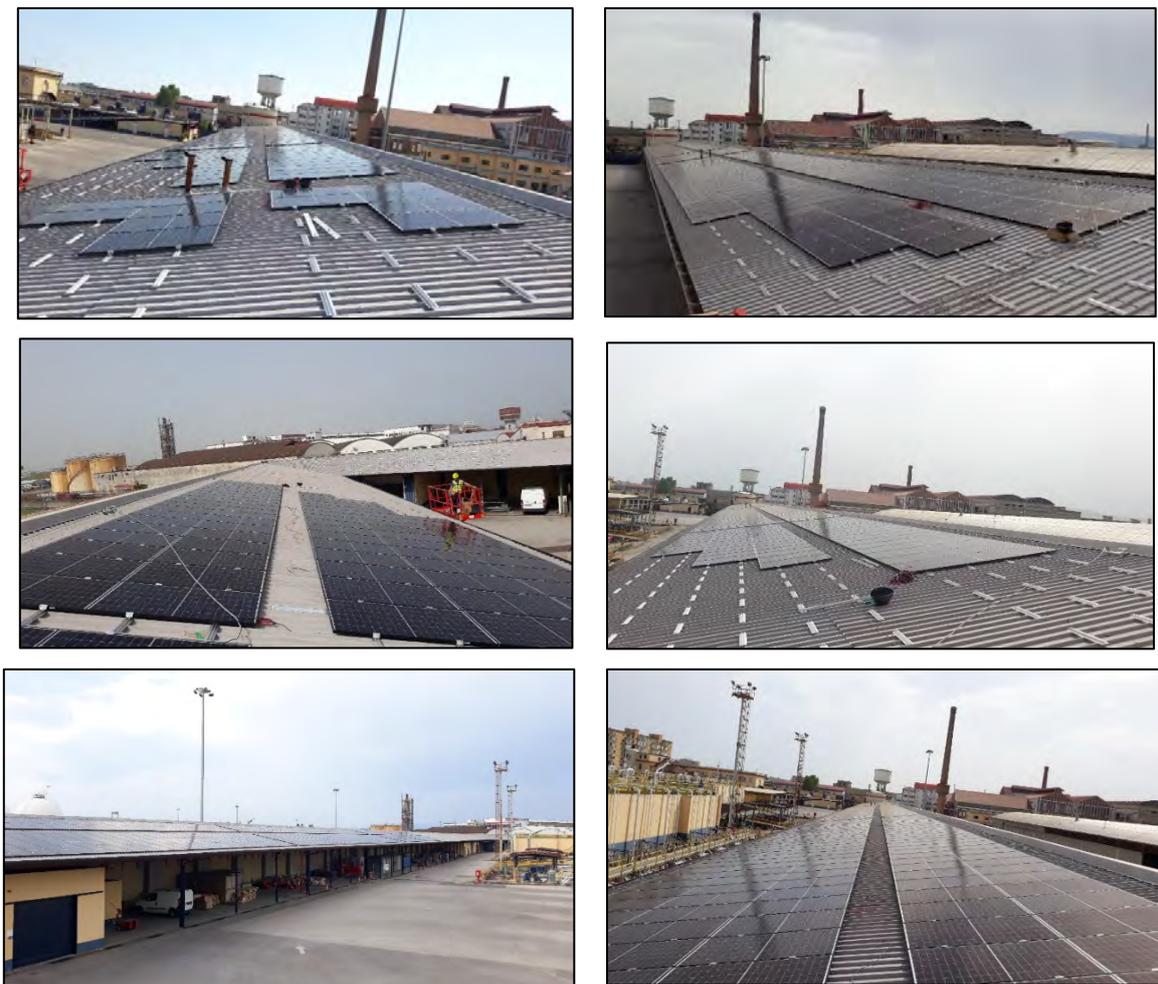


Figura 5. Installazione moduli FV

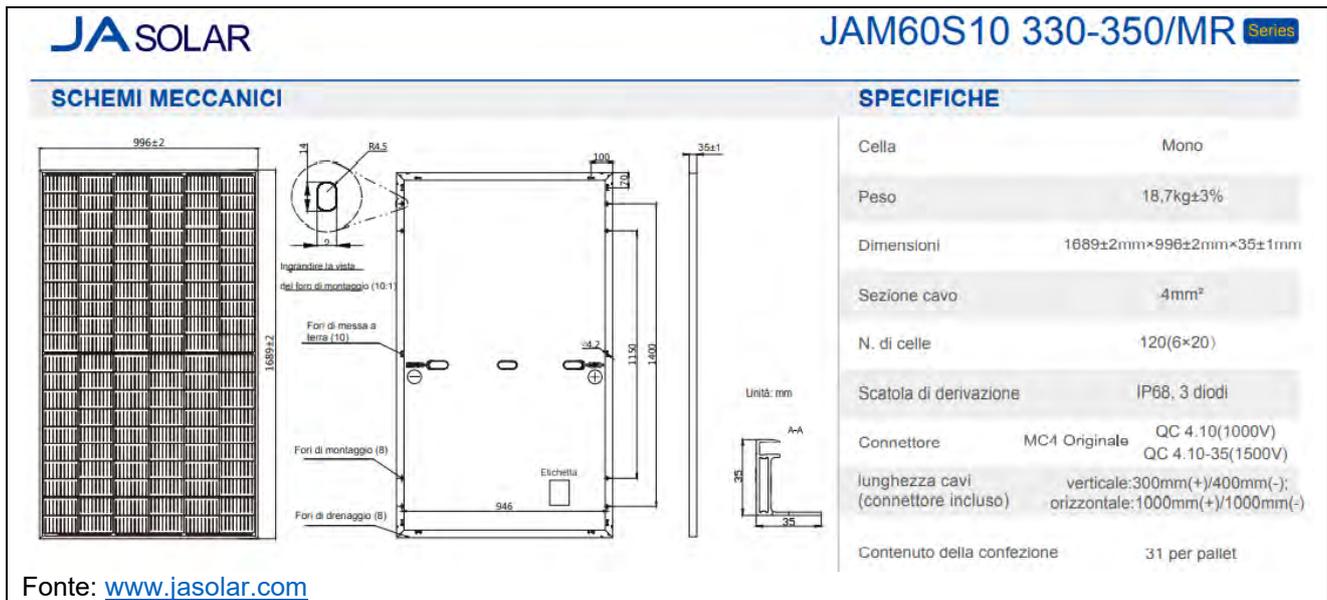


Figura 6. Caratteristiche moduli FV

6. Risultati

Tutte le valutazioni preliminari hanno dunque garantito la possibilità di eseguire l'attività in sicurezza, e di esercire l'impianto senza introdurre ulteriori rischi all'interno del sito produttivo.

7. Conclusioni

In un momento storico in cui si avverte la necessità di accelerare l'evoluzione del comparto industriale verso processi e metodologie che tutelino la salute e la sicurezza parallelamente al rispetto dell'ambiente, l'iter procedurale legato all'installazione dell'impianto in oggetto ha dimostrato come sia possibile modificare anche attività classificate "ad alto rischio" e renderle più "green", senza per questo ridurre le condizioni di sicurezza nella gestione di queste attività.

8. Bibliografia

- [1] D.P.R. 151/2011, Procedimenti prevenzione incendi
- [2] Nota DCPREV, prot. n. 12563 del 2 Settembre 2010, "Installazione di impianti fotovoltaici in attività soggette al controllo dei Vigili del Fuoco"
- [3] Decisione della Commissione UE del 6 settembre 2000 – Attuazione della direttiva 89/106/CEE - Resistenza esterna all'azione del fuoco dei rivestimenti per tetti (numero C(2000) 2266)
- [4] D. Lgs. 81/08 - Allegato XLIV (atmosfera potenzialmente esplosive)
- [5] D.M. 13/10/1994, "Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la costruzione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di G.P.L. in serbatoi fissi di capacità complessiva superiore a 5 mc e/o in recipienti mobili di capacità complessiva superiore a 5.000 kg"
- [6] Decreto del Ministro dell'Ambiente del 15/05/1996 "Criteri di analisi e valutazione dei Rapporti di Sicurezza relativi ai depositi di GPL"

La dismissione come fattore peggiorativo nelle attività a rischio di incidente rilevante

F. Fanigliulo¹, R. Longo², M. Oss³, M. Palermo¹, F. Vazzana⁴

¹ Studio Tecnico Fanigliulo

² Inail - Uot di Catanzaro

³ Inail - Uot di Bolzano

⁴ Ispra

Sommario

L'incidente avvenuto presso l'azienda ThyssenKrupp di Torino il 6 dicembre 2007 è un esempio di come una riduzione dell'attenzione alle misure di prevenzione, in previsione di cessazione di un'attività, possa avere conseguenze drammatiche non solo per i lavoratori, ma anche per la popolazione e l'ambiente.

Gli autori hanno esaminato uno stabilimento di soglia superiore in fase di dismissione, constatando come in breve tempo si sia verificato un evidente rilassamento nell'applicazione del sistema di gestione della sicurezza. Questo soprattutto nella corretta gestione dei processi di "decommissioning", attraverso una efficace e rigorosa applicazione della procedura di gestione delle modifiche.

Nell'articolo si evidenzia anche l'importanza del fattore umano in termini di conoscenza, competenza e cultura della sicurezza sull'attuazione del SGS-PIR, dimostrando che anche un sistema sulla carta ben progettato può non funzionare se l'Alta Direzione non crea le condizioni di disporre di personale preparato e consapevole a cui affidarlo.

1. Introduzione

La dismissione di un impianto a rischio di incidente rilevante viene talvolta accompagnata da una sottovalutazione dei nuovi rischi che nascono a seguito delle diverse lavorazioni che portano alla chiusura dell'attività. Più spesso però non si tratta di sottovalutazione, ma di negligenza nell'adattamento delle misure di sicurezza alle fasi che si susseguono, considerando anche superflui, e quindi indebiti, eventuali investimenti economici necessari allo scopo.

Il D. Lgs. 105/2015, all'articolo 13, comma 7, obbliga ad aggiornare la notifica prima della "chiusura definitiva dello stabilimento o sua dismissione". Nella lista di riscontro 3a di cui all'appendice 3 dell'allegato H del D. Lgs. 105/2015, al punto 4.iv, ultimo trattino, viene specificato di "Verificare che siano definite per le diverse tipologie di impianti le procedure di messa in sicurezza, fuori servizio, disattivazione, dismissione e demolizione, comprese la bonifica e lo smaltimento dei residui.". Dunque la Commissione Ispettiva deve sempre verificare la presenza della procedura di dismissione nel sistema di gestione della sicurezza, ma in caso la dismissione sia in corso deve accertarsi che la procedura sia attuata e che, soprattutto, sia coerente con la situazione reale.

1.1 Il famoso caso dell'azienda ThyssenKrupp di Torino

Il 5 dicembre 2007 presso la linea 5 dell'acciaieria ThyssenKrupp di Torino morivano 7 operai ed uno restava ferito. I processi giudiziari hanno ricostruito la vicenda, addebitando la causa dell'incidente alla dismissione in corso dello stabilimento, in quanto l'azienda aveva intenzione di lasciare aperto solo lo stabilimento di Terni: gli estintori erano scarichi; i telefoni aziendali isolati; gli idranti malfunzionanti; non erano presenti incaricati alla

prevenzione incendi e lotta antincendio in quanto non venivano più effettuati corsi di formazione specifica.

Non si tratta pertanto di errore umano, ma di abbandono volontario, da parte della direzione aziendale, di tutte le normali misure di prevenzione e delle relative spese economiche in vista della imminente chiusura.

2. Un caso di studio

Per evidenti motivi di opportunità, per il caso reale che verrà presentato non verrà mai citata la ragione sociale della ditta in esame, che pertanto verrà nel proseguo denominata "Ditta", né saranno pubblicate planimetrie o altri documenti che potrebbero rendere identificabile l'Azienda.

Sono state analizzate le due verifiche ispettive consecutive subite dalla Ditta negli anni 2014 e 2018.

L'Azienda già nel 2014 era in fase di dismissione, anche se gli impianti, pur non producendo, venivano mantenuti efficienti per poter, in caso di necessità, riprendere la produzione. Nel 2014 il personale contemporaneamente presente nell'Azienda era pari a 45 unità. Quattro anni dopo era sceso a 15 unità. Infatti nel 2018 erano stati dismessi definitivamente la metà degli impianti produttivi. L'Azienda continuava però ad essere in soglia superiore a causa dell'olio combustibile denso (OCD) contenuto in 6 serbatoi per un totale di oltre 300.000 t nel 2014, ridottisi a 5 serbatoi con circa 260.000 t nel 2018 (il limite di soglia superiore definito dall'allegato I, colonna 3, del D. Lgs. 105/2015 è pari 25.000 t). Si sottolinea che l'Azienda aveva invece previsto la dismissione totale dei sei serbatoi entro il 2016, previsione completamente lontana dalla realtà, considerata la difficoltà di vendita di tale prodotto sul mercato. Tale previsione errata può aver influito su alcuni aspetti di sicurezza che tratteremo in seguito.

2.1 L'analisi dei rilievi fatti dalle due Commissioni

La Commissione del 2014 ha impartito alla Ditta 16 raccomandazioni e 5 prescrizioni, mentre quella del 2018 ha fatto 7 raccomandazioni e 4 prescrizioni. Tutte le raccomandazioni e prescrizioni sono state fatte proprie dal CTR.

2.1.1 I rilievi della Commissione del 2014

Nel 2014 la Commissione avverte la necessità di fare una raccomandazione molto significativa relativamente alla fase di dismissione in atto: *"Si apprende dai responsabili aziendali che sono in corso di definizione le procedure finalizzate alla dismissione e bonifica dei serbatoi di stoccaggio dell'OCD, che secondo le previsioni si protrarranno fino al 2016. Si raccomanda a tal fine la stretta osservanza delle procedure del SGS-PIR nella gestione del transitorio, in termini di modifiche, formazione e addestramento del personale interno ed esterno, pianificazione dell'emergenza..."* Pare il sentore, da parte della Commissione, che sia subentrato nel personale un senso di abbandono e di smarrimento delle certezze della propria vita lavorativa che portano inevitabilmente ad un sentimento di distacco da quello che si è sempre fatto. È una fase così pericolosa che spinge la Commissione a chiudere così la raccomandazione: *"di tali azioni si ritiene debba essere tenuto costantemente informato il CTR..."*.

In effetti la Ditta non ha mai comunicato al CTR le attività di formazione e addestramento del personale, limitandosi a chiedere l'autorizzazione alla bonifica di due serbatoi di OCD. La Ditta ha dichiarato all'atto dell'ispezione del 2018 di aver espletato la formazione e l'addestramento, ma le carenze al riguardo sono risultate talmente gravi da spingere la Commissione 2018 ad impartire due prescrizioni che, vedremo, hanno riguardato non solo la formazione del personale, ma anche la manutenzione degli impianti antincendio.

E proprio riguardo alla manutenzione degli impianti antincendio la Commissione del 2014 impartiva la seguente raccomandazione: *“Per le manutenzioni sulle apparecchiature antincendio, documentate anche nell'apposito registro, sul SAP avviene solamente la registrazione degli interventi, non è presente l'attività di pianificazione e consuntivazione, attraverso il controllo degli interventi. Si raccomanda di provvedere all'implementazione di questi aspetti.”* Nel 2018, nonostante la Società avesse dichiarato di aver previsto per le manutenzioni delle apparecchiature antincendio apposita pianificazione e consuntivazione, attraverso il controllo degli interventi su SAP, la Commissione riscontrava, in occasione della simulazione di emergenza, gravi carenze di manutenzione sui cannoni monitori dei serbatoi di OCD, a cui si aggiungeva la difficoltà da parte degli operatori di capire la natura del problema. In particolare si riscontravano perdite di acqua a causa dell'eccessiva corrosione con conseguente diminuzione della pressione che impediva al getto d'acqua di raggiungere i serbatoi di OCD. Dunque le carenze di pianificazione presenti nel 2014, nonostante la dichiarazione nel 2018 da parte dell'Azienda, avevano portato in breve tempo all'abbandono di un impianto così importante per la sicurezza quale quello dei cannoni monitori. Poco coerente risulta pertanto anche la risposta positiva della Ditta ad una raccomandazione della Commissione del 2014 in cui si chiedeva di formalizzare *“i criteri per le attività di manutenzione svolte su apparecchiature non "critiche”*. Probabilmente la raccomandazione documentale era stata risolta, ma gli aspetti concreti della manutenzione erano stati quasi abbandonati sinergicamente al pensiero della imminente dismissione.

Lo stesso dicasi per la raccomandazione fatta nel 2014 *“Si raccomanda di inserire il concetto che le modifiche temporanee devono essere trattate come quelle permanenti, per tutti gli aspetti di definizione, analisi dei rischi, pianificazione e attuazione.”* La Ditta ha fatto quanto richiesto sotto l'aspetto documentale, ma il comportamento pratico dimostra tutt'altro.

In occasione della simulazione di emergenza prima citata, oltre alle carenze di manutenzione, si è riscontrato un imbarazzante comportamento da parte della squadra di emergenza, incapace di organizzarsi secondo la procedura esistente nella risposta al segnale di inizio emergenza, dunque con tempi di reazione inaccettabili, con la dimostrazione palese di non conoscere i propri singoli compiti all'interno della squadra, e con una impacciata ed improduttiva reazione al momento della constatazione del malfunzionamento dei cannoni monitori. L'imbarazzo della situazione ha addirittura spinto il RSPP dello stabilimento, presente come spettatore alla simulazione, ad intervenire materialmente in aiuto della squadra di emergenza. È vero che la Commissione del 2018 ha riscontrato, in risposta alla raccomandazione del 2014 *“Si raccomanda inoltre di inserire a sistema il modello utilizzato per la registrazione delle simulazioni, con l'indicazione della natura delle informazioni che esso deve contenere”*, la presenza di un modello per la registrazione delle simulazioni, esaminando anche alcune schede compilate. Ma il loro contenuto era realistico? Le simulazioni venivano effettivamente svolte? La risposta può essere trovata già in una delle prescrizioni proposte dalla Commissione del 2014: *“Si rileva in ogni caso che dall'esame documentale non sempre è stata rispettata la tempistica prevista dal DM 16 marzo 1998 per la programmazione delle simulazioni di emergenza e non è stata sviluppata una metodologia per coordinare le attività svolte dal Servizio sicurezza con quelle del Responsabile dell'esercizio. Si propone di prescrivere un maggiore rispetto della calendarizzazione minimo semestrale delle attività, unita ad una pianificazione delle esercitazioni che permetta chiaramente di identificare quelle svolte per testare il PEI da quelle finalizzate all'addestramento degli operatori.”* La Commissione del 2018 rileva la correttezza delle registrazioni delle simulazioni, ma l'evidenza pratica dimostra la loro scarsa efficacia (effettuate davvero?).

Una raccomandazione impartita nel 2014 che mette in evidenza il rilassamento della Ditta nell'attività di controllo delle procedure è quella relativa al controllo degli accessi: *“Le procedure di controllo degli accessi in Centrale non sono applicate in modo coerente da tutti gli addetti alla portineria. Si raccomanda una intensificazione dell'attività formativa sul rispetto delle procedure previste.”*. La necessità di ridurre il personale, man mano che procedeva la dismissione, ha spinto l'Azienda a sostituire il personale interno addetto alla portineria con una ditta esterna. La Società dichiara alla Commissione 2018 di aver intensificato la formazione del personale della ditta esterna, ma la Commissione ha riscontrato la non risoluzione del problema, constatando che la ditta in appalto svolgeva il servizio facendo gli stessi errori procedurali del personale interno.

Riguardo alle rimanenti 10 raccomandazioni e 4 prescrizioni adempiute dalla Ditta, c'è da sottolineare con rammarico che ad eccezione di una prescrizione, riguardante l'applicazione del permesso di lavoro a tutte le aree dello stabilimento in dismissione e non solo all'area dei serbatoi di OCD, tutte riguardano aspetti documentali del sistema di gestione della sicurezza, sicuramente importanti ai fini del miglioramento continuo del sistema stesso e del rispetto delle norme vigenti, ma meno attinenti agli aspetti pratici delle attività di dismissione che potrebbero coinvolgere la sicurezza dei lavoratori e della popolazione.

2.1.2 I rilievi della Commissione del 2018

Descrivendo i rilievi della Commissione del 2014 abbiamo già descritto alcune problematiche riscontrate nel 2018. La più importante è sicuramente collegata alla simulazione di emergenza svolta nel corso dell'ispezione del 2018 che ha dimostrato una scarsa confidenza della squadra di emergenza con le procedure aziendali. La Commissione ha constatato, esaminando la documentazione relativa alla formazione, che nei test di valutazione tutti i discenti prendevano il voto massimo nonostante la presenza di errori. La motivazione fornita dal docente del corso, il nuovo Responsabile SGS dell'azienda, è che fa eseguire la correzione dei test direttamente ai discenti, i quali diventano consci degli errori commessi, e dunque tutti preparatissimi! Questo passaggio è fondamentale per capire il cambiamento di atteggiamento in azienda a seguito della sostituzione del responsabile SGS, di cui parleremo in altro paragrafo. La Commissione ha conseguentemente impartito la seguente raccomandazione: *“La Commissione raccomanda una correzione più puntuale dei test di apprendimento che sia espressione del reale grado di attenzione del discente in aula durante la formazione e permetta di individuare nel miglior modo possibile le carenze formative dei singoli lavoratori, in modo da poter apportare le opportune correzioni in occasione delle successive attività formative.”*

Ovviamente l'esito della simulazione di emergenza ha spinto la Commissione a proporre la seguente prescrizione: *“La Commissione propone di prescrivere la ripetizione della formazione sul comportamento da tenere in caso di incendio dei serbatoi di OCD, per tutti gli addetti alle squadre di emergenza, prima del successivo programmato addestramento trimestrale e di verbalizzare puntualmente gli esiti della simulazione riportando correttamente i tempi di svolgimento.”* Inoltre ha proposto la ripetizione dell'addestramento e l'esecuzione di una simulazione di emergenza alla presenza di rappresentanti del Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco. In considerazione degli eccessivi tempi di risposta da parte della squadra di emergenza in occasione della simulazione, ben 10'20" per l'apertura della rete di spegnimento ad anello intorno ai serbatoi a partire dal segnale di allarme, la Commissione ha impartito anche la seguente proposta di prescrizione: *“La Commissione propone di introdurre nel SGS un sistema di reportistica delle esercitazioni che preveda un sistema certo di misurazione dei tempi di esecuzione delle simulazioni di emergenza.”* Considerando anche che, in occasione della simulazione di emergenza svolta in presenza della Commissione, la squadra di emergenza ha avuto difficoltà ad

aprire la saracinesca generale dell'impianto antincendio di uno dei serbatoi, viene il dubbio che le 8 simulazioni di emergenza registrate nel sistema nel 2018 siano state realmente eseguite, o almeno che non siano state eseguite nel rispetto della procedura. Le interviste ai componenti della squadra di emergenza hanno confermato tali dubbi, considerando che un operatore ha dichiarato di aver svolto l'ultima esercitazione 6 mesi prima, e che un altro ha dichiarato non riducibile il tempo di intervento misurato durante la simulazione, sentendosi soddisfatto del *"buon esito della simulazione svolta"*. Infine l'ASPP dello stabilimento ha dichiarato apertamente che non vengono rilevati i tempi di intervento durante le esercitazioni.

Con specifico riferimento all'attività di dismissione dell'impianto l'Azienda ha redatto le istruzioni operative relative allo scarico di OCD, ai controlli dei serbatoi di OCD, alla gestione dell'emergenza in caso di sversamenti, al caricamento/scaricamento di OCD da piste, alla gestione dell'impianto di idrogeno. La Commissione ha innanzi tutto evidenziato l'assenza di istruzioni operative per il controllo delle tubazioni di collegamento tra i serbatoi di OCD, e conseguentemente la mancanza di procedure per la loro manutenzione, nonostante tali tubazioni siano presenti nell'elenco delle attrezzature critiche, raccomandandone la redazione. Ma anche, con riferimento alle istruzioni esistenti, ha rilevato la mancata esplicitazione delle modalità di conduzione degli impianti in tutte le modalità (normali, anomale o di emergenza), che non sono rilevabili i parametri operativi dell'impianto, e che non tutte contengono le indicazioni dei DPI. E' stata pertanto proposta la seguente prescrizione: *"La Commissione propone di prescrivere la modifica delle istruzioni operative assicurandosi che esse siano congruenti con l'analisi di sicurezza e che contengano almeno le informazioni previste dalla lista di riscontro di cui all'allegato H del D. Lgs. 105/2015, con particolare riferimento alla modalità di conduzione degli impianti in condizioni normali, anomale e di emergenza, ai parametri operativi normali degli impianti e che siano esplicitati i DPI necessari per eseguire in lavori."*

Per completare questo paragrafo riportiamo la significativa frase di chiusura del rapporto finale della Commissione: *"L'impressione complessiva però è che, in questa triste fase di dismissione dello stabilimento, sia un po' calata l'attenzione nell'applicazione delle procedure, cosa che può diventare grave quando si pone minore attenzione alle procedure di manutenzione degli impianti antincendio ed alla corretta esecuzione delle simulazioni di emergenza, come constatato dalla Commissione in occasione del sopralluogo del 15/10/2018. Si sottolinea inoltre l'atteggiamento recidivo della Società nella riproposizione di comportamenti già evidenziati nella precedente ispezione del 2014:*

- *la raccomandazione R1 del 2014 si è trasformata nelle due attuali proposte di prescrizione P1 e P2;*
- *si sono riscontrate nuovamente carenze di manutenzione sugli impianti antincendio;*
- *non si è risolta nella pratica la raccomandazione R14 del 2014."*

2.2 La sostituzione del responsabile del sistema di gestione della sicurezza

La Commissione ha avuto anche l'impressione, non riportabile nel rapporto finale di ispezione, che l'abbassamento dei livelli di attenzione e di accuratezza nell'applicazione delle procedure del SGS sia coinciso col pensionamento del precedente responsabile del SGS. Costui, non solo svolgeva fin dall'inizio dell'emanazione della normativa specifica questo ruolo, ma aveva da giovane partecipato alla costruzione dello stabilimento e vi aveva trascorso tutta la propria vita lavorativa. Un attaccamento diremmo sentimentale che, unito alla precisione ed alla preparazione, permetteva una migliore applicazione delle procedure da parte di tutto il personale. La Commissione ha certamente valutato

l'incidenza di questo fattore umano quando, visionando il registro di manutenzione delle apparecchiature di emergenza e degli impianti antincendio, è stata costretta ad emanare la seguente raccomandazione: *“Si raccomanda un migliore controllo dei registri compilati dal personale addetto in quanto si è riscontrato che negli ultimi due anni circa non è stata apposta la data del controllo settimanale dell'impianto di segnalazione sonoro.”* Così come più scadente è stata l'efficacia della formazione ed informazione che prima veniva erogata al personale proprio da lui.

3. Considerazioni sugli aspetti gestionali delle dismissioni

Di seguito si forniscono, anche a seguito delle problematiche riscontrate nel caso di studio riportato nel paragrafo precedente, alcuni spunti di riflessione sulle possibili aree di interesse che un SGS-PIR efficace dovrebbe tenere in considerazione durante la gestione del decommissioning di uno stabilimento.

3.1 Gestione dei rischi

La gestione dei rischi del processo deve assicurare l'identificazione sistematica, la valutazione e il controllo dei rischi, in termini di frequenza e conseguenze, che possono aversi nel corso dell'esercizio degli impianti per tutto il ciclo di vita dell'impianto, compreso lo smantellamento (decommissioning). La tracciabilità di tali criteri e requisiti di sicurezza deve essere assicurata per tutta la durata di vita dell'impianto.

Le procedure e le tecniche normalmente adottate nella gestione dei rischi del processo produttivo non possono essere semplicemente adattate alla fase di dismissione. Infatti in questa fase, come visto nel caso di studio presentato, l'aspetto psicologico prende il sopravvento sugli aspetti tecnici e di sicurezza e salute del lavoro: per il datore di lavoro tale aspetto è strettamente legato a quello economico, e lo spinge a fare economia sugli strumenti materiali e immateriali necessari a mantenere lo stesso livello di sicurezza per tutta la durata delle attività di dismissione; per i lavoratori il fattore psicologico incide sulla attenzione e concentrazione da adottare durante la propria attività, a cui si aggiunge una situazione di incertezza nel futuro che in alcuni casi sfocia nello stress lavoro-correlato associato a sindrome depressiva. Quest'ultima è una condizione molto pericolosa perché genera un allentamento nell'adozione delle misure di prevenzione e protezione, da parte del lavoratore, che può dar luogo a gravi incidenti.

3.2 Modifiche

Da quanto sopra detto, si evince l'importanza che, in occasione di attività di dismissione, la revisione del SGS-PIR venga assegnata a personale dotato di specifica competenza ed esperienza, non necessariamente coincidente con il RSGS. Infatti la revisione del sistema potrebbe essere assegnata ad una figura professionale, anche esterna, in possesso dell'esperienza necessaria alla gestione di tali processi.

Tale figura dovrà curare, nel rispetto della normativa vigente, la redazione della documentazione necessaria all'effettuazione delle modifiche e, durante tutto il processo di dismissione, il continuo riesame e rielaborazione:

- della valutazione dei rischi, del piano di emergenza interna, dell'eventuale rapporto di sicurezza e quant'altro richiesto dalla normativa vigente;
- di schemi, disegni e quant'altro serva a identificare e descrivere tecnicamente gli impianti, i dispositivi e le attrezzature in uso, nonché i parametri che ne caratterizzano il funzionamento;
- delle procedure operative di conduzione, controllo e manutenzione, e quant'altro serva a descrivere correttamente le modalità operative di conduzione dell'impianto;

– della formazione, informazione e addestramento del personale.

Inoltre la gestione dello smantellamento (decommissioning) di uno stabilimento o di un impianto deve prevedere specifiche procedure che assicurino la costante comunicazione e coordinamento nella gestione della sicurezza tra il personale operativo coinvolto nella modifica e le imprese appaltatrici presenti, in particolare nello smantellamento di apparecchiature contaminate (comprese le linee e i serbatoi), nella rimozione delle sostanze pericolose presenti, con particolare attenzione alle modalità di isolamento meccanico ed elettrico.

3.3 Il training del personale interno, esterno e la gestione delle emergenze

Dal caso studio esaminato appare chiaramente come sia fondamentale la gestione della preparazione del personale, interno ed esterno. La pianificazione e programmazione delle attività di informazione, formazione e addestramento, durante la dismissione di un impianto o di tutto lo stabilimento, devono essere oggetto di attenta valutazione, in quanto le stesse tempistiche previste dalla normativa cogente (come indicate nell'appendice 1 dell'allegato B del D. Lgs. 105/2015) potrebbero non essere sufficienti a garantire un adeguato livello di sicurezza sia nella consapevolezza degli operatori delle imprese appaltatrici, sia nella risposta della squadra di emergenza.

Lo scopo essenziale della formazione e dell'addestramento deve essere quello di assicurare che tutto il personale coinvolto nella dismissione parziale o totale di uno stabilimento venga continuamente aggiornato sulla evoluzione delle condizioni di sicurezza e salute dell'impianto, sulle interferenze tra i lavoratori e sulle misure di emergenza che devono mantenere sempre alto il livello di sicurezza all'interno dell'azienda.

Al fine di mantenere sempre viva la "cultura della sicurezza", l'aggiornamento del contenuto dei programmi di formazione dovrebbe essere integrato da argomenti motivazionali, anche con l'eventuale aiuto di uno psicologo che potrebbe addirittura partecipare all'attività formativa come osservatore, al fine di valutare l'eventuale presenza di soggetti a maggior rischio di sindrome depressiva.

Una maggiore attenzione deve essere posta nella collaborazione con il Rappresentante dei Lavoratori per la Sicurezza, in particolare sulla necessità di segnalare al Gestore situazioni di "rilassamento" dei lavoratori sugli aspetti di sicurezza e salute, in modo da permettere di intervenire tempestivamente nella risoluzione di situazioni critiche.

La revisione critica degli scenari incidentali presenti nel PEI dovrebbe essere continua, al fine di eliminare le ipotesi incidentali non credibili o divenute tali da essere gestite con semplici procedure operative e non richiedere l'intervento della squadra di emergenza, ovvero, comprendere nuovi scenari che possono verificarsi durante l'attività di dismissione, in modo da tenere anche conto della possibile interferenza dovuta alla presenza di imprese appaltatrici che non era prevista durante il normale esercizio dello stabilimento.

4. Conclusioni

Il presente lavoro dimostra come sia possibile, partendo da un caso di studio significativo, trarre utili considerazioni sulla gestione dei sistemi di sicurezza, quali quelle elencate nel precedente paragrafo, allo scopo di migliorare l'approccio aziendale in senso pratico al sistema stesso. Frequentemente riscontriamo sistemi ben strutturati dal punto di vista documentale, ma che nella realtà non vengono applicati correttamente, sia per generali carenze di formazione e addestramento che per scarsa attitudine al loro controllo da parte del responsabile del sistema di gestione della sicurezza, spesso dislocato in sede diversa,

o del responsabile dello stabilimento. Si è evidenziata altresì l'importanza di fornire al personale dipendente motivazioni per il proprio futuro lavorativo, qualora la dismissione riguardi l'intero stabilimento, al fine di evitare comportamenti difforni dalle procedure aziendali specifiche.

5. Bibliografia

[1] D. Lgs. 26 giugno 2015, n. 105. In Supplemento ordinario n. 38/L alla Gazzetta Ufficiale n. 161 del 14/07/2015.

[2] Rossella Giuliano. Incidente nello stabilimento ThyssenKrupp di Torino(2007-2017): una retrospettiva giuridica. In www.iusinitinere.it/incidente-nello-stabilimento-thyssenkrupp-di-torino2007-2017-una-retrospettiva-giuridica-6846

[3] Norma UNI 10616:2012. Impianti a rischio di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Linee guida per l'attuazione della UNI 10617.

[4] Norma UNI 10617:2019. Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Requisiti essenziali.

Indicazioni tecniche per l'analisi della completezza documentale relativa alla dichiarazione di messa in servizio cumulativa per i serbatoi GPL fino a 13 m³

M. De Mattia¹, M. Larice², C. Piccolo³, F. Rossetti⁴, M.N. Tini⁵

¹ Inail – Uot di Milano

² Inail – Uot di Udine

³ Inail – Uot di Avellino

⁴ Inail – Uot di Brescia

⁵ Inail – Uot di Terni

Sommario

Scopo del presente lavoro è l'elaborazione di indicazioni tecniche per l'analisi della completezza documentale tecnica e amministrativa relativa alla verifica di messa in servizio cumulativa per i serbatoi GPL fino a 13 m³.

L'art. 6 comma 2 del dm 329/2004 dispone, per le attrezzature costruite in serie, quali i serbatoi di stoccaggio di gas petrolio liquefatto (GPL) di capacità non superiore a 13 m³ e dei loro insiemi, la modalità di dichiarazione di messa in servizio cumulativa.

Per l'attuazione di quanto sopra, al fine di fornire indicazioni utili a tecnici ed aziende utilizzatrici, si descrive la modalità di verifica della completezza e correttezza della dichiarazione di messa in servizio alla luce delle normative tecniche di settore e delle lettere circolari emanate negli anni dall' Inail e dall'ex Ispesl.

Le presenti indicazioni tecniche, elaborate anche sulla base dell'esperienza delle Unità operative territoriali (Uot) dell'Inail, si propongono di fornire alle aziende di settore uno strumento per la corretta predisposizione delle documentazioni da inviare e, altresì, un utile documento per uniformare l'esame tecnico.

1. La dichiarazione di messa in servizio

1.1 Inquadramento normativo

Le attività di cui al presente documento sono quelle previste, per la dichiarazione di messa in servizio cumulativa di serbatoi di stoccaggio di gas petrolio liquefatto (GPL) di capacità non superiore a 13 m³ e dei loro insiemi, dall' art. 6 comma 2. del d.m. 329/04 e dalle modalità di cui alle Lettere Circolari ex Ispesl ed Inail.

La dichiarazione di messa in servizio cumulativa, a seguito di "Verifiche di "primo impianto" ovvero di "messa in servizio" (di seguito verifiche di messa in servizio) di attrezzature/insiemi a pressione, rientra tra le attività di cui l'Istituto è titolare in via esclusiva.

Anche il d.lgs.81/08 e smi attribuisce all'art. 9 comma 6 la titolarità dell'IspeSl (oggi Inail) nelle attività di "prime verifiche e verifiche di primo impianto di attrezzature di lavoro sottoposte a tale regime". Per le attrezzature e gli insiemi a pressione il rimando è alle disposizioni previste dal d.m. 329/2004 che ne disciplina le modalità di verifica di messa in servizio nei luoghi di vita e di lavoro.

Il d.m. 329/04 prevede, per quanto di interesse le seguenti tipologie di verifica:

- Verifica obbligatoria di primo impianto ovvero della messa in servizio (art. 4);
- Obblighi da osservare per la messa in servizio e l'utilizzazione, dichiarazione di messa in servizio (art. 6);
- Obblighi delle verifiche periodiche (art. 8);

- Riqualificazione periodica (art. 10);

L'Inail è preposto, ai sensi dell'art. 4 del d.m. 329/04, alle verifiche di messa in servizio finalizzate al controllo del funzionamento in sicurezza delle attrezzature ed insiemi come richiamato nell'art. 1 comma 2. lettera a) dello stesso decreto.

L'attività è volta alla valutazione della corretta installazione e al rispetto delle prescrizioni previste dal fabbricante ed elencate nel manuale d'uso e manutenzione o istruzioni d'uso.

Le attività vengono svolte dalle Unità operative territoriali di certificazione verifica e ricerca (Uotcivr) che operano nei rispettivi ambiti territoriali di competenza.

Le attrezzature e gli insiemi di cui all'art.1 del d.m. 329/04, non esclusi dall'art. 2, sono soggetti al processo della *dichiarazione di messa in servizio* (art.6) da parte dell'utilizzatore, che consente l'utilizzo degli stessi.

Le attrezzature/insiemi non esclusi dall'art. 2 del d.m. 329/04 e non ricadenti nell'art. 5, sono soggetti alla verifica di messa in servizio.

Di fatto l'art. 5 consente per gli insiemi, per i quali da parte del competente organismo notificato risultano effettuate per quanto di propria competenza la verifica degli accessori di sicurezza o dei dispositivi di controllo, di non effettuare la verifica di messa in servizio e procedere direttamente con la dichiarazione di messa in servizio.

La dichiarazione di messa in servizio deve essere inviata anche alle ASL/ARPA competenti per territorio.

Secondo quanto indicato dall' art. 6 comma 2. del d.m. 329/2004, per le attrezzature costruite in serie, quali i serbatoi di stoccaggio di gas petrolio liquefatto (GPL) di capacità non superiore ai 13 m³ e dei loro insiemi installati presso utilizzatori da aziende (che ne conservano la proprietà e la responsabilità tecnica e provvedono al loro rifornimento), può essere presentata un'unica dichiarazione di messa in servizio cumulativa per tutte le attrezzature e gli insiemi installati in un semestre.

Per procedere all'inoltro della suddetta dichiarazione di messa in servizio cumulativa, l'utente come indicato dall' art. 6 comma 1 del d.m. 329/04 deve allegare alla richiesta la seguente documentazione:

- a) l'elenco delle singole attrezzature, con i rispettivi valori di pressione, temperatura, capacità e fluido di esercizio.
- b) una relazione tecnica, con lo schema dell'impianto, recante le condizioni di installazione e di esercizio, le misure di prevenzione, protezione e controllo adottate (nota Inail n. 25007 del 29/07/2020).
- c) una espressa dichiarazione, redatta ai sensi dell'ex art. 2 del d.P.R. 403/98, attestante che l'installazione è stata eseguita in conformità a quanto indicato nel manuale d' uso (la dichiarazione oggi è resa ai sensi dell'art. 46 del d.P.R. 445/2000).
- d) il verbale della verifica di messa in servizio ove prescritta.

Per quanto previsto dall'art. 6 comma 4., per le attrezzature a pressione e insiemi esclusi dalla verifica di messa in servizio, ai sensi dell'art. 5, la dichiarazione di messa in servizio cumulativa consente di attivare l'attrezzatura o l'insieme a condizione che si attesti *'che le predette attrezzature o insiemi siano stati debitamente installati, mantenuti in efficienza e utilizzati conformemente alla loro destinazione, non pregiudichino la salute e la sicurezza delle persone o degli animali domestici o la sicurezza dei beni'*.

DICHIARAZIONE DI MESSA IN SERVIZIO CUMULATIVA PER DEPOSITI DI GAS DI PETROLIO LIQUEFATTI (GPL) CON CAPACITÀ COMPLESSIVA NON SUPERIORE A 13 m³

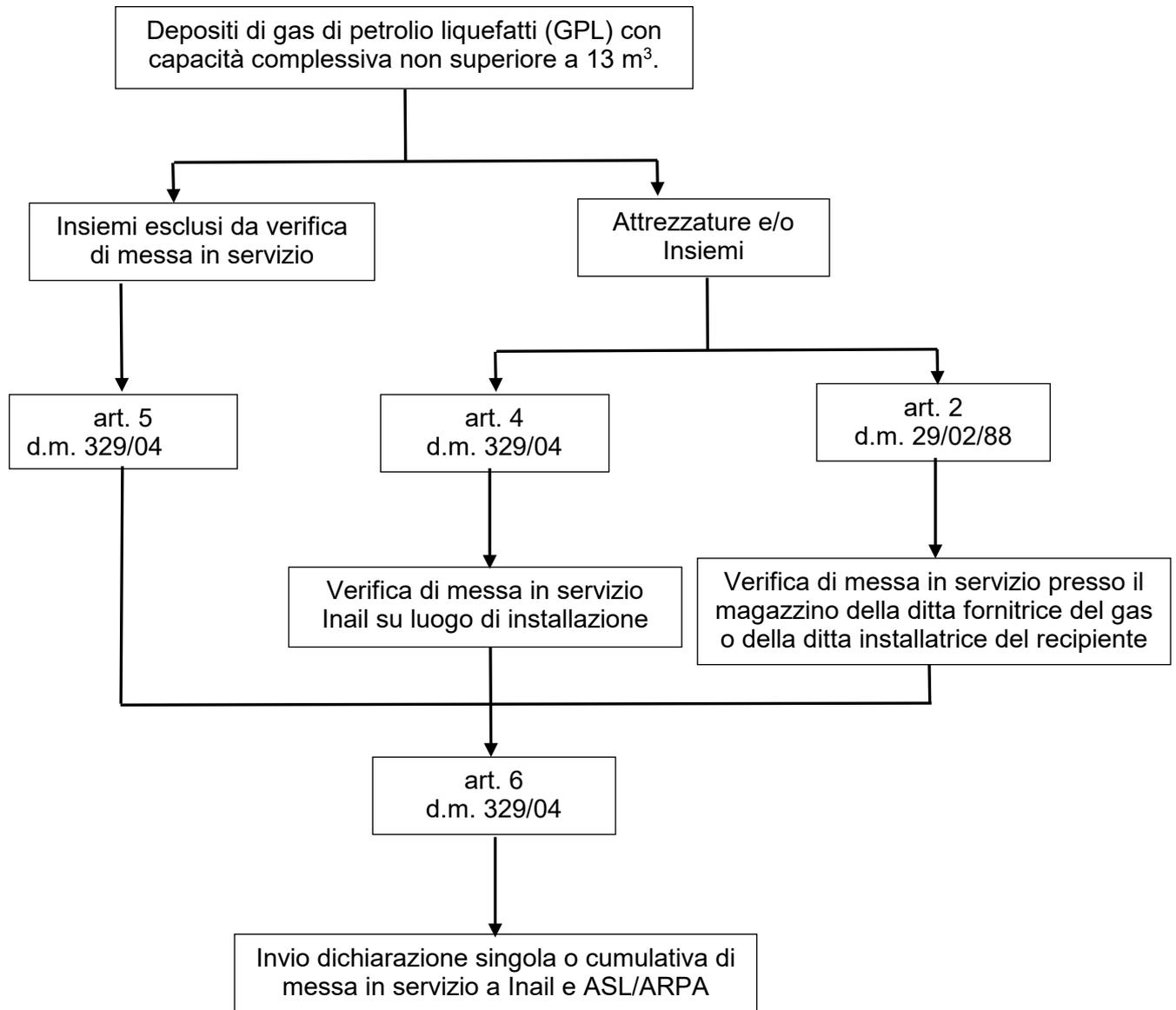


Figura 1. Flusso operativo

1.2 Normativa pregressa al d.m. 329/2004

Antecedentemente al d.m. 329/2004, la materia dei serbatoi di GPL era regolamentata dal d.m. 29/02/88 unitamente a numerose Lettere Circolari di chiarimento emanate da parte dell'ex Ispesl (oggi Inail).

Per quanto di interesse si fa riferimento a quanto previsto dall' art. 2 del d.m. 29/02/88 che indica la possibilità per i recipienti di capacità non superiore a 5 m³ di essere sottoposti alla ispezione generale ed alla verifica di esercizio (denominata *Verifica di primo impianto o di messa in servizio* nel d.m. 329/04) presso il magazzino dell'azienda, anziché presso l'utilizzatore indicandone le relative modalità procedurali ed autorizzative da parte dell'istituto.

Il d.m. 23/09/2004 ha esteso il campo di applicazione del d.m. 29/02/88 ai depositi di gas petrolio liquefatto (GPL) con capacità complessiva non superiore ai 13 m³.

L'art. 3 comma 1 del d.m. 29/02/88 indica altresì la possibilità di derogare dalla verifica periodica di esercizio (di seguito denominata esonero dalla verifica periodica) a condizione che l'azienda si impegni mediante apposita domanda di esonero a:

- a) proteggere gli accessori di sicurezza e di controllo dagli agenti atmosferici;
- b) effettuare in occasione del riempimento e comunque con scadenza non superiore all' anno, il controllo dello stato di conservazione della superficie protettiva esterna del recipiente e della funzionalità degli accessori;
- c) sostituire, almeno ogni 2 anni, le valvole di sicurezza, con altre in possesso del certificato di taratura in corso di validità.

L' art. 3 comma 2 del d.m. 29/02/88 stabilisce che la domanda di esonero dalle verifiche periodiche deve essere sottoscritta oltre che dall'utilizzatore anche dall'azienda.

1.3 Raccordo tra il d.m. 29/02/88 e il d.m. 329/2004

La Lettera Circolare Ispesl 12/05 del 22/07/2005, emanata a seguito dell'entrata in vigore del d.m. 329/2004, ha fornito indicazioni operative alle Uot al fine di raccordare le disposizioni di cui al d.m. 29/02/88 allo stesso d.m. 329/2004.

Si riportano di seguito i principali contenuti di interesse:

- per quanto riguarda il disposto dall' art. 2 del d.m. 29/02/88, la verifica di messa in servizio ai sensi di quanto previsto dall' art. 4 del d.m. 329/04 è da ritenersi obbligatoria soltanto nel caso in cui non si rientri nelle esclusioni previste per gli insiemi di cui all'art. 5 del d.m. 329/2004;
- la verifica di messa in servizio potrà essere effettuata presso il magazzino del fabbricante o dell'azienda o dell'installatore anziché presso l'utilizzatore, alle condizioni previste alle lettere a), b) e c) dell'art. 2 del d.m. 29/02/88;
- l'esonero dalle verifiche periodiche di esercizio di cui all' art. 3 del d.m. 29/02/88 è riferita alle verifiche di funzionamento di cui all' art. 10 comma 2) lettera b del d.m. 329/2004 che hanno periodicità biennale;
- l'esonero dalle verifiche periodiche di esercizio potrà continuare ad essere concesso dall'Inail, alle condizioni indicate all' art. 3 del d.m. 29/02/88, utilizzando i seguenti modelli allegati alla citata Lettera Circolare Inail ex Ispesl 12/05:
 - M.02 Richiesta esonero
 - M.03 Certificato di idoneità per l'esonero
 - M.04 Verbale per sopralluogo

M02

All'INAIL
Settore Ricerca Certificazione Verifica
Unità Operativa Territoriale di

OGGETTO: Richiesta di esonero di cui all'art. 3 del dm 29.02.1988

La sottoscritta ditta _____ con sede a _____

Fornitrice del gas GPL per il recipiente a pressione avente numero di matricola _____

INAIL _____ capacità litri _____

Numero di fabbrica _____ costruttore _____

Preso atto di quanto disposto dal Ministero delle Attività Produttive con nota 14867 del 14.3.05

Preso atto di quanto previsto all'art. 3 del dm 29/02/1988 (G.U. n° 57 del 09/03/1988)

Considerato l'esito positivo dell'esame sulla sussistenza dei requisiti per l'esonero effettuato presso il costruttore da parte della UOT di _____ di cui si allega copia

si impegna a:

- a) **Proteggere gli accessori di sicurezza e di controllo del citato recipiente dagli agenti atmosferici**
- b) Effettuare in occasione del riempimento e comunque con scadenza non superiore all'anno, il controllo dello stato di conservazione della superficie esterna del recipiente e della funzionalità degli accessori; a tale scopo sarà impiegato il metodo del controllo equivalente approvato dall'ISPESL con nota n.p. _____ del _____
(La ditta costruttrice del serbatoio, titolare del suddetto metodo di controllo equivalente, fornirà alla ditta esecutrice idonee istruzioni per l'effettuazione del controllo. A tale scopo il personale della ditta esecutrice parteciperà ad uno specifico corso di addestramento al termine del quale la ditta costruttrice emetterà un certificato nominativo di avvenuta formazione).
- c) Sostituire almeno ogni due anni la valvola di sicurezza con altra preventivamente tarata al banco

Le suddette operazioni saranno annotate su un registro in cui saranno riportati oltre che le date di effettuazione, anche il numero di identificazione della valvola di sicurezza sostituita e la firma del responsabile della ditta esecutrice.

Il recipiente è installato presso la ditta _____

Via _____ località _____

Che dichiara di essere utente del recipiente sopra citato e assieme alla scrivente sottoscrive la presente domanda.

Le ditte sottoscritte chiedono l'esonero dalla prescrizione relativa alla verifica biennale di funzionamento di cui all'art. 10 del dm 1.12.2004 n° 329.

Data _____

Data _____

LA DITTA FORNITRICE DEL GAS

LA DITTA UTENTE

Figura 2. MODULO M02

 Settore Ricerca, Certificazione e Verifica Unità Operativa Territoriale di _____		
A.S.S. n _____	di _____	Prov. _____
Ditta fornitrice del gas o Installatrice del serbatoio		
Ditta Utente del serbatoio		
Matricola Inail:	Capacità in litri:	
Costruttore:	N. di fabbrica	
ESONERO DALLA VERIFICA PERIODICA DI FUNZIONAMENTO Decorrenza*		
<p>Considerato che il Recipiente rientra tra quelli previsti dall'art. 1 del d.m. 29/02/1988,</p> <p>Considerato esaustivo l'avviso espresso dal Ministero delle Attività Produttive, Direzione Generale per lo Sviluppo Produttivo e la Competitività, np. 14867 del 14/03/2005 in merito a quanto previsto dal comma 5 dell'art. 10 d.m. 01/12/2004 N. 329.</p> <p>Considerato l'esito positivo, riportato sull'allegato verbale, dell'esame sulla sussistenza dei requisiti per il rilascio dell'esonero dalla verifica di riqualificazione periodica,</p> <p>Si esprime pertanto VALUTAZIONE POSITIVA</p> <p>Alla concessione dell'esonero dalla prescrizione relativa alla verifica di funzionamento di cui all'art. 10 e alla Tabella dell'Allegato A del d.m. 01/12/2004 N. 329.</p> <p>*L'esonero decorrerà dalla data dell'invio all'Inail della dichiarazione di messa in servizio di cui all'art. 6 del d.m. 01/12/2004 n. 329, alla quale dovrà essere allegata la richiesta di esonero, a firma della ditta fornitrice del gas e dalla ditta utente, relativamente ai contenuti dell'art. 3 del d.m. 29/02/1988; s'intenderà altresì annullato qualora venissero a mutare le condizioni di base alle quali è stato rilasciato; in tal caso l'utente e/o la ditta fornitrice del gas sono tenuti a farne denuncia all'Inail ed alla A.U.S.L. competenti per territorio d'installazione del recipiente, per gli eventuali accertamenti di legge.</p> <p>L'esonero dalla prescrizione relativa alla verifica di funzionamento si riferisce unicamente al recipiente e non al deposito di cui esso fa parte e pertanto non costituisce autorizzazione all'esercizio del deposito stesso, disciplinato dal Decreto del Ministro dell'Interno del 14/05/2004, che ne attribuisce la competenza al Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco.</p> <p>Il presente attestato, completato della richiesta di esonero di cui all'art. 3 del d.m. 29/02/1988, dovrà essere inviato a cura del fornitore del gas al Uot Inail competente per territorio d'installazione del recipiente.</p>		
Data _____	Il funzionario I.N.A.I.L. _____	

Figura 3. Modello M03

M.04

Verbale di sopralluogo di accertamenti per la concessione dell'esonero ai sensi del dm 29/02/88

Verifiche effettuate nel corso del sopralluogo per l'accertamento dei requisiti necessari all'esonero dalle verifiche di funzionamento di cui all'art. 3 del dm 29.02.1988 presso il magazzino della Ditta

1. Individuazione dei dati d'identificazione del recipiente;

ESITO positivo negativo

2. Controllo del certificato di valutazione di conformità, della dichiarazione del costruttore, del manuale d'uso e manutenzione;

ESITO positivo negativo

3. Accertamento della corretta installazione dei dispositivi di sicurezza e controllo;

ESITO positivo negativo

4. Accertamento della coerenza delle istruzioni per l'installazione e il manuale d'uso e manutenzione e il metodo di controllo equivalente;

ESITO positivo negativo

Rilascio del certificato d'idoneità per l'esonero SI NO

IL TECNICO

Figura 4. Modello M04

PROCEDURA ESONERO DALLE VERIFICHE BIENNALI DI FUNZIONAMENTO PER DEPOSITI DI GAS DI PETROLIO LIQUEFATTI (GPL) CON CAPACITÀ COMPLESSIVA NON SUPERIORE A 13 m³.

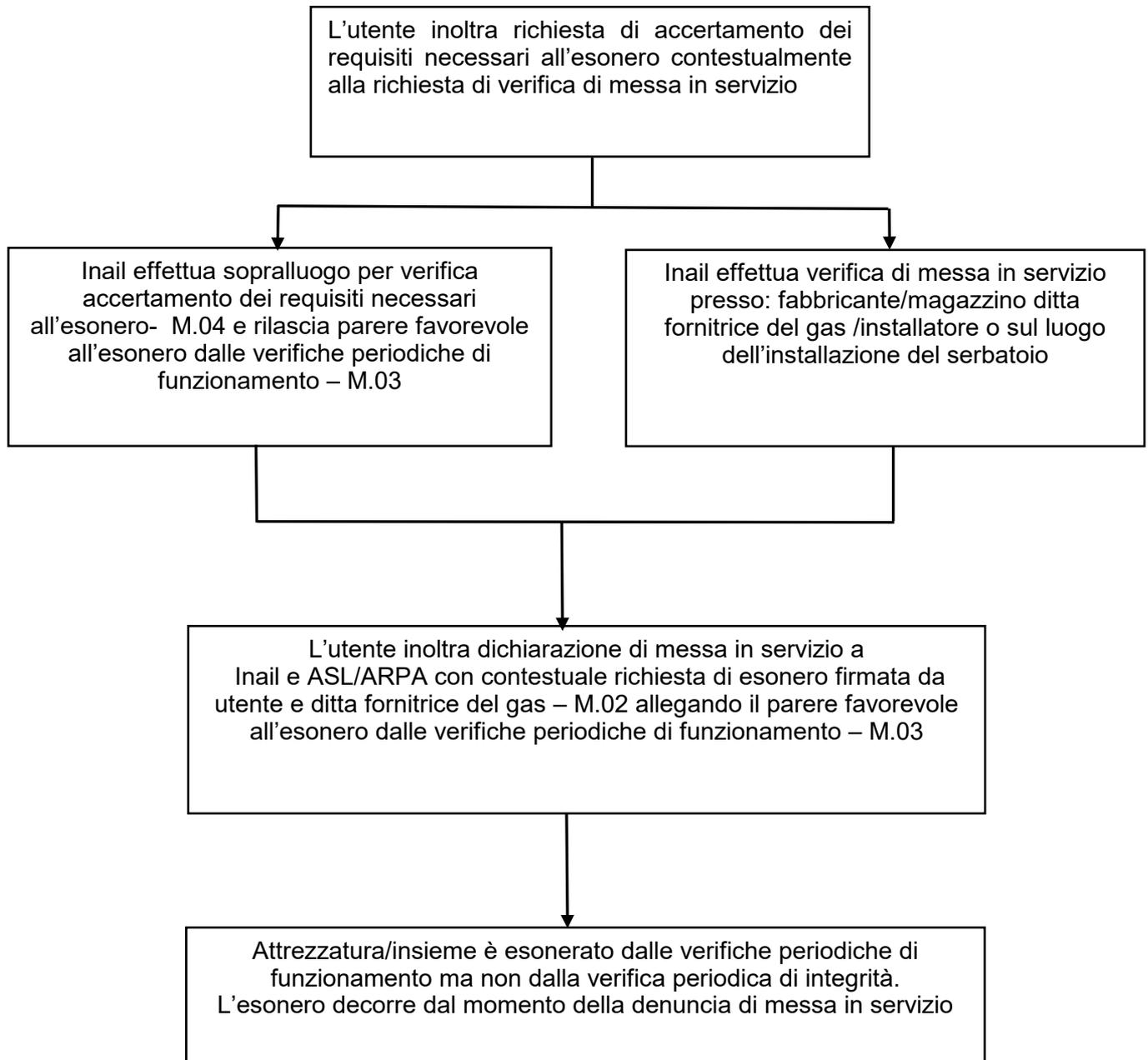


Figura 5. Flusso operativo per l'esonero

2. Iter procedurale

Si riportano di seguito in dettaglio le attività relative alla dichiarazione di messa in servizio cumulativa di serbatoi GPL fino a 13 m³.

2.1 Modalità di presentazione della richiesta da parte dell'utente

La dichiarazione di messa in servizio attualmente può essere presentata dall'utente alla Uot competente per territorio a mano, a mezzo posta ordinaria o raccomandata, a mezzo pec.

2.2 Analisi della richiesta

La Uot competente, dopo la protocollazione della richiesta, effettua la verifica formale della completezza della documentazione che deve essere così composta:

- lettera di trasmissione della documentazione con allegata marca bollo da €. 16,00 o con allegata dichiarazione di annullamento;
- dichiarazione di messa in servizio con elenco delle singole attrezzature contenente almeno i rispettivi valori di pressione, temperatura, capacità e fluido di esercizio;
- relazione tecnica, con lo schema dell'impianto, recante le condizioni d'installazione e di esercizio, le misure di sicurezza, protezione e controllo adottate come da format di cui alla Lettera Inail 002507 del 29/07/2020;
- dichiarazione, redatta ai sensi dell'articolo 46-47 del decreto del Presidente della Repubblica del 28/12/2000, n. 445, attestante che l'installazione è stata eseguita in conformità a quanto indicato nel manuale d'uso;
- verbale della verifica di cui all'articolo 4, ove prescritta;
- limitatamente agli insiemi esclusi dal controllo della messa in servizio, ai sensi dell'articolo 5, l'attestazione che le predette attrezzature o insiemi siano stati debitamente installati, mantenuti in efficienza e utilizzati conformemente alla loro destinazione, non pregiudichino la salute e la sicurezza delle persone o degli animali domestici o la sicurezza dei beni;
- certificato di idoneità per l'esonero dalla verifica periodica di funzionamento rilasciato dall'Uot competente per territorio salvo deroga, ai sensi dell'art.10 comma 5 del d.m. 329/2004, approvata dal Ministero dello Sviluppo Economico;
- dichiarazione di conformità CE per i serbatoi certificati PED/Libretto di omologazione Ispesl per serbatoi non certificati PED;
- indicazione e firma dell'azienda e dell'utente apposte sulla dichiarazione di esonero di cui all'art.3 del d.m. 29/02/1988;

2.2.1 Caso di richiesta completa

L'Uot competente, per la prestazione, predispone una nota da inviare alla azienda a mezzo pec con indicazione degli estremi e modalità di pagamento come da Tariffario Ispesl e in accordo alla Lettera Circolare Ispesl n. 3851 del 28/05/2010.

2.2.2 Caso di richiesta incompleta

L'Uot predispone una nota da inviare all'azienda a mezzo pec con richiesta di integrazione documentale.

2.3 Lavorazione della richiesta da parte della Uot competente

Tale fase si avvia dopo l'avvenuto pagamento da parte dell'azienda

- nel caso i recipienti riportati nell'elenco della richiesta inoltrata dall'azienda dispongano già di matricola assegnata da altra Uot in sede di rilascio di esonero ai sensi dell'art. 3 del Decreto 29/02/1988 dalla verifica periodica di funzionamento si procede come specificato al paragrafo 2.4;
- nel caso i recipienti riportati nell'elenco della richiesta inoltrata dall'azienda non dispongano di matricola, l'Uot procede all'assegnazione della matricola ai singoli recipienti riportati nell'elenco presentato dall'azienda e si procede come specificato al successivo paragrafo.

2.4 Analisi della richiesta da parte della Uot competente

In questa fase l'Uot procede all'esame della documentazione di ogni singola attrezzatura/insieme allegata alla richiesta cumulativa.

2.4.1 richieste di insiemi

- verifica che nella dichiarazione di conformità CE dell'insieme o in documentazione allegata alla stessa, sia presente indicazione in merito all'efficienza degli accessori di sicurezza come indicato dall'art. 5 comma 1 lettera d) del d.m. 329/2004;
- verifica la data di rilascio della dichiarazione di conformità al fine di accertare il rispetto dei termini di riqualificazione periodica indicati dall'art. 10 del d.m. 329/2004 (Verifica di integrità decennale);
- verifica la data di rilascio della dichiarazione di conformità al fine di accertare che il certificato di taratura della valvola di sicurezza sia in corso di validità.

2.4.2 richieste di attrezzature

- verifica che nella documentazione trasmessa sia presente il verbale di verifica di messa in servizio (o ai sensi dell'art. 2 del d.m. 29/02/88);
- verifica la data di rilascio del verbale di verifica di messa in servizio al fine di accertare il rispetto dei termini di riqualificazione periodica indicati dall'art. 10 del d.m. 329/2004 (Verifica di integrità decennale);
- verifica la data di rilascio del verbale di verifica messa in servizio al fine di accertare che il certificato di taratura della valvola di sicurezza sia in corso di validità.

2.5 Redazione del verbale di esito dell'esame della richiesta

2.5.1 Caso di richiesta con informazioni non complete o non congruenti

L'Uot redige un verbale di richiesta di integrazioni secondo quanto previsto all'art.6 punto 1 comma b) del d.m. 329/04 (vedi circolare Ispesl n.15/05 del 6/12/2005 e circolare 01/06 del 16/01/2006), che sarà inviato all'azienda a mezzo pec.

2.5.2 Caso di richiesta completa

L'Uot redige un verbale di ricezione dell'avvenuta dichiarazione di messa in servizio secondo quanto previsto dall'art. 6 del d.m. 329/2004 e secondo quanto indicato dall'art. 3 del d.m. 29/02/88, che sarà inviato all'azienda a mezzo pec.

Con la verifica della completezza e della correttezza della documentazione allegata alla richiesta, eseguita dall'Inail secondo le indicazioni di cui all'art. 6 del d.m. 329/04, l'iter risulta concluso.

3. Conclusioni

Le presenti indicazioni sono frutto di un'accurata analisi delle normative tecniche e delle lettere circolari relative alla dichiarazione di messa in servizio dei serbatoi GPL fino a 13 m³ affiancata all'esperienza maturata negli anni dalle Unità operative territoriali (Uot) dell'Inail in questo settore.

La definizione dell'iter procedurale per la presentazione della richiesta vuole fornire indicazioni utili a tecnici ed aziende utilizzatrici di tali attrezzature per la predisposizione di una documentazione corretta e completa, ai fini della dichiarazione di messa in servizio, secondo l'articolo 6 comma 2) del d.m. 329/2004. Altresì si vuole fornire ai tecnici delle Uot uno strumento di riferimento comune ed uniforme per la fase di esame.

4. Bibliografia

[1] d.m. 29 febbraio 1988 'Norme di sicurezza per la progettazione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 5 m³'

[2] d.lgs. 93/2000 'Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione'

[3] d.m. 23 settembre 2004 'Modifica del decreto 29 febbraio 1988 recante Norme di sicurezza per la progettazione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 5 m³ e adozione dello standard europeo EN 12818 per i serbatoi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva inferiore a 13 m³'

[4] d.m. 329/2004 'Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all' art. 19 del d.lgs. 25/02/2000 n. 93'

[5] Lettera Inail – DC Ricerca – DIT 0025007 del 29/07/2020 'Relazione tecnica allegata alla dichiarazione di messa in servizio di serbatoi a pressione contenenti GPL di capacità inferiore a 13 mc redatta secondo art. 6 del DM 329/2004.'

[6] Lettera Circolare Ispesl n. 12/05 del 22/07/2005

[7] Lettera Circolare Ispesl n.15/05 del 6/12/2005

[8] Lettera Circolare Ispesl n.01/06 del 16/01/2006

[9] Lettera Circolare Ispesl n. 3851 del 28/05/2010

[10] Decreto 7 luglio 2005 Tariffario Ispesl (pubblicato nel supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale n. 125 del 18/07/2005)

Conduzione in sicurezza di un'attività di ispezione interna ad una turbina a gas

R. Iovene¹, R. Vasile¹, E. Di Francescantonio²

¹ Inail – Uot di Pescara

² Edison Spa

Sommario

L'esecuzione delle attività di manutenzione e/o di verifica all'interno di una zona confinata non deve mai prescindere dalla messa in sicurezza dell'area d'intervento; una delle cause più frequenti di incidenti ed infortuni correlati a macchine ed impianti è la riattivazione non intenzionale di fonti di energia.

Oggetto del presente studio è la messa in sicurezza dell'area di lavoro, per l'esecuzione di un'attività di ispezione periodica effettuata all'interno del cabinato di una turbina a gas.

La turbina in oggetto è munita di un sistema di rivelazione che, in caso di incendio, comanda l'attivazione di una scarica di CO₂ all'interno del cabinato. La presenza di personale all'interno del cabinato deve essere quindi garantita da una specifica procedura di sicurezza, volta ad impedire una scarica imprevista di CO₂. La procedura di sicurezza applicata nel caso in esame è del tipo Lockout-Tagout (LOTO) ed è atta a garantire che le sorgenti di energia pericolose, durante le operazioni di manutenzione o di verifica, siano spente e non riavviabili, sino al completamento delle operazioni stesse.

Scopo del lavoro è lo studio della procedura di tipo LOTO, applicata dalla Edison Spa presso la Centrale Termoelettrica di Bussi sul Tirino (PE), finalizzata a combinare le esigenze di sicurezza delle attrezzature con la garanzia di una permanenza sicura nei luoghi di lavoro durante le attività di manutenzione, di ispezione e di verifica.

1. Introduzione

La Centrale termoelettrica di Bussi sul Tirino, oggetto del presente lavoro, è del tipo a ciclo combinato, con una potenza elettrica complessiva di circa 125 MW in assetto cogenerativo. L'energia elettrica prodotta al netto degli autoconsumi è completamente immessa nella rete di trasmissione nazionale. L'impianto è composto da un turbogas (TG) accoppiato ad un alternatore (G1), un generatore di vapore a recupero (GVR) a tre livelli di pressione, una turbina a vapore (TV) accoppiata al suo alternatore (G2), ed un condensatore ad acqua. Il TG è dotato di bruciatori "water injection": questa tecnologia viene utilizzata per la riduzione degli ossidi di azoto NO_x e consente di controllare la temperatura di fiamma mediante l'iniezione di acqua demineralizzata prelevata dal serbatoio dell'acqua demineralizzata e immessa con pompe dedicate nel bruciatore della turbina a gas. La turbina a gas, inoltre, è dotata di un sistema di inter-refrigerazione dell'aria. Tale sistema è costituito da un apposito scambiatore acqua/aria. L'acqua utilizzata dall'inter-refrigerazione viene prelevata e successivamente restituita al fiume Tirino, che scorre nelle vicinanze. I gas prodotti dalla combustione del gas naturale nel TG vengono convogliati attraverso un condotto al generatore di vapore a recupero. Il vapore prodotto nelle tre sezioni di alta, media e bassa pressione (AP, MP, BP) del GVR viene inviato nella turbina a vapore (TV). La condensazione del vapore di scarico della turbina a vapore è ottenuta tramite un condensatore ad acqua derivata dalla condotta forzata che convoglia le acque del fiume Tirino. Le diverse sezioni che compongono la centrale, ognuna con specifiche apparecchiature, durante le attività di manutenzione possono essere potenziali cause di danni.

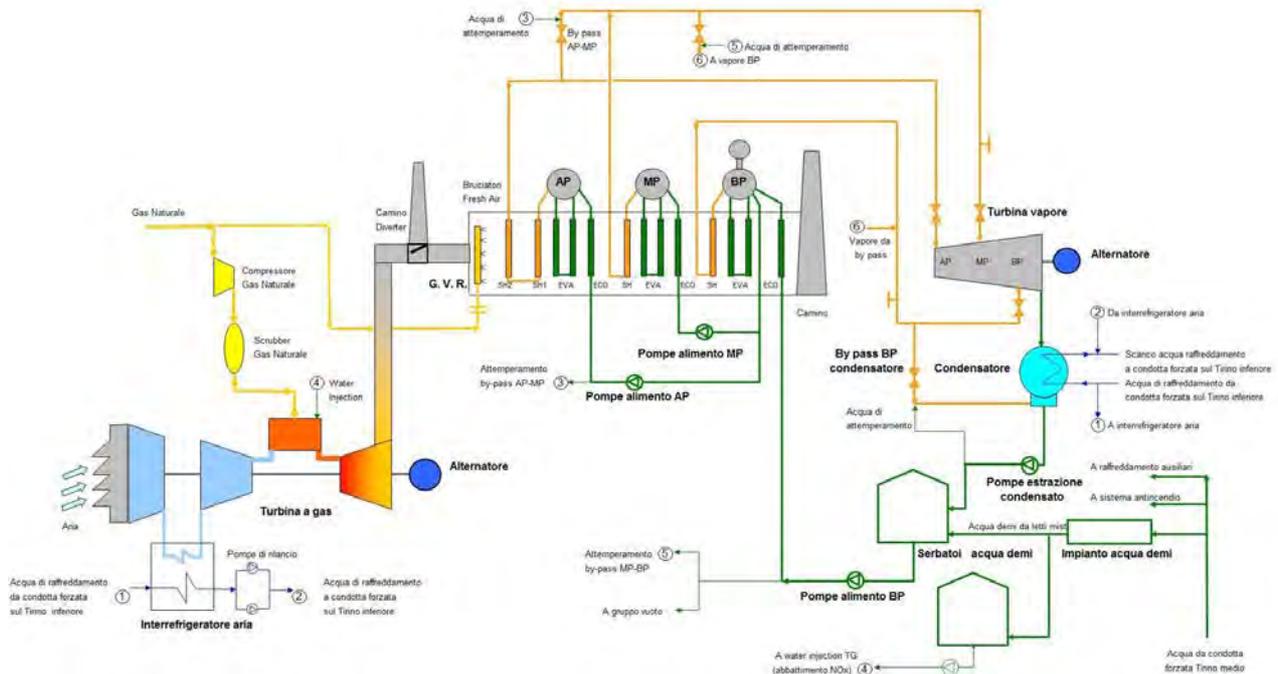


Figura 1. Schema della centrale termoelettrica Edison Spa di Bussi sul Tirino (PE)

2. Descrizione del sistema di protezione antincendio TG e ausiliari

La turbina LMS100, installata presso la centrale termoelettrica di Bussi sul Tirino (PE), è una turbina a gas con sistema di refrigerazione intermedio per la power generation. Si tratta di un design unico che combina componenti di turbine per usi industriali e motori aeroderivati in una sola macchina. L'unità è costituita da una serie di compressori e turbine che funzionano in congiunto per attivare un singolo generatore da 100 MW.

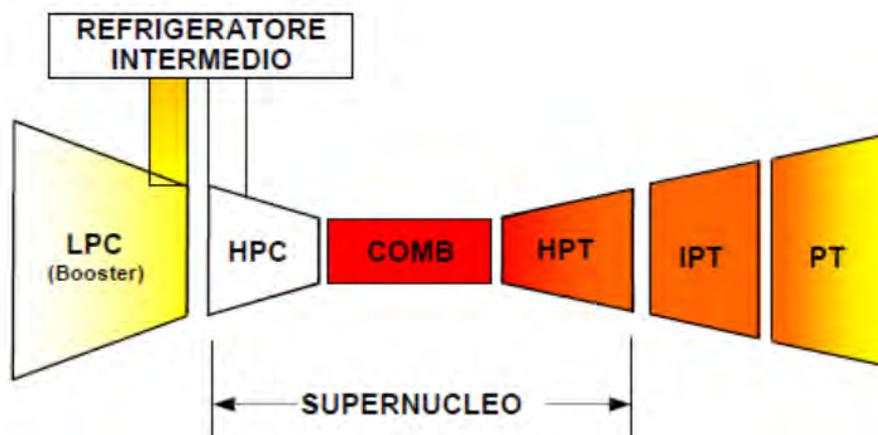


Figura 2. Schema della turbina a gas LMS100

La turbina a gas è alloggiata in un cabinato diviso in tre sezioni: cabinato turbina, cabinato ausiliari e cabinato alternatore. La turbina è dotata di un proprio sistema di sicurezza e protezione in caso di anomalie di funzionamento e/o incendio. Gli strumenti di protezione installati nei tre cabinati sono comandati da differenti pannelli di controllo del sistema antincendio: il cabinato turbina è gestito dal pannello di controllo DET-TRONICS, invece il cabinato ausiliari e il cabinato alternatore sono gestiti ciascuno da un sistema HONEYWELL AM 6000. Nel caso in cui i rilevatori d'incendio, costituiti da sensori termici

posti all'interno dei tre cabinati, rilevino un'anomalia, si ha l'intervento tempestivo del sistema di protezione antincendio relativo al cabinato interessato. Il sistema provvede immediatamente alla chiusura di tutte le serrande di presa d'aria, all'arresto degli estrattori d'aria, all'azionamento del blocco di emergenza del TG, con conseguente chiusura della valvola di blocco gas e apertura del vent con scarico in atmosfera. L'operazione di chiusura delle serrande è comandata automaticamente dal sistema di rilevazione antincendio dello specifico cabinato, tramite una serie di elettrovalvole poste sulla linea aria strumenti. Inoltre, il pannello di controllo relativo attiva il sistema di allarme ottico e acustico e, al fine di contrastare l'eventuale incendio, aziona lo specifico sistema antincendio presente nel cabinato, costituito da una scarica immediata di gas estinguente CO₂ per il cabinato turbina e per il cabinato ausiliari e da un sistema ad acqua frazionata per il cabinato alternatore. Nel dettaglio, l'impianto di estinzione incendi è costituito per il cabinato turbina da n.ro 20 bombole di CO₂ da 81,8 kg cadauna e per il cabinato ausiliari da n.ro 10 bombole di CO₂ da 76,3 Kg cadauna.

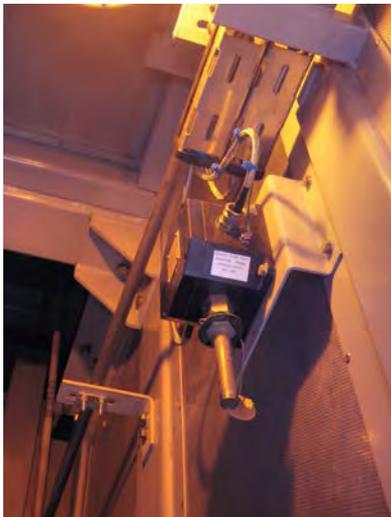
Figura 3. Box bombole CO₂Figura 4. Bombole CO₂

Figura 5. Sensore termico

Figura 6. Punto di emissione estinguente CO₂

In caso di esecuzione di interventi di manutenzione e/o ispezione sulla turbina è necessario l'accesso di personale all'interno dei cabinati, con conseguente rischio derivante dall'esecuzione di attività lavorative all'interno di uno spazio confinato. Si rende quindi indispensabile la messa in sicurezza dell'area di lavoro, prima dell'accesso del personale, dagli stessi dispositivi di sicurezza e protezione della turbina, che, come sopra descritto, hanno un funzionamento automatico. Infatti, in caso di intervento dei sistemi di

sicurezza, ci sarebbe l'attivazione automatica di una scarica tempestiva di gas estinguente CO₂, che investirebbe il personale all'interno dei cabinati turbina e ausiliari. La presenza in sicurezza di personale all'interno dei suddetti cabinati viene quindi gestita da una specifica procedura volta ad impedire una scarica imprevista di CO₂. La procedura di sicurezza applicata nel caso in esame è del tipo Lockout-Tagout (LOTO) ed è atta a garantire che le sorgenti di energia pericolose, durante le operazioni di manutenzione e/o di ispezione e verifica, siano spente e non riavviabili, sino al completamento delle operazioni stesse.

3. Procedure di sicurezza Lockout/Tagout (LOTO)

Le procedure di lockout/tagout sono la metodologia più diffusa per effettuare l'isolamento sicuro delle fonti di alimentazione delle macchine e permettono di elevare il livello di sicurezza nella manutenzione, ordinaria e straordinaria, mediante il controllo delle energie pericolose. La procedura LOTO è applicabile in tutte quelle situazioni in cui vi è un rischio di avvio inatteso di una macchina/attrezzatura di processo, e prevede pertanto che le potenziali fonti di energia pericolosa siano identificate, bloccate e contrassegnate prima dell'inizio dell'attività lavorativa e fino alla conclusione della stessa. Il requisito essenziale di sicurezza e di tutela della salute 1.6.3 della direttiva macchine 2006/42/CE richiede infatti che tutte le fonti di alimentazione di energia di cui è dotata una macchina siano isolabili, in modo da poter eseguire interventi in condizioni di sicurezza. Anche la norma ANSI/ASSP Z244.1 ed il regolamento OSHA 29 CFR 1910.147 stabiliscono i requisiti minimi per il controllo delle energie pericolose. Esse richiedono che i datori di lavoro sviluppino ed attuino programmi e procedure di lockout/tagout applicabili alle macchine ed attrezzature.

Lockout/Tagout è una procedura definita dalla norma ANSI/ASSP Z244.1:

- Lockout: *Posizionamento di un lucchetto in corrispondenza della posizione OFF di un dispositivo di isolamento di una qualsiasi fonte energetica;*
- Tagout: *Posizionamento di un cartello in corrispondenza del lucchetto usato per il lockout, riportante il nominativo dell'operatore autorizzato.*

Le procedure di lockout/tagout richiedono che la messa in sicurezza di una macchina o di un impianto avvenga secondo una sequenza predefinita che prevede il "lucchettaggio" e l'apposizione di etichettatura, e definiscono le modalità operative per:

- individuare le fonti di energia presenti che possono costituire un pericolo per le persone;
- determinare i dispositivi per effettuare il sezionamento di queste fonti di energia;
- bloccare i dispositivi di sezionamento in modo che l'energia non possa essere ripristinata inaspettatamente;
- identificare eventuale energia potenziale accumulata e definire le modalità per il loro contenimento o rilascio sicuro;
- definire i procedimenti per accertarsi dell'effettiva assenza di energie che possono essere rilasciate.

4. Procedura di sicurezza applicata nella centrale Edison di Bussi sul Tirino

La procedura di sicurezza del tipo LOTO applicata dalla Edison nella centrale Edison di Bussi sul Tirino, nel seguito descritta, ha come scopo quello di garantire una permanenza sicura del personale all'interno dei cabinati del TG. La procedura assicura infatti che le porte di accesso allo skid turbina e/o ausiliari del TG si possano aprire solo con la valvola manuale di intercetto gas estinguente in posizione di chiusura, al fine di evitare l'avvio di una scarica inattesa di CO₂ in caso di rilevamento di anomalie all'interno dei locali da parte del sistema di rilevazione incendio.

Figura 7. Valvola di intercetto CO₂Figura 8. Chiusura della valvola di intercetto CO₂

Nel caso di necessità di intervento nei cabinati turbina e ausiliari del TG, il personale interessato, debitamente e preventivamente formato, mette in atto la procedura interna, che prevede l'esclusione del sistema antincendio e può essere attivata unicamente dal capoturno. La procedura, che si articola come nel seguito descritto, inizia con l'emissione di un idoneo permesso di lavoro, che prevede anche di informare ditte terze eventualmente presenti durante lo svolgimento delle operazioni.

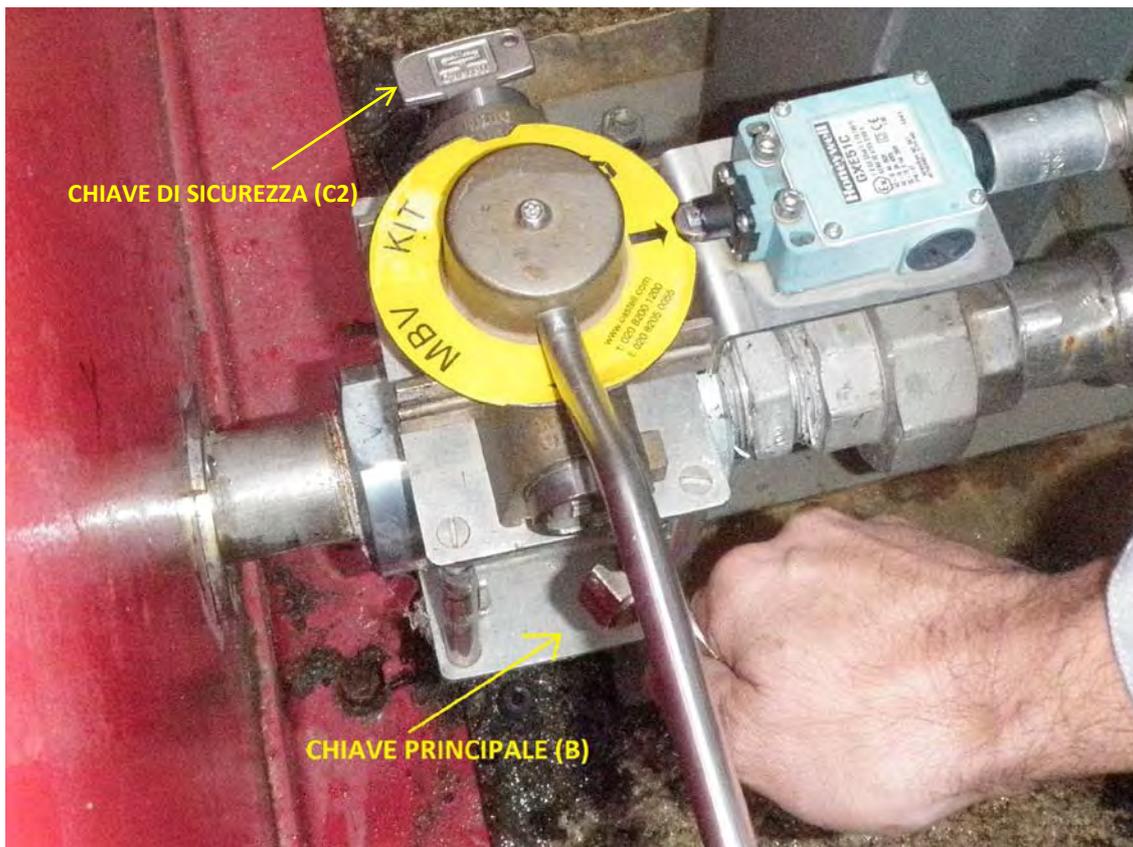
Esclusivamente a seguito dell'emissione di idoneo permesso di lavoro, è possibile prelevare dall'apposita cassetta, posta in sala di controllo, e unicamente da parte del personale Edison di Centrale, la chiave di sicurezza (C2) necessaria alla manovra di chiusura della valvola di intercettazione gas estinguente, che è interbloccata meccanicamente (lockout) ed è posizionata all'esterno del box bombole CO₂, sulla tubazione di collegamento ai locali TG e ausiliari TG. La posizione della valvola è monitorata da uno switch che trasmette l'informazione della avvenuta chiusura al sistema informatico di controllo (tagout).



Figura 9. Chiave di sicurezza



Figura 10. Prelievo della chiave di sicurezza

Figura 11. Chiusura valvola di intercettazione CO₂

Solo a seguito della chiusura della valvola di intercetto estinguente è possibile estrarre la chiave principale (B) (Figura 11) che, a sua volta, permette di estrarre le chiavi per

l'apertura delle porte di accesso al cabinato TG, ubicate nella rastrelliera chiavi posizionata all'interno del box bombole.

Prelevata la chiave dalla rastrelliera è possibile procedere all'apertura della relativa porta di accesso al cabinato TG, ed entrare in sicurezza nel locale, senza il rischio per gli operatori di essere investiti dalla scarica di estinguente, grazie alla garanzia di chiusura della valvola di intercetto della CO₂. Si evidenzia che il sistema di chiusura della porta del cabinato TG è provvisto di una doppia serratura di sicurezza, di cui una ove viene inserita la chiave estratta dalla rastrelliera e l'altra dove è presente una chiave sempre inserita e collegata alla porta da una catenella, per procedere all'apertura della porta è necessario agire su entrambe le chiavi.



Figura12. Rastrelliera chiavi



Figura13. Inserimento della chiave (B)



Figura14. Estrazione di una chiave della porta TG

Tutte le attività sopra descritte sono seguite da remoto tramite DCS dalla sala controllo, dove l'operatore verifica in tempo reale lo stato della valvola manuale di intercetto gas CO₂ e delle porte di accesso ai cabinati della turbina.



Figura 15. Accesso al locale TG



Figura 16. Sala controllo DCS

Al termine dei lavori, ed esclusivamente a seguito della chiusura del permesso di lavoro, si potrà procedere a riposizionare in apertura la valvola di intercettazione del gas estinguente eseguendo tutte le operazioni sopra descritte a ritroso, a garanzia di un corretto ripristino dell'impianto di estinzione incendi.

Il ritorno nella posizione originaria del finecorsa sulla valvola di intercetto del gas estinguente rimuove lo stato di inibizione dell'impianto, con conseguente reset del messaggio "sistema antincendio inibito" a DCS, in modo tale da dare evidenza, anche all'operatore da remoto, del completo e corretto ripristino dell'impianto.

Si riporta di seguito la procedura di tipo LOTO, adottata in centrale, descritta step by step:

Apertura porte di accesso al cabinato TG.

Condizione di partenza:

Valvola di intercetto scarica CO₂ aperta

Le serrature comandate dalle n. 9 chiavi porte (B1...B9) sono posizionate in chiusura

Le n. 9 chiavi di sblocco (B1...B9) sono inserite nella rastrelliera presso il box bombole

La chiave principale (B) è inserita nell'apposita sede locata a lato della valvola di intercetto di scarica CO₂

La chiave di sicurezza (C2) è conservata in sala controllo

Azioni per aprire le porte del cabinato principale della turbina a gas:

Prelevare la chiave di sicurezza (C2) dall'apposita cassetta in sala controllo

Inserire la chiave di sicurezza (C2) nell'apposita sede a lato della valvola di intercetto di scarica CO₂

Chiudere la valvola di intercetto scarica CO₂

Liberare la chiave principale (B)

Inserire la chiave principale (B) nella rastrelliera presso il box bombole

Liberare le chiavi di sblocco (B1..B9)

Inserire le chiavi di sblocco (B1...B9) nelle serrature delle porte interessate ed aprire agendo su entrambe le chiavi della doppia serratura

Procedura inversa a termine lavori. Apertura valvola intercettazione scarica cabinato TG.

Condizione di partenza:

Valvola di intercetto scarica CO₂ chiusa

Una o più serrature comandate dalle n. 9 chiavi di sblocco (B1...B9) sono posizionate in apertura

La chiave principale (B) è inserita nell'apposita rastrelliera presso il box bombole

La chiave di sicurezza (C2) è inserita nell'apposita sede locata a lato della valvola di intercetto scarica CO₂

Azioni per apertura valvola intercetto scarica:

Chiudere tutte le serrature delle porte con le relative chiavi di sblocco (B1...B9) agendo su entrambe le chiavi presenti nella doppia serratura

Liberare tutte le chiavi di sblocco (B1...B9)

Posizionare le chiavi sblocco nella rastrelliera presso il box bombole

Estrarre la chiave principale (B) dalla rastrelliera presso il box bombole

Inserire la chiave principale (B) nell'apposita sede locata a lato della valvola di intercetto scarica CO₂

Aprire la valvola intercetto scarica CO₂

Liberare e riporre la chiave di sicurezza (C2) nella apposita cassetta in sala controllo

5. Formazione ed addestramento del personale

La Edison per la Centrale termoelettrica di Bussi sul Tirino effettua annualmente la formazione e l'addestramento di tutto il personale sulle procedure antincendio, nell'ambito di tali attività viene svolta una formazione specifica per l'attuazione della procedura di sicurezza descritta nei precedenti paragrafi. La formazione e addestramento sulla procedura di sicurezza di tipo lockout/tagout viene condotta al fine di assicurare che il personale svolga correttamente tutte le operazioni necessarie alla messa fuori servizio dell'impianto di estinzione incendi, prima dell'inizio degli interventi nel cabinato TG. Tutte le attività di formazione/addestramento sopra descritte vengono regolarmente registrate.

6. Conclusioni

La necessità di eseguire lavori di manutenzione, di ispezione e di verifica sulla turbina a gas a servizio della centrale termoelettrica della Edison Spa, ubicata nel comune di Bussi sul Tirino (PE), ha posto all'attenzione dell'azienda l'esigenza di garantire la sicurezza del personale impiegato nelle attività che devono essere svolte nella zona confinata del cabinato del TG. La presenza di impianti di protezione antincendio ad inserimento automatico rende infatti tali luoghi pericolosi per il personale presente al loro interno, a causa della possibilità di scariche inattese di gas estinguente CO₂. L'azienda ha pertanto provveduto alla redazione di una specifica procedura di sicurezza del tipo LOTO, atta a prevenire i rischi connessi all'intervento del sistema di estinzione incendi, basata su un sistema di interblocchi che permette di aprire le porte dei cabinati TG esclusivamente a seguito della chiusura della valvola di intercettazione del sistema estinguente. Si evidenzia infine l'importanza di una adeguata formazione ed addestramento del personale, che risultano fondamentali per una corretta applicazione della procedura di sicurezza descritta.

7. Bibliografia

[1] Direttiva Macchine 2006/42/CE

[2] Norma ANSI/ASSP Z244.1 – 2016 – The Control of Hazardous Energy Lockout, Tagout and Alternative Method

[3] Regolamento OSHA 29 CFR 1910.147 - The Control of Hazardous Energy

[4] Edison SpA - Centrale di Bussi – Procedura operativa PGS0007GT “Gestione accessi locali protetti da CO₂” - Rev. 0001 del 16/07/2014

[5] Edison SpA - Centrale di Bussi – Procedura operativa POS0087BU “Verifiche periodiche antincendio” - Rev. 0004 del 07/08/2014

[6] Edison SpA - Centrale di Bussi – Procedura operativa PRO-002-EDIS-99 “Permessi di Lavoro” - Rev. 4 del 20/12/2011

Revamping di una centrale di potenza in accordo allo standard EN 12952-7

E. Becherini, C. Mazzei, M. Ghisti, M. Lombardi, M. Gatto
Ener Consulting S.r.l.

Sommario

Negli ultimi anni, la gestione della sicurezza degli impianti si è orientata in modo preponderante verso l'impiego di sistemi strumentati di sicurezza (SIS) in grado di ridurre efficacemente i pericoli, anche gravi, e quindi il rischio, con sistemi ad affidabilità dimostrabile e quantificabile. Questa soluzione trova o dovrebbe trovare impiego in moltissime tipologie di insiemi PED, tra cui anche i generatori di vapore a recupero presenti nelle centrali di potenza. L'articolo si propone quindi di evidenziare l'implementazione della Sicurezza Funzionale in tale ambito in compliance alla Direttiva 2014/68/UE- PED.

La norma armonizzata alla PED che definisce i requisiti di progettazione dei sistemi di sicurezza strumentati delle caldaie a tubi d'acqua è la EN 12952-7 che richiama come obbligatoria anche la norma EN 50156-1 relativa ai requisiti per la progettazione ed installazione dell'equipaggiamento elettrico per forni ed apparecchiature ausiliarie.

L'articolo, ricalca i passaggi che sono stati effettivamente seguiti durante il lavoro che è stato eseguito:

1. Individuazione delle SIF (Safety Instrumented Functions) richieste nel caso in esame (Limiter), tramite i dettami della norma armonizzata alla Direttiva PED, EN 12952-7;
2. Calibrazione della matrice di rischio per l'allocazione SIL sulla base dello specifico progetto;
3. Allocazione SIL delle SIF, tramite la norma EN 50156-1;
4. Validazione del SIS, procedendo al calcolo del PFD (Probability of Failure on Demand) delle intere catene di sicurezza, con particolare attenzione agli effetti, su tale parametro, di un non perfect proof test;
5. Predisposizione di un piano di test del SIS, al fine di assicurare il mantenimento dell'affidabilità della catena nel tempo.

1 Introduzione

Come noto, una Safety Instrumented Function (SIF) è una funzione realizzata tramite l'impiego di un sensore (o un set di questi), un logic solver ed attuatori (elemento finale) atti a agire su una singola funzione per proteggere il sistema contro i rischi (che devono essere precedentemente identificati), portando in uno stato sicuro il sistema da proteggere.



Figura 1. Struttura di una SIF

Lo standard EN 12952-7 interviene in ausilio ai progettisti nella fase di individuazione dei rischi e quindi delle SIF, come alternativa all'utilizzo di metodologie consolidate quali ad esempio l'HazOp.

Riassumendo il vantaggio dell'uso della EN 12952-7 è triplice:

- L'uso sistematico dello standard armonizzato costituisce presunzione di conformità alla Direttiva PED.
- Risparmio in termini di tempo e risorse;
- Omogeneità e ripetibilità nell'individuazione e nella scelta delle funzioni di sicurezza (SIFs) e nella loro progettazione, per tutte le apparecchiature che rientrano nell'ambito di applicazione dello standard;

2 Individuazione e definizione delle SIF

La EN 12952-7 qualifica come "limiter" i sistemi di sicurezza strumentati. Una tipologia di limiter da considerare nella progettazione dei sistemi di controllo dei generatori di vapore è il bassissimo livello dei corpi cilindrici superiori. Una deviazione negativa di tale valore (mancanza d'acqua), come noto è una delle condizioni più pericolose per un generatore (per esempio per una esposizione dei tubi ai fumi caldi in mancanza di acqua e relativo surriscaldamento e possibile scoppio degli stessi).[4]. Secondo il paragrafo 5.5.1 della suddetta norma tale limiter deve agire interrompendo tutte le fonti di alimentazioni del combustibile: nella fattispecie si ricorda che, trattandosi di centrale termoelettrica in cogenerazione, i fumi di caldaia sono prodotti da delle turbine a gas.

La SIF in esame è stata così definita: esistendo tre livelli di stati con voting 2oo3, allorché due di questi rilevano un valore del livello del corpo cilindrico inferiore alla soglia stabilita, dopo un ritardo di 5s, viene inviato un segnale al risolutore logico. Quest'ultimo, invia un segnale al logic solver di sicurezza delle turbine a gas.

Il controller di sicurezza delle Turbine elabora questo segnale (configurazione 2oo3) e comanda le seguenti azioni contemporanee a carico delle turbo Gas stesse:

- Chiusura della valvola di intercettazione ausiliaria gas combustibile agendo sulla relativa solenoide;
- Chiusura della valvola di sicurezza gas combustibile agendo sulla relativa solenoide.

Di seguito è riportata l'architettura della SIF oggetto dello studio.

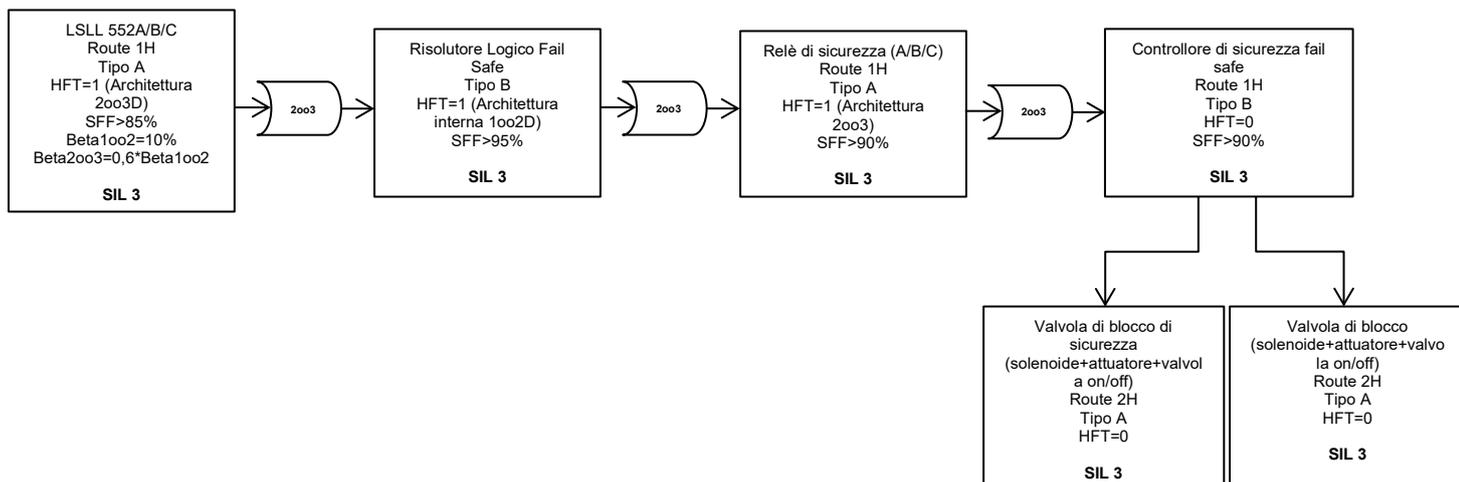


Figura 2. Struttura logica della SIF

3 Calibrazione della matrice di rischio e del grafo di rischio

Due sono i metodi più utilizzati per l'allocazione dei livelli di integrità di sicurezza alle varie funzioni di sicurezza:

- Matrice di rischio con metodologia Alarp;
- Risk graph (grafo del rischio).

Gli standard sulla sicurezza funzionale ad ampio spettro quali la EN 61508 e la EN 61511 descrivono in maniera dettagliata entrambe le metodologie, lasciando ai progettisti o comunque definendo contrattualmente con i clienti, la possibilità di scegliere l'uno o l'altro. Lo standard EN 50156-1, invece contempla solamente l'utilizzo del risk graph, che è comunque lo strumento più largamente utilizzato in tutte le industrie di processo.

Di seguito, solo a titolo di completezza, vengono descritte entrambe le metodologie, mostrandone pro e contro, anche se anticipiamo già che nel nostro caso abbiamo usato la metodologia Risk Graph.

3.1 Matrice di rischio con metodologia ALARP

La matrice di rischio si basa sul principio ALARP, secondo il quale, ogni rischio deve essere ridotto almeno ad un livello tanto basso quanto ragionevolmente praticabile: sopra un certo livello il rischio, questo è considerato intollerabile e non può essere giustificato in circostanze ordinarie.

Al di sotto si trova la regione di tollerabilità, nella quale un'attività è permessa a patto che il rischio associato sia stato ridotto ad un livello basso ragionevolmente prevedibile.

Nella regione inferiore, invece, il rischio è considerato come insignificante e non sono richieste azioni di mitigazione.

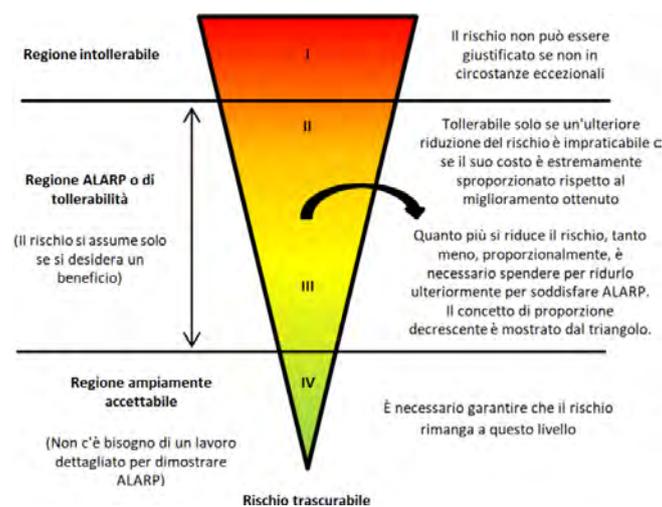


Figura 3. Metodologia ALARP

Secondo la IEC 61508-5 sono definite le seguenti classi di rischio:

- Classe di rischio I: regione Intollerabile;
- Classe di rischio II: Indesiderabile (tollerabile solo se la riduzione del rischio non è praticabile o i costi sono enormemente sproporzionati rispetto ai benefici (regione ALARP));
- Classe di rischio III: Tollerabile se il costo della riduzione del rischio potrebbe eccedere i benefici (regione ALARP);
- Classe di rischio IV: regione Accettabile.

Identificate le classi di rischio tramite la metodologia ALARP, si va a costruire la matrice di rischio. I parametri che intervengono nella matrice di rischio, sono i seguenti:

- Severità delle conseguenze;
- Frequenza di accadimento.

I valori indicati nei vari standard utilizzati sono, generici, anche se largamente utilizzati.

Ogni progetto specifico ha quindi, le proprie caratteristiche in termini di applicazione, luogo di installazione, frequenza di utilizzo e parametri di processo perciò è opportuno provvedere la calibrazione della matrice di rischio e quindi dei vari parametri che la compongono, sulla base delle informazioni ricevute dal fabbricante ed utilizzatore.

Per il progetto specifico, ad esempio, il generatore di vapore è a conduzione continua con un operatore abilitato alla conduzione, sempre presente in sala controllo. Considerando le indicazioni del fabbricante, la seguente calibrazione dei parametri di severità e frequenza è stata proposta e seguita dopo unanime approvazione.

Severità:	
Ferite lievi	1
Ferite severe o un morto	2
Diversi morti	3
Catastrofico	4

Tabella 1. Calibrazione parametro Severità

Frequenza di accadimento:	
Inverosimile durante la vita del sistema: $<10^{-4}$ (volte/anno)	1
Non più di una volta nel tempo di vita del sistema: $10^{-4} - 10^{-2}$ (volte/anno)	2
Alcune volte durante il tempo di vita del sistema: $10^{-2} - 10^{-1}$ (volte/anno)	3
Più di una volta all'anno: >1 (volte/anno)	4

Tabella 2. Calibrazione parametro Frequenza

La combinazione di questi due parametri porta alle classi del rischio, per il progetto in oggetto, secondo la seguente matrice:

		Severità:			
		1	2	3	4
Frequenza	4	II	II	I	I
	3	III	II	I	I
	2	IV	III	II	I
	1	IV	III	II	I

Tabella 3. Matrice di rischio del progetto

I numeri romani nella matrice rappresentano le Classi di Rischio evinte dalla piramide Alarp. Per le Classi di Rischio I e II, il rischio non è accettabile ed una SIF (Limiter) dovrà essere prevista ed allocata SIL. Per la Classe di Rischio III dovranno essere fornite indicazioni per l'operatore del Sistema sotto forma di istruzioni e procedure. Per la Classe di Rischio IV nessuna azione di mitigazione è richiesta.

Una volta definita la matrice di rischio per la classificazione del rischio, occorre derivare una matrice, al fine di poterla utilizzare per ottenere un livello quantitativo di integrità della sicurezza (SIL) da assegnare alle varie SIFs (Limiters. Anche tale matrice andrà calibrata.

Il valore numerico da assegnare ad ogni livello SIL, si riferisce a quelli riportati nello standard generico EN 61508-1:

Safety Integrity Level (SIL)	Probabilità di fallimento su richiesta (PFD)	Probabilità di fallimento oraria (PFH)	RISK Reduction Factor (RRF)
4	$10^{-5} \leq \text{PFD} < 10^{-4}$	$\text{PFH} < 10^{-8}$	$10000 < \text{RRF} \leq 100000$
3	$10^{-4} \leq \text{PFD} < 10^{-3}$	$10^{-8} \leq \text{PFH} < 10^{-7}$	$1000 < \text{RRF} \leq 10000$
2	$10^{-3} \leq \text{PFD} < 10^{-2}$	$10^{-7} \leq \text{PFH} < 10^{-6}$	$100 < \text{RRF} \leq 1000$
1	$10^{-2} \leq \text{PFD} < 10^{-1}$	$10^{-6} \leq \text{PFH} < 10^{-5}$	$10 < \text{RRF} \leq 100$

Tabella 4. Livelli SIL

Nell'ambito della nostra applicazione, le funzioni di sicurezza possono essere considerate con applicazione in bassa domanda (richiesta della funzione inferiore ad 1 volta all'anno, in accordo alle definizioni della EN 61508), per cui il parametro al quale fare riferimento è la probabilità di fallimenti della funzione su richiesta (PFD).

La calibrazione della matrice per ottenere i livelli SIL, è condotta sulla base di requisiti legali e regolamenti, linee guida da autorità locali, indicazioni da parte dell'industria, etc.

In caso non vengano fornite indicazioni, si procede considerando che normalmente la probabilità che una persona muoia entro un anno per cause naturali sia di $10^{-2}/y$ ed oscilla con l'aumentare dell'età fino ad un valore massimo di $10^{-4}/y$. Quindi, considerando che, i pericoli causati da attrezzature tecniche devono essere inferiori ai rischi esistenti in natura, la probabilità "p" per una persona di morire a causa di un guasto di un'installazione deve essere inferiore a $10^{-4}/y$.

Normalmente si assume $10^{-5}/y$ considerando un fattore di sicurezza 10 per i lavoratori. Per l'applicazione specifica del nostro lavoro è stato scelto un livello di rischio target pari $R_t = 10^{-5}/y$.

Considerando i parametri precedenti, la seguente matrice del rischio è stata utilizzata per il caso di studio in oggetto.

Conseguenze		Frequenza di accadimento			
		Quasi impossibile ($0,0001 \leq F < 0,001$)	Improbabile ($0,001 \leq F < 0,01$)	Probabile ($0,01 \leq F < 1$)	Frequente ($F > 1$)
		4	3	2	1
Ferite lievi ($S < 10^{-4}$)	1	NO SIL	NO SIL	NO SIL	SIL 1
Ferite severe o 1 morto ($S > 10^{-2}$)	2	SIL 1	SIL 1	SIL 2	SIL 3
Diversi morti ($S > 10^{-1}$)	3	SIL 2	SIL 2	SIL 3	NR
Catastrofe ($S > 1$)	4	SIL 3	SIL 3	NR	NR

Tabella 5. Matrice del rischio calibrata

NR = una sola SIF non è sufficiente per raggiungere il rischio target.

Impiegando questa metodologia, considerando che l'evento oggetto di studio si può considerare di frequenza "2" e con conseguenze di livello "2", si conclude che la SIF di bassissimo livello esaminata giunge ad un SIL Target 2.

3.2 Grafo di rischio

Lo standard EN 50156-1 che, si ricorda essere quello che indirettamente richiede la EN 12952/7, invece propone come unica metodologia, quella del grafo di rischio.

Il grafo di rischio si basa sul principio che il rischio è proporzionale alla conseguenza e alla frequenza dell'evento pericoloso. Si parte dal presupposto che non esistano sistemi strumentati di sicurezza, sebbene siano presenti tipici sistemi strumentati di processo.

Le conseguenze sono legate ai danni associati alla salute e alla sicurezza del personale.

La frequenza è la combinazione di:

- Frequenza di presenza nella zona pericolosa e il potenziale tempo di esposizione del personale;
- Possibilità di evitare l'evento pericoloso;
- Probabilità che l'evento pericoloso si verifichi senza sistemi strumentati di sicurezza in atto (con tutte le altre strutture esterne di riduzione del rischio operative).

Ciò produce i seguenti quattro parametri di rischio:

- Conseguenza dell'evento pericoloso (C);
- Frequenza di presenza nella zona pericolosa moltiplicata per il tempo di esposizione (F);
- Possibilità di evitare le conseguenze dell'evento pericoloso (P);
- Probabilità dell'accadimento indesiderato (W).

Negli ultimi anni, questa metodologia ci risulta quella più largamente utilizzata, con i seguenti vantaggi:

- approccio non numerico;
- facilità di utilizzo;
- uso comune con conseguente conoscenza più diffusa del metodo.

Per contro, tale approccio può a volte risultare troppo qualitativo e talvolta troppo soggettivo.

La parametrizzazione standard, così come proposta dalla norma, infatti, potrebbe non rispecchiare esattamente l'applicazione specifica, restituendo un'allocazione SIL troppo restrittiva (e questo andrebbe nell'ottica della sicurezza ma influenzerebbe negativamente il costo dell'applicazione), oppure, ed è il caso peggiore, un'allocazione troppo "leggera", che comporterebbe una stima al ribasso del livello di affidabilità richiesto alla funzione di sicurezza. Per questo motivo, anche per il grafo di rischio è opportuno effettuare una calibrazione sullo specifico progetto.

Per il caso di studio sono stati utilizzati seguenti parametri in linea con la matrice di rischio Tabella 3.1.3. di cui al par. 3.1.

Parametro	Motivazione della scelta
Conseguenze dell'evento pericoloso (C)	
C1: lesioni lievi	La presenza continuativa di un solo operatore esposto all'evento pericoloso ci consente di scegliere un livello di severità C2.
C2: Lesioni gravi (permanenti) a una persona. Morte di una persona.	
C3: Morte di più persone	
C4: Effetto catastrofico, molte persone uccise	

Parametro	Motivazione della scelta
Frequenza e tempo di esposizione all'evento (F)	
F1: da raro a più frequente	Considerando che per il progetto specifico vi è la presenza continuativa in sala controllo di un operatore, si è preferito il valore F2 per il parametro.
F2: da frequente a permanente	
Probabilità di evitare l'evento pericoloso (P)	
P1: Possibile in determinate condizioni	Le condizioni da considerare per assegnare il parametro P1 invece di P2 sono specificate nella norma IEC 61508. In generale, il parametro P1 deve essere considerato se sono verificate tutte le seguenti condizioni: <ul style="list-style-type: none"> • Presenza di strutture per allertare l'operatore in caso di guasto del SIS • Presenza di strutture indipendenti per evitare pericoli o per ospitare in sicurezza gli operatori • Il tempo di allerta dell'operatore e la verifica del pericolo sono sufficienti per implementare le azioni richieste. Tali condizioni risultano rispettate nel caso di studio, perciò si procederà con il parametro P1.
P2: Quasi impossibile	
Probabilità di accadimento indesiderato (W)	
W1: tasso di domanda $D < 0,1$ all'anno	Questo è il tasso di domanda annuo dell'evento indesiderato senza considerare il SIF in analisi. Sulla base delle informazioni ricevute e degli studi su sistemi simili (GVR a tubi d'acqua) è plausibile considerare l'evento di bassissimo livello verificabile con frequenza rara, conservativamente < 1 volta all'anno. La scelta del parametro ricade quindi sul caso W2.
W2: $0,1 < D < 1$ all'anno	
W3: $1 < D < 10$ all'anno	

Tabella 6. Parametri grafo di rischio

4 Allocazione del Safety Integrity Level (SIL) per la SIF

Di seguito si riporta il risultato della allocazione del SIL per le SIF (Limiter) considerate (bassissimo livello corpo cilindrico) secondo la norma EN 50156-1.

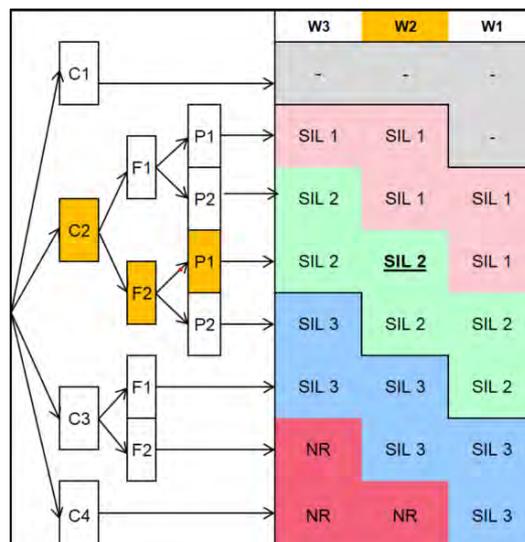


Figura 4. Allocazione del SIL attraverso la norma CEI EN 50156-1

Sulla base delle risultanze della combinazione dei parametri di cui alla tabella 3.2.1 si ottiene un grado SIL pari a 2 che è quindi il SIL Target che la catena di sicurezza deve ottenere.

Si sottolinea che in questo caso la metodologia Risk Graph fornisce risultati analoghi a quella della Matrice di Rischio ALARP.

5 Validazione del Safety Instrumented System (SIS)

Successivamente alle fasi studio e definizione del SIS e delle relative SIF si è provveduto a progettare le funzioni stesse da installare, seguendo le indicazioni riportate nello standard EN 50156-1 per evitare l'introduzione dei guasti sistematici in queste due fasi. Il processo di gestione della sicurezza funzionale si conclude, dopo la messa in servizio, con la validazione del SIS.

L'obiettivo di questa fase è verificare che le varie SIF realizzate siano in grado di rispettare i requisiti SIL assegnati (SIL Target) nella fase di allocazione.

La validazione di ogni funzione di sicurezza si articola nei seguenti punti:

- validazione della gestione dei guasti sistematici;
- validazione dei vincoli architettureali;
- validazione del PFD.

5.1 Validazione della gestione dei guasti sistematici

I guasti sistematici sono tipicamente imputabili ad errori nella gestione del progetto, mancanza di documentazione o mancanza di un sistema di gestione della Qualità.

Anche per questa parte la EN 50156-1 non riporta indicazioni specifiche ma si riferisce a quanto prescritto dalla EN 61508.

Per il progetto specifico sono state seguite le tabelle da B.1 a B.5 e A.15 e A.16 dello standard EN 61508-2 per i guasti sistematici nelle fasi del ciclo di vita del SIS e per la gestione dei guasti causati da progettazione HW e SW e per guasti causati da stress ambientale, rispettivamente.

Tutta la documentazione proveniente dai fornitori delle varie apparecchiature coinvolte nel SIS è stata verificata, approvata ed archiviata nel sistema di gestione documentale del fabbricante.

5.2 Validazione dei vincoli architettureali

La validazione dei vincoli architettureali si basa sulla verifica dell'architettura implementata nella funzione di sicurezza, secondo le indicazioni riportate nella EN61508.

Considerando che il livello SIL della funzione è determinato dal più debole della catena, per questa SIF il SIL raggiunto dai vincoli architettureali è **SIL 2** conforme al SIL Target precedentemente trovato.

5.3 Validazione del PFD

Avendo assunto la funzione di sicurezza in applicazione low demand mode, il parametro relativo alla quantificazione dei guasti casuali è il PFD che, come sopra accennato, indica la probabilità di fallimento su domanda della funzione stessa.

Per le SIFs in modalità a domanda il PFD_{avg} raggiunto si calcola come:

$$PFD_{Average (avg)} = PFD_{Initiator (IN)} + PFD_{LogicSolver (LS)} + PFD_{FinalElement (FE)} \quad (1)$$

E deve essere inferiore al 90% del PFD limite superiore del SIL richiesto, ad es. per un SIL 2, il PFD ottenuto deve essere inferiore a $PFD_{avg} < 9 \cdot 10^{-3}$.

Il PFD di ogni sottosistema è stato calcolato utilizzando le formule riportate nella EN 61508-4 sulla base delle diverse architetture logiche e per diversi intervalli di proof test.

Per l'applicazione in oggetto sono stati utilizzati i dati ricavati dai certificati e dai safety manual delle apparecchiature coinvolte nella funzione di sicurezza.

Si riportano nel seguito i risultati del calcolo del PFD per ogni sottosistema della catena.

PARAMETRO	VALORE	VALORE	VALORE
	(TI = 1 anno) (TID = 6 mesi)	(TI = 3 anni TID= 1 anno)	(TI = 5 anni TID= 1 anno)
Elemento iniziatore			
PFD(IN)	<u>$1,99 \cdot 10^{-5}$</u>	<u>$5,16 \cdot 10^{-5}$</u>	<u>$7,53 \cdot 10^{-5}$</u>
Risolutore logico			
PFD(Input Modules)	$9,26 \cdot 10^{-8}$	$1,93 \cdot 10^{-7}$	$2,11 \cdot 10^{-7}$
PFD(output Modules)	$9,26 \cdot 10^{-8}$	$1,93 \cdot 10^{-7}$	$2,11 \cdot 10^{-7}$
PFD(CPU)	$9,26 \cdot 10^{-8}$	$1,93 \cdot 10^{-7}$	$2,11 \cdot 10^{-7}$
PFD(LS)	<u>$2,78 \cdot 10^{-7}$</u>	<u>$5,80 \cdot 10^{-7}$</u>	<u>$6,33 \cdot 10^{-7}$</u>
Elemento finale (compreso il safety relay e controller turbina)			
PFD(safrel)	<u>$3,72 \cdot 10^{-6}$</u>	<u>$2,71 \cdot 10^{-6}$</u>	<u>$1,90 \cdot 10^{-6}$</u>
PFD(FE) (dichiarato dal fabbricante con proof test ad 1 anno e percentuale di copertura del proof test del 98%)	<u>$4 \cdot 10^{-4}$</u>	N/A	N/A
SIF			
PFD(SIF)	<u>$4,2 \cdot 10^{-4}$</u>	N/A	N/A

Tabella 7. Sintesi dei PFD

Per il relè di sicurezza, in mancanza di dati del costruttore, è stata effettuata una FMEDA di alto livello considerando le indicazioni da Database ufficiali di affidabilità [6] [7] e [8].

Il valore di PFD raggiunto dalla funzione di sicurezza è compatibile con un **SIL 3**, tuttavia i vincoli architettureali non consentono di raggiungere tale livello, per cui la SIF è validata con grado **SIL 2**.

5.3.1 Elemento finale: valutazione degli effetti di un non perfect proof test

È interessante approfondire brevemente le conseguenze che un non perfect proof test (dichiarato dal fabbricante dell'elemento finale pari al 98%) ha sul PFD dell'elemento considerato.

L'elemento finale risulta composto da due valvole di blocco, comandate, le quali devono essere entrambe chiuse affinché la funzione di sicurezza possa essere considerata attuata.

Il fabbricante dell'elemento finale ha fornito la documentazione relativa alla sicurezza funzionale con le seguenti condizioni applicative:

- intervallo di proof test mandatorio: 1 anno;
- percentuale di copertura del proof test sull'elemento finale 98%.

La prima condizione ha impatto su tutta la catena, vincolando, per tutti i sottosistemi ad effettuare il proof test periodico almeno 1 volta all'anno. Di conseguenza per tutti gli item

coinvolti in catena sono stati considerati i valori di PFD ottenuti nella prima colonna della tabella 5.3.1.

La seconda condizione ha invece impatto sul valore del PFD dell'elemento finale, che sarà maggiore rispetto al caso in cui si abbia un proof test perfetto, come dimostrabile attraverso i calcoli, che per brevità non si riportano.

6 Cenni al piano di test del SIS

Ai fini del mantenimento del livello di affidabilità delle catene di sicurezza che compongono il SIS è necessario definire un piano periodico di test. La frequenza delle prove è definita dal calcolo del PFD_{avg} .

Nell'applicazione specifica l'intervallo di proof test è limitato ad 1 anno come prescrizione del fabbricante dell'elemento finale. Tutti gli elementi coinvolti nella catena dovranno essere, quindi, testati con periodicità di proof test pari ad 1 volta all'anno.

Il piano di test includerà, oltre alla procedura di prova, i parametri da rilevare, ad esempio il settaggio degli elementi iniziatori e il valore di scatto alla prova, nonché il tempo di attuazione della funzione di sicurezza che è parte integrante della definizione della funzione stessa; tuttavia, l'approfondimento di questi parametri esula dallo scopo di questa trattazione.

7 Conclusioni

L'utilizzo della norma EN 12952-7, armonizzata alla Direttiva PED, consente al progettista di individuare le sicurezze (Limiter) del generatore di vapore in modo semplice e senza bisogno di strumenti di analisi più strutturati.

In questa trattazione si è cercato di evidenziare il modus operandi da seguire durante le fasi di progettazione e validazione di un sistema di sicurezza, attraverso un caso studio di rilevante importanza, confrontando anche due metodologie per l'allocazione del SIL della SIF.

Durante la fase di validazione si è tenuto conto degli effetti di un proof test non perfetto dell'elemento finale e si è infine ribadita la necessità di mettere in atto un piano di test del SIS, al fine di mantenere nel tempo il livello SIL richiesto alla funzione di sicurezza.

8 Bibliografia

- [1] UNI EN 12952-7:2013 - Caldaie a tubi d'acqua e installazioni ausiliarie - Parte 7: Requisiti per l'apparecchiatura della caldaia.
- [2] CEI EN 50156-1:2015 - Equipaggiamento elettrico per forni ed apparecchiature ausiliarie - Parte 1: Requisiti per la progettazione applicativa e per l'installazione.
- [3] CEI EN 61508:2011 - Sicurezza funzionale dei sistemi elettrici, elettronici ed elettronici programmabili per applicazioni di sicurezza (tutte le parti).
- [4] Andreini Pierangelo, Pierini Fernando. La conduzione dei generatori di vapore. 7^a edizione. Hoepli. 2008.
- [5] CEI EN 61511:2017 - Sicurezza funzionale - Sistemi strumentati di sicurezza per il settore dell'industria di processo (tutte le parti).
- [6] Siemens-Norm SN 29500-7:2005 - Expected values for relays.
- [7] Safety Equipment Reliability Handbook - Volume 2 - Logic Solvers & Interface Modules. 4^a Edizione.
- [8] MIL-HDBK-217F – Military Handbook – Reliability Prediction of Electronic Equipment.

Assistenza agli operatori nelle procedure di verifica di serbatoi, intesi come ambienti confinati, in logica 4.0

M. Pirozzi¹, E. Di Ponzio², D. Freda¹, L. Ricciardi¹, L. Di Donato¹

¹ Inail - Dit - Laboratorio Macchine e attrezzature di lavoro

² Inail - Uot di Taranto

Sommario

Le attività che comportano l'accesso all'interno di attrezzature, quali serbatoi, recipienti o altre tipologie di apparecchiature possono configurarsi come lavori in spazi confinati e/o sospetti di inquinamento o assimilabili a questi. Pertanto è necessario che il lavoratore sia adeguatamente formato per l'esecuzione in sicurezza delle attività previste nonché per quelle da eseguire in emergenza.

La memoria illustra una procedura di lavoro guidata finalizzata a supportare il tecnico durante le operazioni di verifica all'interno di un serbatoio a pressione. La procedura proposta è fruibile attraverso l'utilizzo di dispositivi mobili (tablet o smartphone) ed è stata implementata con una piattaforma di sviluppo software di "Augmented Collaboration". La piattaforma utilizzata consente di "corredare" i diversi step di cui si compone l'esame visivo dell'attrezzatura con materiale di supporto informativo e di visualizzare la riproduzione tridimensionale dei relativi ambienti e contenuti, oggetto della procedura stessa.

Il prodotto guida così l'operatore, passo dopo passo, nella esecuzione delle varie attività di cui si compone l'ispezione del serbatoio assicurando un controllo contestuale dei principali fattori di rischio: a partire dalle fasi preliminari (documentale, di avvenuta bonifica, di agevole accessibilità, altro) il lavoratore procede accertandosi che siano soddisfatte le diverse condizioni che permettono di operare in sicurezza (carenza di ossigeno, presenza di sostanze pericolose, microclima sfavorevole, elettrocuzione, presenza di ostacoli che possono comportare urto, tagli e altro). La procedura prevede, inoltre, la verifica della idoneità dei dispositivi di protezione individuale (DPI) e delle attrezzature di monitoraggio ambientale dell'ambiente confinato.

1. Introduzione

Gli articoli 10 e 12 del D.M. 329/2004 "Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93" [1] disciplinano i controlli di sicurezza da effettuare su attrezzature e insiemi a pressione. Tali controlli consistono in verifiche di funzionamento con periodicità diverse dipendenti dal tipo di attrezzatura a pressione in esame e in verifiche di integrità decennali. La verifica di integrità, secondo il punto 4.3.2 del D.M. 11 aprile 2011 [2], consiste, oltre che nell'esecuzione di un esame spessimetrico, nell'accertamento dello stato di conservazione delle varie membrature dell'attrezzatura da effettuarsi mediante un esame visivo delle parti interne ed esterne accessibili ed ispezionabili. Nel caso specifico dei generatori di vapore d'acqua, in aggiunta alle suddette verifiche, è prescritta anche una visita interna, da effettuare con cadenza biennale, volta ad accertare la permanenza delle condizioni di stabilità per la sicurezza dell'esercizio dell'apparecchio, così come specificato al punto 4.4 del D.M. 11 aprile 2011.

In generale l'attività di verifica delle attrezzature a pressione può presentare diversi aspetti critici. Grande rilevanza, dal punto di vista della sicurezza, rivestono, ad esempio, le operazioni di pulizia e bonifica degli apparecchi che contengono prodotti infiammabili o

nocivi e gli allestimenti di opere provvisorie di accesso alle membrature o da percorrere in caso di grandi volumi [3] e [4].

In questo lavoro è stata anche presa in considerazione una problematica a volte sottovalutata da chi deve eseguire operazioni di manutenzione, riparazione e controllo: il salvataggio dei lavoratori in caso di incidenti, malori o infortuni. Il salvataggio di un lavoratore infortunato o privo di sensi è infatti di estrema complessità poiché per introdursi in un serbatoio o in una cisterna molte volte occorre attraversare un passo d'uomo (in genere ovale) avente le dimensioni pari a 300 mm x 400 mm o a 320 mm x 420 mm. Ovviamente la grandezza raccomandata per le aperture dipende da vari fattori: garanzia di resistenza meccanica dell'attrezzatura, ubicazione e raggiungibilità dell'apertura di accesso, spazio libero intorno l'apertura, possibile utilizzo di DPI (ad es. dispositivi di protezione respiratoria, DPI per il salvataggio, DPI contro le cadute come le imbragature), utilizzo di piattaforme di lavoro o dispositivi d'ingresso. L'utilizzo di autorespiratori o dei DPI sicuramente aumenta gli ingombri rispetto al solo corpo umano [5].

Le attività che comportano l'accesso all'interno di attrezzature, quali serbatoi, recipienti o altre tipologie di apparecchiature, si configurano quindi come lavori in ambienti sospetti di inquinamento o confinati di cui al D.P.R. 177/2011. Il lavoratore, ai sensi dello stesso decreto, deve essere adeguatamente formato e addestrato ed è necessario che, oltre al possesso delle conoscenze specifiche relative all'attività di ispezione da effettuare, sia a conoscenza delle specifiche procedure per operare in sicurezza in tali ambienti [6] e [7].

I recenti sviluppi delle nuove tecnologie e, in particolare, di quelle abilitanti nell'ottica dell'industria 4.0, offrono la possibilità di avere a disposizione una serie di strumenti che permettono, oltre all'implementazione di nuovi metodi e sistemi di formazione e addestramento, lo sviluppo di sistemi innovativi per la gestione e l'esecuzione delle diverse fasi lavorative correlate alle attività di ispezione e verifica periodica, riducendo così il numero degli interventi a uomo presente e conseguentemente la probabilità di accadimento dell'incidente [6] e [8].

In tal senso, proprio al fine di supportare i tecnici/operatori durante l'attività di verifica in un serbatoio a pressione, è stata realizzata una procedura di lavoro guidata da utilizzare su dispositivi mobili (es. tablet o smartphone) ed implementata mediante una piattaforma di sviluppo software di "Augmented Collaboration" (figura 1). La procedura realizzata è specificamente diretta a eliminare o ridurre al minimo i rischi propri delle attività di ispezione visiva all'interno di attrezzature e serbatoi a pressione comprensiva dell'eventuale fase di soccorso e di coordinamento con il sistema di emergenza del Servizio sanitario nazionale e dei Vigili del Fuoco.



Figura 1. Maschera di login per l'accesso alle funzioni dell'app mobile

2. Lo strumento di assistenza all'operatore

Si vuole mettere a disposizione dell'utente, in primis gli addetti alla verifica/ispezione delle diverse unità territoriali dell'Inail, uno strumento operativo, da utilizzare in campo, utile a fornire:

- istruzioni di lavoro digitali, guidare cioè gli operatori attraverso istruzioni di lavoro digitali in "Augmented Reality" (AR), utilizzando anche strumenti di "Artificial Intelligence" (AI);
- supporto da remoto, assistere cioè operatori fisicamente distanti, sfruttando anche funzionalità di "Virtual Reality" (VR) e AR attraverso l'utilizzo di dispositivi mobili.



Figura 2. Ambiente operativo dell'app mobile: pagina per il caricamento delle procedure

Il sistema ideato e realizzato consiste quindi fondamentalmente di una componente software (con l'utilizzo di una piattaforma dedicata) e di una componente hardware (dispositivi mobili) per la fruizione da parte dell'operatore dei diversi contenuti della procedura stessa, ivi compresi quelli di VR e AR. I diversi passaggi sequenziali operativi (figura 3) che gli utenti devono seguire per condurre l'ispezione visiva del serbatoio sono espressi mediante una base testuale arricchita da contenuti informativi a valore aggiunto (video, fotografie, documenti, immagini in 3D) con la possibilità di visualizzare la riproduzione tridimensionale dei relativi ambienti e attrezzature oggetto della procedura stessa.

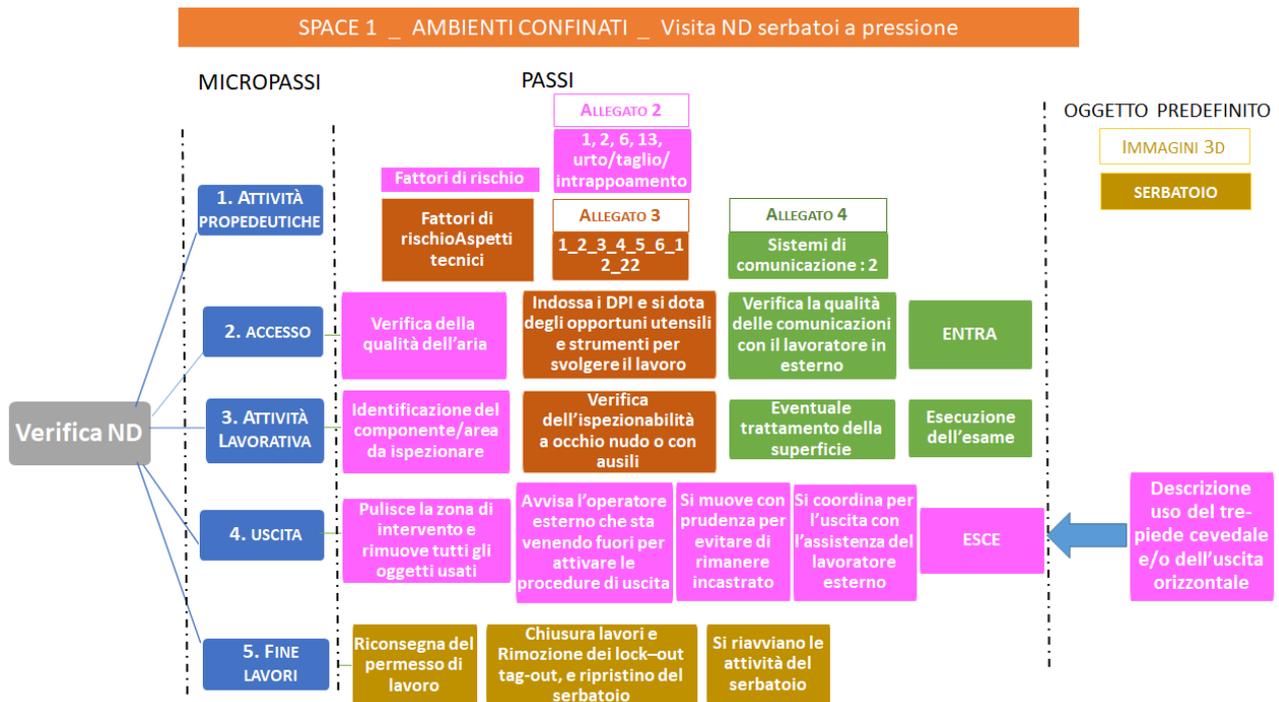


Figura 3. Schema dei passaggi sequenziali operativi previsti dalla procedura.

3. Descrizione delle fasi della procedura di ispezione guidata

Le attività prese in esame nella procedura e implementate nella piattaforma comprendono sia i diversi controlli preliminari alla verifica (esame della documentazione, di avvenuta bonifica, di agevole accessibilità, altro), sia la verifica della corretta valutazione dei fattori di rischio presenti all'interno dell'attrezzatura (carenza di ossigeno, presenza di sostanze pericolose, microclima sfavorevole, possibile elettrocuzione, presenza di ostacoli che possono comportare urti, tagli e altro). La procedura prevede, altresì, la verifica dell'idoneità dei DPI e delle attrezzature di monitoraggio ambientale e di comunicazione necessari ad accedere all'ambiente confinato (figura 4).

In particolare il sistema consente di caricare e consultare all'atto della verifica, la documentazione relativa all'attrezzatura (disegni, procedure di fabbricazione, condizioni di funzionamento, schemi, eventuali verbali di verifica e di riparazione, quaderno di saldatura, etc.) e quella relativa alla procedura di emergenza, nonché i documenti che autorizzano l'ingresso (quali certificati gas free, di bonifica o altro).

Alla verifica documentale segue il controllo della presenza della dotazione di sicurezza da utilizzare (elmetto, calzature di sicurezza, guanti, maschera, imbragatura, etc.) e della funzionalità dei dispositivi di rilevazione (es. rilevatore di ossigeno) e di comunicazione con l'esterno. Oltre alla verifica di questi dispositivi, è previsto il controllo della presenza degli attrezzi necessari all'esecuzione della verifica (ad es. lente d'ingrandimento, specchietto, calibro per saldature, fotocamera o videocamera) e di attrezzature accessorie, come lampade o torce, accessori per la pulizia delle superfici, gessi o vernici. Per tutte le attrezzature introdotte con l'ambiente deve essere verificata la compatibilità di utilizzo in ambiente confinato (ad es. apparecchi certificati atex).

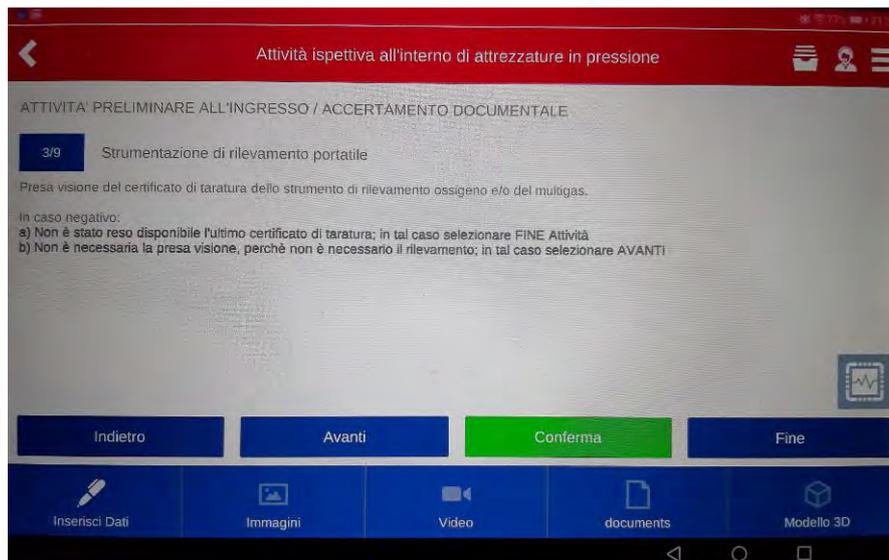


Figura 4. Ambiente operativo app mobile: esempio relativo ad uno step della procedura

I possibili fattori di rischio sono correlati sia con la difficile accessibilità e la non completa ispezionabilità interna dell'attrezzatura, causati dalla presenza di elementi inamovibili o la cui rimozione può pregiudicare l'integrità dell'attrezzatura, sia con la qualità dell'ambiente all'interno dell'apparecchio. Talvolta è necessario procedere, preventivamente all'accesso, alla bonifica dell'attrezzatura. In tal caso il datore di lavoro deve dare riscontro documentale dell'avvenuta bonifica e del mantenimento delle condizioni di accessibilità per tutta la durata della verifica [5] e [7].

È preferibile che l'accesso all'interno dell'attrezzatura del verificatore avvenga almeno con un altro operatore che possa eventualmente dare assistenza nel corso della verifica; di questa condizione deve essere data evidenza nella procedura di emergenza, al fine anche di stabilire il numero minimo di operatori che devono essere posizionati all'esterno.

Le diverse fasi di cui si compone la procedura operativa corrispondono ai diversi "step" da seguire e validare o opzionare sul dispositivo mobile utilizzato.

Il sistema guida l'operatore a lavorare in sicurezza seguendo le diverse attività da eseguire: accesso nell'attrezzatura attraverso uno dei passi d'uomo, svolgimento dell'ispezione secondo il piano controlli e con eventuale trattamento delle superfici, acquisizione di immagini, foto o videoregistrazioni (per una tracciabilità oggettiva di quanto rilevato e per la redazione del report finale), uscita da uno dei passi d'uomo.

L'accesso può prevedere anche la preventiva predisposizione di opere provvisorie all'interno o all'esterno dell'attrezzatura. Si evidenzia che dopo il superamento della "portina" di accesso, l'operatore può muoversi spesso solo carponi sulle opere provvisorie e questo sia se il serbatoio è ad asse orizzontale e di diametro non sempre adeguato alla postura eretta (es. corpo cilindrico di un generatore di vapore acqueo), sia se è ad asse verticale per la presenza di strutture interne (es. piatti di distillazione/separazione).

Le operazioni possono avere durate prolungate per consentire, ad esempio, l'esame visivo di giunzioni saldate, tra componenti in pressione e carpenterie di sostegno strutturale, o di superfici soggette a corrosione/erosione [7].

Gli spazi angusti e l'illuminazione non sempre ottimale possono rendere il controllo difficoltoso e non sempre efficace ed esteso. Importante ruolo può quindi rivestire la condivisione delle immagini con gli operatori esterni dello staff di ispezione in fasi dedicate della procedura, ad esempio per conferma di giudizio di idoneità o altre finalità per assicurare la sicurezza della prosecuzione di esercizio.

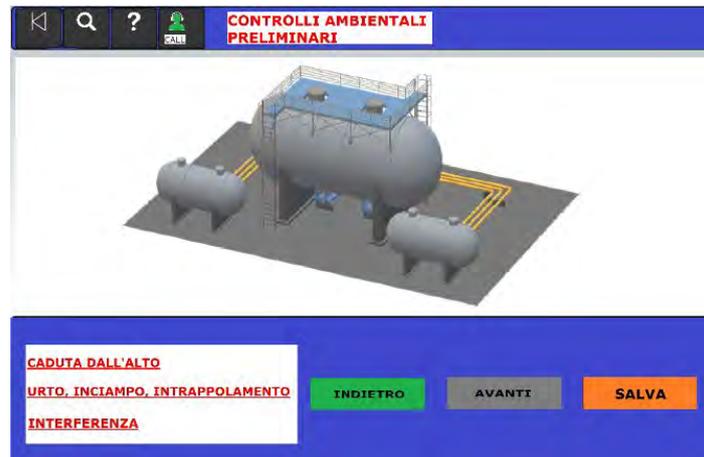


Figura 5. Esempio di ambiente applicativo 3D per ispezioni di serbatoi

Inoltre, prima e durante la prova è necessario monitorare la quantità di ossigeno e rimanere in comunicazione con l'esterno del tipo a voce, a vista o se necessario con sistemi di comunicazione idonei per l'ambiente.

Il verificatore deve aver ben compreso la procedura di emergenza e verificata la presenza degli operatori a cui è affidato il compito di recupero, con i quali deve essere garantita la continuità della comunicazione.

A conclusione dell'ispezione o a seguito della sospensione dell'attività, il prodotto restituisce un report dettagliato delle opzioni scelte e dell'esito delle attività svolte.

4. Conclusioni

Il prodotto proposto guida il tecnico, passo dopo passo, nella esecuzione delle varie attività di cui si compone l'ispezione del serbatoio, verificando, contestualmente, il soddisfacimento delle diverse condizioni che permettono di operare in sicurezza.

I prossimi step di sviluppo previsti sono i seguenti:

- l'implementazione degli aspetti di realtà virtuale e aumentata di supporto alle fasi operative in campo e degli strumenti di AI sia per la validazione delle operazioni compiute e sia per la personalizzazione delle istruzioni digitali operative fornite dal sistema;
- la sperimentazione in campo della procedura realizzata mediante il coinvolgimento dei tecnici Inail di alcune unità territoriali "pilota" con un feedback atteso per eventuali modifiche sia nei contenuti procedurali delle istruzioni operative e sia per gli aspetti strettamente correlati alla ricostruzione di ambienti e attrezzature.

La sempre crescente esigenza di innalzare i livelli di sicurezza, spinge lo studio e le prossime attività di ricerca [9] e [10] ad ampliare l'utilizzo del sistema software e hardware con le ulteriori potenzialità offerte dalla piattaforma quali: la formazione del personale da remoto e la distribuzione del know-how mediante strumenti di AR e di AI per lo svolgimento di attività di ispezione in campo. In pratica nel prossimo futuro si potrebbe sviluppare un sistema di formazione/addestramento a distanza degli utenti ovunque essi si trovino, mediante la possibilità di effettuare simulazioni di ispezioni, garantendo ai diversi utenti un'interazione da remoto e la condivisione di know-how attraverso l'utilizzo di funzionalità di AI.

Si vuole infine ringraziare per la disponibilità collaborativa mostrata la ditta Overit che ha sviluppato la piattaforma software sulla quale si basa lo strumento realizzato.

5. Bibliografia

- [1] D.M. 329/2004 “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.
- [2] D.M. 11 aprile 2011 Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo (G.U. del 29.4.2011, n. 98, S.O. n. 111).
- [3] Di Donato, L., Paolini, M., Ricciardi, L., Rizzo, M. "Procedure di sicurezza, ai sensi del DPR 177/11, per le attività di saldatura all'interno del corpo cilindrico di un generatore di vapore di una centrale termoelettrica", Convegno Safap 2014, Roma, 14 e 15 ottobre 2014; pag. 249 – 254, ISBN 978-88-7484-418.
- [4] Manuale illustrato per lavori in ambienti sospetti d'inquinamento o confinati ai sensi dell'art. 3 comma 3 del D.P.R. 177/2011 - Pubblicazione realizzata dal Sottogruppo Ambienti Confinati del Comitato 1 della Commissione Consultiva Permanente per la Salute e Sicurezza sul Lavoro. – ISBN 978-88-7484-298-8, INAIL Edizione 2013
- [5] Indicazioni operative in materia di sicurezza ed igiene del lavoro per i lavori in ambienti confinati – Pubblicazione a cura del gruppo di lavoro “Ambienti confinati” regione Emilia Romagna, prima pubblicazione 2013, ultimo aggiornamento gennaio 2019.
- [6] L. Di Donato, M. Pirozzi, C. Console, L. Ricciardi, F. Cassandra, E. D'Alessandri, D. Freda (Inail Dit) • Coll.ni A. Di Filippo • Grafica ed Editing: D.G. Cogliani, F. Ceruti. “Ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento e assimilabili - Aspetti legislativi e caratterizzazione”, fact sheet - ISBN 978-88-7484-676-4 © 2020 Inail
- [7] C. De Petris, C. Mennuti, C. Delle Site, contributi di R. Balestreri, R. Carrara, D. Di Ponzio, G. Augugliaro, M. Gennari, A. Fiodo. “L'esame visivo su attrezzature a pressione ai fini delle verifiche di costruzione e di esercizio” – linea guida Ispesl, gennaio 2006.
- [8] L. Di Donato, F. Longo, A. Ferraro, M. Pirozzi – “An advanced solutions for operators' training working in confined and/or pollution suspected space”, *Procedia Manufacturing* 42 (2020) pp. 254-258, www.sciencedirect.com
- [9] L. Di Donato, C. Console, D. Freda, L. Ricciardi, F. Cassandra, E. D'Alessandri, M. Pirozzi (Inail Dit) • Grafica ed Editing: D.G. Cogliani, F. Ceruti - Ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento e assimilabili - Prodotti di Ricerca dell'istituto” - Fact sheet -ISBN 978-88-7484-677-1 © 2020 Inail.
- [10] L. Di Donato, D. Freda, C. Console, L. Ricciardi, F. Cassandra, E. D'Alessandri, M. Pirozzi (Inail Dit), A. Cordisco (Inail Cte) D. Maccioni (Inail Direzione Territoriale Arezzo Siena) - Grafica ed Editing: D.G. Cogliani, F. Ceruti - “Ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento e assimilabili - formazione in aula e addestramento in campo” - Fact sheet - ISBN 978-88-7484-678-8 © 2020 Inail.

Procedura di verifica da remoto di attrezzature a pressione: stato dell'arte ed evoluzione

G. Augugliaro¹, R. Balistreri², F. Giacobbe³, E. Pichini Maini¹

¹ Inail - Dit

² Inail - Uot di Cagliari

³ Inail - Uot di Messina

Sommario

Tra le attività istituzionali dell'Inail rivestono grande rilievo le verifiche di riparazione e di messa in servizio delle attrezzature a pressione ai sensi del D.M. 329/04. Tali attività risultano particolarmente critiche e urgenti quando riguardano attrezzature installate ed esercite nelle industrie di processo, soggette alle prescrizioni del D. Lgs. 105/2015 (impianti a rischio di incidente rilevante).

A marzo del 2020, nel periodo più critico della pandemia da Covid-19, per via delle restrizioni alla mobilità e allo svolgimento delle attività in presenza imposte dal lock-down, l'Inail-DIT ha elaborato la "Procedura sperimentale per l'esecuzione da remoto di verifiche su attrezzature a pressione", per adattare in via temporanea le modalità di conduzione delle verifiche indifferibili su attrezzature a pressione alla situazione emergenziale che si era venuta a determinare. La procedura permette di condurre regolarmente le fasi operative della verifica pur nel rispetto delle restrizioni imposte dal contesto emergenziale, è utilizzabile esclusivamente per quelle attività di verifica attribuite dal legislatore all'Inail in via obbligatoria ed esclusiva e presuppone il consenso formale del richiedente. Non è esclusa in futuro la sua estendibilità a campi applicativi ulteriori rispetto a quelli attualmente assunti. Oltre agli aspetti prettamente amministrativi, la procedura ha definito strategie che ne hanno consentito l'immediato utilizzo garantendo di fatto l'equivalenza tra la verifica eseguita da remoto e quella effettuabile in presenza: in particolar modo è risultato di grande valore l'utilizzo di un "target" che consentisse una valutazione il più possibile oggettiva sulla bontà e risoluzione delle immagini riprodotte sullo schermo in remoto.

1. Introduzione

La regolamentazione italiana del settore delle attrezzature a pressione attribuisce in via esclusiva all'Inail la titolarità di talune verifiche. Si tratta in particolare delle verifiche che si rendono necessarie a seguito di interventi di riparazioni di cui all'art. 14 del DM 329/04, nonché di verifiche di messa in servizio (art. 4 del DM 329/04) e di prima verifica periodica su attrezzature e insiemi a pressione (Decreto Ministeriale 11/04/2011).

Nel caso di verifiche che si rendano necessarie a seguito di interventi di riparazione, le attività da svolgersi nell'ambito della verifica sono indicate nell'art. 52 del RD n. 824 del 12/05/1927, con le modalità specificate nel DM del 21/05/1974 e Decreto Ministeriale del 21/11/1972.

Entrambe le tipologie di verifica sono necessarie e inderogabili: l'attrezzatura non può iniziare o riprendere a funzionare e essere utilizzata senza che tali verifiche siano effettuate e abbiano esito positivo.

Nel periodo di lock-down resosi necessario per l'emergenza dovuta alla pandemia da Covid-19, il DPCM del 11/03/2020 ha riconosciuto ad alcune classi merceologiche la caratteristica di 'essenziali per la vita del Paese' consentendo – e anzi richiedendo – che continuassero a erogare i servizi loro specifici. Si è trattato delle classi in cui rientrano le strutture ospedaliere, le raffinerie, le centrali elettriche, le filiere alimentari... Per tutte queste realtà,

le verifiche a seguito di interventi di riparazione o di messa in servizio sono rimaste necessarie, inderogabili, indifferibili. E tuttavia la situazione emergenziale legata al Covid-19 rendeva sconsigliabile la presenza nel sito industriale, in prossimità dell'attrezzatura oggetto della verifica e del personale della Ditta utilizzatrice e/o riparatrice.

Pertanto, all'interno delle contrapposte necessità di:

- dover eseguire la verifica per autorizzare l'esercizio dell'attrezzatura;
 - dover evitare il contatto ravvicinato col personale tecnico delle Ditte coinvolte
- si è deciso di redigere una procedura che permettesse al personale INAIL di eseguire le verifiche di cui è titolare, assicurando da remoto la supervisione degli stessi aspetti assicurati in presenza, e con la stessa affidabilità.

In particolare si è osservato che la normativa che definisce le attività da svolgersi nel corso delle verifiche esige il positivo riscontro di caratteristiche dell'attrezzatura o dell'intervento eseguito, ma non la presenza del tecnico. Testi scritti in periodi in cui non si pensava di dover/poter erogare servizi da remoto, non li hanno contemplati semplicemente perché non li hanno pensati. Ma le prestazioni raggiungibili con le moderne tecnologie di rilevazione, registrazione, trasmissione di immagine sono tali che addirittura alcuni dettagli si riscontrano meglio utilizzando un apparato strumentale che non a occhio nudo.

Pertanto, anche considerando lo standard relativo alle indagini visive [3], là dove distingue tra metodologie visive dirette (a occhio nudo) e indirette (mediate da strumenti – endoscopi, boroscopi - che trasmettono le immagini altrimenti non visibili), si può trattare la verifica da remoto come una verifica indiretta e la strumentazione (hardware e software) per la trasmissione dell'immagine come una 'lunga guida di segnale'.

All'interno dello stesso standard e in altri dedicati alle indagini visive [2] [4] [5], si sono individuati gli indicatori di verifica dell'efficienza del sistema e della qualità dell'immagine rilevata.

2. Descrizione della procedura

Definizioni

OPERATORE: tecnico della Ditta operante sul campo, ovvero nel sito industriale o presso l'attrezzatura oggetto della verifica (operatore1 e operatore2);

VERIFICATORE: tecnico dell'INAIL che esegue la verifica da remoto;

OGGETTO DELLA VERIFICA: attrezzatura, insieme e/o membratura a pressione;

TELE1: dispositivo con telecamera 'in mano' all'operatore1;

TELE2: dispositivo con telecamera che riprende a campo largo, ovvero che riprende l'operatore1 e/o l'operatore2 nel loro campo di azione, da rendere disponibile su richiesta del verificatore.

Dispositivi tecnici, infrastrutture e risorse umane

Per l'esecuzione da remoto delle verifiche di cui alla presente procedura dovranno essere disponibili:

- a) un operatore (operatore1) della Ditta costruttrice/riparatrice/utilizzatrice con conoscenza dei processi e delle attrezzature oggetto della verifica (es. coordinatore di saldatura, addetto al controllo qualità, operatore qualificato CND...) nonché padronanza di gestione di dispositivi IT;
- b) un secondo operatore (operatore2) della Ditta costruttrice/riparatrice/utilizzatrice che svolge le attività funzionali alla verifica, in base alle disposizioni del verificatore;
- c) un collegamento streaming audio-video tra operatore1 e verificatore: il verificatore dirigerà e controllerà da remoto le operazioni e le azioni dell'operatore1 e dell'operatore2;

- d) un dispositivo con telecamera (Tele1) in grado di trasmettere immagini/filmati tramite una piattaforma remota (ad esempio Microsoft Teams, Zoom, Skype, Jitsi....) da cui il verificatore possa ricevere, registrare e interagire con gli operatori;
- e) una trasmissione dati efficiente (es. 4G, Hot Spot, Wi-Fi...) sia sul lato operatore1 sia sul lato verificatore. Si consiglia di effettuare la verifica della velocità di connessione, per esempio tramite il sito www.speedtest.net o l'applicazione Speedtest della Ookla (disponibile sia su Android sia su IOS). La velocità minima necessaria per poter avere una connessione "stabile" deve essere, sia in upload che in download, non inferiore a 1,5 Mbps;
- f) target secondo UNI EN ISO 9712 e UNI EN 13927, fornito nell'allegato 1 della procedura;
- g) una torcia aggiuntiva rispetto a quella eventualmente presente nel Tele1, con cui l'operatore1 possa illuminare – ove richiesto - l'immagine inquadrata;
- h) su richiesta del verificatore, un ulteriore dispositivo con telecamera (Tele2) per inquadrature a campo largo che possa trasmettere al verificatore la ripresa delle attività svolte da operatore1 e operatore2

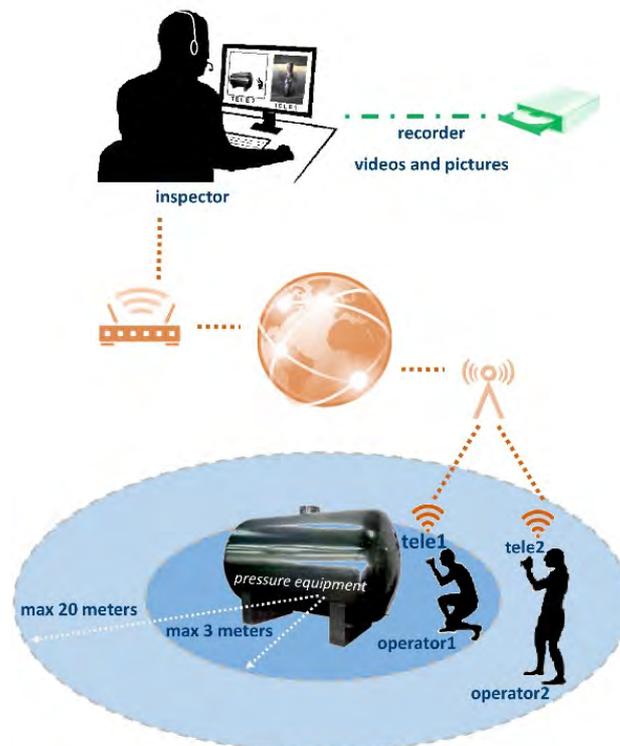


Figura 1

Nella procedura viene fornito un target, indicato nelle Figure 2 e 3, per verificare la risoluzione del sistema. Nel target sono integrati:

- USAF 1951 [MIL-STD-150A, 1951] con lato di 5 cm,
- USAF 1951 con lato di 15 cm
- Tavole di Ishihara tables per la visione dei colori,
- 25 pannelli per la visione dei grigi,
- Testo scritto in Times New Roman, size 4,5

La Ditta deve stampare il target e posizionarlo in prossimità dell'oggetto della verifica.

L'operatore1 deve inquadrare con Tele1 il target. L'insieme 'Tele1 + sistema di trasmissione dati' deve consentire al verificatore di risolvere:

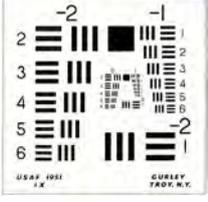
Da vicino (ovvero avvicinando il Tele1 quanto necessario):

- almeno l'elemento 2 del gruppo 0 del target USAF 1951 di lato 5 cm;

- il testo Times New Roman formato 4,5;
- la distinzione dei colori tramite le tavole di Ishihara;
- la visione delle sfumature dei grigi tramite la corretta lettura di almeno 20 dati.

Alla distanza di circa 30 cm: almeno l'elemento 2 del gruppo 0 del target USAF 1951 di lato 15 cm.

Alla distanza di circa 60 cm: almeno l'elemento 6 del gruppo -2 del target USAF 1951 di lato 15 cm.

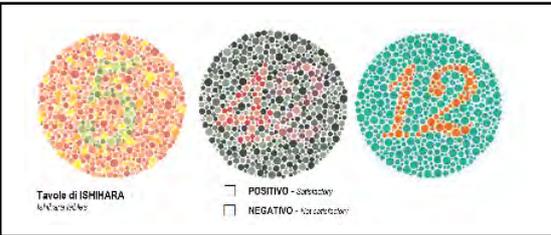


L'acutezza visiva da vicino deve permettere come minimo la lettura del Jaeger numero 1 o Times Roman N 4,5 o caratteri equivalenti (con un'altezza di 1,6 mm)

(Times Roman 4,5):
L'acutezza visiva o acuità visiva o visus è una delle abilità visive principali del sistema visivo ed è definita come la capacità dell'occhio di risolvere e percepire dettagli fini di un oggetto e dipende direttamente dalla nitidezza dell'immagine proiettata sulla retina.

L'acutezza visiva rappresenta l'inverso delle dimensioni angolari minime che un oggetto deve avere per poter essere percepito correttamente. È una delle abilità visiva maggiormente tenute in considerazione durante un esame visivo e una diminuzione dell'acutezza visiva è il motivo principale per cui una persona si reca da un ortottista o da un oculista.

VISIONE DEI COLORI
Color vision



Tavole di ISHIHARA
di N. Ishihara

POSITIVO - senza difetti
 NEGATIVO - viz. colorazione

ESECUZIONE PROVA (vedi istruzioni Test):
La visione delle sfumature di grigio deve essere condotta ad una distanza di 30-50 cm in normali condizioni di luce di lavoro.
Distanza di prova: 30 cm. Illuminazione: 30-35 cm-candela/m². Condizioni di prova.

REQUISITO MINIMO (dati assoluti):
Minimo 20 letture corrette
30 letture visibili (non leggere)

2	7	8	1
23	6	35	5
5		66	46
1	68	32	542
11		35	48
			63

Figura 2

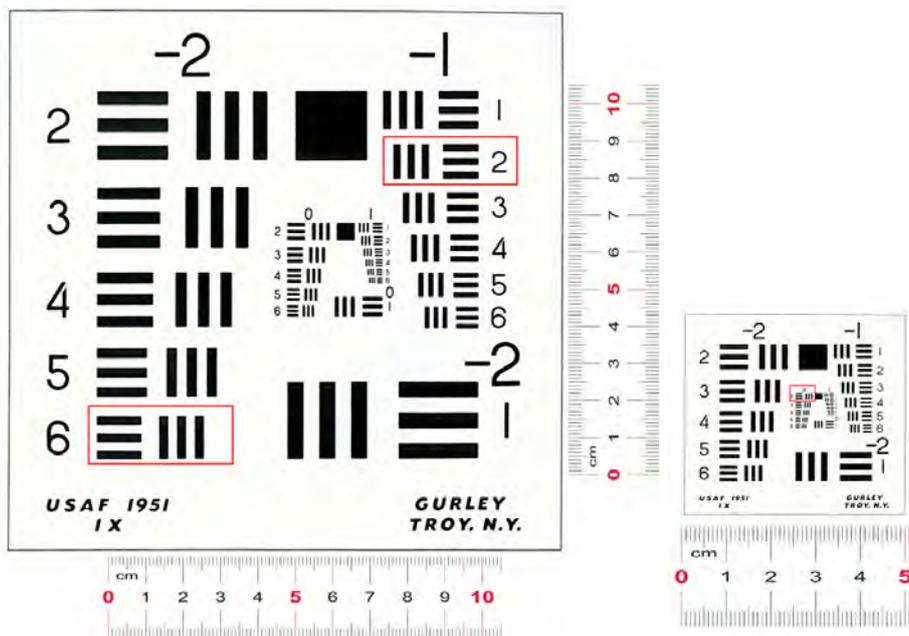


Figura 3. Target USAF 1951 di lato 15 cm e di lato 5 cm (non in scala)

La procedura operativa

La procedura operativa prevede varie fasi, e può essere applicata solo se tutta la documentazione inerente la verifica è trasmessa preliminarmente al verificatore in formato elettronico.

Per prima cosa si stabilisce e verifica il collegamento streaming audio/video tra operatore1 e verificatore, i vari tecnici si identificano e si può iniziare la verifica vera e propria. Il verificatore, a seconda del contesto lavorativo visualizzato da remoto, decide se è opportuno posizionare in un punto fisso la Tele2 per la ripresa continua in campo largo.

Si posizionano i target in prossimità degli oggetti della verifica, ovvero nelle loro stesse condizioni di illuminazione e si verifica la risoluzione del sistema 'Tele1+sistema di trasmissione/ricezione dati' come descritto precedentemente, ed evidenziato in Figura 4.

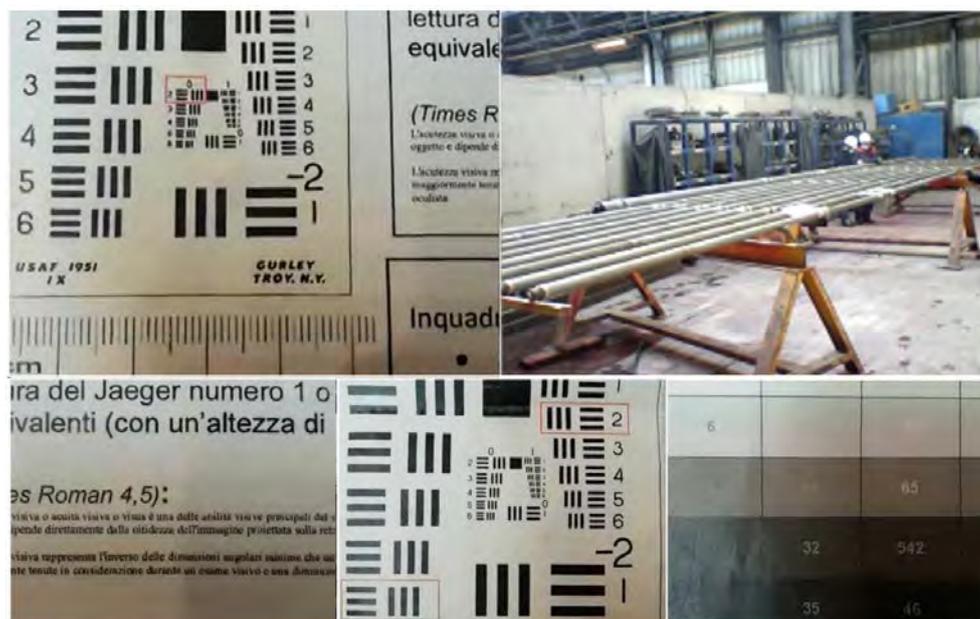


Figura 4. Immagini di parti del target così come visualizzate all'inizio di una verifica

Se tutte le operazioni effettuate danno esito positivo, si può iniziare la verifica da remoto: l'operatore1 e l'operatore2 eseguono tutte le operazioni che il verificatore richiede loro; su richiesta del verificatore, l'operatore1 si avvicina all'oggetto della verifica; per una visione stabilizzata delle immagini, i movimenti di Tele1 devono essere lenti al fine di consentire una ottimale messa a fuoco; per aumentare la risoluzione dei dettagli, il verificatore chiede all'operatore1 di avvicinarsi fisicamente all'oggetto della verifica, anziché ingrandire digitalmente l'immagine.

Durante la verifica il verificatore può registrare le riprese audio-video e/o scattare fotografie ogni volta che lo ritiene opportuno/necessario.

La verifica svolta nel rispetto della procedura deve essere seguita, a fine emergenza, da un sopralluogo avente lo scopo di riscontrare quanto esitato da remoto; di tale sopralluogo verrà rilasciato apposito verbale. Qualora il tecnico verificatore ritenesse che il sopralluogo possa essere evitato (in quanto non essenziale), lo notificherà tempestivamente al DIT per ottenere il nulla osta.

3. Esempi applicativi

In contemporanea con l'apice della pandemia per COVID19, alcuni siti industriali hanno dovuto effettuare fermate periodiche impegnative. In questi casi, il coinvolgimento quotidiano di uno o due tecnici in presenza continua è stato sostituito con l'attività da remoto. Dopo la verifica di efficacia della connessione dati nei diversi impianti mediante l'utilizzo del

“target” che ha consentito la valutazione oggettiva sulla bontà e la risoluzione delle immagini riprodotte sullo schermo in remoto (vedi fig. 2), gli operatori hanno operato da remoto con un valido riscontro circa l'affidabilità degli strumenti di verifica utilizzati.

Per l'utilizzo di questa procedura si sono utilizzati i collegamenti internet tra il tecnico dell'INAIL, collegato tramite PC da remoto, e l'operatore in campo, che con il suo dispositivo mobile è collegato dal posto in cui si trova l'attrezzatura da verificare. Per il collegamento sono stati utilizzati software che permettessero di visualizzare e registrare le immagini e i video che l'operatore in campo inquadra con il suo dispositivo, in particolare Microsoft Teams e SPACE1 di Overit: quest'ultimo è un programma software dedicato alle attività di monitoraggio e manutenzione da remoto di cui l'INAIL ha acquisito alcune licenze per la realizzazione di progetti afferenti al Piano della Ricerca 2019-2021.

Per quanto concerne la strumentazione utilizzata dagli operatori negli impianti, sono stati impiegati dispositivi con sistema operativo Android, IOS, o Windows e certificazione Atex (in caso di utilizzo in ambienti con pericolo di esplosione). Gli stessi dispositivi sono stati corredati con le applicazioni Teams e Space1 al fine di disporre di entrambe le soluzioni in funzione delle condizioni di collegamento con i verificatori Inail.

L'esperienza condotta con altre applicazioni non specifiche, anche commerciali e comuni negli smartphone di più larga diffusione, ha evidenziato sicuramente un approccio facilitato, di immediata attuazione e con una buona fluidità e visione d'insieme. Di contro sono emerse visualizzazioni non sempre ottimali per effetto delle riprese non ad alta definizione. In questi casi, per esaminare particolari di dimensioni dell'ordine dei millimetri, si è operato con movimenti molto rallentati e distanza tra componente e camera tra 20÷50 cm. Con questi accorgimenti è possibile svolgere positivamente il servizio di ispezione.

La procedura è stata utilizzata anche per verifiche su membrane di ricambio costruite all'estero per attrezzature Ispesl (Figura 5), nonché per prove su materiali non standard per le membrane di ricambio, e su materiali plastici e compositi per attrezzature ex DM 1.12.80 (Figura 6).

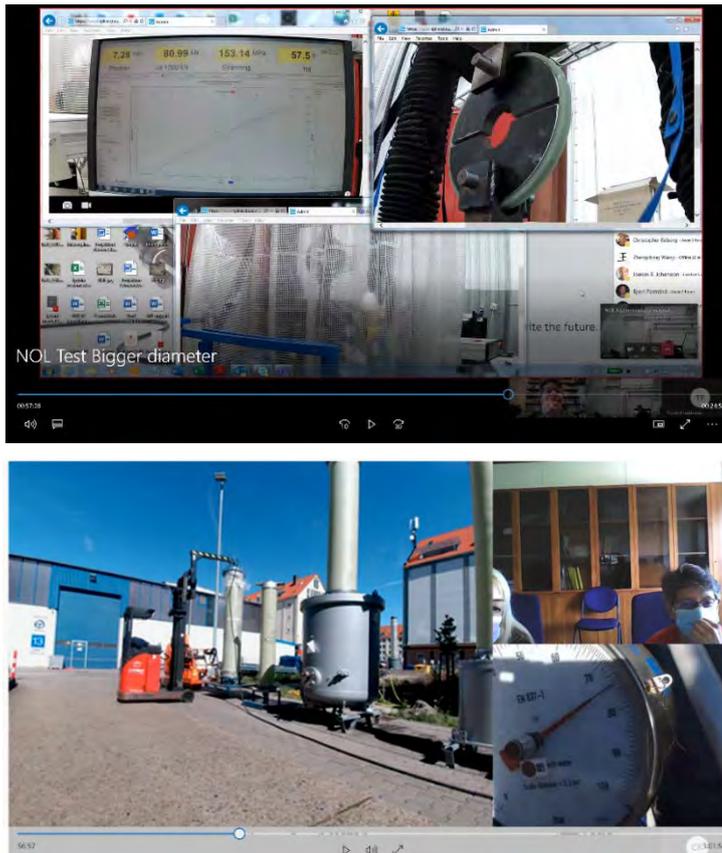


Esame visivo su serpentine



Prova idraulica su collettore

Figura 5. Fotogrammi di riprese video di verifiche su membrane di ricambio costruite all'estero



Prove meccaniche
su campioni di isolatori
in vetroresina

Prove di scoppio su
isolatori in vetroresina

Figura 6. Fotogrammi riprese video di prove su materiali e prove di scoppio su attrezzature ex DM 1.12.1980

La disponibilità della procedura e della strumentazione hardware e software ha consentito l'effettuazione di un consistente numero di verifiche che ad oggi ha contato circa 400 interventi; una prima analisi sulle evidenze riscontrate durante le attività svolte ha permesso di valutare l'applicativo SPACE1 come il più adatto all'effettuazione delle verifiche da remoto trattandosi di una piattaforma realizzata appositamente per i controlli visivi eseguiti con tale modalità, già in uso in altri ambiti; SPACE1 permette di realizzare foto che vengono salvate e rese disponibili con la definizione del dispositivo dell'operatore e di conseguenza non sono influenzate dall'efficacia del collegamento internet; permette inoltre di registrare video delle immagini riprese. Inoltre la piattaforma SPACE1 mantiene in memoria sia le immagini sia i video registrati durante le verifiche e le organizza oltre che per date, anche per TAG che consentono di trovare più facilmente quanto di interesse. Inoltre la collaborazione continua con OVERIT ha permesso di ottimizzare la piattaforma per le esigenze di operatività da remoto richieste dalla procedura dell'Istituto.

A titolo di informazione si evidenzia che anche gli standard sui sistemi di gestione hanno previsto la possibilità di effettuare verifiche ispettive con modalità da remoto. Con la recente pandemia, la versione 5.1 del novembre 2020 dello standard FSSC 22000 (normativa in ambito sistemi di gestione finalizzati alla sicurezza alimentare), ha evidenziato la possibilità di effettuare un audit misto: una parte eseguita dall'auditor in campo e una da remoto, utilizzando il cosiddetto "ICT Audit Approach".

L'applicazione della procedura Inail ha evidenziato spunti di sicuro interesse e talune criticità; alcune di queste ultime sono state già risolte mentre altre andranno ulteriormente analizzate. Tra i punti di forza possiamo citare i seguenti:

- Nelle condizioni a contorno prescritte dalla procedura, i controlli eseguiti da remoto hanno consentito lo svolgimento delle verifiche di riparazione garantendo l'equivalenza tra il controllo in presenza e quello svolto da remoto, senza alcun sostanziale ritardo rispetto alla calendarizzazione.
- La disponibilità della metodologia ha consentito l'effettuazione delle verifiche nelle giornate di massima criticità, nelle quali risultava difficile spostarsi anche per le attività lavorative indifferibili.
- Previa disponibilità dei tecnici verificatori, si è potuto organizzare le verifiche anche nei giorni di festa. L'opportunità di svolgere le verifiche da casa o da qualunque altro luogo coperto da rete dati efficace ha ottimizzato il tempo disponibile per i verificatori, eliminando tutti i tempi morti relativi agli spostamenti, al dover indossare indumenti protettivi e DPI, arrampicarsi sui ponteggi, districarsi tra tubazioni, valvolame, sensori e attrezzature varie. Le attività di verifica di riparazione in impianti ALKY sono state svolte da remoto senza indossare le pesanti tute plastiche antiacido, i guanti, stivali e facciali di protezione specifica, con un ulteriore risparmio in termini di tempo e difficoltà di spostarsi nell'impianto, tra scale alla marinara, passerelle e ponteggi.
- C'è da dire che tutto quanto sopra non ha riguardato il personale in impianto che doveva garantire lo svolgimento delle attività in sicurezza e nel rispetto della procedura: per loro i tempi si sono certamente dilatati, ma questo verrà trattato nei "punti deboli".

Tra i punti deboli, citiamo:

- I tempi tecnici strettamente ristretti all'esame visivo da remoto rispetto a quelli richiesti dall'esame visivo in presenza non sono paragonabili: i primi viaggiano sull'ordine di due tre volte quelli necessari per la verifica in presenza. Inoltre il verificatore può trovare difficoltà a orientare l'operatore verso le visualizzazioni più efficaci e si è costretti all'esame completo e ravvicinato di tutte le membrature.
- Il riconoscimento di dettagli quali punzonature di legge (punzoni RI, ISPEL o INAIL) non è sempre avvantaggiato dall'utilizzo di dispositivi portatili (es. smartphone) che per dimensioni e finalità oggettive dello strumento non sono dedicati all'esecuzione di macro.
- La difficoltà per il verificatore di fare affidamento sul contributo contemporaneo dalle indicazioni che giungono da tutti i suoi sensi, che nell'attività in presenza spesso indirizzano l'esame visivo verso le criticità non immediatamente evidenti ma spesso presenti e, per questo, motivo di approfondimenti, osservazioni, riparazioni e non conformità.
- In caso di comunicazione instabile e di immagine visualizzata con definizione non sufficiente, è necessario rinviare la verifica.
- A volte le immagini non danno una buona caratterizzazione della profondità. Per questo è in atto la sperimentazione di una camera stereoscopica da utilizzarsi lato Client per ottenere immagini tridimensionali da visualizzare lato back-end con un visore apposito.
- In caso di esame visivo eseguito internamente all'attrezzatura il segnale internet non sempre permette la videochiamata a causa della schermatura opposta dalle pareti metalliche dell'attrezzatura; si è testato in questi casi l'utilizzo di un ponte (bridge) con un device esterno, collegato alla rete internet, come hot-spot Wi-Fi per quello utilizzato all'interno dell'attrezzatura al fine di amplificare il segnale disponibile all'interno.
- Qualità del segnale audio: aspetto fino ad ora non preso esplicitamente in considerazione nella procedura, ma significativo. Se le ispezioni vengono effettuate con impianti in marcia, le comunicazioni tra verificatore e operatore possono risultare disturbate dai rumori di fondo. Si rende necessario in questi casi che l'operatore sia dotato di auricolare e microfono. È inoltre necessario disporre di un canale audio indipendente di cui servirsi qualora la connessione dovesse interrompersi.

- Utilizzo della connessione da parte di utenti ‘terzi’: la connessione è ‘titolarità’ dell’INAIL, pertanto utenti ‘terzi’ che vogliono seguire da remoto il collaudo, possono sicuramente farlo (il collaudo e le operazioni che il tecnico verifica/presenza non sono segreti) ma predisponendo un loro proprio e autonomo collegamento. Questo non solo per la qualità del collegamento, ma anche per questione di privacy e di proprietà delle immagini.
- In caso di utilizzo di Microsoft Teams, il controllo sui riquadri che risulteranno in primo piano nella registrazione è piuttosto sfuggente: la soluzione trovata è mantenere con video attivo le due connessioni (campo largo e campo stretto) utilizzate per il collaudo e chiudere a icona (video off) le altre.

Infine i punti di sviluppo futuro, di grande interesse per l’Istituto in quanto già previsti su alcune linee di ricerca sperimentale sull’argomento, sono:

- Realizzare un interfacciamento tra il software SPACE1 o altri attualmente in esame e gli strumenti di misura, come termocamera ad infrarossi, termometro, endoscopio, boroscopio, sonda laser 3D e videocamera stereoscopica, per la visione 3D su apposito dispositivo in uso al verificatore.
- Sviluppare una procedura per l’utilizzo degli strumenti acquisiti nell’evoluzione sopra descritta al fine di eseguire verifiche in semi-presenza; semi-presenza è la condizione per cui il verificatore si trova a bordo attrezzatura ed effettua la visita interna (esame visivo di tutte le superfici interne dell’attrezzatura a pressione, quale reattore, forno, generatore di vapore a tubi d’acqua o a tubi da fumo, scambiatore di calore ecc.) con l’ausilio di specifici dispositivi (videocamere mono obiettivo o stereoscopiche) a bordo di bracci telescopici o robot che si introducono all’interno dell’attrezzatura evitando in tal modo l’ingresso degli operatori in “ambienti confinati”.
- Sviluppare una procedura e una tecnologia software che consenta l’utilizzo di videocamere stereoscopiche, a bordo di robot e/o bracci telescopici, abbinata a strumenti di visione da remoto o in semi-presenza tipo occhiali 3D per un’esperienza immersiva-aumentata, o come potremmo sintetizzare “*augmersive*”.
- Utilizzo della procedura per collaudi da remoto di membrane valutate tali da poterlo considerare come alternativo al collaudo in presenza anche in situazioni non emergenziali.
- Sviluppo di un sistema che consenta di ‘marcare da remoto’ la membratura o l’attrezzatura collegando ad essa, su un supporto applicato in modo inamovibile, una marcatura grafica tipo QR-code; il QR-code potrebbe contenere i dati identificativi della membratura/attrezzatura, la data dell’esecuzione dell’ultima verifica, i riferimenti al tecnico che l’ha collaudata da remoto e che firma digitalmente il QR-code nonché il collegamento URL al contenitore CIVA in cui depositare la foto digitale delle punzonature identificative tradizionali apposte dal fabbricante/riparatore e la marcatura grafica QR-code al loro fianco. Nello stesso contenitore CIVA potranno essere archiviati i documenti di riparazione.

4. Conclusioni

Il lavoro presentato descrive la procedura per l’ispezione remota delle attrezzature a pressione progettata dall’Inail progettata per far fronte all’impossibilità di effettuare ispezioni in presenza durante il lock-down a causa della pandemia COVID-19.

La procedura prevede due dispositivi che permettono di realizzare registrazioni audio e video, azionati manualmente in impianto, mentre l’ispettore si collega tramite PC guidando da remoto le operazioni svolte in impianto, visualizzandole attraverso un software di condivisione.

In questi mesi di utilizzo della procedura, si è rivelata estremamente utile per permettere gli interventi che, in momenti di pandemia, sarebbe stato impossibile effettuare. Tale utilizzo

costituisce già una interessante banco di prova per ulteriori sviluppi futuri avendo messo in luce potenzialità e limite del metodo e dei dispositivi utilizzati.

Durante il periodo della pandemia, utilizzando la procedura sono state svolte circa 400 interventi di verifica: tale suo utilizzo e le successive verifiche svolte in presenza al fine di verificare quanto rilevato da remoto, hanno consentito di tracciare un quadro dei punti forti della procedura e di quelli che possono essere migliorati. Da evidenziare inoltre il positivo riscontro e la fattiva collaborazione prestata da parte degli utilizzatori.

L'esperienza maturata grazie alle attività condotte ha permesso inoltre di tracciare un programma di sviluppo futuro, di grande interesse per l'Istituto e già previsto in alcune linee di ricerca sperimentale sull'argomento.

Bibliografia

- [1] Teeter R.A. et al. (2010). The Remote Audit. *Journal of Emerging Technologies in Accounting*, 7 (1), pp. 73–88, <https://doi.org/10.2308/jeta.2010.7.1.73>
- [2] EN 13927 (2006). Non-destructive testing - Visual testing - Equipment
- [3] EN 13018 (2016). Non-destructive testing. Visual testing. General principles
- [4] ISO 9712 (2012). Non-destructive testing — Qualification and certification of NDT personnel
- [5] MIL-STD-150A (1951). USAF resolution test chart

Operazioni in spazi confinati nell'industria di processo: sviluppo di un metodo quantitativo per la valutazione dei rischi

G. Landucci¹, L. Ricciardi², C. Nicolella¹, C. Console², F. Cassandra², L. Di Donato²

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale, Università di Pisa

² Inail – Dit

Sommario

L'accesso e le operazioni in spazi confinati costituiscono una problematica rilevante dal punto di vista della sicurezza dei lavoratori nell'ambito dell'industria di processo, testimoniata da numerosi incidenti, spesso mortali, avvenuti durante queste specifiche operazioni in apparecchi in pressione.

Il presente studio propone una metodologia quantitativa a supporto dell'identificazione dei pericoli connessi con l'accesso a spazi confinati nell'industria di processo, per la successiva valutazione dei rischi e per la preparazione delle procedure di lavoro. La metodologia proposta, a partire da dati sito-specifici (dati ambientali e rilievi in tempo reale di variabili di processo) consente di derivare i parametri necessari per la valutazione quantitativa dei possibili pericoli e rischi associati.

La metodologia è adattata al caso specifico dell'industria alimentare e, in particolare, alle raffinerie di oli vegetali. La metodologia si basa su una specifica analisi termodinamica, che consente di valutare la composizione della fase vapore, per ricavare indici di pericolosità nelle unità di processo, costituite in prevalenza da apparecchi operanti sottovuoto. Il modello si basa su informazioni derivate sia da controllo qualità (ad esempio, monitoraggio della composizione dell'ingresso dell'olio o dei fanghi, ecc.) che dal monitoraggio ambientale e condizioni di processo (es., temperatura).

L'applicazione del metodo consente in primo luogo di classificare le operazioni in spazi confinati sulla base della pericolosità, oltre a stabilire specifiche esigenze di formazione degli operatori, adeguati dispositivi di protezione individuale da utilizzare e, infine, procedure operative. Per dimostrare le potenzialità della metodologia, vengono presentati e discussi casi di studio basati sull'analisi di impianti industriali reali.

1. Introduzione

Ogni anno si verificano infortuni e decessi a causa di una valutazione del rischio inefficace per spazi confinati e/o ambienti sospetti di inquinamento [1]. Nell'ambito dell'industria di processo, in passato si sono verificati diversi incidenti durante operazioni in spazi confinati a causa di incendi, esplosioni, combustioni spontanee o a causa di contatto con ambienti ad elevata temperatura [2].

Un settore che è stato particolarmente colpito da eventi simili negli anni scorsi è quello dell'industria alimentare e dei bioprocessi, con infortuni a seguito di asfissia, annegamento e contatto con solventi o altre sostanze tossiche [3]. Tali infortuni sono per lo più riconducibili alle attività svolte dagli operatori nello svolgimento delle operazioni di montaggio, manutenzione, pulizia, riparazione delle apparecchiature di impianto [4].

Un processo critico per l'industria alimentare è rappresentato dalla raffinazione dell'olio vegetale grezzo, derivato da processi di estrazione [5]. Landucci et al. [6] hanno studiato gli aspetti di sicurezza relativi a ciascuna sezione del processo di raffinazione degli oli vegetali, come la neutralizzazione, il "bleaching", la filtrazione, e la deodorazione; operazioni che si svolgono in prevalenza in apparecchi sottovuoto. Le problematiche di sicurezza più rilevanti in tali apparecchiature sono rappresentate dal contenuto residuo di

solvente nei serbatoi di stoccaggio e nel processo. Infatti, diversi incidenti catastrofici si sono verificati in passato in Italia e Spagna nell'ambito delle operazioni di stoccaggio [7]; contestualmente, sono avvenuti incidenti significativi durante le operazioni di manutenzione alle unità di deodorazione [8]. Questo dimostra la necessità di sviluppare un approccio sistematico a supporto della valutazione dei pericoli e dei rischi in questo tipo di apparecchiature e, più in generale, per la valutazione della sicurezza delle operazioni in spazi confinati.

Questo lavoro si concentra sullo sviluppo di un approccio a supporto della valutazione dei pericoli e dei rischi per operazioni in spazi confinati e/o ambienti sospetti di inquinamento, con particolare riferimento all'industria alimentare. Rispetto agli approcci convenzionali adottati in questo ambito, viene qui proposta una valutazione di tipo quantitativo. Questo è un elemento critico per superare le limitazioni negli approcci derivati dagli standard e la legislazione corrente, come discusso nella Sezione 2. Il metodo sviluppato nel presente lavoro è presentato nella Sezione 3 e poi adattato all'analisi dei serbatoi di stoccaggio e di processo dell'olio vegetale (vedi Sezione 4). La valutazione di un caso di studio industriale è mostrata nella Sezione 5, mentre la Sezione 6 riporta alcune conclusioni e indicazioni per lavori futuri.

2. Aspetti legislativi

Questa sezione riguarda i principali riferimenti normativi e le questioni aperte da affrontare attraverso la metodologia proposta in questo lavoro, che propone in maniera innovativa una metrica quantitativa per identificare le caratteristiche degli spazi confinati.

La normativa vigente stabilisce i criteri per individuare gli spazi confinati e/o gli ambienti sospetti di inquinamento. Tuttavia, questi ambienti sono molto diversi e possono contenere sostanze chimiche, sia tossiche che infiammabili, di natura diversa. Pertanto, è necessaria un'adeguata valutazione dei rischi e i lavoratori coinvolti devono essere qualificati [9].

La normativa italiana di riferimento (D.P.R. 14 settembre 2011, n. 177 - Regolamento recante norme per la qualificazione delle imprese e dei lavoratori autonomi operanti in ambienti sospetti di inquinamento o confinanti, a norma dell'articolo 6, comma 8, lettera g), del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81.) è l'unica tra gli Stati membri dell'UE a prescrivere che qualsiasi attività lavorativa in spazi confinati e/o in ambienti sospetti di inquinamento possa essere svolta solo da aziende qualificate o lavoratori autonomi che soddisfino i seguenti requisiti:

- piena applicazione delle vigenti disposizioni in materia di valutazione dei rischi, monitoraggio sanitario e misure di gestione dell'emergenza per le imprese;
- presenza di personale con esperienza lavorativa di almeno tre anni in spazi confinati e/o in ambienti sospetti di inquinamento;
- aver svolto attività di informazione e formazione per tutto il personale, compreso il datore di lavoro impiegato per lavori in ambienti di sospetto o confinato inquinamento, specificamente finalizzate alla comprensione dei fattori di rischio tipici di tali attività e previa verifica dell'apprendimento;
- possesso di dispositivi di protezione individuale, strumentazione e attrezzature di lavoro idonei alla prevenzione dei rischi connessi all'operare in spazi confinati con o senza inquinamento ed aver svolto attività di formazione al corretto utilizzo di tali dispositivi, strumentazioni ed attrezzature.

In conclusione, per la valutazione e gestione dei rischi per i lavoratori che operano in ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento, è necessario tenere conto della normativa, a supporto e integrazione della quale intervengono linee guida, buone prassi e metodi quantitativi per l'identificazione e la valutazione dei rischi, come mostrato nel lavoro

attuale, che possono guidare il datore di lavoro nella scelta di procedure di lavoro e di emergenza, DPI e strumenti di rilevazione dei parametri ambientali.

3. Metodologia

La Figura 1 riassume i passaggi principali della presente metodologia, finalizzata all'implementazione di metriche quantitative per la valutazione dei pericoli e dei rischi negli spazi confinati.



Figura 1. Diagramma di flusso della metodologia finalizzata alla valutazione quantitativa dei pericoli associati alle operazioni in spazi confinati.

La prima fase (step 1, in Figura 1) è finalizzata ad una caratterizzazione preliminare del sistema in analisi e del suo funzionamento. Questa fase è qualitativa e offre valutazioni cruciali, in quanto identificare la presenza di un'operazione in spazi confinati è uno screening complesso e influisce sui passaggi successivi.

Successivamente, viene eseguita la valutazione preliminare dei pericoli potenziali (step 2 nella Figura 1), supportando la definizione di fattori di stress rilevanti per il sistema e il funzionamento. I fattori di stress sono qui considerati come tutti gli agenti chimici, fisici o biologici rilevanti che causano una risposta avversa sull'operatore [10]. Particolare enfasi è data agli inquinanti, alle sostanze tossiche e infiammabili, in quanto il metodo è dedicato all'industria di processo, dove vengono lavorate e stoccate sostanze pericolose. Tuttavia, l'approccio è adatto a diversi tipi di fattori di stress, come rumore, vibrazioni, shock elettrico, ecc., e può essere esteso ad altri settori industriali.

Dopo l'identificazione dei fattori di stress rilevanti per il sistema, si definiscono i relativi parametri quantitativi, finalizzati alla valutazione complessiva dello stato del sistema. Nello step 3 (vedi Figura 1), questi parametri sono dapprima modellati attraverso relazioni chimico/fisiche di tipo deterministico. Ciò consente a chi effettua la valutazione del rischio di avere un quadro in tempo reale dello stato del sistema, evidenziando potenziali pericoli legati alle sostanze tossiche e/o infiammabili potenzialmente presenti in una o più operazioni nello spazio confinato identificato nello step 1. Per supportare la valutazione del livello di rischio, vengono introdotti indici specifici derivati dai risultati modello deterministico.

Infine, lo step 4 (vedi Figura 1) consiste in una valutazione del rischio delle operazioni in spazi confinati, basata sulle informazioni quantitative ottenute nelle ultime fasi. In tale fase, possono essere anche definiti i requisiti funzionali per l'operazione, il livello e tipologia di addestramento degli operatori e le eventuali protezioni individuali.

4. Applicazione al settore della raffinazione dell'olio vegetale

4.1 Descrizione delle operazioni e identificazione dei fattori di stress

Come accennato nella Sezione 3, la metodologia sviluppata in questo lavoro ha lo scopo di migliorare la valutazione dei rischi delle operazioni in spazi confinati, con particolare riferimento all'industria di processo, attraverso un approccio quantitativo. Pertanto, la

descrizione del metodo in Sezione 3 ha una validità generale e, per sviluppare la metodologia in un contesto specifico, deve essere adattata al caso/settore in analisi.

Come introdotto nella Sezione 1, il presente lavoro è rivolto all'analisi di sicurezza nell'ambito del processo di raffinazione degli oli alimentari. In particolare, verranno prese in considerazione le operazioni nei serbatoi di stoccaggio dei greggi estratti e le unità di processo operanti sottovuoto. Le operazioni legate ai serbatoi di stoccaggio sono legate all'accesso nell'apparecchio al fine di effettuare manutenzioni, come il settaggio degli strumenti (es. indicatori di livello) o lavorazioni a caldo (es. saldatura). Le operazioni legate all'accesso in apparecchi sottovuoto in fermata sono perlopiù dovute ad operazioni di pulizia o manutenzione.

I fattori di stress rilevanti, che influenzano la natura dello spazio confinato, sono legati alla possibile presenza di vapori tossici/infiammabili accumulati negli apparecchi dove gli operatori devono svolgere le attività lavorative.

Sulla base di queste indicazioni qualitative, vengono dunque individuati i parametri rilevanti che influenzano l'accumulo di vapori pericolosi nello spazio confinato (quindi il principale fattore di stress in questo ambiente di lavoro): i) la temperatura, e ii) la composizione dell'olio vegetale greggio, con particolare riferimento al contenuto di impurità pericolose, come il solvente di estrazione residuo. Pertanto, questi parametri sono implementati in uno specifico modello quantitativo, che consente la valutazione della composizione del vapore all'interno dell'apparecchio, sia nel caso degli apparecchi di stoccaggio, sia per le apparecchiature operanti sottovuoto. L'analisi è applicata ad un caso studio di riferimento.

4.2 Definizione del caso studio

La presente metodologia è applicata ad un impianto industriale situato in Toscana per la raffinazione di oli vegetali. Il parco serbatoi dell'impianto comprende 28 serbatoi con volumi compresi tra 85 e 750 m³, con una capacità totale di circa 8500 t. La raffineria lavora olio di girasole, oliva, arachidi e mais.

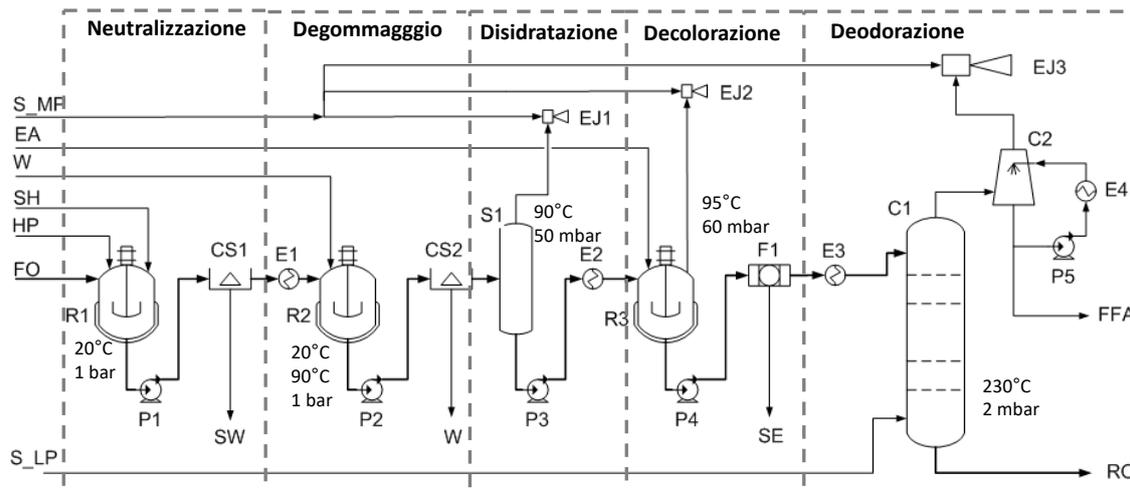
Al fine di fornire un quadro più realistico per il caso studio, si considera una distribuzione di tenore residuo di esano (RSC – “residual solvent content”) in un generico serbatoio del parco stoccaggi, compresa tra 0.05 e 1.5% in peso (vedi Tabella 1). Inoltre, viene definito un andamento fittizio della temperatura ambiente per il caso di studio su un anno di funzionamento (vedere la linea continua nella Figura 3). Il serbatoio è dotato di un sistema di riscaldamento che impedisce il raffreddamento a temperature inferiori a circa 18°C per bassi valori di temperatura ambiente. Per temperature superiori a 18°C la temperatura di esercizio si può assumere pari alla temperatura ambiente media.

Mese →	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
RSC (wt%)	0.1	0.2	0.2	0.4	0.7	1.5	0.2	0.2	0.1	0.7	1.3	0.05

Tabella 1. Distribuzione del tenore residuo di esano (RSC) assunta per il presente caso studio.

Le unità di processo ricevono l'olio greggio ed effettuano le diverse operazioni di purificazione fino allo stoccaggio del prodotto finito. Nel presente studio, al fine di considerare le condizioni tipiche del processo di raffinazione, è stata considerata la purificazione di un tipico olio di girasole assumendo un contenuto di acidi grassi liberi (FFAC) del 4% in peso da ridurre fino allo 0.04% in peso. Una schematizzazione del processo è riportata nel diagramma mostrato in Figura 2. L'olio viene prima neutralizzato aggiungendo idrossido di sodio a un grado di acidità intermedio. Successivamente l'olio

viene purificato dalle gomme mediante l'aggiunta di acido fosforico e successivamente inviato alla separazione centrifuga per scindere la frazione oleosa dai rifiuti solidi. In questa fase l'olio viene lavato con acqua e di conseguenza viene disidratato in un flash sottovuoto. Successivamente l'olio viene decolorato utilizzando terre sbiancanti e carboni attivi in un recipiente agitato in condizioni di vuoto, filtrato e inviato al trattamento di deodorizzazione. Questa sezione consiste in una neutralizzazione "fisica" con vapore acqueo ad alta temperatura in condizioni di vuoto spinto (2 mbar). L'FFAC viene strippato e condensato in un condensatore a contatto diretto, mentre il vapore non condensabile viene inviato alla sezione degli eiettori. La Tabella 2 fornisce le condizioni operative dettagliate utilizzate in ciascuna sezione del processo di raffinazione in esame.



Correnti materiali: S_MP: vapore media pressione; S_LP: vapore bassa pressione; EA: terre e carboni attivi; W: acqua; SH: soda; HP: acido fosforico; FO: olio grezzo; SW: scarti saponosi; SE: terre esauste; FFA: acidi grassi; RO: olio raffinato.

Figura 2. Schema del processo di raffinazione dell'olio vegetale considerato nel presente lavoro. Adattato da [6].

Sezione di processo	Temperatura operativa (°C)	Pressione operativa (mbar)
Neutralizzazione	20	1000
Degommaggio	20	1000
Lavaggio	90	1000
Disidratazione	90	50
Decolorazione	95	60
Deodorazione	230	2

Tabella 2. Condizioni operative nelle diverse unità di processo mostrate in Figura 2 e utilizzate nel presente studio.

4.3 Analisi del sistema olio vegetale – esano e sicurezza delle operazioni nei serbatoi di stoccaggio

La modellizzazione del sistema olio vegetale-esano è il punto di partenza per ottenere una metrica quantitativa dei rischi di incendio ed esplosione negli impianti di stoccaggio di oli vegetali, relativi alla potenziale formazione di miscele infiammabili all'interno dei serbatoi di stoccaggio, e per determinare l'accumulo di e/o vapori nocivi; tale modellazione supporta

anche la simulazione delle diverse operazioni di processo negli apparecchi sottovuoto (vedi Sezione 4.4).

Per prima cosa è stata schematizzata la composizione dell'olio vegetale grezzo, considerando un trigliceride di riferimento (LLP – costituito da due gruppi linoleici e un gruppo palmitico) in miscela con un acido grasso di riferimento (acido oleico) al 2%. Il residuo del solvente di estrazione è stato assimilato ad n-esano puro. L'equilibrio liquido-vapore è descritto dalla seguente relazione:

$$y_i P = \gamma_i x_i \phi_i^{\text{SAT}}(T) P_i^{\text{SAT}}(T) \quad i = 1, \dots, N_c \quad (1)$$

dove x_i e y_i sono rispettivamente le frazioni molari del componente i -esimo nella fase liquida e vapore, P è la pressione operativa nello spazio di testa dell'apparecchio (in Pa), γ_i è il coefficiente di attività del componente i -esimo, ϕ_i^{SAT} è la fugacità del componente i -esimo puro, P_i^{SAT} la tensione di vapore del componente i -esimo, T la temperatura operativa (K) e N_c il numero totale di componenti. Per la valutazione del coefficiente di attività è stata utilizzata una versione modificata del modello UNIFAC (UNiversal Functional Activity Coefficient) [11]. Maggiori dettagli sull'implementazione del modello termodinamico sono riportati in [7].

4.4 Impostazione della simulazione di processo

Le simulazioni di processo sono state eseguite utilizzando il software di simulazione Honeywell UniSim® Design. L'olio vegetale grezzo, comprensivo di FFAC ed esano, è stato schematizzato secondo il modello descritto nella Sezione 4.3 applicato anche per la valutazione dei serbatoi di stoccaggio. Il contenuto residuo di esano è stato fissato pari a 0.1% in peso come ipotesi di funzionamento. Lo scopo della simulazione di processo è stato quello di "tracciare" il flusso di esano attraverso ogni parte del processo, con particolare attenzione alle unità che lavorano sottovuoto e ad alta temperatura, in cui è favorita la vaporizzazione dell'esano e la formazione di condizioni pericolose in prospettiva dell'accesso dell'operatore in fermata.

Maggiori dettagli sulla simulazione di processo sono riportati in [12].

4.5 Definizione degli indici di pericolo

Sulla base dei risultati attesi dal modello termodinamico per i serbatoi di stoccaggio (Sezione 4.3) oppure della simulazione di processo (Sezione 4.4), è stato definito un indice di pericolosità per l'operazione in spazio confinato (vale a dire, CSI) per stimare il rischio di un'eventuale operazione di accesso. L'indice quantitativo CSI è funzione della composizione molare del vapore di esano (y_{RSC}), che è predetta dal modello termodinamico per i serbatoi di stoccaggio, o deriva direttamente dalla simulazione di processo per le unità di raffinazione.

La concentrazione y_{RSC} è associata successivamente ad un livello di pericolo ("hazard level") compreso tra 1 e 4, considerando la relazione tra il valore di y_{RSC} e tre soglie di riferimento:

- Hazard level 1: il primo livello è considerato più sicuro (CSI = 1) perché la composizione del vapore valutata è inferiore al valore di TLV-TWA (= 0.0005 frazione in volume), che è la concentrazione minima ritenuta pericolosa per i lavoratori;
- Hazard level 2: il secondo livello è definito introducendo la seconda composizione di riferimento, che è il valore di IDLH (= 0.0011 frazione di volume). Se la composizione molare del vapore di esano è compresa tra i valori di TLV e IDLH, il valore di CSI è dunque pari a 2.

- Hazard level 3: il terzo livello è limitato tra i valori di IDLH e LFL (= 0.011 frazione di volume), ovvero il limite inferiore di infiammabilità;
- Hazard level 4: il quarto è raggiunto per valori di y_{RSC} superiori a LFL. Il livello più alto è dunque la condizione più pericolosa, perché possono formarsi miscele infiammabili nello spazio confinato, con un rischio elevato per i lavoratori e la sicurezza dell'impianto.

5. Risultati

5.1 Risultati ottenuti per le operazioni nei serbatoi di stoccaggio

La Figura 3 mostra i risultati ottenuti nella valutazione del caso studio, riportando il valore numerico dell'indice di hazard level (rappresentato da linee verticali scure nell'istogramma) e la relativa classificazione di pericolosità, secondo la legenda (vedi sfondo ombreggiato). Chiaramente, il valore dell'indice di pericolosità cambia in base sia alle condizioni di stoccaggio che a quelle ambientali.

I risultati ottenuti portano alla valutazione dei periodi più critici per le operazioni di ingresso, in particolare per il mese di giugno quando CSI = 4 per più giorni, a causa dell'elevata temperatura ambiente e il tenore di esano residuo considerato. Un valore così alto di CSI può indicare condizioni pericolose nel serbatoio, sia per gli operatori che per l'integrità stessa dell'apparecchio, poiché l'innescò accidentale dell'atmosfera esplosiva può portare a gravi danni alle apparecchiature e alle unità vicine.

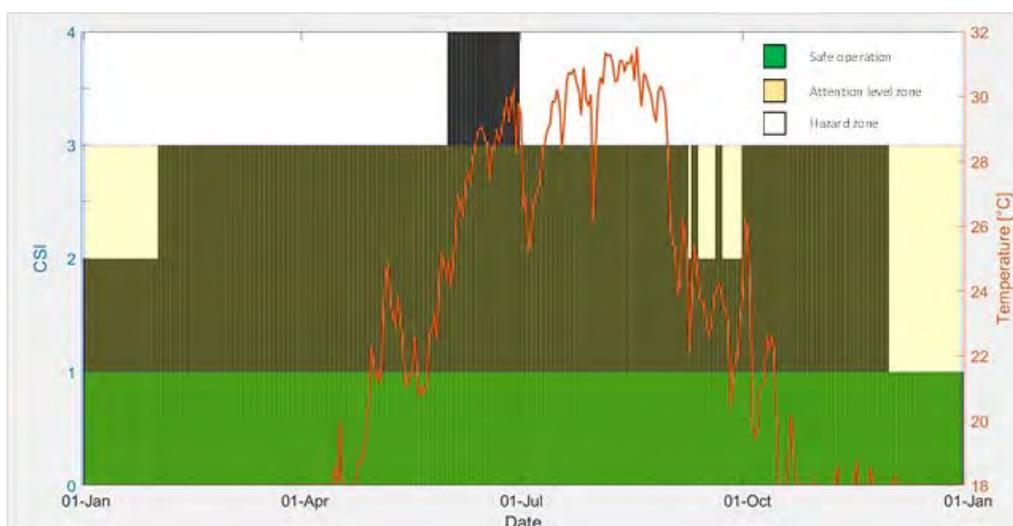


Figura 3. Valutazione CSI (linee scure dell'istogramma) e classificazione dei rischi per il caso di studio (vedi sfondo ombreggiato). Viene inoltre riportato l'andamento della temperatura ipotizzato per l'anno di esercizio (vedi linea continua). Adattato da [13].

Sulla base del CSI calcolato secondo la presente metodologia, la valutazione del rischio delle operazioni di manutenzione può essere supportata da informazioni in tempo reale derivate da modelli chimico/fisici. Queste informazioni possono essere integrate nelle procedure convenzionali per l'analisi della sicurezza sul lavoro, supportando la stima del rischio per l'operazione in questione.

Allo stesso tempo, possono essere derivati i requisiti funzionali per migliorare la sicurezza delle operazioni in stabilimento. Nel caso di operazioni di accesso in serbatoi di olio vegetale greggio, è stata riconosciuta di fondamentale importanza l'adozione dell'uso sistematico di inertizzazione tramite azoto o di vapore prima delle operazioni e/o di

specifiche procedure di accesso (drenaggio completo delle apparecchiature, ventilazione ecc.) soprattutto per alti valori di CSI.

5.2 Analisi delle unità di processo operanti sottovuoto

La simulazione rigorosa di processo ha consentito di tracciare il flusso di esano vapore a partire dalla concentrazione iniziale nel grezzo, per poi valutare la concentrazione in fase vapore e derivare l'indice CSI. La Figura 4 mostra un diagramma di *Sankey* che riporta i nodi più critici in cui è previsto l'accumulo di esano. In particolare, l'analisi ha evidenziato la necessità di concentrarsi sulle problematiche operative legate alla disidratazione, decolorazione e deodorizzazione, in cui si accumula la maggior parte dell'esano, con potenziale formazione di atmosfere pericolose.

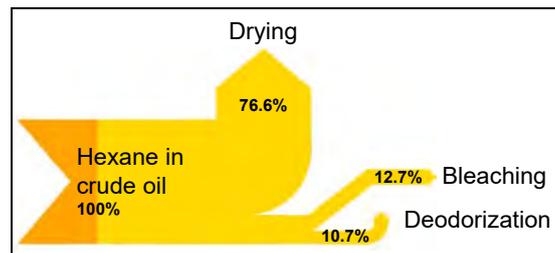


Figura 4. Diagramma di Sankey per evidenziare i nodi di accumulo dell'esano.

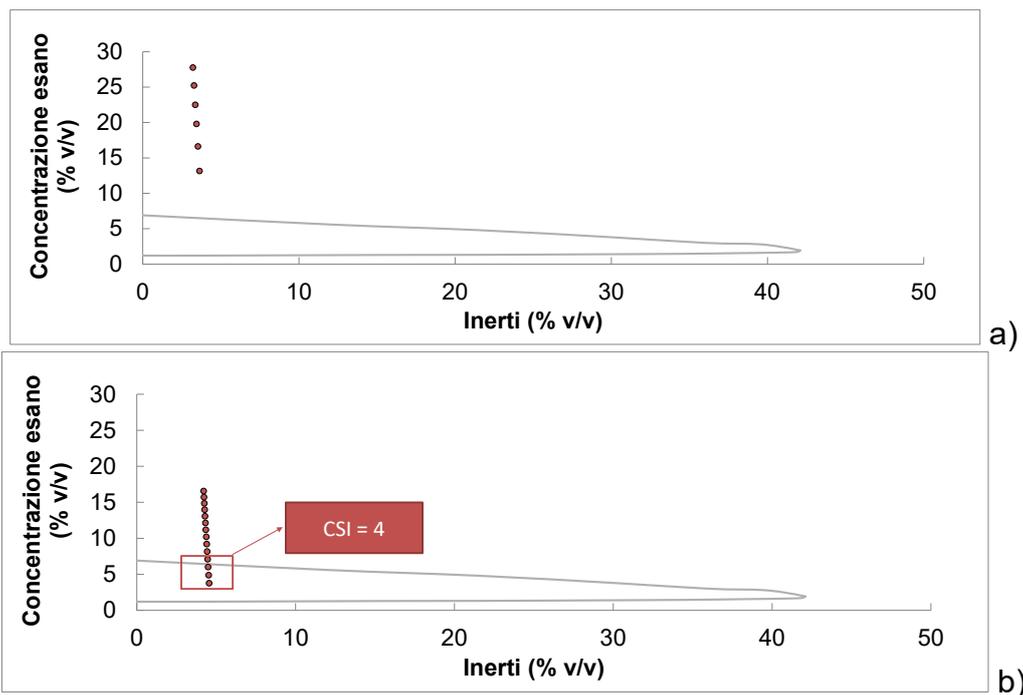


Figura 5. Confronto tra il campo di infiammabilità dell'esano considerando azoto come inertizzante e concentrazione di vapore nella linea di sfiato dell'unità di deodorazione per un contenuto residuo di esano dello 0.1% in peso nell'olio greggio in ingresso alla raffineria: a) infiltrazione di aria pari a 3 kg/h; b) infiltrazione di aria pari a 10 kg/h.

Infatti, nelle apparecchiature sottovuoto possono verificarsi infiltrazioni di aria dalle guarnizioni. Valori standard di infiltrazioni per apparecchi mantenuti sottovuoto tramite eiettori [14] sono stati considerati per verificare la possibilità di formazione di miscele infiammabili in presenza di esano ed inerti (principalmente acqua) negli sfiati. A seconda delle condizioni di processo, ovvero considerando il grado di vuoto e la tipologia di

infiltrazione, e del tenore residuo di esano, possono verificarsi condizioni pericolose come riportato in Figura 5. In particolare, la figura mostra la concentrazione di esano in uscita dalla sezione di deodorazione, evidenziando come in presenza di vuoto spinto (infiltrazione stimata pari a 10 kg/h, vedi Figura 5a) l'unità possa operare nei limiti di infiammabilità, quindi con indici CSI massimi (= 4).

Pertanto, l'analisi consente di identificare le condizioni operative che possono portare ad eventuale formazione di atmosfere pericolose all'interno delle apparecchiature operanti sottovuoto, che poi possono caratterizzare l'ambiente confinato al momento delle operazioni di manutenzione. Il presente metodo quantitativo delinea quindi le condizioni di maggiore pericolosità e supporta le successive valutazioni dei rischi.

6. Conclusioni

Lo scopo del presente lavoro è stato sviluppare una metodologia per la valutazione dei pericoli e dei rischi in ambienti di lavoro confinati e/o sospetti di inquinamento. Rispetto agli approcci convenzionali adottati per le analisi della sicurezza sul lavoro, il presente lavoro illustra come i parametri fisico/chimici relativi sia all'attività lavorativa che all'ambiente possono essere entrambi convertiti in metriche rigorose a supporto dell'identificazione preliminare dei pericoli. La novità introdotta dal metodo è relativa all'implementazione di un approccio termodinamico rigoroso, basato su relazioni chimico/fisiche e simulazione di processo, che consente l'analisi quantitativa del sistema. Pertanto, informazioni importanti possono essere ricavate per supportare successive valutazione dei rischi e per l'implementazione di procedure di lavoro e di appositi percorsi di formazione e addestramento degli operatori. Viene preso in considerazione l'esempio dell'industria alimentare e della raffinazione dell'olio vegetale. Tuttavia, il metodo è adatto all'estensione in qualsiasi campo caratterizzato dalla presenza di sostanze pericolose con conseguenti pericoli tossici e/o infiammabili per gli operatori. La possibilità di sintonizzare l'approccio su qualsiasi settore origina un potente strumento da implementare nel sistema di gestione operativo della sicurezza.

Infine, vale la pena ricordare che il metodo applicato in questo lavoro è in una fase preliminare di sviluppo ed è adatto a fornire informazioni generali sulle varie tipologie di incidenti in ambienti di lavoro confinati e/o sospetti di inquinamento. Il coinvolgimento delle associazioni di categoria per la mappatura degli incidenti nell'industria alimentare, con particolare riferimento alla produzione di vino e olio d'oliva, è un passaggio cruciale per lo sviluppo di buone prassi e per supportare le attività di aggiornamento della normativa di settore.

7. Bibliografia

- [1] Burlet-Vienney, D., Chinniah, Y., Bahloul, A., Roberge, B., 2015. Design and application of a 5 step risk assessment tool for confined space entries, *Saf. Sci.* 80, 144–155.
- [2] Riaz, Z., Arslan, M., Kiani, A.K., Azhar, S., 2014. CoSMoS: a BIM and wireless sensor based integrated solution for worker safety in confined spaces, *Autom. Construct.* 45, 96–106.
- [3] Jacinto, C., Canoa, M., Guedes Soares, C. Workplace and organisational factors in accident analysis within the Food Industry, *Saf. Sci.* 47, 626-635.
- [4] Botti, L., Duraccio, V., Gnoni, M.G., Mora, C., 2018. An integrated holistic approach to health and safety in confined spaces, *J. of Loss Prev. Proc. Ind.* 55, 25-35.

- [5] Shahidi F., 2005, *Edible Oil and Fat Products: Edible Oils*, Bailey's industrial oil and fat products, Vol. 2, 6th Ed., Wiley & Sons, New York, USA.
- [6] Landucci, G., Lovicu, G., Barontini, F., Pipitone, E., Dimatteo, A., Guidi, L., Nicolella, C., 2014, Hazards and safety issues associated to the residual solid content in crude edible oil processing, *Chem. Eng. Trans.* 36, 151-156.
- [7] Landucci G, Nucci B, Pelagagge L, Nicolella C: Hazard Assessment of Edible Oil Refining: Formation of Flammable Mixtures in Storage Tanks. *Int. J. of Food Eng.* 105 (2011) 105-111.
- [8] Landucci, G., Lovicu, G., Barontini, F., Guidi, L., Nicolella, C. 2014, Safety issues related to the maintenance operations in a vegetable oil refinery: A case study, *J. of Loss Prev. Proc. Ind.* 30, 95-104.
- [9] Di Donato, L., Longo, F., Ferraro, A., Pirozzi, M., 2020, An advanced solutions for operators' training working in confined and /or pollution suspected space, *Proc. Manuf.* 42, 254-258.
- [10] Firestone, M., Bender, E.S., 2002. *Lessons Learned on Planning and Scoping for Environmental Risk Assessments*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- [11] Fredenslund A, Gmehling J, Rasmussen P: *Vapor-Liquid Equilibria Using UNIFAC: a Group Contribution Method*. Elsevier, Amsterdam (1977).
- [12] G. Landucci, G. Pannocchia, L. Pelagagge, C. Nicolella, Analysis and simulation of an industrial vegetable oil refining process, *J Food Eng* 2013, 116:840-851.
- [13] Landucci G., Ricciardi L., Rossi L., Ovidi F., Di Donato L., 2020, Quantitative Methodology to Support the Hazard Assessment of Confined Space Operations in the Process Industry, *Chemical Engineering Transactions*, 82, 1-6.
- [14] Körting Hannover AG (1994). *Reference data for application of jet ejectors and vacuum processing*. Körting Hannover AG, Hannover.

Lo stoccaggio di idrogeno. Aspetti della costruzione e verifica delle attrezzature in pressione

M. Oss¹, R. Longo²

¹ Inail - Uot di Bolzano

² Inail - Uot di Catanzaro

Sommario

L'interesse per l'idrogeno, come vettore energetico e di accumulo, è oggi più attuale che mai perché si presenta come una delle possibili soluzioni per rispettare i limiti di emissione di CO₂ richiesti dagli accordi internazionali. Gli autori, dopo una descrizione della situazione attuale delle modalità di produzione e gestione dell'idrogeno, focalizzano l'attenzione sugli aspetti relativi alla sicurezza nello stoccaggio ed alle procedure di controllo della costruzione e di verifica delle attrezzature in pressione contenenti tale sostanza.

1. Interesse per l'idrogeno

Il fabbisogno energetico mondiale è soddisfatto in gran parte dai combustibili fossili, dal nucleare, dall'energia idroelettrica, dai biocarburanti, e solo in minima parte da eolico, solare e geotermico. Le ricadute sull'ambiente sono note: l'utilizzo dei combustibili fossili rilascia CO₂ e altri inquinanti; il nucleare porta con sé il problema delle scorie radioattive; gli impianti idroelettrici modificano il paesaggio con la costruzione di bacini artificiali cementificati; i biocombustibili sono stati spesso fraintesi, disboscando intere aree incontaminate del mondo per coltivare mais, grano, canna da zucchero da destinare alla loro produzione.

Sotto grande attenzione è però l'elevata emissione di CO₂ nell'atmosfera, considerata responsabile del cambiamento climatico in atto. Pertanto gli sforzi della Comunità internazionale si stanno concentrando da tempo sulla ricerca di soluzioni.

Le fonti energetiche rinnovabili consentono di ottenere energia elettrica senza emissione di CO₂. Tuttavia, per esempio, eolico e solare producono energia elettrica legata alle condizioni meteo, e, mentre in condizioni di assenza di vento o sole non danno energia, in condizioni favorevoli forniscono un surplus di produzione, ovvero energia non richiesta immediatamente per l'uso. Si pone quindi il problema di accumulare questo surplus. Ecco quindi che l'idrogeno si propone come una soluzione. Infatti l'energia ottenuta da fonti rinnovabili può essere utilizzata per produrre idrogeno e questo può essere stoccato, trasportato e ritrasformato in energia elettrica o utilizzato come combustibile.

2. Caratteristiche dell'idrogeno

Sulla terra l'idrogeno si trova quasi esclusivamente legato in composti chimici. È infatti molto reattivo con tutti gli agenti ossidanti come l'ossigeno, il cloro, il protossido d'azoto, ecc., e le reazioni sono accompagnate da un elevato sviluppo di calore. In presenza di una fonte di innesco le reazioni possono diventare esplosive, soprattutto se avvengono in ambienti chiusi. Infatti l'energia richiesta per innescare l'idrogeno in aria è estremamente bassa. La fiamma dell'idrogeno è difficilmente visibile alla luce del giorno. I limiti di infiammabilità in aria a 25°C e alla pressione atmosferica sono: inferiore 4% e superiore 77% in volume [1] mentre il campo di esplosività va dal 17% al 56% [13].

È l'elemento con la molecola più piccola e più leggera (densità: 84 g/m³ a 15°C e 1 bar), si sposta molto velocemente verso l'alto e riesce a penetrare nei materiali normalmente impermeabili ai gas.

L'idrogeno è molto leggero anche allo stato liquido (densità: 70 g/l a -253°C e 1 bar); evapora velocemente e forma circa 845 litri di gas per ogni litro di liquido. Il gas appena evaporato, freddo, ha densità simile a quella dell'aria e si diffonde orizzontalmente, ma all'aumentare della temperatura la sua densità diminuisce e si muove verso l'alto. [2]

Ha scarsa densità energetica in termini di volume, che viene aumentata attraverso un aumento della pressione, la liquefazione o il legame chimico o fisico con un altro elemento. Ha però una densità energetica in massa che supera quella di tutti i più comuni carburanti come evidenziato dalla tabella 1.

TIPO DI STOCCAGGIO	Densità di energia per unità di MASSA (MJ/kg)	Densità di energia per unità di VOLUME (MJ/l)
Idrogeno (gassoso a temperatura ambiente)	143	0,01079
Idrogeno (gassoso compresso a 700 bar)	143	5,6
Idrogeno (liquefatto a -235 °C)	143	10,1
Metano (1,013bar, 15 °C)	55,6	0,0378
Gas naturale (compresso) a 200 bar	53,6	10
GPL: propano	49,6	25,3
GPL: butano	49,1	27,7
Benzina	46,9	34,6
Gasolio/Gasolio da riscaldamento	45,8	42,3
Miscela di etanolo E10 (10% etanolo, 90% benzina per volume)	43,54	33,72
Miscela di etanolo E85 (85% etanolo, 10% benzina per volume)	33,1	25,65
Batteria litio-ione	0,54–0,72	0,9–1,9
Batteria litio-solfuro	0,54-1,44	

Tabella 1. Densità energetica di alcuni carburanti e tecnologie di immagazzinamento [3]

3. Processi di produzione

L'idrogeno viene convenzionalmente nominato associandolo ad un colore che indica il processo di produzione ed è in relazione con le emissioni di CO₂:

- **idrogeno verde**, prodotto per elettrolisi dell'acqua utilizzando elettricità ottenuta da fonti rinnovabili. Zero emissioni di CO₂. Nell'elettrolizzatore, o cella elettrolitica, si formano

idrogeno e ossigeno gassosi. Nel processo inverso, nelle celle a combustibile (o fuel cells), l'idrogeno H_2 viene ricombinato con l'ossigeno generando corrente elettrica, acqua e calore;

- **idrogeno grigio**, ottenuto dallo steam reforming, facendo reagire idrocarburi, solitamente il gas naturale, con acqua in forno ad alta temperatura, ottenendo acqua e CO che vengono poi trasformati in idrogeno e CO_2 . Per produrre una tonnellata di idrogeno si producono così circa dieci tonnellate di CO_2 ;
- **idrogeno blu**, che si ottiene come l'idrogeno grigio, però con la separazione e lo stoccaggio della CO_2 . Questo metodo è chiamato in inglese "Carbon Capture and Storage", o CCS in breve;
- **idrogeno turchese**, che è prodotto dal cracking termico del metano in un reattore ad alta temperatura (pirolisi del metano). Invece di CO_2 viene prodotto carbonio solido.

Sono allo studio sistemi che valutano l'efficienza nell'ottenere idrogeno sia dall'attività di microrganismi, cianobatteri e microalghe, che dalla gassificazione di rifiuti solidi urbani e plastiche non riciclabili.

In Europa l'idrogeno è prodotto essenzialmente con lo steam reforming e come sottoprodotto della produzione di cloro.

4. Utilizzo

L'idrogeno può essere utilizzato come combustibile nei motori a combustione interna oppure nelle celle a combustibile (fuel cells) per produrre energia elettrica.

Può essere stoccato e trasportato. Il trasporto può avvenire in serbatoi in forma liquida o gassosa o può essere immesso, in una certa quantità, nei gasdotti. È dimostrata la possibilità di miscelare il 10% di idrogeno al gas naturale nell'infrastruttura esistente [4].

Per quanto riguarda l'accumulo, un vantaggio rispetto alle batterie è la densità di energia per unità di massa (MJ/kg) nettamente a vantaggio dell'idrogeno, come evidente dalla figura 1:

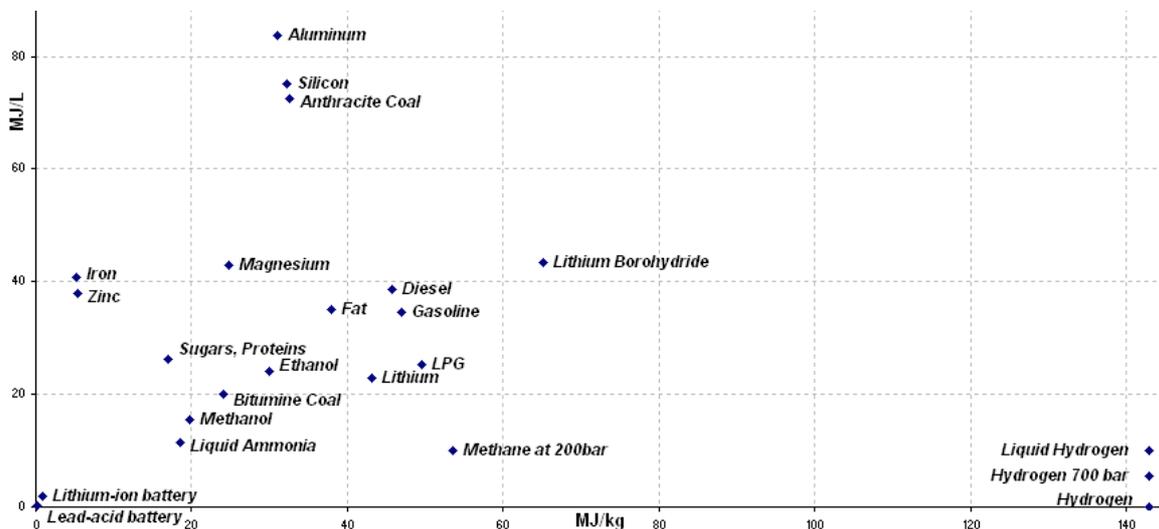


Figura 1. Energia volumetrica / Energia massica per alcune sostanze [3]

Le batterie sono inoltre riciclabili solo per circa la metà dei componenti e la durata di vita stimata di quelle delle automobili è di un massimo di 8 anni o 160000 km.

Le fonti sull'utilizzo dell'idrogeno nel mondo sono svariate, ma in esse le percentuali variano di poco. Nel 2009 [14] l'idrogeno prodotto nel mondo veniva utilizzato per il 50% per la produzione di ammoniaca, e quindi fertilizzanti, il 37% nelle raffinerie, l'8% per la

produzione di metanolo, il 4% in metallurgia e l'1% in campo spaziale. Dopo soli 11 anni lo sviluppo delle tecnologie di produzione dell'idrogeno ne ha modificato l'uso, e attualmente il 27% viene utilizzato per la produzione di ammoniaca, il 33% nelle raffinerie, l'11% per la produzione di metanolo, il 3% in metallurgia e ben il 26% in campo energetico (trasporti e riscaldamento ambienti) [15].

L'idrogeno può contribuire a decarbonizzare molti settori energivori "hard to abate" come per esempio quello siderurgico. Può sostituire il metano per alimentare i processi produttivi.

L'uso dell'idrogeno verde, come vettore di energia, si troverà ad affiancare l'elettrificazione e il suo effettivo impiego dipenderà dall'abbattimento dei costi di produzione, dai sostegni statali e dall'evoluzione della tecnologia di utilizzo.

5. Metodi di stoccaggio e trasporto

Le modalità di stoccaggio dell'idrogeno sono molteplici. Attualmente le più impiegate sono:

- come gas compresso (CGH₂) in serbatoi in grado di resistere a pressioni fino a 1000 bar;
- come liquido criogenico (LH₂) in serbatoi criogenici (il punto di ebollizione dell'idrogeno a 1 bar è -252,76 °C).

Altri significativi sistemi di accumulo sono:

- nei materiali:
 - nei solidi (per assorbimento), come idruri metallici ottenuti dalla reazione chimica reversibile dell'idrogeno con diverse sostanze. Ad esempio pellet di metallo pressato, inseriti in bombole a pressione massima di 40 bar (20 °C), possono immagazzinare circa 1 kg di idrogeno con un contenuto energetico di 33 kWh, e questo può poi essere rilasciato ad una pressione di 1-2 bar [5];
 - in sostanze organiche (idruri chimici come metanolo, ammonio, acido formico ecc.). Ad esempio la tecnologia LOHC ("Liquid Organic Hydrogen Carrier") prevede che l'idrogeno venga legato chimicamente al dibenziltoluene (H 0-LOHC) per formare il peridrodibenziltoluene (H 18-LOHC). L'idrogeno così stoccato può essere conservato a pressione atmosferica e temperatura ambiente e può essere trasportato senza pericolo in normali serbatoi o in tubazioni. Successivamente il peridrodibenziltoluene può essere deidrogenizzato per riavere l'idrogeno, e il ciclo può ricominciare senza limiti. C'è molta disponibilità di dibenziltoluene, non è tossico, è difficilmente infiammabile (anche se caricato a idrogeno), resta liquido da -34 a +360 °C. [6] [7]

La ricerca è molto attiva in questo campo. Focalizzeremo ora l'attenzione sui primi due casi di stoccaggio.

5.1 Stoccaggio come gas compresso (CGH₂) in contenitori a pressione

L'idrogeno viene di solito stoccato e trasportato a temperatura ambiente in forma gassosa a 200/300 bar in bombole singole o assemblate in pacchi, o in bomboloni fissati in modo inamovibile su un contenitore per gas ad elementi multipli (carro bombolaio o trailer).

La maggior parte dei contenitori sono cilindri senza saldatura e vasi/tubi realizzati in acciai legati al cromo-molibdeno temprati e rinvenuti. Negli ultimi anni, al fine di migliorare l'efficienza del trasporto, sono stati introdotti una varietà di cilindri compositi.

Nei serbatoi delle auto si arriva a 700 bar per contrastare il più possibile la sua scarsa densità energetica in termini di volume. A Bolzano si trova il primo impianto inaugurato in Italia per la produzione, lo stoccaggio e la distribuzione di idrogeno verde,

che attualmente può rifornire fino a 15 autobus urbani (con tratte giornaliere di 200-250 km) o fino a 700 vetture al giorno. [8]

5.2 Stoccaggio come liquido criogenico (LH2) in serbatoi criogenici

L'idrogeno può essere stoccato e trasportato a pressione ambiente, sotto forma di liquido criogenico (-253 °C) in contenitori termicamente isolati. Dato che un aumento di temperatura determina l'evaporazione dell'idrogeno liquido all'interno, questi serbatoi sono equipaggiati di un dispositivo di sicurezza che consente lo scarico del gas in caso di innalzamento della pressione.

Il rilascio in atmosfera di idrogeno liquido o di idrogeno appena evaporato può essere fonte di pericolo di incendio/esplosione (basta una debole scintilla come innesco, la fiamma è quasi invisibile, molto stretta e direzionale, che concentra energia su una piccola superficie) e di infragilimento di materiali (acciai, gomme, ecc.) a causa delle basse temperature. Genera inoltre dense nebbie che ostacolano la visibilità. A causa della sua bassa densità e viscosità vi è rischio di fuga dai circuiti e da materiali normalmente impermeabili agli altri gas. [2]

6. Procedura di verifica delle attrezzature in pressione in acciaio contenenti idrogeno

I serbatoi in pressione in acciaio per lo stoccaggio dell'idrogeno rientrano nell'ambito di applicazione della direttiva PED 2014/68/UE. L'esercizio degli stessi, in Italia, è disciplinato dal DM 329/2004 e dal DM 11/04/2011. Se le bombole sono trasportabili sono soggette alla direttiva TPED e all'ADR.

Molta attenzione deve essere posta all'effetto dell'infragilimento e dell'attacco da idrogeno.

Riprendiamo le definizioni della UNI ISO/TR 15916:2018.

Per *infragilimento da idrogeno* si intende una significativa perdita di duttilità di alcuni materiali metallici se esposti all'idrogeno. La duttilità descrive la proprietà dei materiali di deformarsi plasticamente sotto carico prima di rompersi. A livello atomico, affinché avvenga l'infragilimento, le molecole dell'idrogeno devono in primo luogo dissociarsi in atomi prima che possano diffondersi nella struttura metallica. L'idrogeno atomico va ad occupare direttamente il reticolo metallico del materiale sotto forma di atomi interstiziali. Difetti reticolari aumentano la capacità di assorbimento. Quando questi atomi di idrogeno si ricombinano in minuscole cavità della struttura metallica per formare molecole biatomiche di idrogeno, generano una pressione dall'interno della cavità. Questa pressione può aumentare fino a originare, già a bassi carichi, rotture improvvise.

Gli acciai ad alta resistenza alla trazione risultano spesso più suscettibili all'infragilimento degli acciai a bassa resistenza alla trazione. [1]

Per *attacco da idrogeno* si intende invece un fenomeno di infragilimento da idrogeno subito da molti acciai strutturali basso-legati a temperature maggiori di 200 °C . Si tratta di una degradazione non reversibile della microstruttura dell'acciaio causata da una reazione chimica fra l'idrogeno atomico che si diffonde e il carbonio dell'acciaio, con conseguente formazione di metano che non fuoriesce dal metallo ma si raccoglie nelle cavità, esercitando una pressione che provoca la formazione di cricche. Si ha la decarburazione dell'acciaio e la conseguente perdita di resistenza e di duttilità. La severità dell'attacco da idrogeno aumenta con l'aumento della temperatura e della pressione. [1]

L'infragilimento da idrogeno è contrastato da una corretta progettazione ed una adeguata selezione dei materiali.

Vari documenti hanno esaminato il problema della rottura improvvisa dei recipienti contenenti idrogeno. Ad esempio i seguenti emessi dall'EIGA, European Industrial Gases Association e dall'ISO:

- EIGA GASEOUS HYDROGEN STATIONS IGC Doc 15/06/E Revision of Doc 15/96 and Doc 15/05;
- EIGA HYDROGEN CYLINDERS AND TRANSPORT VESSELS Doc 100/20 Revision of D 100/11;
- UNI EN ISO 11114-1:2020 - Bombole per gas - Compatibilità dei materiali della bombola e della valvola con i gas contenuti - Parte 1: Materiali metallici;
- UNI EN ISO 11114-4:2017 - Bombole trasportabili per gas - Compatibilità dei materiali della bombola e della valvola con i gas contenuti - Parte 4: Metodi di prova per la scelta dei materiali metallici resistenti all'infragilimento da idrogeno;
- UNI ISO/TR 15916:2018 - Considerazioni di base per la sicurezza dei sistemi a idrogeno.

Dallo studio dei report di incidenti riguardanti i contenitori di idrogeno l'EIGA raccomanda di prestare la massima attenzione al controllo della superficie interna. Difetti di fabbricazione superficiali, critici per geometria e stress localizzati, oppure difetti derivanti dall'utilizzo, come pitting di corrosione dovuti alla presenza di prodotti non congruenti con quelli previsti, sono spesso la causa scatenante del cedimento improvviso del serbatoio. Questi difetti danno infatti inizio a cricche accelerate dalla presenza di idrogeno e dal numero di cicli di carico e scarico a cui è sottoposto il componente. Fattore di aggravio è l'utilizzo di alte pressioni ed alta purezza dell'idrogeno. Si ritiene che l'effetto di infragilimento da idrogeno sia massimizzato quando l'impurità dell'ossigeno è inferiore a 10 ppm/V, ma diminuisce con l'aumentare dell'impurità fino al punto che livelli di ossigeno superiori a 200/300 ppm/V inibiscono completamente l'effetto di infragilimento da idrogeno. Inoltre si ritiene che, per gli acciai al carbonio sotto i 10 bar, l'effetto dell'idrogeno nel causare infragilimento a temperatura ambiente sia minimo, mentre le pressioni di idrogeno sopra i 25 bar hanno un effetto maggiore. [9]

6.1 Scelta dei materiali

In sede di costruzione la scelta deve orientarsi verso materiali con limitato valore di resistenza alla trazione perché più è alto e più c'è il rischio di rottura improvvisa. Inoltre, per le saldature, devono essere scelti elettrodi non suscettibili all'infragilimento da idrogeno. 3. I serbatoi saldati per lo stoccaggio dell'idrogeno devono essere progettati, fabbricati e ispezionati conformemente a un codice di calcolo riconosciuto e ai seguenti requisiti [9]:

- il carico di snervamento effettivo del materiale non deve essere superiore a 420 MPa;
- il carico di rottura effettivo del materiale non deve essere superiore a 630 MPa;
- il materiale deve essere allo stato normalizzato;
- il materiale deve avere valori specificati per la tenacità a -20°C come indicato dal codice utilizzato;
- l'equivalente in carbonio deve essere conforme al seguente requisito

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} < 0.45$$

Per i recipienti non saldati gli acciai al cromo-molibdeno, temprati e rinvenuti, con un carico di rottura massimo di 950 MPa, possono essere utilizzati in sicurezza.

6.2 Progettazione e costruzione

Riguardo alla progettazione e costruzione [9]:

- dovrebbe essere eseguita un'analisi di fatica basata sul carico ciclico di progetto;
- dovrebbero essere ridotte al minimo le sollecitazioni locali;
- tutte le saldature dovrebbero essere soggette a controlli non distruttivi al 100%;
- la durezza delle saldature e della zona termicamente alterata dovrebbe essere inferiore a 250 HV;
- la superficie interna ed esterna di tutte le saldature principali dovrebbe essere preparata, secondo norma, sia per il controllo ad ultrasuoni che per l'ispezione con particelle magnetiche;
- il recipiente dovrebbe essere protetto dalla sovrappressione per tutti gli eventi prevedibili.

Nella figura 2 vengono riportati i fattori determinanti le rotture visti dalla parte dell'utilizzatore e da quella del costruttore:

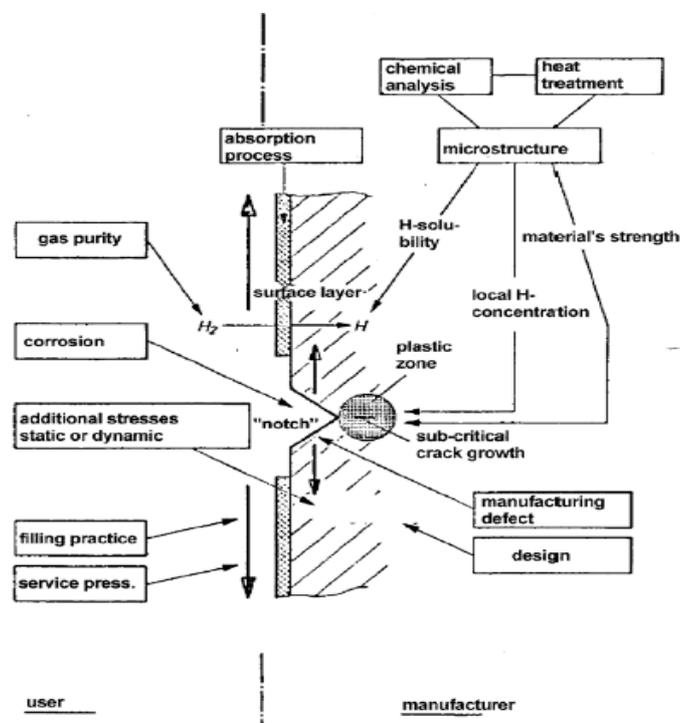


Figura 2. Fattori determinanti le rotture dei recipienti [10]

6.3 Verifiche dei recipienti non saldati

I controlli da effettuare ad ogni ispezione periodica sono il controllo della superficie, sia interna che esterna, e la prova idraulica.

Per i recipienti senza saldatura costruiti o precedentemente controllati senza seguire le raccomandazioni del DOC 100/20 [10], oppure quando rimangono dubbi nell'ispezione visiva, si rende necessario effettuare la prova di durezza e l'esame ad ultrasuoni che verrà eseguito preferibilmente dopo la prova idraulica poiché i difetti, ad esempio le cricche, possono crescere durante tale prova.

6.3.1 Ispezione visiva della superficie interna

L'obiettivo dell'ispezione interna è quello di eliminare i contenitori che presentano difetti critici. Al fine di una corretta ispezione, effettuata anche utilizzando ausili visivi, è essenziale che la superficie interna sia priva di prodotti di corrosione sciolti e di incrostazioni poiché questi potrebbero oscurare difetti più gravi. Se necessario deve essere eseguita una pulizia meccanica della superficie interna ad esempio mediante spazzolatura, sabbiatura, getto d'acqua.

Particolare attenzione deve essere posta per garantire che la superficie sia priva di fessure a spigoli vivi, vaiolature, cricche, incrostazioni, altri difetti come ad esempio quelli descritti nell'appendice F del DOC 100/20 [10] che definisce i criteri per lo scarto dei recipienti. Se permangono dubbi, il recipiente deve essere ulteriormente esaminato con appropriati controlli non distruttivi.

6.3.2 Ispezione visiva della superficie esterna

Prima di procedere con l'ispezione è importante accertarsi che la superficie esterna sia priva di prodotti di corrosione e/o di vernice deteriorata.

Se necessario deve essere eseguita una pulizia meccanica della superficie esterna ad esempio mediante spazzolatura, sabbiatura, getto d'acqua.

L'obiettivo dell'ispezione esterna è quello di eliminare i recipienti che contengono intagli, rigonfiamenti, ammaccature, vaiolature, altri difetti descritti sempre dall'appendice F del DOC 100/20 [10].

6.3.3 Prova idraulica

Al termine della prova idraulica deve essere posta particolare cura alla pulizia, asciugatura e sigillatura del recipiente per evitare rischi di corrosione.

6.3.4 Prova di durezza

Come già detto gli acciai con alta resistenza alla trazione risultano spesso più suscettibili alle rotture indotte dall'idrogeno. È essenziale che il carico di rottura (R_m) non superi i valori raccomandati. La prova di durezza è un metodo pratico e conveniente, non distruttivo, per ottenere informazioni approssimative sul carico di snervamento/rottura di un recipiente metallico. Nella raccomandazione n. 1 e appendice G del DOC 100/20 [10] è riportato come eseguire la prova.

6.4 Verifiche dei recipienti saldati

Per i serbatoi di idrogeno gassoso saldati il DOC 15/06/E [9] raccomanda il 100% di CND di tutti i principali cordoni di saldatura (incluso la ZTA) con i seguenti metodi:

- a) esame interno con particelle magnetiche (preferibilmente la tecnica fluorescente a umido);
- b) rilevamento dei difetti con strumento ad ultrasuoni eseguito dall'interno o dall'esterno del recipiente. Ovviamente le condizioni interne della superficie saldata influenzano la possibilità di effettuare l'esame dall'esterno;
- c) controllo non distruttivo con emissione acustica.

6.5 Verifiche di installazione

Nella norma UNI ISO/TR 15916:2018 [1] vengono fornite raccomandazioni per l'installazione dei serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno. In particolare si deve porre attenzione ai dispositivi di controllo e sicurezza contro le sovrappressioni e le sovratemperature, verificare la pulizia dell'area circostante il serbatoio, e la sua messa a

terra. I serbatoi dovrebbero essere contrassegnati con il nome “idrogeno” o “idrogeno liquido – gas infiammabile”.

Per quanto riguarda gli sfiati controllare che convogliano il gas in luogo sicuro e non siano intercettati. Porre attenzione agli effetti di eventi naturali estremi; ad esempio un grave incidente si è verificato a causa del vento forte che ha piegato, limitandone il flusso in uscita e convogliando al suolo il gas, uno sfiato dell'idrogeno di un recipiente di stoccaggio creando una pericolosa contropressione sul sistema di scarico che si è anche incendiato. Ovviamente per i serbatoi criogenici è fondamentale verificare l'integrità dell'isolamento.

7. Conclusioni

La tecnologia per la produzione e l'uso dell'idrogeno è conosciuta da tempo, basti pensare al gas di città degli anni '50 del secolo scorso, che è poi stato abbandonato a favore dell'uso più economico dei combustibili fossili. Oggigiorno c'è un'elevata attenzione al cambiamento climatico di cui le emissioni di gas serra sono ritenute responsabili. Si è dunque tornati a guardare all'idrogeno, prodotto da fonti rinnovabili, come carburante e come vettore energetico, cioè in grado di veicolare l'energia da una forma all'altra.

I produttori di apparecchi a pressione per il contenimento dell'idrogeno hanno già a disposizione varie norme internazionali a cui far riferimento. In questo articolo sono stati presi in considerazione alcuni degli aspetti più importanti per la sicurezza trattati da queste norme, sia per la costruzione che per l'esercizio.

8. Bibliografia

[1] Norma UNI ISO/TR 15916:2018. Considerazioni di base per la sicurezza dei sistemi a idrogeno

[2] Linde - RACCOMANDAZIONE DI SICUREZZA RS23 – Proprietà e rischi dell'idrogeno

[3] Wikipedia. Densità energetica. Indirizzo internet:

https://it.wikipedia.org/wiki/Densit%C3%A0_energetica#:~:text=La%20densit%C3%A0%20energetica%20%C3%A8%20la,pi%C3%B9%20correttamente%20di%20energia%20specifica

[4] Marco Alverà. Rivoluzione idrogeno. La piccola molecola che può salvare il mondo. Mondadori. 2020

[5] <https://www.gknhydrogen.com/>

[6] Hydrogenious Technologies GmbH–Erlangen. Indirizzo internet:

<https://www.hydrogenious.net/index.php/en/hydrogen-2-2/>

[7] Tim Koch. Das Supermolekül: Wie wir mit Wasserstoff die Zukunft erobern. Westend. 2019

[8] Autostrada del Brennero s.p.a. Indirizzo internet:

<https://www.autobrennero.it/it/sostenibilita/idrogeno/>

[9] EIGA GASEOUS HYDROGEN STATIONS IGC Doc 15/06/E - Revision of Doc 15/96 and Doc 15/05 - Appendix 5: Welded gaseous hydrogen storage vessels

[10] EIGA HYDROGEN CYLINDERS AND TRANSPORT VESSELS Doc 100/20 - Revision of Doc 100/11

[11] norma UNI EN ISO 11114-1:2020 - Bombole per gas - Compatibilità dei materiali della bombola e della valvola con i gas contenuti - Parte 1: Materiali metallici

[12] norma UNI EN ISO 11114-4:2017 - Bombole trasportabili per gas - Compatibilità dei materiali della bombola e della valvola con i gas contenuti - Parte 4: Metodi di prova per la scelta dei materiali metallici resistenti all'infragilimento da idrogeno

[13] EnvironmentalChemistry.com

[14] Maria Valenti. Produzione di idrogeno per via solare. Tesi di dottorato. Università degli Studi di Napoli Federico II. 2009

[15] Alberto Costa. Il futuro dell'idrogeno. In Dirigenti Industria. 1 luglio 2020.
<https://dirigentindustria.it/notizie/sviluppo-sostenibile/il-futuro-dell-idrogeno.html>

Gli apparecchi a pressione in un impianto di STEAM REFORMIG dell'idrogeno

S. Guido¹, G. Odino², G. Gorrino³, A. Urso⁴

¹Consorzio NOVIGAS

²Studio tecnico Ing. Odino

³Inail - Uot di Roma

⁴Inail - Uot di Alessandria

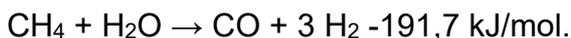
Sommario

La produzione su vasta scala di Idrogeno viene ottenuta dal metano con una reazione di reformig, il processo consiste nel far reagire il metano con il vapore d'acqua ad una temperatura compresa tra 800 e 865 °C. Tali caratteristiche di reazione fanno sì che le attrezzature a pressione costituenti l'impianto di reforming siano soggette a fenomeni di scorrimento viscoso, di invecchiamento, di fatica e problematiche dovute ai composti chimici pericolosi che si sviluppano durante il processo (idrogeno, ossido di carbonio).

L'impianto di produzione di idrogeno oggetto di studio, è stato realizzato da KTI e avviato nel 1992; è caratterizzato da una producibilità nominale di 1000 Nm³/h di idrogeno usando come alimentazione gas naturale. L'idrogeno così prodotto ha una purezza minima del 99,995% in volume.

1. Steam reforming

Il processo consiste nel far reagire metano (CH₄) e vapore acqueo (H₂O) ad una temperatura tra 800 e 865 °C, per produrre syngas (una miscela costituita essenzialmente da monossido di carbonio e idrogeno), secondo la reazione:



Trattandosi di una reazione endotermica il calore richiesto per attivare la reazione è generalmente fornito bruciando un off gas, composto da CO, CH₄ e H₂ per mantenere la temperatura di esercizio del reformer.

Una delle complicazioni che si incontrano con questa tecnologia altamente ottimizzata è la formazione di coke o carbonio:



Per evitare tale complicazione viene utilizzato un eccesso di vapore.

L'idrogeno può essere ottenuto anche dal monossido di carbonio (CO) attraverso la seguente reazione che avviene a circa 450 °C:

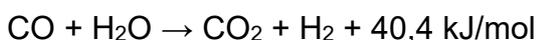




Figura 1. Impianto di steam reforming

Figura 2. Impianto di steam reforming

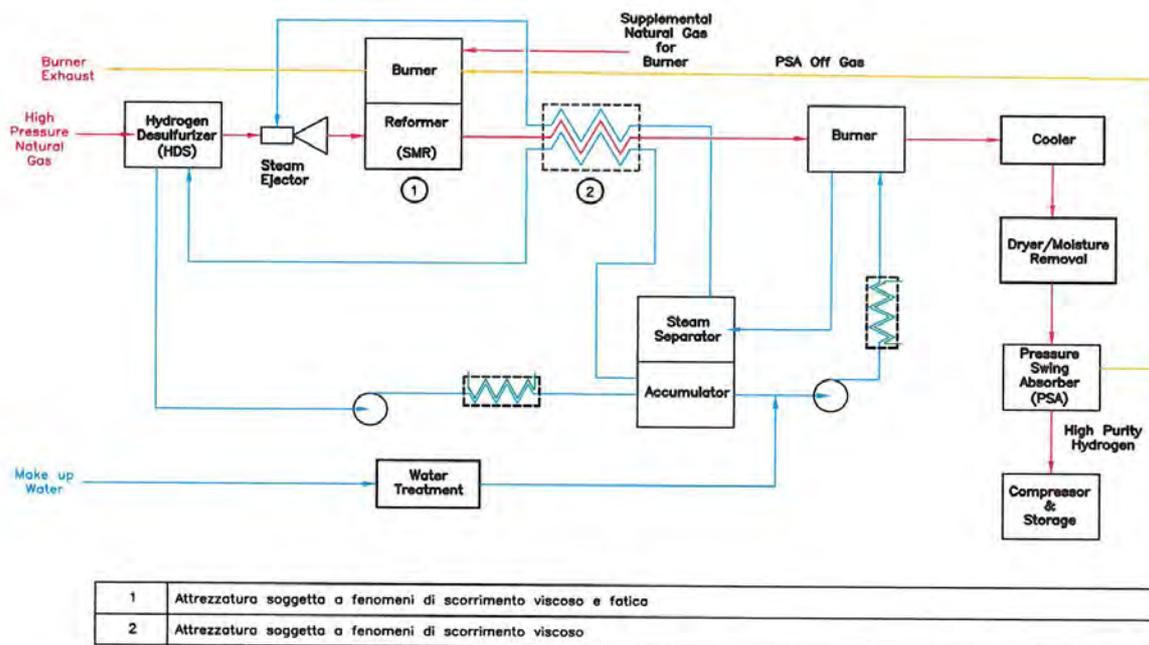


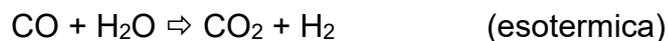
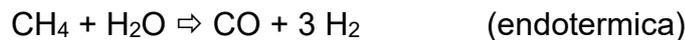
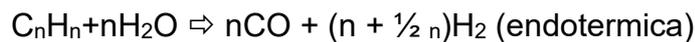
Figura 3. Schema tipo dell'impianto

1.1 Sistema di produzione idrogeno

Il gas naturale è usato come materia prima per la produzione di H₂ e come combustibile normalmente recuperato dal sistema di purificazione dell'idrogeno (Process Switch Adsorber o PSA). La parte di gas utilizzata come alimentazione passa attraverso uno scambiatore di calore dove il gas naturale viene riscaldato dall'idrogeno ottenuto dal processo raggiungendo una temperatura di circa 105÷110 °C alla pressione di 17,5 bar, successivamente il metano è inviato al preriscaldatore all'interno della convettiva. Al gas naturale viene aggiunta una opportuna quantità di idrogeno di ricircolo (circa 10 Nm³/h) a circa 20 bar proveniente dal compressore o da un carro bombolaio di idrogeno utilizzato come polmone, necessaria per la desolforazione del gas naturale.

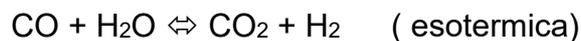
La carica combinata ($\text{CH}_4 + \text{H}_2$) dopo il preriscaldamento ad una temperatura di circa $400\text{ }^\circ\text{C}$ nella convettiva viene inviata al desolfatore il quale contiene un letto catalizzatore con ossido di cobalto e molibdeno e due letti con ossido di zinco.

Lo zolfo non reattivo viene trasformato in idrogeno solforato nel catalizzatore e successivamente adsorbito dall'ossido di zinco; il catalizzatore è progettato per una vita media di circa 2 anni alle condizioni di progetto. Dopo la desolfazione (miscelazione con vapore e preriscaldamento alla temperatura di circa $540\text{ }^\circ\text{C}$ nel serpentino di preriscaldamento all'interno della convettiva) il gas di processo viene inviato nei tubi reformer H-1 dove, in presenza di catalizzatore a base di nichel, è per la massima parte convertito in H_2 , CO e CO_2 , secondo le seguenti reazioni:



Poiché le reazioni risultano complessivamente endotermiche il processo richiede apporto di calore che è fornito da sei bruciatori installati nella volta del forno nei quali avviene la combustione mista del gas recuperato dal sistema di purificazione (PSA) e del gas naturale.

La miscela di H_2 , CH_4 , CO , N_2 , CO_2 e vapore d'acqua uscente dal reformer alla temperatura di $865\text{ }^\circ\text{C}$ e pressione di $14\div 15$ bar viene raffreddata nella caldaia di processo fino a $350\text{ }^\circ\text{C}$ generando vapore alla pressione di 20 bar. Il gas uscente dalla caldaia di processo alimenta il convertitore ad alta temperatura dove l'ossido di carbonio reagisce, in presenza di un catalizzatore a base di ossidi di ferro e cromo, con il vapore d'acqua residuo per produrre ulteriore idrogeno e anidride carbonica secondo la reazione di equilibrio



La temperatura di entrata nel convertitore ad alta temperatura è controllata automaticamente tramite il by-pass interno della caldaia di processo. L'effluente del convertitore, alla temperatura di circa $420\text{ }^\circ\text{C}$, viene raffreddato cedendo calore nel preriscaldatore dell'acqua di alimento caldaia e nel preriscaldatore del metano raggiungendo una temperatura di $35\text{ }^\circ\text{C}$ nel condensatore finale.

Dopo la separazione della condensa il gas è inviato all'unità di purificazione PSA (Process Switch Adsorber) dove l'idrogeno puro è recuperato mediante adsorbimento delle impurezze su setacci molecolari alla pressione di 13 bar.

Il condensato di processo, saturo di CO_2 , viene miscelato con acqua demineralizzata ed inviato al degasatore.

Il desorbimento delle impurezze produce un gas a bassa pressione (gas di purga o surge gas) che, raccolto in apposito accumulatore, viene utilizzato come combustibile nei bruciatori del reformer.

Il gas di purga è costituito da: CH_4 , CO , N_2 , CO_2 , H_2O e H_2 residui; l'idrogeno puro recuperato nella PSA (efficienza di recupero 75%) è inviato all'impianto alla pressione di 12,5 bar.

1.2 Circuito generazione vapore

Il condensato di processo recuperato nel separatore di condensa, dopo la miscelazione con l'acqua demineralizzata, viene inviato al degasatore nel quale l'ossigeno e l'anidride carbonica vengono rimossi mediante stripping a 0,2 bar e 105°C con il vapore prodotto dal flash del blow down e con quello proveniente direttamente dallo steam drum.

L'acqua degasata alimenta tramite le pompe il preriscaldatore, nel quale viene preriscaldata ad una temperatura di 200 °C prima di entrare allo steam drum.

Il vapore viene generato in due modi:

- Recuperando il calore dei prodotti della combustione all'uscita della sezione radiante nei coils convettivi.
- Recuperando il calore del gas di processo all'uscita del reformer nella caldaia di processo.

Il vapore prodotto è così utilizzato:

- come vapore di processo per la reazione di steam reforming
- come vapore di stripping nel degasatore

L'eccesso di vapore viene scaricato in atmosfera.

1.3 Circuito combustibile

Il combustibile è utilizzato esclusivamente nel reformer H-1, dove vengono bruciati, nelle normali condizioni di esercizio, il gas naturale e il gas di purga proveniente dall'unità PSA.

2. Attrezzature in pressione

A servizio del processo sono impiegate attrezzature a pressione suddivise secondo le tabelle di seguito riportate:

Attrezzatura	PS (bar)	TS (°C)	Capacità/DN	Fluido
Idrodesoforatore	19.3	430	1300	NG
Forno	19.3	970	880	NG+H2O
Shift converter	17.3	450	1200	Syn-gas
Convettiva pre riscaldamento Forno	17.3	590	187	NG+H2O
Convettiva preriscaldamento desolfurazione	19.3	450	64	NG
Quench per raffreddamento uscita reformer	17,3	380	600	Syn-gas
Scambiatore di calore Syngas H2O demineralizzata	17.3	425	112	Syn-gas
Scambiatore di calore Syngas Natural gas	25	400	875	Syn-gas
Scambiatore di calore Syngas H2O industriale	17.3	425	5190	Syn gas
Separatore di condensa	17.3	425	350	Syn gas
Serbatoi purificazione H2 (n°4)	14.8	100	4500	Syn gas / H2
Serbatoio Off gas	5	100	60000	Off-gas

Tabella 1. Attrezzature utilizzate per il circuito produzione di idrogeno

Attrezzatura	PS (bar)	TS (°C)	Capacità/DN	Fluido
Steam Drum	22.0	220	1550	H2O/ Steam
Generatore Vapore	23.1	222	400	H2O
Convettiva vapore 1	23.1	250	126	H2O
Convettiva vapore 2		250	49	H2O
Scambiatore di calore Syngas H2O demineralizzata	35.5	425	710	H2O

Tabella 2. Attrezzature utilizzate per il circuito produzione di vapore

Attrezzatura	PS (bar)	TS (°C)	Capacità/DN	Fluido
Tubazione	8.8	60	80	NG

Tabella 3. Attrezzature utilizzate per il circuito combustibile

2.1 Attrezzature in pressione funzionanti in regime di scorrimento viscoso

Le attrezzature facenti parte dell'impianto di produzione di idrogeno costruito nell'anno 1991 ed entrato in esercizio nel 1993 utilizzato per un numero di ore effettive pari a circa 280.000 ore, alcune delle quali sono soggette a fenomeni di scorrimento viscoso in quanto utilizzate a temperature di esercizio superiori a 500 °C

Le attrezzature soggette al fenomeno di scorrimento viscoso risultano essere le seguenti:

- convettiva pre riscaldamento forno (serpentino di scambio gas naturale+vapore con i fumi esausti della camera radiante)
- collettore di ingresso tubi reformer
- tubi reformer in manuarite
- collettore di uscita tubi reformer

2.2 Attrezzature in pressione soggette a fatica oligociclica

Le principali attrezzature soggette a fatica oligociclica sono quelle utilizzate nel sistema di purificazione idrogeno che avviene in 4 letti (serbatoi) dove gli inquinanti del prodotto finito (H₂) vengono trattenuti dagli adsorbitori al loro interno. Lavora in 4 fasi adsorbimento, depressurizzazione, purge e repressurizzazione. I tempi dei cicli di esercizio sono variabili in funzione della produzione dell'impianto e variano da 360 secondi per letto al 50 % a 210 secondi per letto al 100% della producibilità impianto.

Le attrezzature soggette al fenomeno di fatica oligociclica risultano essere i serbatoi dell'impianto del sistema di purificazione.

Figura 4. Collettore di uscita tubi reformer

Figura 5. Collettore di uscita tubi reformer

3. Scorrimento viscoso

Lo scorrimento viscoso (creep) è una deformazione plastica permanente del materiale sottoposto a sforzo costante per lunghi periodi ad alta temperatura.

Lo scorrimento viscoso si manifesta al di sopra della temperatura di scorrimento (T_s), coincidente indicativamente con la temperatura di ricristallizzazione e approssimabile, in media, alla metà della temperatura di fusione misurata in gradi kelvin.

Si possono distinguere tre fasi principali quando il processo avviene a $T > T_s$ e sollecitazione costante:

- primo stadio (creep primario): all'applicazione del carico si ha la deformazione elasto-plastica, che aumenta con velocità decrescente favorita dalla mobilità delle dislocazioni più favorevoli (creep logaritmico);
- secondo stadio (creep secondario): si stabilisce un equilibrio tra l'incrudimento e la ricristallizzazione: la deformazione prosegue a velocità quasi costante e bassa relativamente a quella presente nella fase successiva;
- terzo stadio (creep terziario): la deformazione aumenta rapidamente, arrivando velocemente alla rottura, a causa delle microcricche appuntite e dei microvuoti tondeggianti (nei punti di incontro di tre cristalli) e soprattutto dello scorrimento diffusivo dei giunti dei grani (cioè i grani si allungano per diffusione di atomi nella direzione della trazione e di vacanze nella direzione normale).



Figura 6. Classificazione del grado di danneggiamento da Creep

4. Fatica oligociclica

La fatica è un fenomeno meccanico di degradazione del materiale, dovuta a sollecitazioni cicliche, che giunge a rottura per un valore di carico unitario inferiore a quello che produrrebbe la rottura nel caso di sollecitazioni massime ammissibili del materiale.

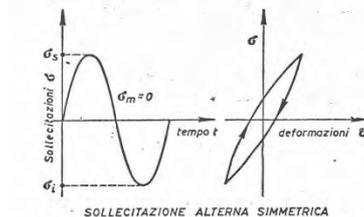


Figura 7. Esempio di ciclo di isteresi

5. Le condizioni al contorno nella gestione e manutenzione degli impianti

Nell'impianto oggetto di studio sono state eseguite negli anni alcune riparazioni che consistono nella sostituzione del collettore di uscita e pig-tails, sostituzione dei tubi catalitici e sostituzione della sezione radiante e convettiva. Nell'arco di funzionamento dell'impianto sono state eseguite tre valutazioni di vita residua, ed effettuate le valutazioni sui serbatoi soggetti a fatica oligociclica per determinare l'eventuale esercibilità di tali attrezzature.

La presenza di attrezzature a pressione con elevati valori di temperatura e pressione di esercizio, di sostanze tossiche e infiammabili espone, il personale che opera nell'ambito delle attività di gestione e di manutenzione delle stesse, a condizioni di rischio di diversa natura:

- le interferenze con le altre attrezzature sono dovute alla presenza di temperature elevate, fenomeni di dilatazione, possibili fughe da flangiature di collegamento tra le varie attrezzature e le attrezzature facenti parte di altri impianti del sito (frazionamento aria);
- per le attrezzature installate sull'impianto di produzione idrogeno i rischi maggiori sono dovuti alla presenza di materiale infiammabile, tossico e alle temperature e pressione di esercizio elevate; per ovviare a questi rischi le giunzioni delle tubazioni dell'impianto vengono realizzate tramite saldatura in modo da ridurre le connessioni flangiate che possono essere causa di perdite per possibile rottura delle guarnizioni.
- Tutte le apparecchiature e tubazioni funzionanti ad alta temperatura risultano coibentate.
- Nell'impianto sono presenti rilevatori per la presenza di gas tossici (CO) e rilevatori ad infrarossi per eventuali perdite di idrogeno;
- i fenomeni di scorrimento viscoso e fatica oligociclica sono monitorati e verificati prima della scadenza delle 100.000 ore di utilizzo

- La tipologia dell'attività prevede l'obbligo, per il personale che accede all'impianto, di idonei Dispositivi di Protezione Individuale idonei ad ambienti con pericolo di esposizione ed è inoltre vietato recarsi in impianto con strumenti elettronici che possano essere fonte di innesco in caso di fuga di gas.

Le manutenzioni dell'impianto si suddividono in manutenzioni ordinarie e straordinarie, le prime consistono oltre alle manutenzioni di rito ad una verifica dello stato di conservazione delle attrezzature con metodi di controllo non distruttivi (CND) esame visivo, liquidi penetranti, magnetoscopia, ultrasuoni, repliche metallografiche e correnti indotte che verranno comunque effettuate prima del raggiungimento delle ore di fine vita dell'impianto prevista in 100.000 ore.

Le manutenzioni straordinarie consisteranno nella sostituzione o riparazione delle attrezzature oggetto di difetti risultanti dai citati controlli.

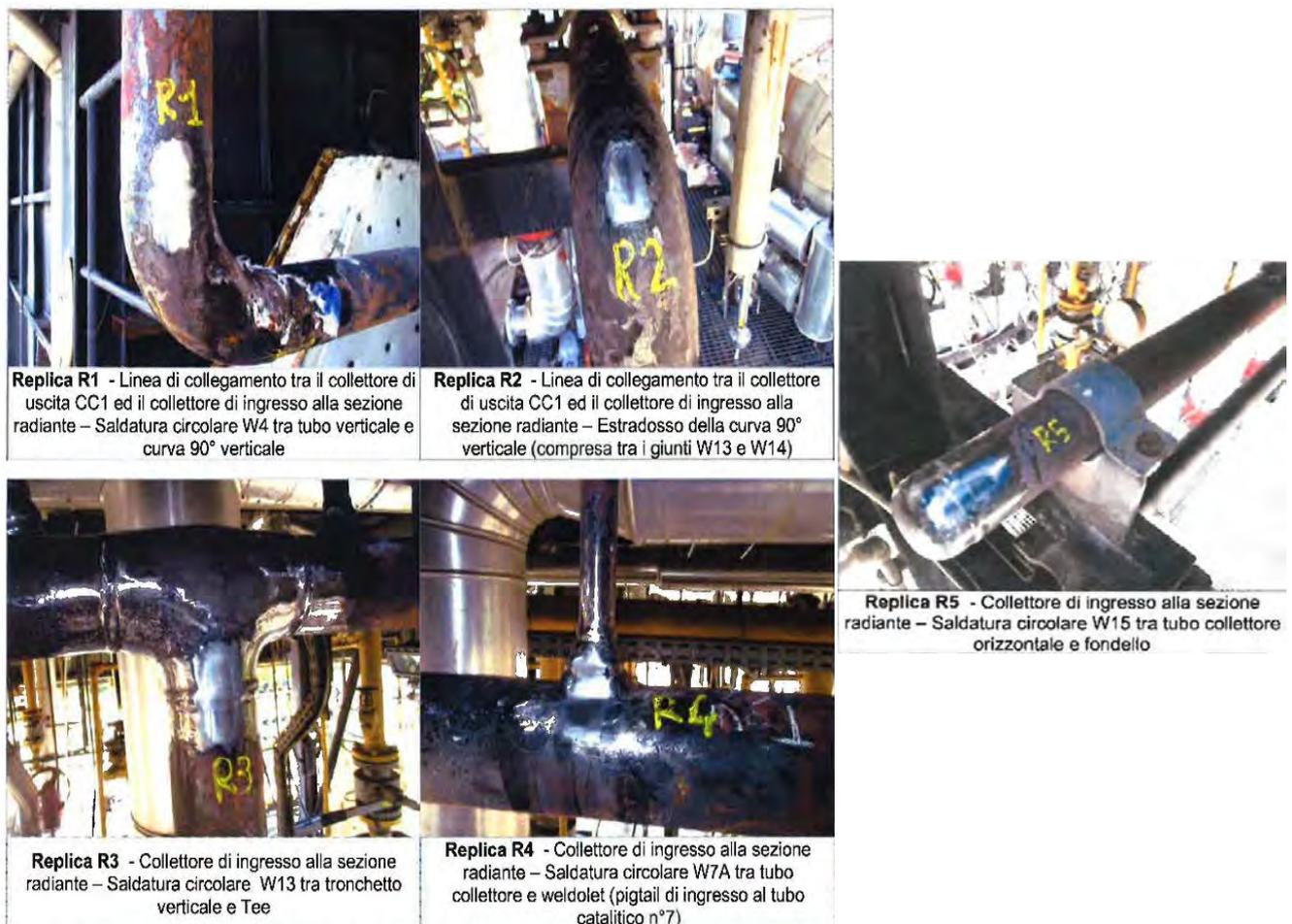


Figura 8. Preparazione per le repliche metallografiche

Un particolare controllo eseguito per monitorare lo stato di conservazione dei tubi del reformer è stato effettuato utilizzando il metodo a correnti indotte, i risultati di tali controlli ha evidenziato solo delle lievi dilatazioni dei tubi come evidenziato in figura 9.

Le attrezzature soggette a scorrimento viscoso possono essere sostituite o verificate con metodi di analisi e valutazione costituiti dalle seguenti prove: liquidi penetranti, ultrasuoni, repliche metallografiche, correnti indotte eseguite da ditte specializzate nel settore.



Figura 9. Risultati controlli con correnti indotte Figura 10. Esecuzione correnti indotte

6. Conclusioni

La descrizione del ciclo operativo di un impianto per la produzione di idrogeno consente di evidenziare quanto sia determinante, per la corretta funzionalità dell'impianto, l'efficienza, la funzionalità e la manutenzione delle attrezzature a pressione ivi installate.

Le attrezzature analizzate, rappresentano un elemento fondamentale per garantire condizioni di utilizzo in sicurezza dell'impianto in condizioni di elevato stress di esercizio.

Le attrezzature nel loro complesso devono garantire la funzionalità dell'impianto per la produzione di idrogeno; inoltre date le condizioni di esercizio con fenomeni di scorrimento viscoso (alte temperature) fa sì che le attrezzature possono essere a loro volta soggette ad anomalie di funzionamento.

La descrizione, nel presente lavoro, dei principali fattori di rischio di un impianto di produzione di idrogeno, evidenziato nell'ambito dell'esperienza di verifiche tecniche condotte dalle UOT di Alessandria e Roma, ha lo scopo di focalizzare l'attenzione sugli aspetti di monitoraggio e prevenzione delle anomalie dovute a scorrimento viscoso e fatica oligociclica che si manifestano nelle attrezzature utilizzate.

L'analisi del contesto per i rischi connessi ai fattori di alta temperatura, fluidi pericolosi e infiammabili non possono, infatti, essere trascurate nella definizione dei rischi connessi nella gestione, nel controllo e nella manutenzione di attrezzature a pressione installate in questi tipi di impianti, a garanzia degli aspetti di sicurezza non solo per i lavoratori coinvolti, ma anche per l'ambiente e per la popolazione.

Il controllo utilizzato con il metodo a correnti indotte ha evidenziato uno strumento valido per poter monitorare i tubi di reforming e potrà essere successivamente sviluppato uno studio specifico per poter utilizzare questa metodologia di indagine come alternativa ai metodi tradizionalmente in uso.

7. Bibliografia

[1] Decreto Ministeriale 1 dicembre 2004, n. 329 "Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'art. 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93 (G.U. S.O. n. 22 del 28/01/2005).

[2] D.Lgs 9 aprile 2008, n. 81, Testo coordinato con il D.Lgs. 3 agosto 2009, n. 106, Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro. Attuazione dell'articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. (Gazzetta

Ufficiale n. 101 del 30 aprile 2008 - Suppl. Ordinario n. 108; Decreto integrativo e correttivo: Gazzetta Ufficiale n. 180 del 05 agosto 2009 - Suppl. Ordinario n. 142/L)

[3] Decreto Ministeriale 11 aprile 2011, "Disciplina delle modalità' di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo" (G.U. Serie Generale n. 98 del 29/4/2011 – S.O. n. 111)

[4] Linea guida Creep ISPESL 2003

[5] Circolare ISPESL 48/2003

[6] Specifica tecnica UNI/TS 11325-4 Sezione cinque

Technical Repository: un passo verso la digitalizzazione nel mondo della sicurezza

Gruppo di Lavoro Inail, Dit - Dcod - Cit

S. Anastasi¹, F. Ceruti¹, P. De Cillis², C. La Gioia³, R. Modestino⁴, V. Mordanini⁵, A. Nebbioso¹, L. Ricciardi¹

¹ Inail - Dit

² Inail - Uot di Bari

³ Inail - Dcod

⁴ Inail - Uot di Avellino

⁵ Inail - Cit

Sommario

Le attività tecniche che il legislatore ha attribuito all'Inail, per garantire la sicurezza delle attrezzature di lavoro e dei prodotti messi a disposizione di lavoratori, non possono prescindere dalla conoscenza delle indicazioni che in decenni di attività sono state fornite, per rendere l'azione più puntuale ed efficace e garantire livelli di sicurezza idonei, in particolare, nei luoghi di lavoro.

In tale contesto, allo scopo di non disperdere tutto il materiale conoscitivo fino ad oggi prodotto riguardo le attività di verifica e certificazione espletate dall'Istituto, il Dit ha costituito un GdL, in collaborazione con le unità operative territoriali di Avellino e Bari, la DCOD e la CIT finalizzato alla realizzazione di un Repository di circolari, regolamentazioni tecniche, note tecniche, pareri e decreti, organizzato e strutturato su base semantica, rivolto, in prima istanza, all'utenza interna dell'Istituto.

Il progetto di sviluppo del Technical Repository nasce dalla necessità di reperire e consultare in forma digitale documentazione tecnica inerente alle attività di verifica e certificazione espletate dall'Istituto su attrezzature e impianti nei luoghi di vita e di lavoro, documentazione già presente nelle diverse sedi centrali e territoriali, ma solo in forma cartacea e non organizzata per le consultazioni da parte dell'utenza.

Dopo aver definito i requisiti funzionali del sistema, si è proceduto alla creazione di un ambiente di test per verificare la validità delle scelte effettuate e, infine, alla realizzazione dell'infrastruttura necessaria per la pubblicazione del Repository nell'area Intranet del portale istituzionale.

1. Introduzione

Le competenze che il legislatore ha attribuito ad Inail afferiscono a settori di attività diversi, ma sono tutte accomunate dall'obiettivo di garantire livelli di sicurezza adeguati nei luoghi di lavoro.

Ormai da decenni i tecnici dell'istituto si occupano di attività di verifica e certificazione per attrezzature a pressione, impianti di riscaldamento, apparecchi di sollevamento, ponti sollevatori per veicoli, impianti di messa a terra e di protezione contro le scariche atmosferiche, maturando conoscenze approfondite nei diversi ambiti, tanto da costituire un riferimento, anche a livello normativo.

D'altro canto l'attività di ricerca che l'Istituto conduce nel settore della sicurezza sul lavoro, consente di arricchire l'azione istituzionale di spunti innovativi che possono contribuire a migliorare i livelli di sicurezza nei luoghi di lavoro.

Da un lato le attività di verifica e certificazione rappresentano per l'Istituto un'occasione per entrare a diretto contatto con le diverse realtà lavorative, con le problematiche concrete con cui i lavoratori quotidianamente sono chiamati a confrontarsi, offrendo significativi spunti per l'avvio di attività di ricerca che possano essere funzionali a migliorare i livelli di sicurezza negli ambienti di lavoro. Dall'altro il *know how* maturato nello sviluppo delle ricerche arricchisce il contributo dei tecnici Inail nell'espletamento dei loro compiti istituzionali, consentendo una divulgazione dei risultati raggiunti, per una reale applicazione delle soluzioni individuate.

È quindi evidente come ricerca e attività istituzionali si alimentino vicendevolmente in un virtuoso circolo, che pone sempre il lavoratore al centro dell'attenzione.

Nel corso degli anni sono stati prodotti documenti di indirizzo, note esplicative e/o di approfondimento, pareri e circolari da parte di Ispesl, Inail e Ministeri competenti. Si tratta di informazioni che hanno orientato l'operato di tecnici e utilizzatori e che non sempre risultano disponibili e/o facilmente reperibili.

In tale contesto è emersa, pertanto, prepotentemente la necessità di recuperare tale patrimonio conoscitivo e soprattutto organizzarlo così da renderlo fruibile in modo semplice e guidato.

L'esperienza, infatti, ha dimostrato che non sempre tutti gli attori a vario titolo coinvolti nelle attività di verifica e certificazione avevano conoscenza di tutte le indicazioni operative che nel tempo sono state prodotte ovvero che queste informazioni in alcuni casi risultavano non chiaramente contestualizzate, soprattutto in relazione allo specifico riferimento legislativo da cui discendevano.

Partendo quindi dalle esigenze manifestate dagli stessi tecnici che operano nei settori di attività dell'Inail e dalla consapevolezza che un patrimonio informativo per essere efficace deve risultare accessibile e fruibile, il Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici dell'Inail, in collaborazione con le Unità operative territoriali di Avellino e Bari, con la Consulenza per l'Innovazione Tecnologica e la Direzione Centrale per l'Organizzazione Digitale, ha avviato un progetto di ricerca volto innanzitutto a reperire tutti i documenti che negli anni sono stati prodotti relativamente alle attività di verifica e certificazione e ad organizzarli in modo coerente e armonizzato.

L'obiettivo è quello di creare un repository in cui i documenti siano archiviati secondo logiche funzionali ad una rapida ed efficace consultazione, istituendo, ove necessario, collegamenti tra prodotti diversi, in modo da rimandare a specifici approfondimenti ovvero evidenziare eventuali evoluzioni legislative e regolamentari che potrebbero essersi prodotte nel tempo e attribuire così l'informazione al corretto stato dell'arte di riferimento. In taluni casi, infatti, può risultare difficile contestualizzare i documenti a disposizione e soprattutto avere immediata contezza di come e se una determinata problematica sia stata affrontata in modo diverso col passare del tempo, soprattutto se non si dispone di una panoramica completa di tutto quanto prodotto nel settore.

I fruitori di questo archivio informatizzato saranno in un primo momento esclusivamente i tecnici dell'Istituto, che svolgeranno anche una fase di test, in modo da evidenziare eventuali lacune e/o malfunzionamenti e permettere così un'ottimizzazione del prodotto; dopodiché l'idea sarebbe quella di estendere la platea anche a soggetti esterni, in primo luogo tecnici di Asl/Arpa e soggetti abilitati ed infine anche a datori di lavoro/utilizzatori, creando dei livelli di accesso che tengano conto della natura dell'informazione in relazione all'utilizzo che se ne andrà a fare.

Per la costituzione del Repository innanzitutto si è proceduto ad una raccolta dei documenti, suddividendoli nei macro-settori dell'attività di certificazione e verifica dell'Inail, quali pressione, riscaldamento, sollevamento, messa a terra e protezione dalle scariche atmosferiche, per poi procedere ad una razionalizzazione degli stessi, cercando di

individuare dei criteri di classificazione che potessero essere maggiormente funzionali ad una ricerca orientata prevalentemente alle attività istituzionali condotte da Inail.

Come vedremo al paragrafo 2, i summenzionati settori corrispondono a specifiche “comunità” del Repository.

Per quanto attiene in particolare al settore/comunità “Pressione”, si è operata una successiva classificazione corrispondente alle diverse attività di certificazione, immatricolazione, verifiche di messa in servizio e periodiche, espletate da Inail su specifiche tipologie di attrezzature e impianti a pressione.

2. Modello Open Access e il Repository

Per raggiungere l’obiettivo del progetto Technical Repository, l’attività di ricerca è partita da un’indagine sugli approcci biblioteconomici nazionali e internazionali in ambito di digitalizzazione, conservazione a lungo termine e condivisione dell’informazione elettronica, per valutare poi le soluzioni software che negli anni sono state sviluppate, soprattutto nell’ambito delle licenze Open Source, in modo da realizzare un prodotto innovativo e soprattutto capace di interagire con altri ambienti in un’ottica di condivisione.

A tal fine ha assunto un valore centrale il movimento internazionale dell’Open Access, modello preso come riferimento da cui partire per lo sviluppo del prodotto.

L’Open Access (OA) è un movimento culturale che promuove la libera circolazione e l’uso non restrittivo dei risultati della ricerca e del sapere scientifico, rispettando i principi di condivisione, interoperabilità e conservazione a lungo termine dell’informazione.

In questo quadro nasce il Repository istituzionale o disciplinare, uno dei prodotti più innovativi in ambito bibliotecario e documentale, in quanto rappresenta un effettivo strumento di comunicazione della conoscenza e soprattutto di condivisione dell’informazione specialistica di un determinato settore o di un’istituzione, fortemente collegato alla strategia OA.

Clifford Lynch in un suo lavoro scientifico sulla rivista “Portal: Libraries and the Academy” definisce i Repository *“a set of services that a university offers to the members of its community for the management and dissemination of digital materials created by the institution and its community members”*, mettendo in risalto l’obiettivo principale di tali sistemi al fine di condividere il sapere.

Il movimento Open Access, al fine di garantire l’interoperabilità tra i Repository, ha individuato un modello per l’organizzazione dei depositi di conservazione, il modello OAIS (Open Archival Information System) recepito e pubblicato come standard ISO 14721:2012. Questo modello identifica e descrive la missione principale di un archivio OAIS, ovvero la preservazione dell’informazione a lungo termine, e può essere definito un framework concettuale, che definisce un’ontologia per la conservazione e una guida per l’individuazione delle strategie conservative.

Il modello OAIS non fa riferimento ad un’architettura specifica, ma si limita a definire il quadro in cui il processo di conservazione si svolge e le funzionalità richieste. Pertanto è possibile elencare alcuni elementi base da garantire per il rispetto dello standard, come:

- la conservazione dell’informazione nel lungo periodo;
- l’accesso all’informazione archiviata, in una forma coerente con le esigenze degli utenti del sistema;
- la possibilità di avere dati in formato digitale di qualsiasi tipo;
- l’uso di metadati standard come Dublin Core;
- il supporto del protocollo OAI-PMH per l’esposizione dei metadati;
- il supporto del full text search tramite google;
- la ricerca mediante thesauri;
- il cross language search;

- la possibilità di organizzare le risorse distinte per collezioni (ad esempio in base ai dipartimenti di appartenenza);
- il processo di submitting automatizzato;
- la possibilità di reperire statistiche di accesso al sistema;
- Identificatori persistenti atti a garantire la preservazione;
- il supporto dell'OpenURL linking;
- lo spazio riservato all'utente autorizzato in cui poter memorizzare i percorsi di ricerca, i documenti selezionati.

Tali funzionalità sono rese disponibili da vari software open source reperibili sul mercato, ognuno con le proprie caratteristiche tecniche, specifici servizi e determinati requisiti di sistemi.

Tra questi, DSpace rappresenta una soluzione estremamente completa per la gestione di un Repository.

DSpace è un software open source, scritto in java, distribuito con licenza BSD (Berkeley Software Distribution) sviluppato in collaborazione dai laboratori Hewlett-Packard e dal MIT tra marzo 2000 e novembre 2002. L'architettura modulare consente un discreto livello di personalizzazione, che permette alle istituzioni di organizzare i servizi e la gestione dei contenuti digitali in modo flessibile.

Interessante è la gestione degli add-ons, che permette alle istituzioni utilizzatrici non solo di sviluppare in proprio gli eventuali tools aggiuntivi necessari, ma anche di poterlo fare nell'ottica di un loro inserimento nel pacchetto base.

Attività di studio effettuate negli anni precedenti dimostrano che il software Dspace risponde pienamente alle nostre esigenze, in particolare:

- l'organizzazione in comunità/collezioni ha permesso di definire un'adeguata struttura ad albero per organizzare la documentazione in possesso in modo appropriato, offrendo, magari nelle fasi successive del progetto, la possibilità di attribuire politiche di accesso per differenti categorie;
- il workflow dell'attività di submission permette all'utente di descrivere il documento mediante i metadati definiti in fase di progettazione, e offre all'amministratore di sistema di monitorare le eventuali richieste di pubblicazione sul Repository;
- l'add-on per la gestione dei thesauri, già testato in precedenti repository sviluppati, permette di ricercare la documentazione presente nell'archivio in modo efficiente.

Il progetto in esame si poggia su questi presupposti per sviluppare un ambiente software, cercando di rispettare gli standard tecnici riconosciuti a livello internazionale, al fine di ottenere vantaggi per la condivisione e diffusione del materiale contenuto nell'archivio, soprattutto in un'ottica di interazione e interoperabilità sia sintattica che semantica relativa alla tematica della sicurezza delle attrezzature e impianti nei luoghi di lavoro.

Il materiale documentale da archiviare in tale sistema è costituito dalla documentazione tecnica di supporto per l'espletamento delle attività di verifica e certificazione, non sempre facilmente reperibile per i tecnici dell'istituto, ma necessaria per assicurare l'assolvimento dei compiti istituzionali attribuiti dal legislatore in modo efficiente e uniforme sul territorio nazionale.

L'applicativo che si sta realizzando deve essere uno strumento altamente usabile per permettere l'individuazione rapida del materiale ricercato, ma anche altamente performante per offrire una panoramica esaustiva dell'argomento di interesse con correlazioni tra le varie tipologie di documentazione.

Questo richiede una personalizzazione del software per permettere la visualizzazione delle correlazioni e la creazione di un soggettario di termini tecnici legati all'attività di verifica.

Struttura del Repository

Un repository in DSpace è strutturato secondo la seguente gerarchia:

- comunità (*Community*);
- sotto-comunità (*SubCommunity*);
- collezione (*Collection*)
- elemento (*Item*), caratterizzato dai metadati (*Metadata*)

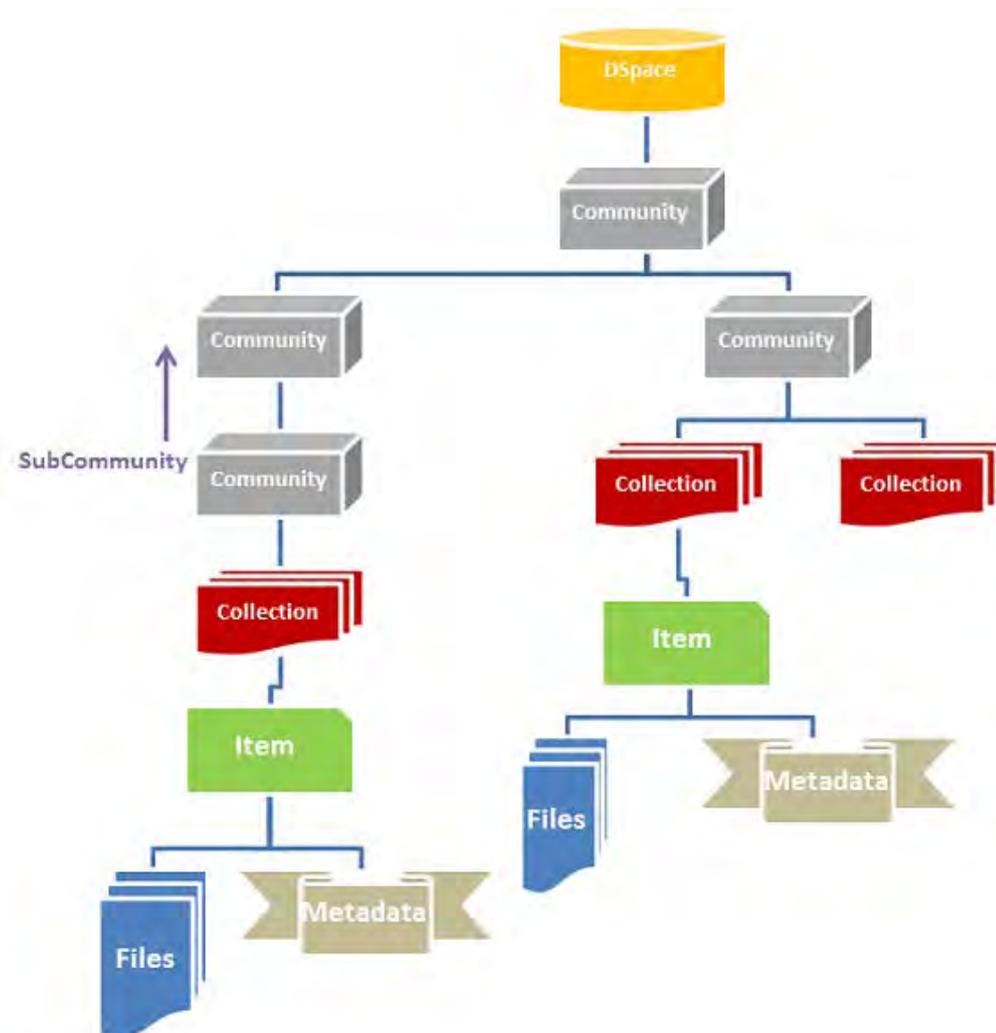


Figura 1. Gerarchia DSpace (Fonte: *DSpace 6.x Documentation*)

Comunità, Sotto-comunità e Collezioni

L'organizzazione che viene data all'informazione nel sistema dei depositi istituzionali parte dall'individuazione di raggruppamenti logici, identificati con i termini di "comunità" e "collezioni".

Questo approccio è significativo, in quanto nel concetto di comunità sono implicite i principi di interazione e di comunicazione. Le comunità definiscono le collezioni, sottocategorie che permettono una migliore organizzazione dell'informazione, decidono le politiche di accesso, i criteri di validazione dei contenuti e la loro tipologia.

Nei tradizionali repository, generalmente, le comunità si identificano con le ripartizioni di un ente: dipartimenti, istituti o gruppi di ricerca. Le comunità presenti nel Technical Repository, invece, presentano caratteristiche differenti da quelli tradizionali proprio per la tipologia di

documentazione da archiviare. Il contesto di studio ha determinato la definizione di particolari comunità, partendo dall'organizzazione logica delle procedure di certificazione e verifica effettuate su singole attrezzature o impianti. Tale organizzazione non è risultata per nulla scontata poiché, pur partendo dalla consapevolezza che l'utente finale, almeno in un primo momento, sarà un esperto del settore, e quindi capace di muoversi facilmente all'interno del Technical Repository, l'attenzione è stata rivolta a facilitare l'utilizzo del sistema da parte di un utente meno esperto. A tal fine si è pensato di far riferimento alla classificazione presente nell'applicativo Inail CIVA [1] con cui l'utenza accede alla quasi totalità dei servizi erogati dall'istituto relativamente a certificazione e verifica di attrezzature e impianti.

In particolare le comunità (a cui potranno, nel tempo, aggiungersene altre) da cui si è generata la struttura ad albero delle diverse componenti del Repository coincidono con i seguenti settori:

- sollevamento;
- impianti di riscaldamento;
- pressione;
- impianti di messa a terra e protezione dalle scariche atmosferiche.

Le sotto-comunità del Technical Repository sono state strutturate in base alle attività (certificazione, omologazione, verifiche, ecc.) svolte dall'Inail nei diversi settori/comunità individuati e relativamente alle diverse tipologie di attrezzature, che costituiscono le collezioni.

Per la comunità Pressione sono state così individuate le sotto-comunità:

- certificazione PED;
- omologazione
- immatricolazione/messa in servizio;
- verifiche;
- riparazioni e modifiche.

Per quanto riguarda le collezioni, le attrezzature individuate sono le seguenti:

- forno,
- generatore di acqua surriscaldata,
- generatore di vapore d'acqua,
- insieme a pressione (non considerato come unità indivisibile),
- insieme a pressione u.i. (unità indivisibile),
- recipiente di gas (escluso serbatoio per gpl),
- recipiente di vapore,
- serbatoio gpl,
- tubazione
- vaso d'espansione;

a cui si aggiungono:

- altre apparecchiature (per casi particolari non contemplati nelle altre collezioni)
- tutte le apparecchiature (per le sotto-comunità a tutte le attrezzature del settore pressione).

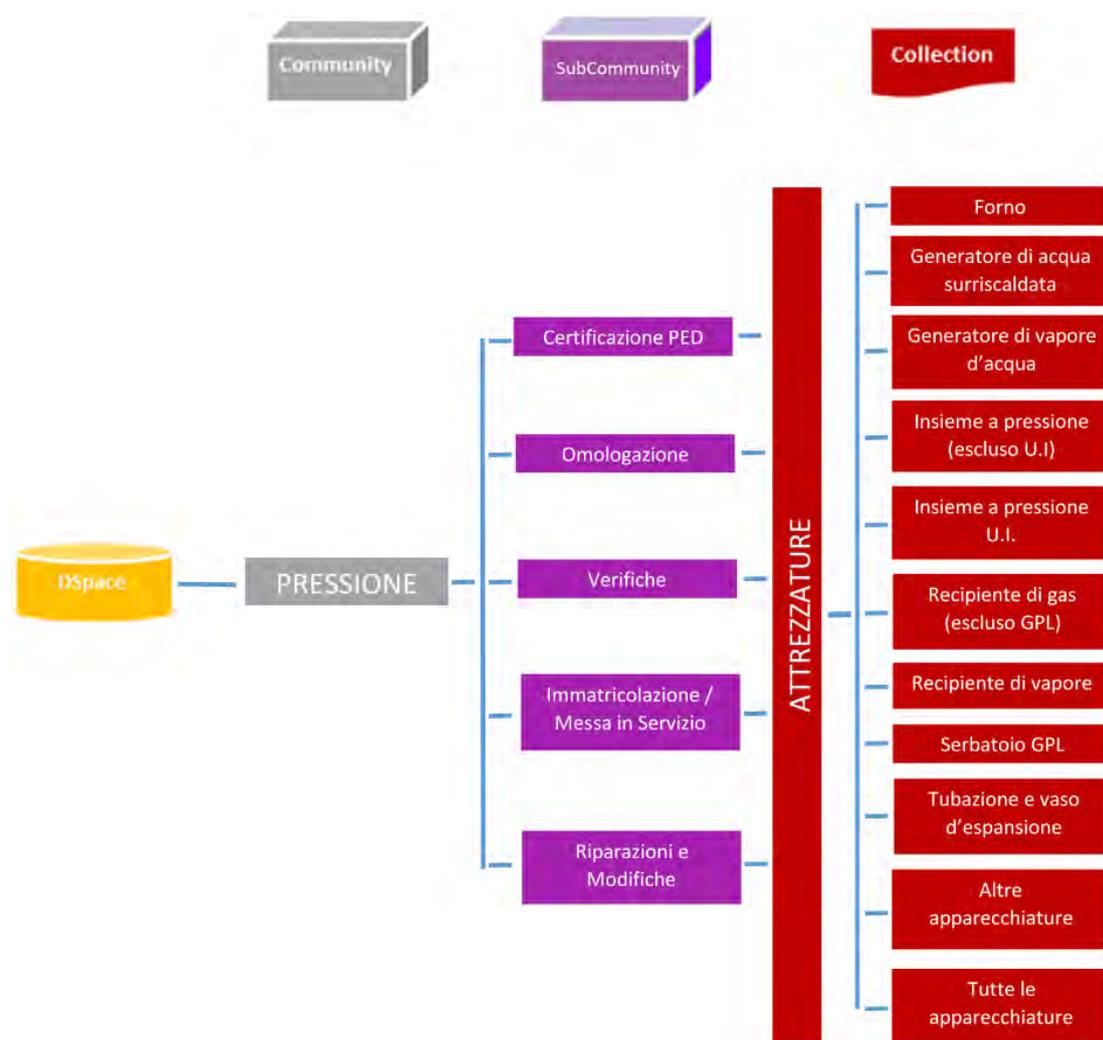


Figura 2. Esempio a stralcio di parte della struttura implementata in DSpace

Elementi e Metadati

L'elemento è ciò che si inserisce in DSpace per popolare il Repository ed è costituito da metadati e raccolte di file.

Nel mondo bibliotecario e dell'informazione più in generale, l'aspetto descrittivo dei supporti e la loro valenza informativa in termini di contenuti hanno svolto da sempre un ruolo di centrale importanza; si sono così andate definendo regole e standard sia per quella che comunemente si chiama descrizione bibliografica sia per quella che si definisce genericamente descrizione analitica.

Nel mondo digitale questi aspetti sono ancora più legati fra loro rispetto ai supporti tradizionali, soprattutto per la necessità di mantenere l'oggetto aggiornato e fruibile in termini tecnologici.

Negli archivi digitali, la descrizione di un documento è fornita da un insieme di diverse tipologie di informazione indicate con il nome di metadati.

I Metadati, letteralmente definiti come "dati sui dati", sono, infatti, informazioni strutturate relative ai dati, che possono supportare un'ampia gamma di operazioni sulle risorse digitali all'interno del Repository, quali: individuazione e recupero, gestione e controllo, e conservazione a lungo termine delle risorse.

Per supportare queste differenti funzioni possono essere necessari metadati diversi. Nella pratica, però, singoli schemi di metadati spesso supportano molteplici funzioni e comprendono più d'una delle categorie sotto elencate.

I metadati possono essere distinti in tre categorie funzionali:

- descrittivi: per l'identificazione e il recupero degli oggetti digitali; sono costituiti da descrizioni normalizzate dei documenti fonte (o dei documenti digitali nativi)
- amministrativi e gestionali: per le svariate operazioni di gestione degli oggetti digitali all'interno dell'archivio, per offrire maggiori informazioni sulla sua creazione e su ogni restrizione d'uso
- strutturali: per descrivere la struttura interna dei documenti (ad esempio, introduzione, capitoli, indice) e gestire le relazioni fra le varie parti componenti gli oggetti digitali.

L'applicazione DSpace offre di default lo standard di metadati Dublin Core (DCMES, Dublin Core Metadata Element Set) nella sua formulazione semplice/non qualificata.

Il DCMES è uno schema di metadati descrittivi molto semplice, prodotto di un'iniziativa interdisciplinare e progettato per supportare il reperimento di risorse attraverso una vasta gamma di domini. Definisce quindici elementi che consentono di reperire risorse appartenenti a domini diversi: Titolo, Creatore, Soggetto, Descrizione, Editore, Autore di contributo subordinato, Data, Tipo, Formato, Identificatore, Fonte, Lingua, Relazione, Copertura, Gestione dei diritti.

La capacità di fornire i metadati DC semplici è il requisito minimo indispensabile per consentire il reperimento della risorsa. Il set base di metadati DC è generalmente un sottoinsieme di un più ricco corredo di metadati item-level.

Nel progetto del Technical Repository, partendo dalla caratteristica principale di DSpace, quella cioè di essere un modello dati flessibile, si è partiti dalla valorizzazione di questa struttura preimpostata, configurando poi un nuovo schema di metadati, personalizzato in base alle specifiche collezioni basate sui documenti relativi alle attività di verifica e certificazione.

Inserimento, gestione e ricerca del dato

Poiché la divisione del Repository in Comunità e Collezioni, come detto, permette di definire un'adeguata struttura ad albero per organizzare la documentazione in possesso in modo appropriato, potendo offrire con DSpace la possibilità di attribuire politiche di accesso per differenti categorie di utenti, si possono assegnare criteri di validazione dei contenuti.

Si può dunque offrire un processo di submission automatizzato per determinati utenti mediante il quale si associano ad ogni item i metadati Dublin Core individuati in fase di analisi e si effettua l'upload del documento.

In alternativa, un utente con privilegi inferiori può proporre l'indicizzazione di un documento nel Repository e l'amministratore di sistema avrà l'onere di monitorare le eventuali richieste di immissione, accettando/rifiutando o modificando la proposta effettuata.

Il Repository offre diverse possibilità di ricerca del dato:

- navigando nelle Comunità e Collezioni (Fig. 3), potendo consultare tutti i documenti presenti;
- attraverso la ricerca sui metadati data, autore, titolo, oggetto, ecc... (Fig. 4)

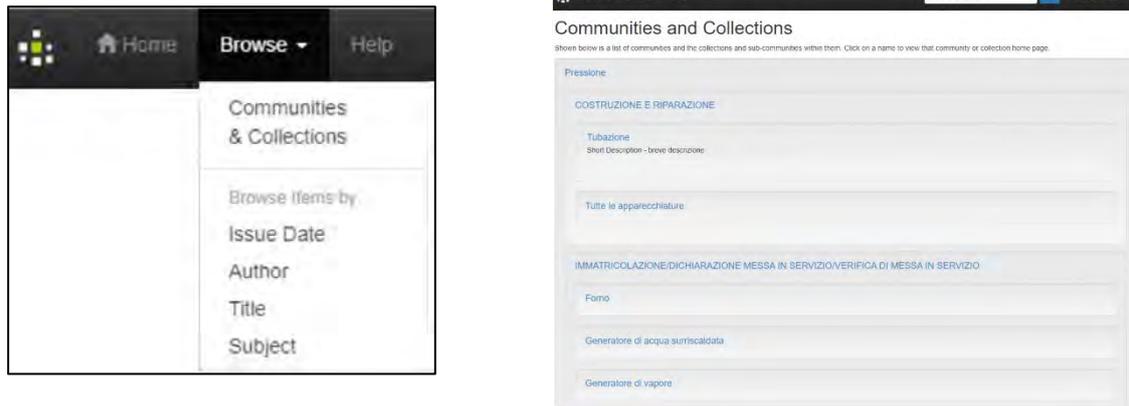


Figura 3. Ricerca in Comunità e Collezioni

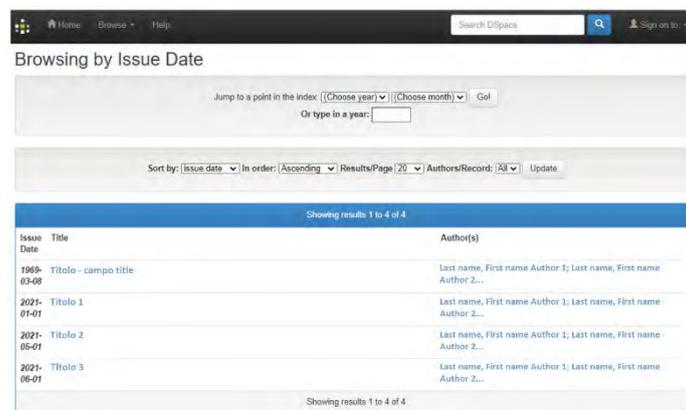


Figura 4. Shot di esempio di una tipologia di ricerca del dato

La ramificazione dell'albero comunità\collezioni è stata determinata dal numero di documenti che compongono le singole unità logiche, accorpando o suddividendo le stesse a seconda delle necessità.

3. Conclusioni

Gli sviluppi futuri del Technical Repository non possono prescindere da alcune considerazioni di carattere generale che, in linea con il contesto europeo e internazionale, sintetizzano e si collegano al più ampio concetto di trasformazione digitale della Pubblica Amministrazione. La prima analisi deve riguardare le modificazioni ed integrazioni alle disposizioni che, nel corso degli ultimi anni, hanno interessato il Codice dell'Amministrazione Digitale, Testo Unico che riunisce e disciplina le norme aventi ad oggetto l'informatizzazione della Pubblica Amministrazione nei rapporti con i cittadini e le imprese. Il Testo Unico, istituito con decreto legislativo 7 marzo 2005, n. 82, è stato ripetutamente modificato e integrato, ma è con il decreto legislativo 13 dicembre 2017, n. 217 che si è assistito ad una completa razionalizzazione dei suoi contenuti: in particolare, è stata rafforzata la natura di "carta di cittadinanza digitale" attraverso disposizioni finalizzate a riconoscere ai cittadini e alle imprese il diritto alla fruizione dei servizi pubblici *online* e *mobile oriented*, è stato sostenuto il processo di valorizzazione del patrimonio informativo pubblico, collocandolo tra le finalità istituzionali di ogni Amministrazione, e promossa l'integrazione e l'interoperabilità tra i servizi pubblici.

La seconda considerazione è inerente il principio del cosiddetto “*digital first*” che, applicato alla Pubblica Amministrazione proprio attraverso il CAD, identifica il nuovo modo di intendere il digitale: per l'erogazione dei servizi e per le attività di *e-government* deve essere considerato lo strumento essenziale, il “prima di tutto”. L'obiettivo sostanziale è dunque quello di avvicinare gli utenti alla PA attraverso opportuni percorsi di digitalizzazione dei sistemi e l'utilizzo di strumenti tecnologici innovativi.

Alla luce di quanto sopra, riconducendo i principi sopra descritti al contesto lavorativo nel quale si sta implementando il Technical Repository, è evidente come la digitalizzazione della documentazione correlata alle attività di certificazione e verifica contribuirà a garantire, seppure a livelli differenziati, la disponibilità dell'informazione, facilitando l'operato dei tecnici interni ed esterni all'Inail, che potranno contare sulla immediata fruibilità di materiale opportunamente organizzato e facilmente reperibile. Questo progetto, perfettamente inserito nel più ampio processo di trasformazione digitale istituzionale che da anni è reclamato dal legislatore, contribuirà al processo di valorizzazione del patrimonio informativo, mettendo a fattor comune le conoscenze maturate in decenni di attività, e garantirà al tempo stesso l'interoperabilità, attraverso il ricorso a tecnologie che assicurano tale requisito.

L'infrastruttura software adottata per la realizzazione del Repository, infatti, permette di raggiungere l'obiettivo di condivisione dell'informazione grazie al soddisfacimento di requisiti basilari previsti oggi per i servizi digitali:

- interoperabilità: garantendo l'harvesting dei metadati si può prevedere l'integrazione con altri sistemi (supporto protocollo OAI-PMH); gli utenti devono accedere direttamente alla più vasta gamma di contenuti; deve essere possibile reperire i contenuti digitali e interagire con essi in maniera agile e intuitiva, usarli con facilità senza l'esigenza di strumenti specializzati e gestirli efficacemente. La corretta adozione di standard rappresenta, quindi, l'ossatura stessa dell'interoperabilità dei dati fra vari sistemi;
- accessibilità: i materiali devono essere accessibili al più vasto pubblico e messi a disposizione attraverso l'impiego di standard aperti e formati non proprietari, con accesso multilingue e per cittadini con varie disabilità;
- conservazione a lungo termine: identificare in modo univoco e permanente il documento informatico; la costante manutenzione degli standard aiuta a garantire il futuro a lungo termine dei materiali, in modo tale da mantenere la risorsa nella sua continuità storica e diversità di formato
- sicurezza: nell'epoca delle reti, è importante poter stabilire con certezza l'identità dei contenuti e identificare gli utenti; proteggere i diritti di proprietà intellettuale; poter determinare l'integrità e l'autenticità delle risorse.

A conclusione della fase di test, che coinvolgerà i tecnici dell'Istituto, il progetto verrà dunque esteso ai fruitori esterni. Pertanto, partendo da una esigenza interna, il Repository potrà, di fatto, essere di supporto agli utenti che a vario titolo operano in ambito di sicurezza sul lavoro.

4. Bibliografia

[1] Annarita Barbaro, Monica Zedda, Donatella Gentili, Rafael Leon Greenblatt, *The presence of High-impact factor Open Access Journals in Science, Technology, Engineering and Medicine (STEM) disciplines*, «JLIS Italian Journal of Library, Archives, and Information Science», 6 (2015), n. 3, p. 57-75. < <https://www.jlis.it/article/view/11257/10621> >

[2] Antonella De Robbio, *Archivi aperti e comunicazione scientifica*, Napoli, ClioPress, 2007. < <http://www.fedoa.unina.it/1093/1/derobbio.pdf> >

- [3] Brenda Fay, Jennifer Deal, Vicki Budzisz, *An Institutional Repository experience at a large health care system*. «Medical Reference Services Quarterly», 36 (201), n. 3, p. 280-291.
- [4] Circolare Inail n. 12 del 13 maggio 2019: “Servizi telematici di certificazione e verifica: CIVA”.
- [5] Corrie Marsh, Dillon Wackerman D, Jennifer A.W. Stubbs, *Creating an Institutional Repository: Elements for Success!* «The Serials Librarian», 72 (2017), n. 1-4, p. 3-6.
<<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/0361526X.2017.1297587?needAccess=true>>
- [6] Diego Forestieri, Patrizia De Cillis, Renato Gurin, Matteo Gurin, Valentina Costanzo, *Per un management della conoscenza centrato sulla persona: un approccio innovativo nell'ambito del supporto alla ricerca sulla salute e sicurezza nei luoghi di lavoro*, «Progetto Sicurezza», (2012), n. 3-4, p. 38-40.
- [7] Ernest Abadal, *Open Access: l'accesso aperto alla letteratura scientifica*, Milano: Ledizioni, 2014.
- [8] Ian Sommerville, *Ingegneria del software*, 8. ed., Boston, Pearson Education - Addison Wesley, 2007 (ed. or. *Software Engineering*, 10. ed., Pearson Education, c2016).
- [9] Iryna Solodovnik, *Metadata issues in Digital Libraries: key concepts and perspectives*, «JLIS Italian Journal of Library, Archives, and Information Science», 2 (2011), n. 2, p. 4663-1–4663-27. < <https://www.jlis.it/article/view/4663/4552> >
- [10] Iryna Solodovnik, *Repository Istituzionali Open Access e strategie Linked Open Data: per una migliore comunicazione dei prodotti della ricerca scientifica*. Firenze: University Press, 2015. < https://www.fupress.com/archivio/pdf/3091_9271.pdf >
- [11] Lorenza Salvatori, *La comunicazione scientifica dal preprint al repository: il caso dello Scientific Information Service del CERN*, Milano: Ledizioni, 2013, p. 275-276. < <https://books.openedition.org/ledizioni/1568?lang=it> >
- [12] Mauro Guerrini, *Gli archivi istituzionali: open access, valutazione della ricerca e diritti d'autore*. Milano: Edizione Bibliografica, 2010
< http://eprints.rclis.org/15609/1/Gli_archivi_istituzionali.pdf >
- [13] Nunzia Bellantonio, Raffaella Modestino, *La strategia flessibile: modello di riferimento per lo sviluppo di un repository innovativo*. «Il Project Manager: rivista di project, program e portfolio management», 20 (2014), n. 4: p. 33-38.
- [14] Open Archives Initiative < <http://www.openarchives.org> > Donohue, DSpace System
- [15] Pierluigi Feliciati, *Usability of library and archives' digital environments as a quality requirement. Context, models, and evaluation tools*, «JLIS Italian Journal of Library, Archives, and Information Science», 7(2016), n.1, p.113-130.
< <https://www.jlis.it/article/view/11512/10746> >

5. Sitografia

- [1] AGID, Agenzia per l'Italia Digitale < <https://www.agid.gov.it/> >
- [2] Altalex < <https://www.altalex.com/> >
- [3] Diritto e diritti dal 1996 < <https://www.diritto.it/> >
- [4] OpenDOAR < <https://v2.sherpa.ac.uk/opensoar/> >
- [5] Registry of Open Access Repositories < <http://roar.eprints.org> >
- [6] DSpace 6.x Documentation
< <https://wiki.lyrasis.org/display/DSDOC6x/DSpace+6.x+Documentation> >

Tecniche analitiche per la caratterizzazione dei fenomeni di degrado e la valutazione della vita residua delle tubazioni in polietilene ad alta densità

C. Andenna, D. Lega

Inail – Dit

Sommario

Le tubazioni in polietilene ad alta densità hanno trovato impiego a partire dagli anni '80 nell'industria chimica, petrolchimica e negli acquedotti. L'uso di tale materiale rispetto alle tradizionali leghe metalliche presenta degli indiscutibili vantaggi legati ad un minor costo, maggiore inerzia chimica e resistenza alla corrosione, ridotte perdite di carico per assenza di incrostazioni, facilità di installazione. La vita utile di progetto corrisponde ad almeno 50 anni. Tuttavia, il polietilene, come tutti i polimeri, è soggetto a fenomeni di degrado, cioè a delle trasformazioni chimiche che cambiano la sua struttura originale e modificano le proprietà meccaniche. I fattori estrinseci responsabili della degradazione sono di natura meccanica (sollecitazioni di flessione, torsione, allungamento) e/o chimica (termo-decomposizione, ossidazione, idrolisi, fotodegradazione). A tutt'oggi l'unico metodo di valutazione del danneggiamento e stima della vita residua sono le prove in pressione in accordo alla norma EN ISO 9080. Tali prove tuttavia sono lunghe, in termini di anni, e costose.

Questa memoria presenta una breve descrizione dei principali fenomeni di danneggiamento del polietilene ed analizza lo stato dell'arte in merito ad una delle metodiche analitiche più promettenti, l'analisi termica DSC, per individuare il livello di degrado raggiunto dalle tubazioni esercite. In particolare viene discussa l'utilità ed i limiti di parametri quali il tempo o la temperatura di induzione all'ossidazione, anche tramite un caso studio, quali indici di degrado e di valutazione della vita residua.

1. Introduzione

Il polietilene in Italia è stato utilizzato a partire dagli anni '80 soprattutto per la realizzazione di tubazioni destinate al trasporto ed alla distribuzione del gas metano, dell'acqua potabile e per le reti di scarico dei liquami civili ed industriali. L'utilizzo di tubazioni in polietilene rispetto a quelle tradizionali in lega metallica presenta degli indiscutibili vantaggi: un peso ridotto, una buona duttilità, facilità di lavorazione, costi ridotti ed una buona resistenza alla corrosione ed all'attacco di molti agenti chimici. Limitazioni all'impiego sono invece legate ad un alto coefficiente di espansione termica, infiammabilità, tolleranza limitata alla temperatura. In questi ultimi anni la produzione e l'impiego del polietilene sono aumentati notevolmente e di conseguenza sono sorti nuovi impulsi in merito agli studi sulle possibilità di impiego in sicurezza di tale materiale. Il presente lavoro riassume i principali fenomeni di danneggiamento e presenta un caso studio come applicazione di uno dei metodi più promettenti.

2. Fenomeni di danneggiamento

Il polietilene è un polimero semicristallino, pertanto è costituito da una fase cristallina ed una fase amorfa. Le regioni cristalline sono costituite da lamelle, catene polimeriche ripiegate su sé stesse con un preciso allineamento che formano delle strutture a pacchi. Tipicamente le lamelle hanno uno spessore di 10-20 nm ed una lunghezza di poche decine di micron. Le regioni cristalline sono interconnesse fra loro da molecole di collegamento che attraversano

la fase amorfa denominate “tie molecules” TMs (a), anelli (b) e intrecci di catene (c), Figura 1. [1, 2, 3, 4, 5]

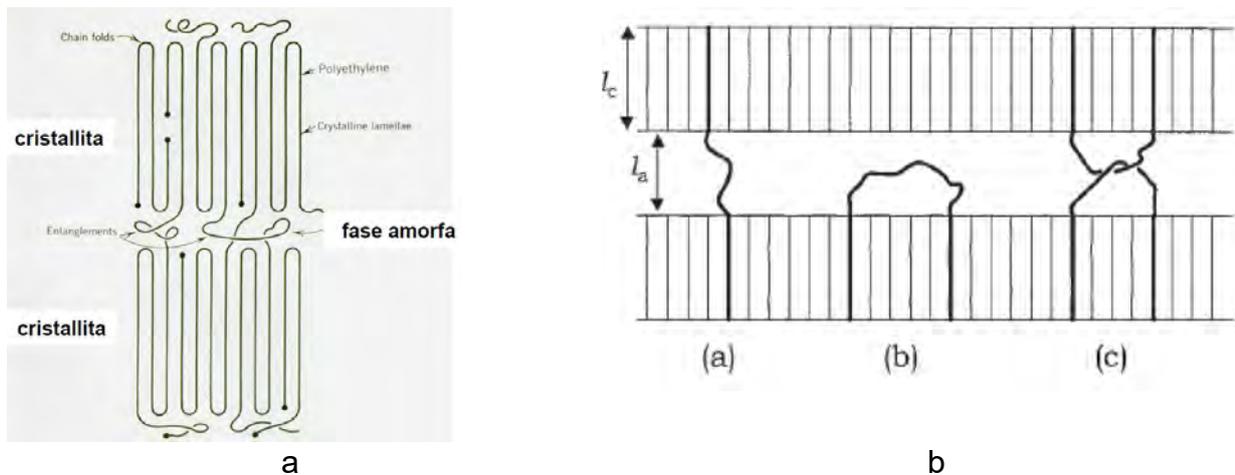


Figura 1. a) struttura semi-cristallina del polietilene [3] b) strutture di collegamento fra i cristalliti: (a) TMs, (b) anelli, (c) intrecci di catene [6]

Queste strutture di collegamento hanno un ruolo cruciale sulle proprietà meccaniche dei polimeri semicristallini a breve ed a lungo termine. In assenza di esse i cristalliti risulterebbero uniti solo da deboli forze di Van der Waals, e per azione di uno stress meccanico potrebbero scivolare facilmente uno sull'altro o dividersi, conferendo così una scarsa resistenza meccanica al materiale. [3, 4, 5, 6]

Il polietilene cambia nel tempo la propria microstruttura e subisce un decremento delle proprietà meccaniche, ossia è soggetto a fenomeni di degrado. La degradazione del PE avviene sostanzialmente per azione dell'ossigeno, della luce, del calore e della tensione meccanica. Il principale meccanismo di degrado è quello termo-ossidativo, si tratta di un meccanismo radicalico, i prodotti intermedi sono dei perossidi, ed i prodotti finali sono composti ossidati a basso peso molecolare quali acidi carbossilici, aldeidi e chetoni (Figura 2) [7, 8]

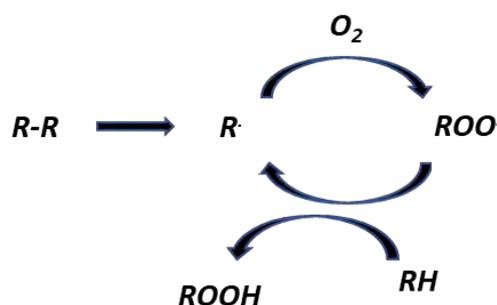


Figura 2. Schema del degrado termo-ossidativo in una poliolefina

I processi di ossidazione e scissione di catena hanno delle precise conseguenze sulle proprietà del polimero, la fase cristallina è inaccessibile all'ossigeno, l'ossidazione pertanto avviene solo nella zona amorfa, il risultato finale è la formazione nella fase amorfa di catene più corte che cristallizzano più facilmente. Il processo è denominato “chemi-cristallizzazione” e comporta un decremento della % della fase amorfa, un impoverimento delle molecole di collegamento tra la fase cristallina e la fase amorfa, le molecole TMs, ed una riduzione della distanza fra le lamelle (Figura 3). [9, 10] Pertanto, in relazione ai cambiamenti microstrutturali determinati dai processi di degrado nel polietilene invecchiato aumenta la %

della fase cristallina, aumenta la densità, diminuisce il numero delle molecole di collegamento fra le fasi cristallina ed amorfa ed il polimero diventa più fragile. Per contrastare questi fenomeni conseguenti al degrado termo-ossidativo al polietilene vengono aggiunti degli additivi. Gli additivi giocano un ruolo chiave nel proteggere il polimero dai fenomeni di degradazione, in linea generale si tratta di sostanze chimiche che agiscono assorbendo la radiazione UV o reagendo con i radicali liberi e gli intermedi reattivi, rallentando così il decorso delle reazioni radicaliche relative al degrado termo-ossidativo. Nel polietilene un additivo particolarmente utilizzato è il nerofumo che agisce sia assorbendo la radiazione UV che interagendo con i perossiradicali. Altri additivi invece, come per esempio i fenoli o le ammine stericamente impedito, reagiscono esclusivamente con i perossiradicali intermedi neutralizzandoli. [7, 11] Il problema è che il contenuto di additivo antiossidante presente nel polimero diminuisce nel tempo, in relazione sia alle reazioni in cui è coinvolto, sia ai processi di migrazione verso l'esterno del polimero, e la sua diminuzione è strettamente legata all'evolversi del processo di degrado. La stabilità del polimero è quindi strettamente legata alla percentuale di additivo ancora presente, per le poliolefine tale percentuale viene misurata determinando la temperatura o il tempo di induzione all'ossidazione mediante una procedura standard con la tecnica del calorimetro a scansione differenziale (DSC) [9].

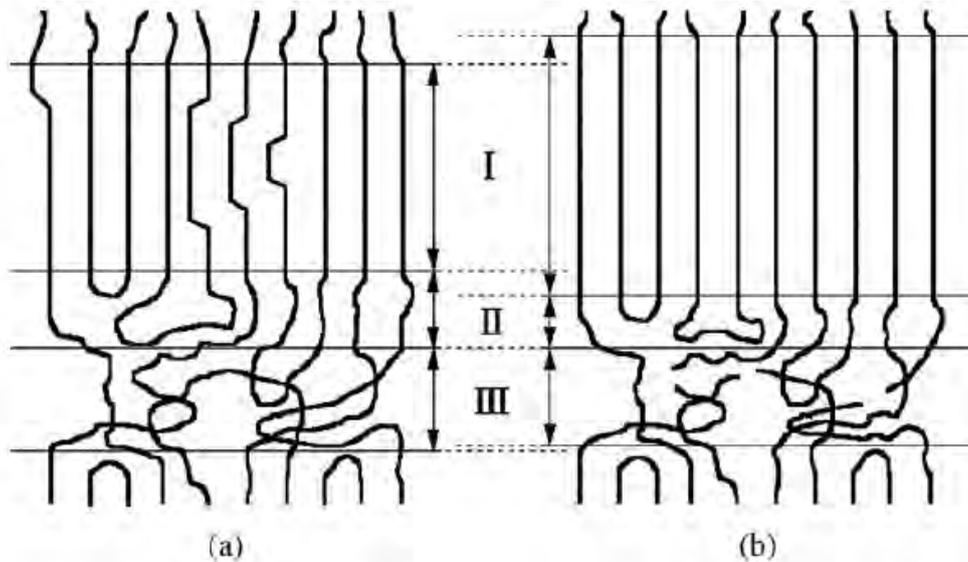


Figura 3. Schema dei cambiamenti microstrutturali del PE legati al degrado termo-ossidativo: a) campione non invecchiato, b) campione invecchiato [9]

Per il polietilene sussiste una relazione lineare tra la concentrazione di additivi antiossidanti quali il nerofumo o i fenoli e la temperatura o il tempo di induzione all'ossidazione. (Figura 4) [12].

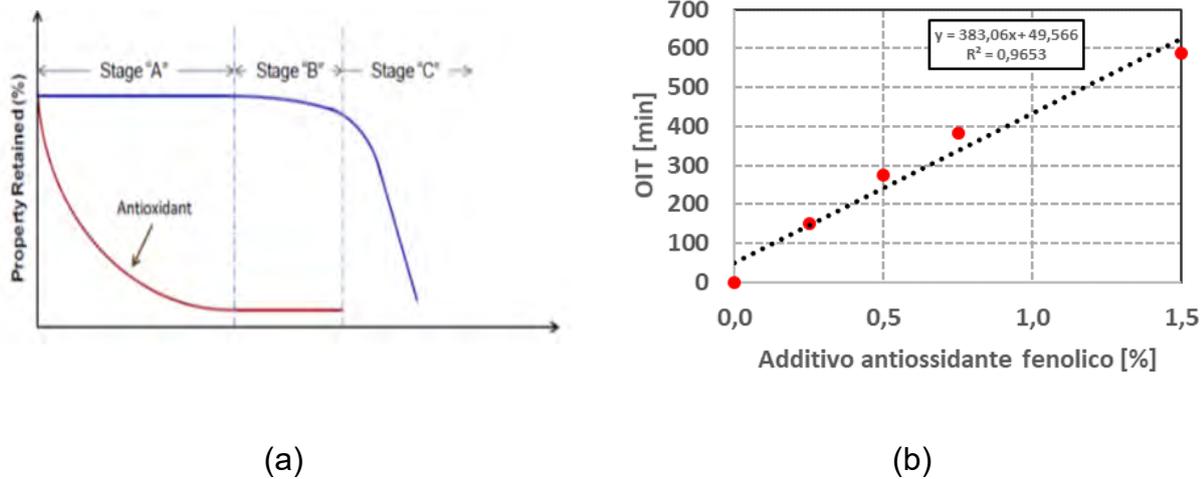


Figura 4. a) degrado termo-ossidativo del PE in relazione alla presenza dell'additivo b) relazione fra l'OIT in min e la concentrazione un additivo antiossidante fenolico AO espressa in % in peso. [13]

Nella pratica si usano due metodi: il metodo dinamico ed il metodo isoterma. Nel metodo dinamico il campione è riscaldato in una cella DSC ad una velocità definita sotto atmosfera ossidante fino a inizio della reazione. Si misura, in un termogramma DSC, la temperatura di inizio dell'ossidazione, denominata OOT. (Figura 5) Nel metodo isoterma invece il campione viene riscaldato in atmosfera inerte fino ad una temperatura definita e mantenuta costante per qualche minuto, l'atmosfera viene poi cambiata da inerte (N_2) ad ossidativa (O_2 o aria). Il tempo che intercorre fra il primo contatto con l'ossigeno e l'inizio dell'ossidazione è detto tempo di induzione all'ossidazione OIT (Figura 6). Per le tubazioni adibite al trasporto di acqua l'American Water Works Association richiede per la certificazione di qualità una temperatura di almeno $230^\circ C$ per l'OOT, ed un tempo di almeno 20 minuti per l'OIT a $200^\circ C$. Quest'ultimo parametro viene proposto in Europa dallo standard UNI EN 12201-1 eseguendo la prova in atmosfera di ossigeno. [1]

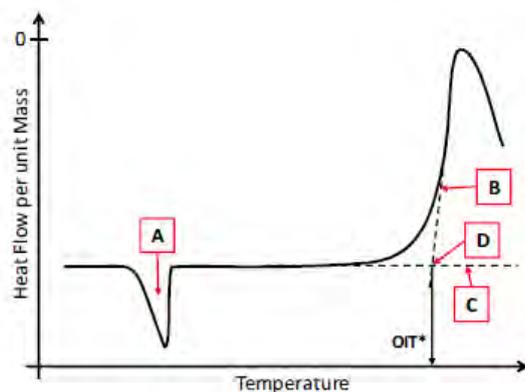


Figura 5. Schema di un termogramma DSC per la determinazione dell'OOT di una poliolefina: A picco di fusione, B tangente al segnale di ossidazione, C linea di base, D OOT/OIT*, temperatura di inizio dell'ossidazione [1]

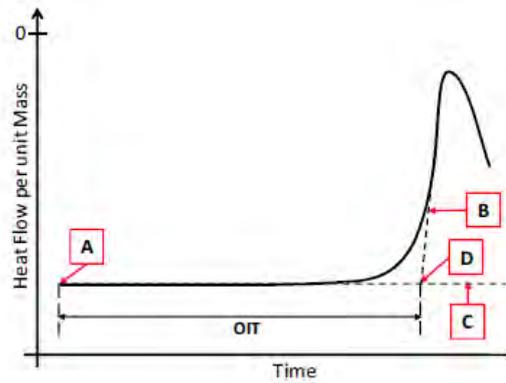


Figura 6. Schema di un termogramma DSC per la determinazione dell'OIT di una poliolefina: A tempo di introduzione dell'atmosfera ossidante, B tangente al segnale di ossidazione, C linea di base, D OIT tempo di inizio dell'ossidazione [1]

Il tempo a rottura per degrado termo-ossidativo di una poliolefina viene generalmente valutato dalla relazione di Arrhenius:

$$t_R = \frac{f(P)}{A} e^{E_a/RT} \quad (1)$$

$f(P)$ è una funzione che dipende dalle proprietà del polimero ma è indipendente dalla temperatura. Da ciò ne consegue che la cinetica del degrado termo-ossidativo del polietilene, descritta con il modello di Arrhenius, è utilizzabile per valutare le prove accelerate in relazione all'effetto della temperatura:

$$k(T) = A e^{-E_a/RT} \quad (2)$$

$k(T)$ = costante cinetica relativa al fenomeno di degrado, E_a = energia di attivazione, T temperatura assoluta in K, R costante dei gas.

Il grafico del $\ln(k(T))$ vs $1/T$ si traduce in una linea retta la cui pendenza è $-E_a/R$.

Il tempo a rottura, inoltre, è strettamente correlato ai parametri DSC OIT/OOT: $t_R = \text{OIT}$ o OOT . Da ciò ne deriva che facendo misure di OIT/OOT a diverse temperature è possibile estrapolare la vita residua a temperature più basse. [14, 15, 16, 17]. Le correlazioni sono molto buone in un intervallo di temperature al di sopra della temperatura di fusione (Figura 7):

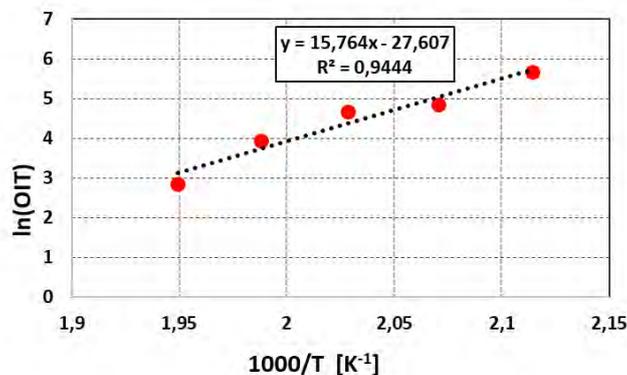


Figura 7. In OIT vs 1000/T di una tubazione in HDPE esercita [18]

Purtroppo le estrapolazioni alle temperature di esercizio appaiono da subito inaffidabili. Gli studi condotti da Kramer et al. sul polietilene legato XPE hanno mostrato come la correlazione $\ln(\text{OIT})$ vs $1/T$ presenti un ginocchio intorno alla temperatura di 150°C (Figura 8). [19] Da ciò ne deriva che dalle prove OIT ad alta temperatura, al di sopra di 150°C , le stime della vita residua estrapolate a temperatura ambiente non sono attendibili [20, 21, 22]. Prove di lunga durata a basse temperature sono poco praticabili con la tecnica DSC. Secondo alcuni autori la presenza di questo ginocchio può essere facilmente compresa, in quanto lo stabilizzante si dissolve solo nella fase amorfa nel polimero semicristallino mentre è molto più omogeneo nel fuso. [19, 20]

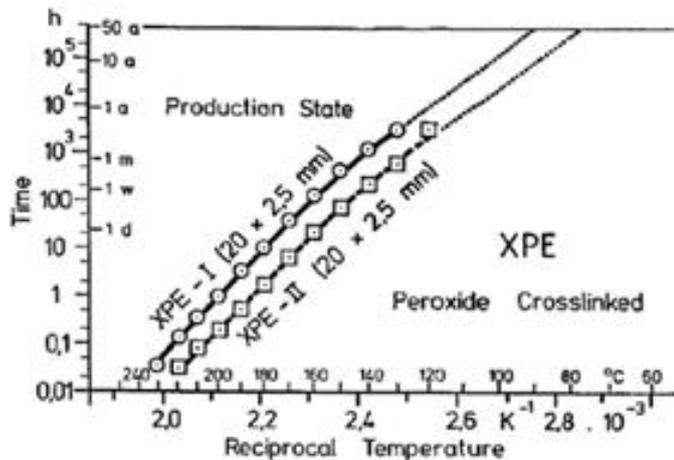


Figura 8. $\ln(\text{OIT})$ vs $1/T$ per il polimero XPE [19]

In relazione alla problematica esposta Celina et al. [22] hanno proposto un modello Arrhenius modificato con la coesistenza di 2 possibili processi di degrado termo-ossidativo, uno prevalente a temperature più alte (HT) ed uno prevalente a temperature più basse (LT):

$$k(T) = A_{LT} e^{-E_{aLT}/RT} + A_{HT} e^{-E_{aHT}/RT} \quad (3)$$

Tuttavia rimane il problema di come valutare i parametri a bassa temperatura A_{LT} e E_{LT} . Per risolvere questo problema diversi autori [1, 23, 24, 25] propongono una valutazione della vita residua con il parametro OIT/OOT in riferimento ad una cinetica di Arrhenius mediante una valutazione della velocità di consumo dell'antiossidante e quindi di diminuzione del parametro OIT/OOT a diverse temperature. In particolare spezzoni di tubo vengono sottoposti a prove di invecchiamento in un intervallo di temperature compreso fra 40 e 100°C di differente durata. Sui campioni così trattati, vengono poi eseguite le misure di OIT a 200°C o di OOT. I risultati di queste prove si correlano ai valori del materiale non trattato tramite le relazioni:

$$\ln(\text{OIT}_t) = \ln(\text{OIT}_0) + S_T \cdot t; \quad \ln(\text{OOT}_t) = \ln(\text{OOT}_0) + S_T \cdot t \quad (4)$$

Dove $\text{OIT}_t/\text{OOT}_t$ è il valore dell'OIT/OOT al tempo di esposizione t , $\text{OIT}_0/\text{OOT}_0$ è il valore per il materiale non esposto, S_T è la velocità di consumo dell'additivo alla temperatura T . I meccanismi in base ai quali l'additivo si consuma, sebbene sicuramente complessi, sembrano seguire la cinetica del 1° ordine di Arrhenius. In particolare, il logaritmo della velocità S_T si correla linearmente con l'inverso della temperatura secondo la relazione (5), Figura 9:

$$\ln(S_T) = -\frac{K}{T} + \ln(C) \quad (5)$$

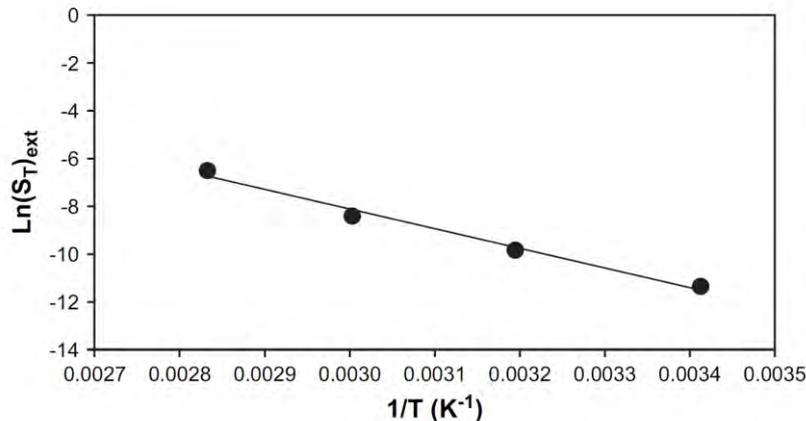


Figura 9. $\ln(S_T)$ vs $1/T$ [23]

Il valore di S_T quindi può essere calcolato a temperature più elevate ed estrapolato a temperatura ambiente, una volta noto il valore di S_T dalla relazione (5), si può calcolare il tempo che impiega l'additivo a consumarsi completamente assumendo un valore di OIT a rottura molto breve (1 minuto). Questo metodo verrà utilizzato nel caso studio.

Relativamente alla tecnica OOT, tramite la valutazione del parametro S_T fatte da prove di invecchiamento, Sanders [1] propone un criterio orientativo di valutazione dello stato di degrado delle tubazioni in polietilene adibite al trasporto dell'acqua come riportato nella Tabella 1:

OOT °C	Intervallo di ricontrollo in anni
>228,5	30
225-228,5	15
223,75-225	5
<223,5	Valutare la sostituzione

Tabella 1. Criterio per valutare lo stato di degrado di una tubazione in polietilene con prove OOT, [1]

In pratica, questo metodo tenta di dare una risposta semplice e di facile applicazione sul tempo atteso di vita della tubazione a partire da una semplice misura della temperatura di ossidazione del materiale. Se la tecnica appare interessante, lo stesso autore sottolinea la necessità di ulteriori studi al riguardo e che quindi non può essere usata per la predizione della vita residua.

3. Caso studio

A titolo di esempio della determinazione della vita residua, si è considerato come caso studio un tubo nero di polietilene ad alta densità (HDPE), già utilizzato per il trasporto di acqua per un periodo non noto. Sul materiale sono state effettuate prove di Differential Scanning Calorimetry (DSC) in aria per determinare la percentuale di cristallinità, la temperatura di fusione, l'entalpia di fusione e la temperatura di inizio ossidazione (OOT). Sullo stesso materiale sono stati inoltre misurati i tempi di OIT a differenti temperature. I valori ottenuti sono riportati nella Tabella 2 e nella Tabella 3.

Cristallinità	Temp. fusione	Entalpia di fusione	Temperatura di inizio ossidazione
[%]	[°C]	[J/g]	[°C]
59.19	133.97	173.77	250.14

Tabella 2. Risultati delle prove di DSC e OOT

Peso	Temp.	Tempo di inizio ossidazione
[mg]	[°C]	[min]
4.7300	220	13.14
5.2300	240	1.89

Tabella 3. Risultati delle prove OIT sul campione 'A'

Il lavoro di Hoang a Lowe [23] riporta, per un materiale simile al nostro (HDPE, PE100), una velocità di perdita degli antiossidanti a 200 °C che, per la superficie esterna del tubo, più esposta agli agenti invecchianti, è espressa da:

$$\ln(S_T) = \frac{-8214.3856}{T} + 16.5243 \quad (6)$$

mentre, nel caso della superficie interna, meno esposta agli agenti invecchianti, è espressa da:

$$\ln(S_T) = \frac{-8613.7284}{T} + 17.6908 \quad (7)$$

Per il nostro materiale, le misure effettuate a 220 e 240 °C, Tabella 3, permettono di stimare il valore di OIT a 200 °C in circa 107 min. Nella Tabella 4 vengono mostrati i tempi di completo depauperamento degli antiossidanti e quindi della vita residua del materiale, calcolati secondo la prima delle relazioni (4).

Temperatura di esercizio	Tempo di perdita degli antiossidanti: zona più esposta all'acqua	Tempo di perdita degli antiossidanti: zona meno esposta all'acqua
[°C]	[anni]	[anni]
10	144	183
20	53	65

Tabella 4. Stima dei tempi attesi per il completo depauperamento degli antiossidanti

Gli anni attesi per la vita residua del materiale in esame, se ancora esercito a temperature tipiche per un tubo interrato, risulterebbero quindi superiori ai 50 anni generalmente considerati per la vita utile del materiale. Inoltre, tale risultato è anche abbondantemente sopra il periodo di oltre 30 anni stabilito dal modello di Sanders [1], Tabella 1, per una successiva valutazione del materiale; questo appare in linea con l'alto valore della

temperatura di OOT misurato, 250 °C (Tabella 2), rispetto ai valori considerati dall'autore. Questi tempi rappresentano il valore massimo atteso per la vita del tubo in quanto una volta trascorsi il tubo ha perso le sue caratteristiche di resistenza meccanica e inizia la formazione di cricche al suo interno che portano al cedimento finale, [23]. Dalla Tabella 4 si vede inoltre non solo come il possibile tempo atteso per la durata di esercizio del tubo vari molto al variare della temperatura a cui è esposto, ma anche come l'esposizione ad un ambiente più o meno aggressivo comporti alcuni anni di differenza. La valutazione della vita residua effettuata nel caso studio è stata effettuata sui valori dei coefficienti trovati in letteratura nel caso di un materiale analogo e in condizioni di utilizzo compatibili. Tuttavia, questo metodo può essere utile solo nel caso in cui non siano disponibili valori specificatamente determinati per il materiale di interesse. I risultati così ottenuti rappresentano quindi solo una stima della vita residua attesa e sono affetti da una indeterminazione non nota.

4. Conclusioni

In questa memoria viene discusso l'utilizzo dei parametri DSC OIT/OOT nella valutazione del degrado termo-ossidativo del polietilene. Entrambi i parametri sono facilmente e rapidamente misurabili ed implicano l'utilizzo di pochi mg di campione. Tuttavia l'estrapolazione alle temperature di servizio dei dati ottenuti a temperature più alte presenta delle criticità. Valutazioni associate a prove di invecchiamento in forno risultano invece utili ed accettate da diversi autori ma appare necessaria la determinazione dei valori dei parametri necessari all'applicazione dei modelli per lo specifico materiale in esame.

5. Bibliografia

- [1] J.M. Burgess Sanders "Techniques to determine the remaining In- service life of polymer pipes for the water industry" PhD thesis, 2010, Imperial College, London
- [2] L. H. Gabriel "History and physical chemistry of HDPE" Ch1, Recommended materials specifications and design requirements, National Academy Press, 1999
- [3] Jay J. Cheng Mechanical and chemical properties of high density polyethylene: effects of microstructure on creep characteristics PhD in chemical engineering, 2008, Waterloo, Ontario, Canada
- [4] D.C. Basset and A.M. Hodge "On lamellar organization in banded spherulites of polyethylene" Polymer, 1978, vol.19, pp 469-472
- [5] B. Christ and J.M. Schultz "Polymer spherulites: a critical review" Prog. Polym. Sci., 2016, vol.56, pp 1-63
- [6] R. Seguela "Critical review of the molecular topology of semicrystalline polymers: the origin and assessment of the tie molecules and chain entanglements" J. Polym. Sci., part.B Polym.Phys.,vol.43,2005, pp 1730-1748
- [7] Raquel Maria "Monitoring the degradation of PE pipes by IR microscopy" PhD thesis, Lisbona, 2014
- [8] A. Ploka and A. Masek "Lifetime predictions methods for degradable polymeric materials: a short review" Materials , 2020, 13: 4507
- [9] Jingdai Wang et al. "Effects of thermo-oxidative aging on chain mobility, phase composition, and mechanical behavior of high-density polyethylene" Polym. Eng. Sci., 2011, 51: 2171-2177

- [10] B. Fayolle et al. "Review: Degradation-induced embrittlement in semicrystalline polymers having their amorphous phase in a rubbery state" *J. mater. sc.*, 2008, 43:6999-7012
- [11] Norman S. Allen et al. "Aging and sabilisation of filled polymer: an overview" *Polym. Degrad. Stabil.* 1998, 61 :183-189
- [12] J.Viebke, W.Gedde "Assessment lifetime of hot water polyethylene pipes based on oxidation induction time data" *Polym. Eng. Sci.* , 1998, 38(8) : 1244-1250
- [13] W.K.Wong "Evaluation of the oxidative degradation mechanism of the corrugated high density polyethylene pipe and the pipe resin" PhD thesis, Drexel University , 2011
- [14] Zbigniew Dobkowski "Lifetime prediction for polymer materials using OIT measurements by the DSC method" *Polimery* 2005, 50, n.3, pp 213-215
- [15] Z. Dobkowsky and Ewa Rudnic "Lifetime prediction for polymers via the temperature of initial decomposition" *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2002, 69: 693-697
- [16] Z. Dobkowsky and Ewa Rudnic "Lifetime prediction for polymers via the temperature of initial decomposition" *J. Therm. Anal. Calorim.*, 1997,48: 1393-1400
- [17] P. Budrugaec "On the use of the oxidative stability measurements for short term endurance characterization of polymeric materials" *Polym. Degrad. Stabil.*, 2000, 68: 289-293
- [18] A. Antonini, C. Andenna, C. D' Ottavi, D. Lega, C. Mennuti, E. Pichini, C .Ratti, Characterization of aging of HDPE piping using DSC, DTA, DTA- TG techniques *Medicta 2019 5th Central and Eastern European Conference for Thermal Analysis and Calorimetry (CEEC-TAC 5) & 14th Mediterranean Conference on Calorimetry and Thermal Analysis* ", Rome 27-30 August 2019
- [19] E. Kramer, J. Koppelman, J. Dobrowsky "Oxidation stability of crosslinked polyethylene, isothermal DTA method" *J. therm. anal.*, 1989, 35: 443-457
- [20] J. Pospisil, Z. Horak, J. Pilar, N. C. Billingham, H. Zweifel, S. Nespurek "Influence of testing conditions on the performance and durability of polymer stabilisers in thermal oxidation" *Polym. Degrad. stabil*, 2003, 82: 145-162
- [21] V. Langlois, L.Audonin, J. Verdu "Thermoxidative aging of crosslinked linear polyethylene: stabilizers consumption and lifetime prediction" *Polym. Degrad. Stabil.* 1993, 40: 399-403
- [22] M. Celina, K.T. Gillen, R.A. Assink, "Accelerated aging and lifetime prediction: review of non Arrhenius behavior due to the two competing process" *Polym. Degrad. Stabil.*, 2005, 90: 395-404
- [23] Eric M. Hoang, David Lowe "Lifetime prediction of a blue PE 100 water pipes" *Polym. Degrad. Stabil.* (2008) , 93 :1496-1503
- [24] A.M.Asce et al. "Antioxidant depletion and service life prediction of HDPE geomembranes exposed to low level radioactive waste leachate" *J. geothech. Geoenviron. Eng.*, 2017, 143 (6): 1-11
- [25] W.K.Wong "Evaluation of the oxidative degradation mechanism of corrugated high density polyethylene pipe and pipe resin" PhD, Drexel University, 2011

Interventi di ripristino strutturale con sistema in materiale composito “P.R.S.” per la sigillatura di perdite a carico di serbatoi di raffineria

L. Comel¹, R. Grassetti²

¹ Coating inspector, GMA srl

² CEO, GMA srl

Sommario

Il sistema GMA P.R.S. (Piping Recovering System) è una tecnica che prevede l'applicazione di un laminato in fibra di carbonio in matrice resinosa per il ripristino strutturale di tubazioni, serbatoi ed altre componenti di siti industriali, quali petrolchimici, raffinerie e centrali elettriche. Il P.R.S, coperto da brevetto industriale risponde alle indicazioni della circolare INAIL (allora ISPESL) OO-07/0000821/10.

Nel corso dell'esperienza all'interno di questi siti è emersa, nel confronto con le funzioni di manutenzione ed ispezione e collaudi, l'esigenza di ottimizzare al sistema al fine di offrire una soluzione rapida, sicura ed efficace per la risoluzione delle varie problematiche corrosive che possono emergere nel corso dell'esercizio di serbatoi adibiti allo stoccaggio di idrocarburi.

Nella presentazione verranno analizzate le esperienze di G.M.A. in materia, affrontando diverse situazioni che possono riguardare la vela di serbatoi a tetto galleggiante, i cassoni di galleggiamento, le virole ed il trincarino.

1. Introduzione

Il sistema P.R.S. è già stato oggetto di alcune presentazioni ai SAFAP 2016 e 2018, ove ci si è soffermati sulle esperienze in termini di applicazioni su tubazioni in pressione e sugli studi per la valutazione del comportamento a lungo termine del laminato.

Il P.R.S. nasce dall'esperienza di GMA all'interno di siti a rischio rilevante, quali in particolare raffinerie ed impianti petrolchimici ed ha l'obiettivo di offrire una soluzione pratica ed efficace per il rinforzo strutturale di tubazioni, serbatoi ed altre componenti di impianto soggette a perdite e/o problematiche corrosive.

Il sistema è stato progettato sulla base di rigorosi test di laboratorio su materiali e simulacri di prova ed il suo dimensionamento tiene conto delle varie condizioni di progetto della componente da ripristinare.

Il P.R.S., costituito da un laminato di fibra di carbonio in matrice resinosa, con interposizione di strati di fibra di vetro e preliminare applicazione di uno strato di adesione con carica inerte prevede la possibilità di essere installato in condizioni ATEX, evitando la necessità di dispendiosi fermi impianto.

2. Il sistema P.R.S.

Il sistema consiste nell'applicazione sulla zona interessata, dopo idonea preparazione superficiale (spazzolatrice ATEX o, se ammesso, sabbiatura) di uno strato di materiale composito, a base di fibre di carbonio e resina. L'interposizione di uno strato di materiale di riempimento consente una trasmissione omogenea delle sollecitazioni dalla superficie al composito e l'assorbimento di eventuali differenze di dilatazione termica. L'applicazione, come detto, può essere eseguita su qualsiasi superficie (piana o curva) e di qualunque estensione; lo spessore dello strato e il tipo di composito sono determinati in funzione dei

parametri di esercizio del componente dal programma di calcolo che contempla i seguenti casi:

- Rivestimento totale di un tratto di tubazione
- Rivestimento parziale di un tratto di tubazione
- Rivestimento localizzato o totale di una superficie piana

Dopo la polimerizzazione della resina (epossidica o vinilestere), la componente riacquista le caratteristiche meccaniche di progetto conferite dal PRS, senza alcuna interruzione del servizio

Il PRS elimina la necessità di ricorrere a tagli o a saldature, eliminando rischi ambientali ed aumentando la sicurezza. Sono anche evitate le possibilità di infragilimenti o cricature del metallo dovuti al processo di saldatura.

I criteri di calcolo, di dimensionamento e di realizzazione della riparazione prendono come riferimento la ASME PCC-2 Article 4.1 "Non-Metallic Composite Repair Systems for Pipelines and PIPework: High Risk Applications."

Per tutti i riferimenti teorici del calcolo e per le modalità di intervento si considerano inoltre i seguenti riferimenti normativi:

- UNI CEN ISO/TS 24817:2011: Industrie del petrolio, della petrolchimica e del gas naturale - Riparazioni di tubazioni per mezzo di materiale composito - Qualifica e progettazione, installazione, collaudo e ispezione
- CNR- DT 202/2005: "Istruzioni per Interventi di consolidamento statico di strutture metalliche mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati"
- Il sistema PRS, infine, è stato giudicato coerente alle indicazioni della circolare Ispesl OO-07/0000821/10 (all. 1) da parte del consiglio Tecnico Attrezzature ed Insiemi a Pressione di INAIL
- UNI 11325-5 "Interventi temporanei sulle attrezzature a pressione"

Nel seguito dell'articolo affronteremo lo specifico caso del rivestimento localizzato di superfici piane, quali quelle dei tetti di serbatoi di stoccaggio di idrocarburi, unitamente ad altri casi specifici di rinforzi strutturali legati all'ambito dei serbatoi

3. Tipologie di interventi su serbatoi

Nel corso dell'esperienza sul campo sono emerse diverse situazioni ove un intervento rapido di messa in sicurezza di perdite e/o corrosioni risulti determinante nella gestione del serbatoio, evitando interventi complessi quali svuotamento e bonifica, necessari per attuare tecniche tradizionali come la saldatura.

In particolare, si possono configurare diversi scenari, quali:

- Sigillatura a carico di perdite su virole e cassoni di galleggiamento
- Rinforzi strutturali di virole
- Sigillatura corrosioni e perdite su tetti galleggianti
- Riparazioni su trincarini

In tutti i casi è fondamentale effettuare un'adeguata preparazione superficiale, tenendo allo stesso tempo conto delle difficoltà operative e del rischio ATEX.

In tal senso è necessario prevedere un idoneo sgrassaggio delle superfici, rimuovendo eventuali residui di precedenti cicli di verniciatura.

Un'adeguata preparazione superficiale, valutabile come pari al grado St2 secondo ISO 8501-1 è conseguibile, a seconda delle condizioni operative e dell'estensione della superficie, mediante spazzolatrice pneumatica certificata per ambienti a rischio ATEX (MBX Bristle Blaster), oppure con idonei utensili manuali antiscintilla.

In presenza di perdite in atto la preparazione superficiale va svolta in due fasi, la prima grossolana e finalizzata all'efficacia del temporaneo contenimento della perdita (lamierini

sagomati, metallo molecolare a rapido indurimento, cunei metallici o in legno ecc.), la seconda più approfondita successivamente alla messa in sicurezza della perdita.

L'intervento va valutato in maniera preliminare con la committenza, nel rispetto di tutte le condizioni operative e di sicurezza previste dalla normativa vigente e dalle prescrizioni in vigore sul sito industriale in oggetto, tenendo conto peraltro dei requisiti per l'operatività in ambienti sospetti di inquinamento o confinati.

Nel rispetto della rapidità di intervento e di eventuali tempi limite previsti da contratto, la funzione di ingegneria di GMA, a seguito di sopralluogo in sito, identifica la soluzione ottimale per la messa in sicurezza del serbatoio, prendendo atto della problematica corrosiva in essere, delle condizioni di esercizio/progetto e dello storico manutentivo dell'item in esame.

A seguito di questa valutazione verranno quindi decise le modalità di intervento, lo spessore finale del laminato ed il tipo di resina da impiegare, incluse formulazioni specifiche per alte temperature.

4. Casi di studio

4.1 Mantelli e cassoni di galleggiamento di serbatoi

Nel primo caso l'intervento, valutato in condizioni delle criticità in essere e delle condizioni di esercizio, prevede il risanamento del mantello mediante metalli molecolari ad alta velocità di reticolazione e "surface tolerant", in possibile combinazione con un rinforzo in materiale composito e l'impiego di lamierini preformati.



Figura 1. Riparazione difetto passante su mantello serbatoio

Per quanto concerne i cassoni di galleggiamento, si possono osservare problematiche di foratura della lamiera del tetto a contatto con il prodotto stoccato, che portano all'accumulo dello stesso all'interno dei cassoni.

Il ciclo di lavoro prevede il risanamento delle lamiere inferiori del tetto galleggiante a doppio pontone per mezzo di metalli molecolari Stick ad alta velocità di reticolazione e rinforzi piani in fibra di carbonio, assieme all'introduzione di lamierini pre-sagomati in acciaio carbonio di spessore 1 mm.

Inoltre, si può provvedere all'installazione di un sistema di contenimento perdita costituito da un lamierino sagomato cilindrico, sigillato alla base, nel caso in cui il sistema di sigillatura della lamiera possa presentare cedimenti nella tenuta.

L'intervento si svolge in due attività successive:

- realizzazione del sistema di contenimento della perdita sigillato alla base;

- sigillatura delle forature mediante applicazione di lamierini metallici dallo spessore di 1mm e incollaggio/stuccatura mediante metallo molecolare e successivo rinforzo PRS.



Figura 2. Sigillatura perdita, realizzazione del sistema di contenimento e successiva sigillatura con ciclo PRS

4.2 Rinforzi per serbatoi in presenza di alte temperature

L'utilizzo di resine epossidiche altamente performanti consente di spingere l'utilizzo del ciclo di rinforzo PRS per mantelli di serbatoi fino a temperature di esercizio prossime ai 150°C. Le immagini successive si riferiscono all'esecuzione di 120 rinforzi localizzati a carico di un serbatoio in AISI316L di un sito chimico, dotato di tracciatura di vapore e presentante diffuse problematiche di corrosione localizzata.

Il ciclo di lavoro prevede la preparazione superficiale delle zone di intervento mediante spazzolatrice ATEX e la realizzazione di laminati di rinforzo locali così costituiti:

- Primer chimico di adesione
- Riempimento delle corrosioni mediante metallo molecolare per alte temperature
- Applicazione di più strati di fibra di carbonio e tessuto MAT di vetro saturati di resina epossidica per alte temperature fino a spessore di 5 mm del laminato



Figura 3. Dettaglio corrosioni dopo preparazione superficiale; in evidenza le tracciate di vapore in corrispondenza della zona di intervento



Figura 4. Aspetto finale di alcuni rinforzi; nell'immagine di destra è visibile il QR code identificativo dell'intervento

4.3 Tetti di serbatoi

La presenza di forature anche molteplici e diffuse su serbatoi a tetto galleggiante è una delle criticità più diffuse e che, visto il rischio di fuoriuscita di idrocarburo nell'ambiente e le difficoltà operative per il ripristino, rende urgente la messa in atto di interventi contenitivi. GMA interviene frequentemente nei siti contrattualizzati, predisponendo dei rinforzi locali in grado di sigillare le perdite, garantendo idonea adesione al substrato e mantenendo la necessaria flessibilità della vela.

Il dimensionamento dei rinforzi nei punti dove sono presenti i fori viene eseguito tenendo conto della pressione in gioco e della dimensione dei fori stessi.

Nel caso in cui vi siano più fori in una zona circoscritta, si realizza un rinforzo in PRS tale da raggruppare tutte le discontinuità vicine.

Nella scelta degli spessori si tiene conto anche gli effetti dei fenomeni flessionali che interessano le lamiere che costituiscono la vela del tetto galleggiante; infatti, il tetto è sottoposto a oscillazioni e frecce che rischierebbero di portare ad un distacco del laminato composito di rinforzo qualora questo presentasse un'eccessiva rigidità.

Per evitare questi fenomeni di coazione tensionale, si sceglie uno spessore tale da permettere che il laminato segua le deformazioni del substrato metallico in modo solidale. Inoltre, si utilizza una resina di tipo epossidico per costituire la matrice del rinforzo, dato che quest'ultima è dotata di una elasticità superiore rispetto alle resine vinilesteri che vengono utilizzate abitualmente per rinforzi strutturali di tubazioni in pressione.

Facendo riferimento ad uno dei tanti interventi svolti all'interno di un sito oil&gas italiano, si riporta di seguito la procedura di lavoro seguita per questa tipologia di intervento.

- Sgrassaggio della zona di lavoro
- Eliminazione delle perdite mediante l'applicazione sui fori di piastrine metalliche pre-sagomate sigillate con metallo molecolare oppure con inserimento di cunei di legno a sezione tronco-conica pre-torniti anch'essi sigillati con metallo molecolare a rapida velocità di indurimento
- Rimozione del rivestimento poliuretano preesistente
- Preparazione superficiale con spazzolatrice ATEX
- Applicazione del primer di adesione
- Deposizione dello strato S1 di resina con carica inerte
- Realizzazione del laminato in fibra di carbonio e tessuto tipo "mat" di vetro per uno spessore di 3 mm

- Controlli dell'applicazione
- Mappatura delle riparazioni effettuate ed emissione report lavorazioni



Figura 5. Applicazione primer di adesione dopo seconda preparazione superficiale e fasi di applicazione del laminato

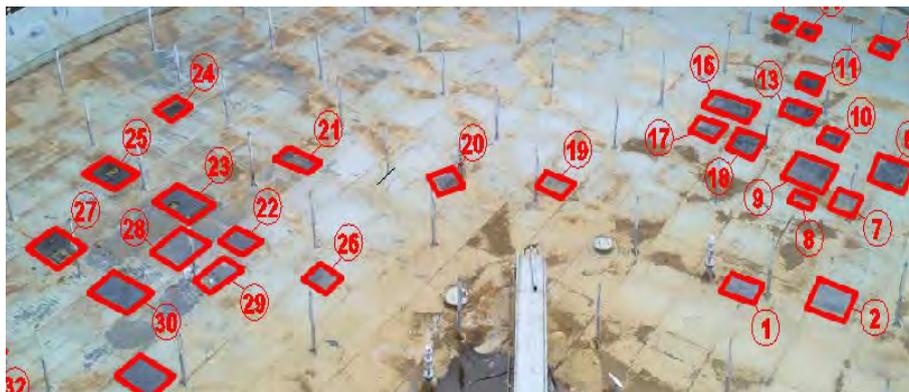


Figura 6. Mappatura riparazioni effettuate

Nel caso specifico sono stati sigillati 96 fori aventi diametro medio di 25 mm (range 5 – 40 mm), su un serbatoio deputato allo stoccaggio di virgin nafta

4.4 Riparazione di trincarini

Frequentemente incontriamo problematiche di degrado a carico del fondo del trincarino di serbatoi all'interno di siti industriali.

Sulla base delle necessità dei committenti GMA ha sviluppato in ciclo di riparazione dotato delle seguenti caratteristiche:

- 1) in grado di "cristallizzare" la situazione attuale, bloccando quindi i fenomeni corrosivi in atto;
- 2) in grado di garantire un'adeguata sigillatura tra la platea in cls ed il fondo del serbatoio, evitando in tal modo infiltrazioni di acque meteoriche ed umidità;
- 3) in grado di migliorare il deflusso delle acque meteoriche, mediante realizzazione di adeguata pendenza evitando in tal modo i ristagni;
- 4) in grado di garantire l'impermeabilità alle acque (waterproof) e la resistenza ai raggi UV sulle seguenti zone:

- a) trincarino: fino ad un'altezza di circa 200-250 mm. circa sulla prima virola
- b) parte orizzontale della platea in cls: integralmente
- c) parte verticale della platea in cls: fino ad un'altezza di circa 200mm.

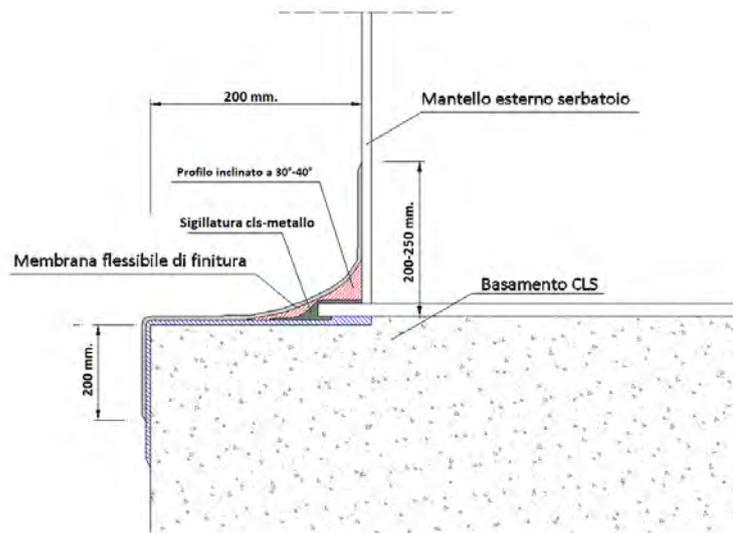


Figura 7. Schema tipo di applicazione del sistema di sigillatura ed impermeabilizzazione del trincarino

Viene dapprima svolta la pulizia delle superfici da trattare mediante processo di sabbiatura con uso di graniglia asilicogena a granulometria controllata sino a raggiungere un idoneo grado di pulizia e realizzare un profilo tale da consentire una perfetta adesione dei materiali da applicare;

La parte metallica verrà sabbiata fino ad un'altezza di circa 250 mm, che comprenderà trincarino e parte della prima virola;

La parte cementizia della platea, verrà sabbiata integralmente sulla parte orizzontale, mentre sulla parte verticale ci si attesterà ad un'altezza di circa 200 mm.;

A seguito della preparazione superficiale, si procede alla primerizzazione delle superfici, effettuando un trattamento differenziato tra zoccolo della platea e parte terminale del mantello.

La parte inferiore viene quindi rinforzata mediante ciclo in vetroresina "Liner 1", mentre l'interfaccia tra platea e mantello prevede la realizzazione di uno strato elastomerico.

Viene poi realizzata un'idonea pendenza sulla parte superiore del trincarino per garantire il deflusso delle acque meteoriche, per poi proteggere la totalità delle superfici trattate con una membrana flessibile rinforzata.

Le immagini seguenti si riferiscono al trincarino di un serbatoio criogenico, contenente etilene a 300 mmH₂O e temperature comprese tra -80°C e -102°C.



Figura 8. Fasi di lavorazione: sabbiatura, applicazione rivestimento in VTR Liner 1 e sigillatura mediante rivestimento epossipoliuretano



Figura 9. Realizzazione profilo inclinato, deposizione membrana flessibile con rete di rinforzo e aspetto finale

GMA ha sviluppato negli anni una significativa esperienza riguardo questo sistema di applicazione, inserendolo nelle specifiche di manutenzione di player primari nell'ambito oli&gas.

Il sistema garantisce un'elevata durabilità nel tempo, come testimoniato dai controlli svolti su riparazioni effettuate a distanza di diversi anni.



Figura 10. Sistema di rinforzo di un trincarino a 8 anni dall'applicazione

5. Conclusioni

Nel corso degli ultimi 15 anni GMA ha avuto modo di ottimizzare le sue tecniche di riparazione in materiali composito e, sulla base delle necessità della committenza sono state sviluppate soluzioni specifiche per la risoluzione delle problematiche che possono emergere nell'esercizio di serbatoi all'interno di siti a rischio rilevante, come raffinerie ed impianti petrolchimici.

Tali soluzioni si prestano ad essere eseguite in ambiente ATEX e mantenendo l'operatività del serbatoio, garantendo quindi un ottimale bilanciamento tra ottimizzazione dei costi di esercizio e sicurezza del sito e degli operatori.

6. Bibliografia

[1] Comel L. Rinforzo strutturale in P.R.S. di un grande serbatoio G.P.L. in seguito a "warning" da CND. Senza alcuna interruzione dell'operatività. Atti del congresso MCM 2013, Milano

[2] Comel L. Stefanini P. Messa in sicurezza di un grande serbatoio G.P.L. Fluid Trasmissioni di potenza 2013 N°6 Novembre: pagine 30-32

[3] Comel L, Grassetti R. Rinforzi strutturali in fibra di carbonio e resina PRS per apparecchiature, tubazioni e valvole, in seguito a warning da CND senza alcuna interruzione di operatività. Atti del convegno SAFAP 2016, Milano

[4] Comel L, Grassetti R. Rinforzi strutturali in materiale composito PRS per apparecchiature in pressione: esperienze in materia di durabilità e monitoraggio nel tempo. Atti del convegno SAFAP 2018, Bologna

Come affrontare la riparazione di una filettatura tramite l'utilizzo di un inserto elicoidale

P. Coppoli¹, M. Garavaldi¹, N. Bravi², E. Franchi², M. Guerrieri³

¹ Baker Hughes – Nuovo Pignone S.r.l.

² Inail - Uot di Lucca

³ SAIPEX S.r.l.

1. Introduzione

Il danneggiamento di una filettatura rappresenta una tipologia di rottura piuttosto rara, caratterizzata da specifiche particolarità, soprattutto se, come nel caso oggetto dello studio, si tratta di un accoppiamento filettato tra vite e madrevite di dimensioni rilevanti pari a circa 80 mm che richiede l'utilizzo di un inserto elicoidale di dimensioni tali da non risultare normato da alcuno standard internazionale.

L'attrezzatura oggetto dell'intervento di riparazione è stato uno scambiatore a fascio tubiero ad U in cui la piastra tubiera è saldata al distributore, formato da un cilindro cavo forgiato e due bocchelli per l'ingresso e uscita del fluido da raffreddare. Il distributore è chiuso da un coperchio piano, tramite accoppiamento filettato con tirante prigioniero.

La riparazione si è resa necessaria in quanto, a seguito di una ispezione interna a scopi manutentivi, è emerso un danneggiamento della filettatura del decimo foro del distributore (partendo dal vertice superiore dell'apparecchio e procedendo in senso orario).

Per tale ragione la soluzione tecnica adottata prevedeva di utilizzare un inserto elicoidale (spirale) autofilettante che necessitava dei seguenti passaggi al fine di ripristinare l'accoppiamento:

- alesaggio del foro filettato;
- nuova filettatura del foro con utensile specifico al fine di ricreare un foro con filettatura congrua a quella esterna dell'elicoide;
- inserimento elicoidale con attrezzatura speciale.

Al termine dell'intervento il tirante potrà essere stato correttamente accoppiato allo scambiatore in quanto le spire interne dell'inserto elicoidale sono caratterizzate da un diametro e da una tipologia di filettatura concorde a quella del foro originale.

Tale soluzione è comunemente utilizzata in carpenteria per il ripristino di accoppiamenti filettati, esiste però un solo riferimento normativo che garantisce l'idoneità dell'intervento in ambito attrezzature in pressione, la norma ASME PCC Pt. 2, che cita la norma ASME B18.29.1 per i riferimenti tecnici dell'attività. Tale norma contiene i riferimenti geometrici e i calcoli di progetto per inserti fino a un diametro di 1 ½", inferiore al diametro del foro danneggiato, pertanto è stato necessario confrontarci con la UOT di riferimento e con il DIT per capire quali analisi approfondire per la corretta esecuzione dell'intervento.

Questo articolo si pone l'obiettivo di illustrare la procedura di riparazione adottata andando a descrivere nel dettaglio gli aspetti tecnici con cui è stato necessario confrontarsi.

2. Approccio di calcolo

L'obiettivo ultimo dell'attività di riparazione è quello di ripristinare le condizioni di progetto dell'accoppiamento flangiato tra il coperchio ed il distributore.

Tale accoppiamento è realizzato tramite n°16 tiranti che ingranano su altrettanti fori ciechi presenti sulla cassa del distributore.

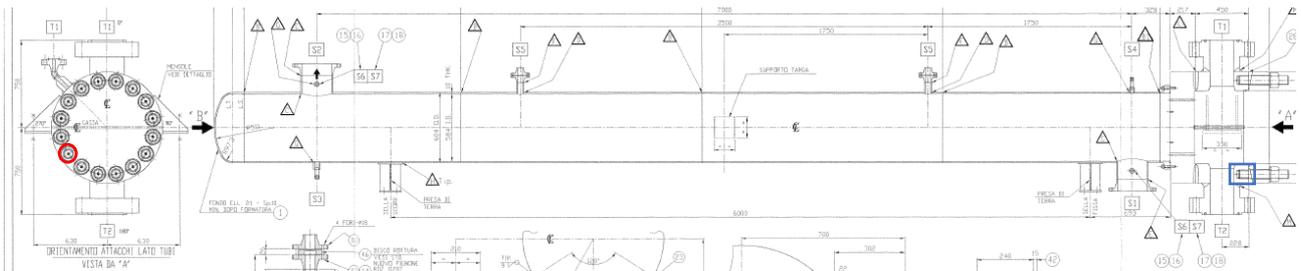


Figura 1. Estratto del disegno costruttivo dello scambiatore con evidenziato in rosso il tirante oggetto della riparazione ed in blu la zona della filettatura danneggiata

La tenuta dell'accoppiamento è stata predisposta tramite due o-ring installati rispettivamente uno in posizione orizzontale sul canale centrale tra distributore e coperchio ed il secondo in posizione verticale sulla superficie di contatto degli stessi.

Entrambi gli o-ring sono forniti di anello di centraggio per garantirne la correttezza del posizionamento in fase di montaggio ed il conseguente schiacciamento ai fini della tenuta finale.

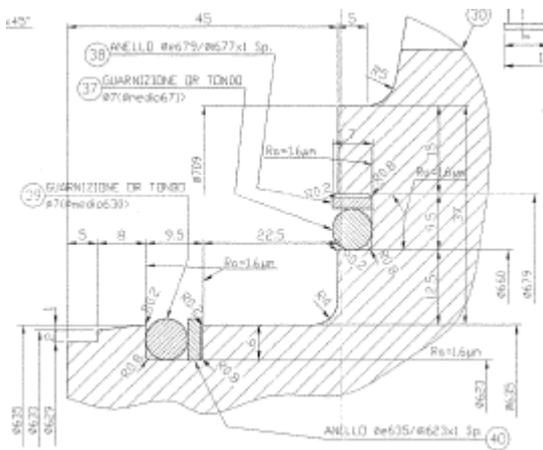


Figura 2. Estratto del disegno costruttivo dello scambiatore con il particolare delle guarnizioni di accoppiamento tra il distributore ed il coperchio ed un'immagine reale del componente

Primo obiettivo di un accoppiamento flangiato realizzato tramite dei tiranti ed un sistema di guarnizioni è quello di garantire la tenuta durante l'esercizio dell'attrezzatura in pressione al fine di scongiurare fuoriuscite del gas di processo.

La tenuta si realizza tramite l'imposizione di un corretto precarico di trazione ai tiranti durante la fase di serraggio del coperchio sul distributore.

Tale serraggio deve essere omogeneo sull'intera circonferenza in modo tale che la pressione di tenuta sia uniforme lungo tutto il perimetro dell'accoppiamento.

Pertanto l'approccio di calcolo è stato caratterizzato da n°5 fasi che andremo a descrivere nel dettaglio nei successivi paragrafi.

2.1 Fase 1: Determinazione del precarico

La valutazione della forza di precarico si resa necessaria poiché nel manuale d'uso e manutenzione del fabbricante dell'apparecchiatura non sono presenti indicazioni in merito. Per la determinazione del precarico dei tiranti è necessario fare riferimento al diagramma tensoriale che rappresenta la combinazione degli sforzi tra il tirante ed il sistema flangia-guarnizione e che ci permette di determinare quale sia il valore ottimale di questo parametro in modo tale da poter garantire la tenuta dell'accoppiamento.

Di seguito si riporta un'immagine esplicativa.

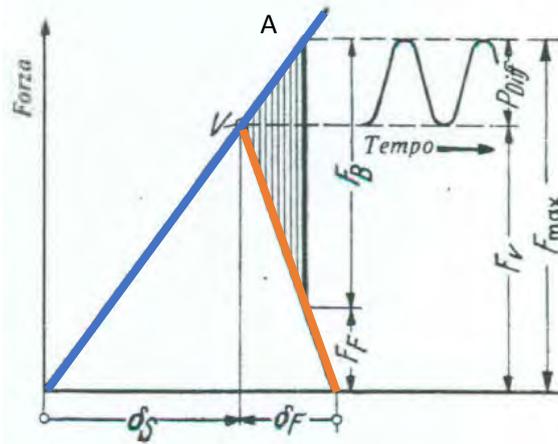


Figura 3. Geometria dell'accoppiamento bullonato

Nel diagramma riportato in Figura 3 è possibile identificare la retta in blu come quella relativa al carico di trazione agente sul tirante ed in rosso quella relativa al carico del sistema flangia-guarnizione. La pendenza di tali retta è determinata dalla rigidezza dei due componenti dell'accoppiamento.

Pertanto in condizioni di progetto e quindi di massimo esercizio, il tirante sarà sollecitato dal livello di carico corrispondente al punto A pari al valore F_{max} .

Tale forza F_{max} è data dalla somma del contributo alla trazione dovuto alla pressione interna che spinge sul coperchio F_b e del contributo dovuto alla spinta della guarnizione F_F .

Nel caso della nostra specifica applicazione il valore F_{max} corrisponde al parametro W_{m1} in condizioni di esercizio ed al parametro W_{mi} in condizioni di prova idrostatica così come riportato nell'allegato 1 della presente relazione, che è stato determinato in accordo al paragrafo 1.L della norma di calcolo VSR che corrisponde al codice di costruzione dello scambiatore oggetto della riparazione.

A questo punto per la determinazione del precarico esistono in letteratura e dall'esperienza comune diverse metodologie. Se ne riporta di seguito un breve excursus dandone una valutazione nel nostro specifico caso per poi illustrare l'approccio adottato:

1. Normalmente l'approccio utilizzato per la determinazione del precarico è quello che prevede che sia applicata una forza necessaria allo schiacciamento ideale della guarnizione in modo tale che possa essere poi garantito la tenuta durante l'esercizio dell'accoppiamento. Il valore ideale di schiacciamento viene usualmente dichiarato dal fabbricante della guarnizione che conosce il comportamento e con tale parametro si determina lo schiacciamento da imprimere tramite il precarico sui tiranti. Nel caso oggetto di studio la guarnizione è rappresentata dalla presenza di due o-ring in materiale polimerico morbido tenuti in sede da alcuni anelli di centraggio previsti in AISI304 dal fabbricante. Gli o-ring per loro caratteristiche non hanno un valore di schiacciamento che possa essere considerato nel calcolo di determinazione del serraggio pertanto in questa particolare applicazione potremmo considerare applicabile lo schiacciamento dell'inserto di centraggio in AISI304, la cui deformazione è necessaria per garantire l'esatto posizionamento e tenuta dell'o-ring.
2. Un approccio alternativo che oltre alla tenuta sia rivolto alla garanzia al carico massimo è quello che ipotizza che il precarico sia pari al parametro W_{m1} in condizioni operative o al parametro W_{mi} in condizioni di prova idrostatica che rappresentano i massimi valori del carico che il tirante dovrà subire in fase di esercizio per contrasto della pressione interna in accordo paragrafo 1.L della norma di calcolo VSR

In via del tutto conservativa, al fine di avere le massime garanzie di tenuta e carico massimo si considera come approccio di riferimento per la determinazione del precarico, il numero 2. Occorre precisare comunque che in fase di serraggio la coppia reale applicata non sarà in funzione di tale valore ma bensì un valore inferiore.

2.2. Fase 2: Determinazione della coppia di serraggio

La Figura 4 mostra la geometria dell'accoppiamento bullonato dopo l'inserimento dell'inserto elicoidale.

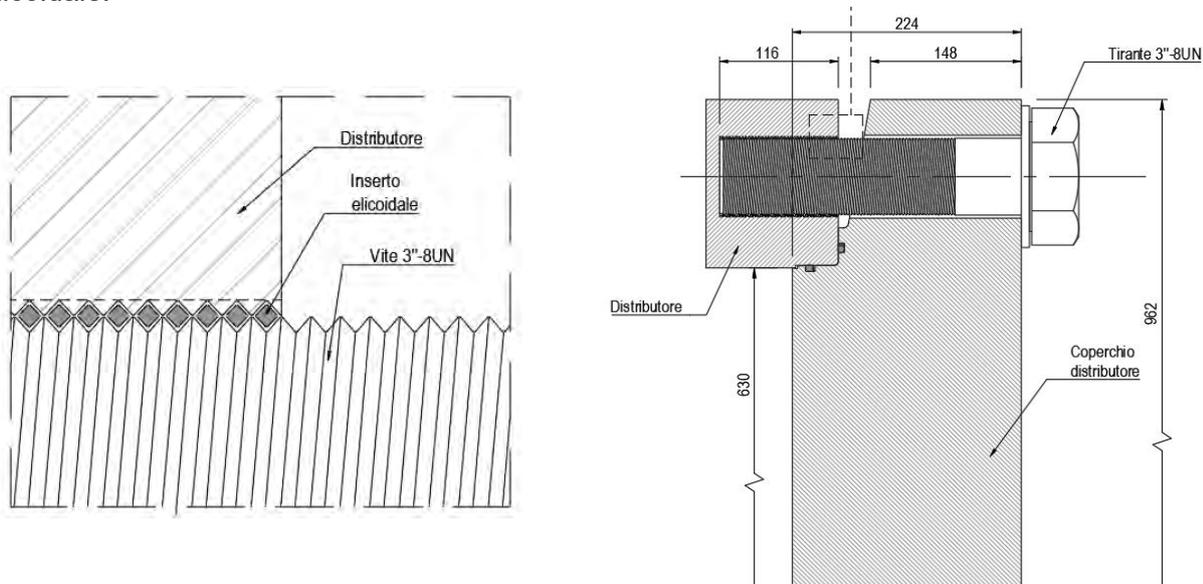


Figura 4. Geometria dell'accoppiamento bullonato

L'avvitamento del tirante da 3" sarà agevolato dall'utilizzo di due sostanze specifiche:

- un grasso lubrificante denominato "Molykote M77", il quale permetterà di ridurre l'attrito tra il tirante e l'elicoide e facilitarne dunque l'avvitamento. L'utilizzo del grasso lubrificante permette di adottare un coefficiente d'attrito secondo quanto dichiarato dal produttore.
- Una pasta adesiva denominata "Loctite", la quale permetterà di aumentare l'attrito tra la madrevite e l'elicoide e facilitarne l'accoppiamento.

L'utilizzo combinato dei due prodotti sopra citati permetterà di minimizzare l'eventuale scorrimento relativo tra i due accoppiamenti filettati madrevite-elicoide ed elicoide-tirante in modo da non influire sul valore della coppia di serraggio.

2.3 Fase 3: Verifica del giunto bullonato oggetto di riparazione

Noto il precarico da applicare a ciascun tirante, saranno elaborate le necessarie verifiche strutturali al fine di garantire che il nuovo accoppiamento madrevite-elicoide-tirante sia strutturalmente in grado di sostenere il massimo sforzo a cui è sottoposto nelle due condizioni di carico previste dalla raccolta VSR ossia in condizioni di esercizio (operation) ed in condizioni di prova idraulica (proof test).

Pertanto saranno oggetto di verifica:

- Sforzo a taglio sulle spire dell'elicoide;
- Sforzo a taglio sulle spire della madrevite del foro prigioniero;
- Sforzo a taglio sulla filettatura del tirante.

2.4 Fase 4: Verifica lunghezza accoppiamento

Lo scopo di questa fase di calcolo è stato quello di verificare che la lunghezza di accoppiamento tirante filettatura femmina sia in accordo a quanto prescritto dalle normative del settore ed al codice di calcolo originario, nel caso specifico rappresentato dalla VSR. Il dettaglio della porzione filettata sul distributore è indicato nella figura che segue.

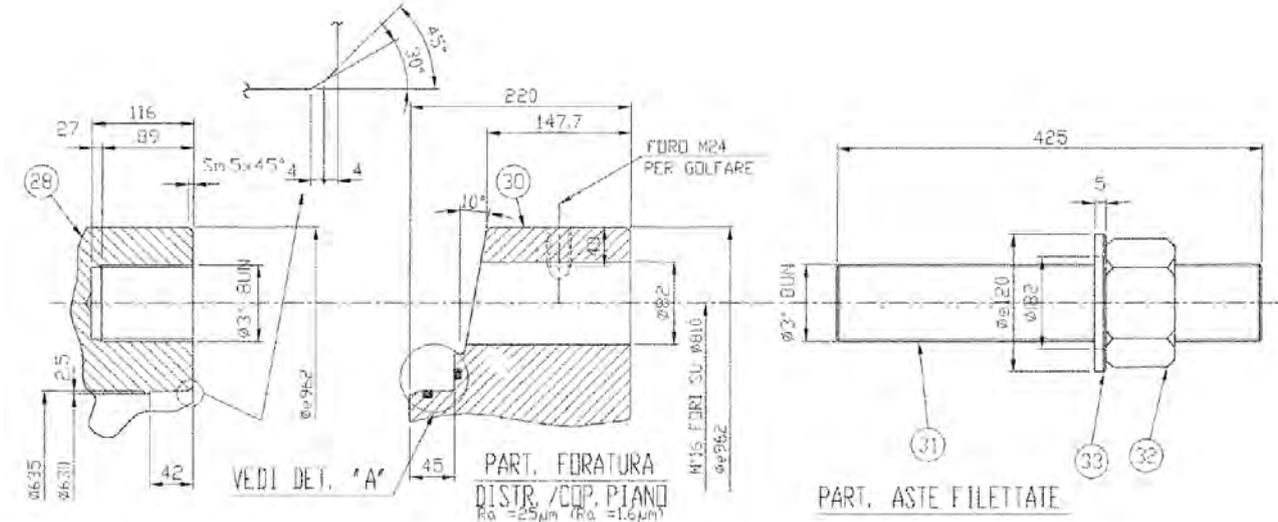


Figura 5. Dettaglio del foro prigioniero sulla cassa del distributore

La tecnica di riparazione proposta, mediante inserimento di un inserto elicoidale con diametro finale pari a quello di partenza, pertanto, si dimostra idonea a garantire un ottimale grado di accoppiamento tra tirante e filettatura.

Non si è ritenuto necessario procedere alla verifica di stabilità del componente soggetto alla lavorazione del foro (la cassa del distributore nella fattispecie) poiché non c'è variazione tra prima e dopo dell'area del foro nel metallo di base.

L'utilizzo inoltre di un tirante dello stesso diametro di quello precedente rende non necessaria qualsiasi verifica sul coperchio di chiusura.

2.5 Fase 5: Verifica contemporaneità dei carichi

Il distributore dello scambiatore per la sua conformazione molto particolare presenta la necessità di essere sottoposto a verifica di contemporaneità dei carichi in quanto l'intervento di riparazione ha previsto in fase di rialesatura del foro un'asportazione di materiale.

Tale verifica è stata affrontata tramite la tecnica di analisi agli elementi finiti.

La sezione oggetto dello studio è stata quella relativa all'area circostante al foro cieco e per quanto concerne la contemporaneità dei carichi applicativi, si elenca di seguito quelli considerati:

- Carichi esterni localizzati presenti sui due bocchelli, facendo riferimento alla tabella presente sul disegno costruttivo di fabbricazione.
- Carico dovuto alla pressione e temperatura interna di progetto presenti sul distributore come da tabella presente sul disegno costruttivo di fabbricazione.
- Carico dovuto allo sforzo di trazione dei tiranti.

Per ragioni di sintesi in questa sede non sono riportati le ipotesi di calcolo, l'approccio di modellazione ed i risultati della specifica analisi FEM.

A titolo esemplificativo di seguito un'immagine dei risultati della fase di calcolo sperimentale.

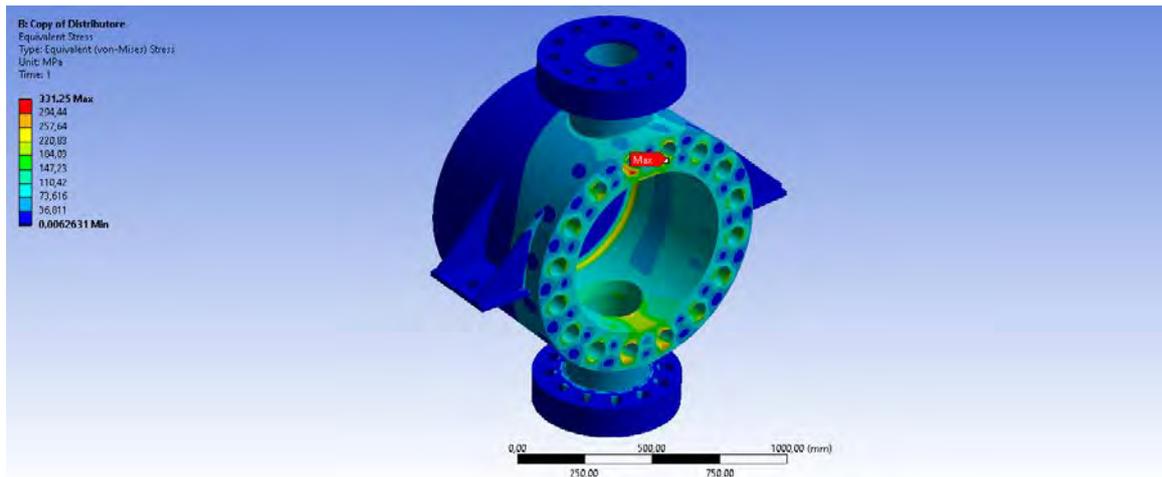


Figura 5. Andamento della tensione equivalente nel modello del distributore

3. Fasi operative dell'attività

Di seguito si riassumono i principali step della procedura di riparazione che ha avuto avvio dopo l'esecuzione delle approfondite verifiche di calcolo, presentate nel paragrafo precedente, che ne garantivano correttezza ed attuabilità da un punto di vista progettuale. Per ciascuna fase sono state riportate alcune immagini delle attività operative.

1. I Fase: Alesatura del foro filettato lato madrevite tramite un trapano con punta speciale.



Figura 6. la filettatura danneggiata, il posizionamento del macchinario per l'alesatura, lo strumento di alesaggio

2. II Fase: Esecuzione controlli con liquidi penetranti superficiali per verifica presenza di difettologie.



Figura 7. Esecuzione di controllo con liquidi penetranti a valle della fase di alesaggio

3. III Fase: Nuova maschiatura del foro lato madrevite eseguita tramite utensile speciale fornito dal costruttore dell'elicoide.



Figura 8. Maschio, posizionamento della testa nei pressi del foro, posizionamento generale

4. IV Fase: Esecuzione controlli con liquidi penetranti dopo la maschiatura completa del foro
5. V Fase: Installazione inserto elicoidale con apposita attrezzatura.



Figura 9. Una immagine dell'elicoide e dello strumento manuale per la sua installazione all'interno della madrevite del distributore

6. V Fase: Serraggio del tirante previo ingrassaggio dello stesso.
7. VI Fase: Esecuzione prova in pressione.

Ciascuna fase è stata oggetto di stretto monitoraggio da parte di Inail, ente di controllo che ha seguito l'attività di riparazione.

4. Risultati

La riparazione ha dato esito positivo in quanto l'attrezzatura dopo aver subito tutte le verifiche previste dalla normativa e dalla procedura stessa di riparazione è stata messa nuovamente in servizio ed utilizzata in condizioni di sicurezza

5. Conclusione

La grande disponibilità e competenza dell'ente di controllo sia dell'unità territoriale che di quella centrale unita alla forte ed importante esperienza in ambito di attrezzature metalliche da parte dell'utilizzatore hanno permesso di affrontare con successo un'attività di riparazione che presentava diverse insidie ed incertezze.

6. Bibliografia

Le normative applicate per lo svolgimento delle attività descritte nei paragrafi precedenti sono elencate di seguito:

- [1] VSR Rev.1995 Ed.1999.
- [2] UNI PdR 55:2019.
- [3] Direttiva PED 2014/68/UE.
- [4] ASME VIII Div.1.
- [5] ASME B1.1 Ed.2019.
- [6] ASME PPC-1 Ed.2019.
- [7] ASME PCC-2 Ed.2018.
- [8] ASME B18.29.1-2012.

Protezione con INCONEL 625 di surriscaldatori di vapore all'interno di un termovalorizzatore

E. Opromolla¹, C. Liccardo², L. Tassan Pagnochit², A. Cocchiario³

¹ Inail - Uot di Napoli

² A2A Ambiente SpA

³ Consulente A2A Ambiente SpA

1. Sommario

Il Termovalorizzatore di Acerra è un impianto di recupero energetico dai rifiuti progettato per produrre energia elettrica. È costituito da tre caldaie per la produzione di vapore, collegate ad un unico turbo-generatore.

La temperatura, la tipologia dei fumi e la temperatura del vapore, all'interno delle tubazioni, comportano problematiche di usura dei banchi surriscaldatori posizionati nei diversi giri fumi con conseguente corrosione superficiale delle tubazioni. Tali problematiche determinano la necessità di interventi di manutenzione con prolungati periodi di indisponibilità della caldaia.

Al fine di migliorare l'affidabilità della caldaia, sulla base delle esperienze di esercizio maturate, si è ritenuto necessario procedere alla sostituzione integrale degli scambiatori SH3. Alcune sezioni dello scambiatore sono state ricoperte in Inconel 625 al fine di migliorarne la resistenza alla corrosione.

2. Configurazione del generatore

La caldaia a vapore è a quattro passaggi fumi verticali. I fumi lasciano la camera di combustione primaria e cedono parte del loro calore in due passaggi radianti. Nel secondo passaggio fumi, addizionali pannelli scambianti servono quali surriscaldatori finali del vapore con temperature fino a 480 °C in esercizio e 507 °C di progetto. La temperatura dei fumi scende fino a circa 700 °C prima dell'ingresso nel terzo passaggio nel quale sono posizionate le superfici di scambio per convezione (banchi surriscaldatori addizionali SH1). Nel quarto passaggio fumi sono posizionati i banchi economizzatori.

La temperatura dei fumi in uscita dalla caldaia è compresa tra 170 ÷ 190 °C in relazione al carico termico ed al grado di sporcamento (*fouling*) delle superfici di scambio.

Le pareti laterali dei primi tre passaggi sono costituite da tubi membranati evaporatori. Nel quarto passaggio le pareti sono costituite da piastre in acciaio.

La caldaia è sostenuta dall'alto da una struttura in acciaio che permette la dilatazione termica in verticale.

L'acqua di alimento è preriscaldata nell'economizzatore, fatta evaporare nelle pareti membranate e surriscaldata nel surriscaldatore, come nel seguito descritto.

L'acqua di alimento è immessa in caldaia attraverso l'economizzatore situato nel quarto passaggio dove passa attraverso i banchi economizzatori in controcorrente rispetto ai fumi. Una parte della portata d'acqua di alimento, variabile a seconda delle esigenze di processo, viene deviata attraverso uno scambiatore di calore a serpentina inserito all'interno del corpo cilindrico, dove viene preriscaldata, per poi ritornare nel flusso principale dell'acqua di alimento a monte dell'economizzatore. Questa configurazione del circuito dell'acqua di alimento serve a controllare la temperatura dei fumi all'uscita della caldaia, mantenendola entro un prefissato "range" al variare delle condizioni di carico e del grado di sporcamento delle superfici di scambio.

L'acqua preriscaldata fluisce, tramite tubazioni collegate al collettore di uscita dell'economizzatore, al corpo cilindrico, dal quale, attraverso i tubi di caduta esterni ("downcomers") e successive tubazioni di collegamento, viene distribuita nei tubi vaporizzanti delle pareti membranate.

In tali tubazioni si forma una miscela liquido/vapore che ritorna al corpo cilindrico per circolazione naturale (ossia per la differenza di densità tra il fluido circolante nei tubi di caduta esterni e quello all'interno dei tubi di risalita riscaldati). Nel corpo cilindrico avviene la separazione acqua-vapore.

Il vapore saturo fluisce dal corpo cilindrico al surriscaldatore 1, costituito da 5 sezioni di tubi di scambio convettivi disposti all'ingresso (SH 1.0) del terzo passaggio fumi, nel secondo passaggio fumi (SH1.05) ed all'interno del terzo passaggio fumi (SH1.1, SH1.2, SH1.3).

Dal surriscaldatore 1.3 il vapore passa al 3 (SH3), con attemperamenti intermedi.

Gli attemperatori consentono di mantenere costante la temperatura del vapore anche in caso di cambiamenti nel carico termico o cambiamenti nello scambio termico dovuti al *fouling* delle superfici di scambio.

I surriscaldatori 1.05 e 3 sono costituiti da file di tubi ("pannelli") verticali, sospesi all'interno del secondo passaggio fumi, protetti esternamente da rivestimento refrattario e Inconel 625.

La caldaia e la linea vapore ad alta pressione sono protette da due valvole di sicurezza, situate sulla sommità del corpo cilindrico e sull'uscita del surriscaldatore.

Durante l'avviamento della caldaia il valore permesso di variazione della pressione è controllato da valvola di start-up di controllo e il vapore prodotto viene scaricato in atmosfera attraverso un silenziatore di avviamento.

Durante condizioni normali di esercizio, il vapore di alta pressione è inviato alla turbina e la valvola di controllo dell'ammissione vapore in turbina regola la pressione di esercizio.

3. Il percorso dei fumi

I passaggi in caldaia dei fumi sono direttamente consecutivi alla camera di combustione primaria. Nei passaggi i fumi sono raffreddati per scambio termico radiante e convettivo con il circuito acqua/vapore della caldaia.

I passaggi fumi sono quattro, a sviluppo verticale. I primi tre hanno le pareti costituite da tubi di scambio (vaporizzatori), saldati tra loro tramite alette per la tenuta.

Il primo passaggio è costituito da una camera vuota (le superfici di scambio sono esclusivamente quelle delle pareti e del tetto). Tale passaggio è parzialmente provvisto di rivestimento refrattario nella zona bassa e di rivestimento mediante riporto di saldatura di Inconel 625 nella zona superiore. Il secondo passaggio, in aggiunta alle pareti membranate, è equipaggiato con addizionali scambiatori a "pannelli", sospesi (surriscaldatori SH1.05 e SH3).

4. Attività di preparazione alla fermata

I componenti da sostituire vengono preventivamente realizzati massimizzando le attività di prefabbricazione presso officine di fornitori esterne all'impianto. I nuovi componenti sono controllati e collaudati in officina da un ispettore di un Ente Terzo e sono accompagnati dalla relativa documentazione di qualità e certificazione di conformità.

Tale tipo di certificazione garantisce l'esecuzione presso l'officina del fornitore di tutti i controlli previsti dalla direttiva PED e dalle norme tecniche applicabili e consente di ridurre al minimo le attività da svolgere in cantiere con conseguente riduzione del tempo di fermata del generatore.

5. Scambiatori SH3

Gli scambiatori SH3 rappresentano lo stadio finale di surriscaldamento del vapore all'interno del generatore di calore. Lo scambiatore è situato nel secondo passaggio fumi ed è costituito da 11 pannelli verticali sospesi a travi portanti poste sulla sommità della caldaia.

Ogni pannello è costituito da 30 tubi collegati tra loro da membrane. I tubi sono realizzati in acciaio 10CrMo9-10 EN10216-2 delle dimensioni 38x6.3 mm.

In ogni pannello si alternano tubi con flusso discendente a tubi con flusso ascendente. Ciò consente di collocare i collettori di ingresso ed uscita all'esterno del generatore nella cosiddetta "camera morta superiore" garantendone una elevata durata.

Le tubazioni discendenti ed ascendenti confluiscono in un unico collettore inferiore che bilancia i flussi tra le tubazioni.

Sia le tubazioni che il collettore sono investiti da fumi di combustione a temperatura superiore a 750°C nella sezione superiore e vengono attraversati da vapore fino a 480°C nelle sezioni prossime all'uscita.

Per garantire una maggiore durabilità ogni pannello è rivestito con una malta cementizia refrattaria supportata su pioli metallici saldati alle tubazioni. Il collettore inferiore di ogni pannello ed i dreni sono stati rivestiti in Inconel 625.



Figura 1. Collettore inferiore rivestito in Inconel 625

6. Stato di usura SH3

Le elevate temperature del vapore, in concomitanza con le temperature raggiunte dai fumi nel secondo passaggio fumi della caldaia, determinano un notevole deterioramento delle tubazioni con rischio di cedimento e perdita di vapore.

In occasione di ogni fermata viene eseguita una ispezione di tutta la superficie degli scambiatori ed identificate le aree che presentano deterioramento della struttura in refrattario o perdite.

Uno specifico studio ha riguardato l'analisi delle cause di degrado.

Riassumendo quanto emerso nel corso da tali analisi si può affermare che l'elemento più critico è rappresentato dalla corrosione, il cui maggiore responsabile è il cloro, presente sia nei rifiuti organici (ad es. nei materiali plastici come il Cloruro di polivinile) che inorganici (ad es. Cloruro di sodio). Di fatti il cloro reagendo con gli alcali (sodio, potassio e

calcio) e, in particolare, con i metalli pesanti (piombo, zinco, cadmio, mercurio) causa la formazione di miscele eutettiche basso fondenti che, essendo liquide anche a basse temperature ($T_f < 200 \text{ }^\circ\text{C}$), risultano particolarmente corrosive in quanto il sale fuso ha una elevata capacità di dissoluzione nei confronti degli ossidi metallici.

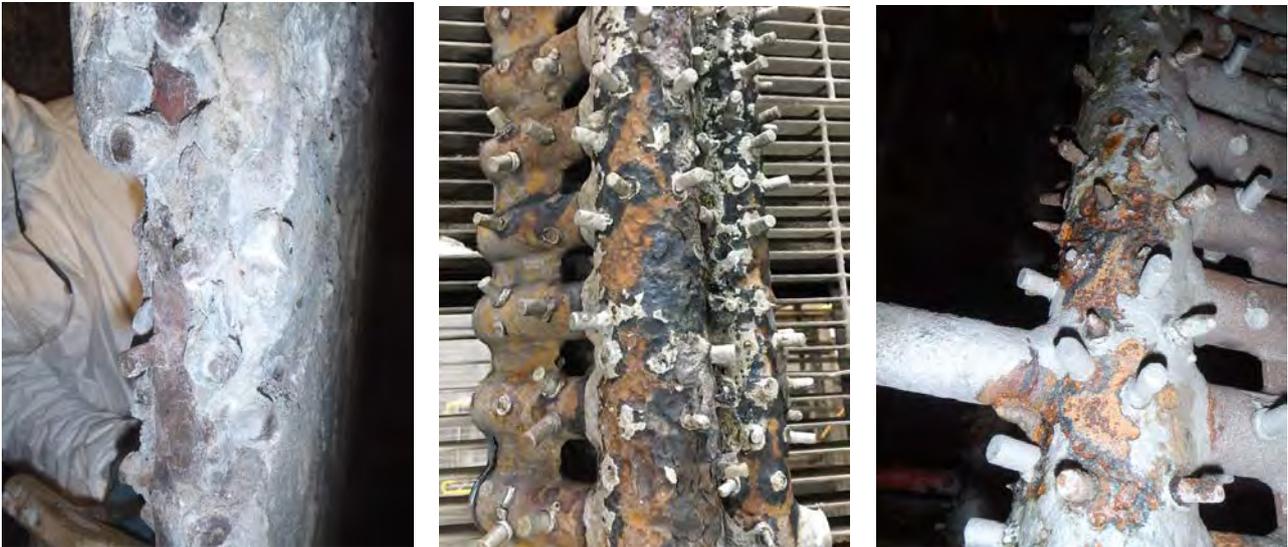


Figura 2. refrattario caduto e tubazione danneggiata (a sinistra); stato di usura collettori inferiori SH3 prima del rivestimento in Inconel 625 (al centro e a destra)

Giova a questo punto ricordare che la stabilità termodinamica dei cloruri metallici è funzione, oltre che della temperatura, anche della concentrazione di HCl nei gas e della pressione di esercizio.

L'analisi morfologica ha rilevato la presenza di vuoti lungo i bordi dei grani, causati dall'estrema volatilità dei prodotti di corrosione clorurati attraverso la scaglia; ciò conferma l'attacco da cloruri nei confronti del metallo base.

Poiché la velocità di corrosione, in relazione alla temperatura di esercizio ed all'ambiente aggressivo, è significativamente elevata, si è giunti alla necessità di utilizzare materiali alternativi, in particolare si è previsto l'impiego di componenti rivestiti con Inconel 625 per alcune sezioni. Tale scelta è stata limitata a specifici componenti in considerazione delle sollecitazioni e delle temperature di esercizio che, se troppo elevate, determinano un rapido degrado del rivestimento.

La presenza del refrattario di rivestimento determina un'intrinseca difficoltà nel determinare le aree da sottoporre ad intervento di riparazione. Non è infatti possibile procedere a campagne spessimetriche periodiche, come avviene per altri componenti del generatore. Tale difficoltà comporta la necessità di procedere per passi successivi analizzando lo stato di deterioramento delle tubazioni nelle zone che presentano danni al refrattario e quindi estendendo l'area di intervento in base allo stato di conservazione delle tubazioni.

Nel corso delle operazioni di ripristino finora svolte si è proceduto al taglio e sostituzione delle singole tubazioni ammalorate, all'esecuzione di controlli non distruttivi, al ripristino dei pioli ed alla posa del refrattario.

Tale tipo di intervento è per sua natura localizzato e quindi ogni pannello presenta zone con interventi eseguiti in periodi diversi. Le stesse aree già oggetto di rifacimento presentano spesso necessità di un nuovo intervento.

I pannelli sono stati eserciti per cinque anni e sono stati oggetto di ripetuti interventi di riparazione con cadenza di 6/8 mesi.

7. Interventi SH3

Data la vetustà degli scambiatori gli interventi localizzati sono diventati sempre più frequenti rendendo necessaria la sostituzione dei pannelli nella loro interezza.

Per minimizzare i tempi di fermata è stata prevista la prefabbricazione degli scambiatori in officina con successivo montaggio. Gli scambiatori SH3 sono stati consegnati divisi in due sezioni e sono stati uniti in officina, presso il termovalorizzatore, prima della verticalizzazione.

In tale fase si prevede l'esecuzione di 30 giunti per pannello per un totale di 330 giunti su tubo 38x6,3 in 10CrMo9-10.



Figura 3. Preparazione e pannelli pronti per la verticalizzazione

Le operazioni di posa del refrattario sono state eseguite in parte all'esterno della caldaia e sono state completate all'interno del generatore.



Figura 4. Posa del refrattario

Per ridurre i tempi di inserimento dei pannelli in caldaia è stata prevista la costruzione di una struttura in carpenteria metallica dotata di ancoraggi per i pannelli e piani di lavoro alle varie quote.

Le prime fasi delle lavorazioni hanno previsto il montaggio della struttura a lato della caldaia 3, successivamente sono stati verticalizzati i pannelli e posato il refrattario. Le attività di preparazione sono state eseguite durante il normale funzionamento del generatore. Completata la posa del refrattario e la prima fase di asciugatura è stata fermata la caldaia per permettere l'apertura del tetto, lo smontaggio delle tubazioni di collegamento ai collettori e l'estrazione dei pannelli. Tale attività ha previsto l'impiego di una gru della capacità di 650T di portata considerato il peso delle arpe complete di refrattario e la necessità di sollevare fino a 70 metri di quota.

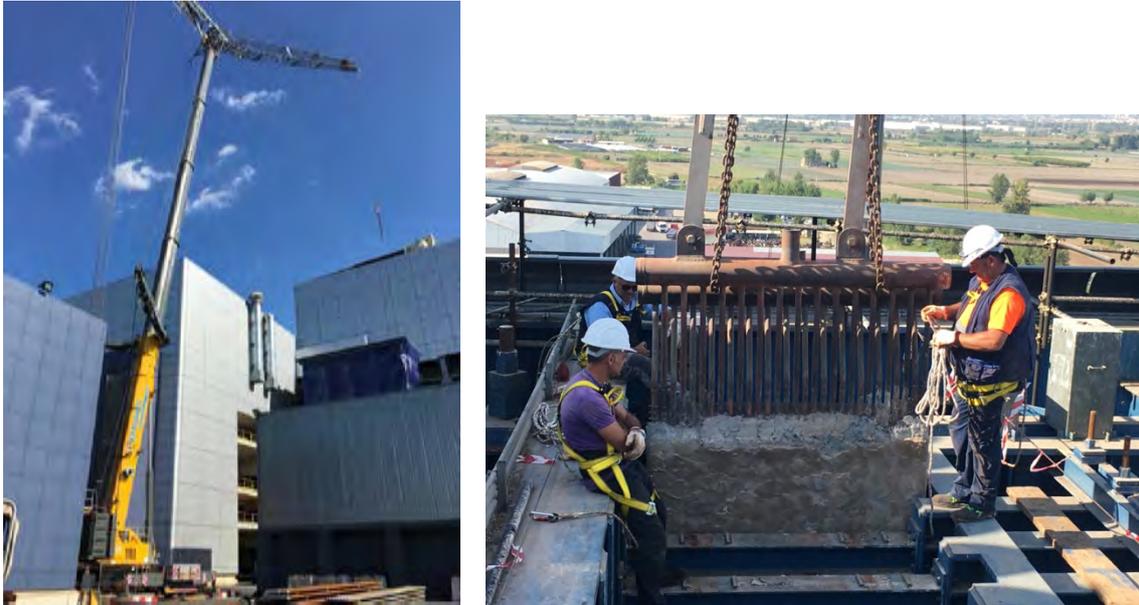


Figura 5. Posizionamento gru ed estrazione pannelli

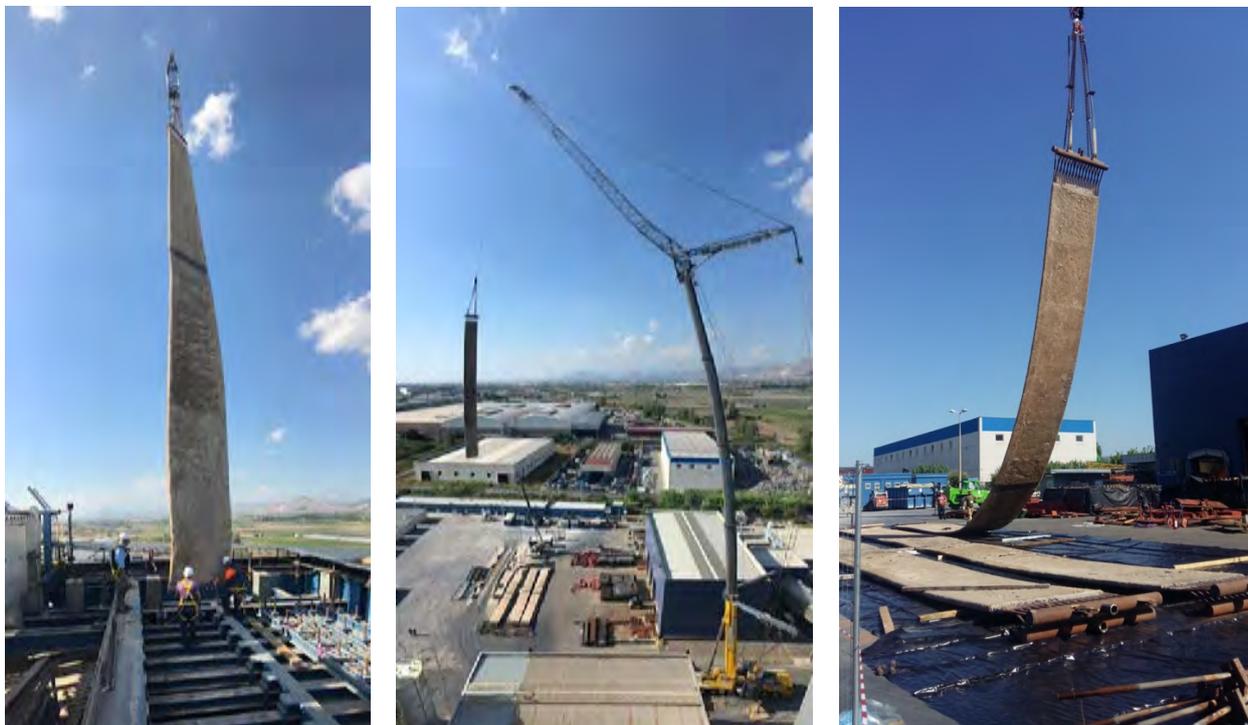


Figura 6. Fasi della rimozione dei pannelli

Si è proceduto quindi all'inserimento dei pannelli nel generatore e alla saldatura delle relative tubazioni di alimentazione e drenaggio.



Figura 7. Inserimento dei nuovi pannelli

Le tubazioni di alimentazione (risers) collegano i collettori di mandata e ritorno degli SH3 ai collettori trasversali di caldaia. Tale attività ha comportato l'esecuzione di 22 giunti su tubazione 114,3x11 in 10CrMo9-10, 11 giunti su tubazione 114,3x10 in 15Mo3 ed 11 giunti eterogenei 10CrMo9-10/15Mo3 che hanno richiesto un trattamento termico. I giunti in uscita dal collettore SH3 in mat. 10CrMo9-10 non prevedono trattamento termico in virtù dell'esclusione prevista dalla tabella 10.4-2 della norma UNI EN 12952-5.



Figura 8. Fasi di saldatura e trattamento termico dei collettori superiori

Le attività sono state eseguite con personale specializzato con turnazione sulle 24h. Tutti i giunti saldati sono stati verificati mediante Controllo Gammagrafico come prescritto dalle norme applicabili. Nello specifico, sono state eseguite verifiche radiografiche sia prima che dopo il trattamento termico al fine di ridurre il rischio di dover ripetere il trattamento in caso di presenza di difetti. I certificati, le pellicole radiografiche, così come i documenti relativi alla rintracciabilità, alle procedure di saldatura e qualifiche saldatori, sono conservati nel fascicolo tecnico dell'intervento presso l'impianto di Acerra e sono stati controllati dall'UOT di Napoli dell'INAIL.

8. Trattamenti termici

L'intervento ha previsto l'esecuzione di trattamenti termici dei giunti saldati (PWHT) in base alla norma tecnica di fabbricazione UNI EN 12952 per i giunti eterogenei 10CrMo9-10/15Mo3. Relativamente ai giunti omogenei in 10CrMo9-10 la tabella 10.4.2 della norma UNI EN 12952-5 prevede alla nota e) l'esclusione dal trattamento termico per i diametri e spessore interessati dalla lavorazione considerato che la temperatura di progetto è superiore a 480 °C.

EN 12952-5:2011 (E)

Table 10.4-2 — Temperature ranges for post-weld heat treatment for welded joints of similar and dissimilar materials

Steel type	Steel group	Temperature range °C								
		1.1 + 1.4	1.1	2.2 + 4.1 + 4.2	5.1	6.1	5.2	6.2	6.4 ^a	6.4 ^a
C-Mn	1.1 + 1.4	550 to 600	550 to 600	550 to 600						
0,3Mo	1.1		550 to 630	550 to 600	600 to 630					
20MnMoNi 15MnCrMoNiV 15NiMoCuNb	2.2 4.1 4.2			570 to 620	600 to 620					
1Cr1/2Mo ^d	5.1				620 to 680	650 to 690	650 to 700			
14MoV	6.1					680 to 730	690 to 730			
2½Cr1Mo ^e	5.2						680 to 730	730 to 750	730 to 760 710 to 730 ^a	
Cr-Mo-V ^c	6.2							720 to 760	740 to 760	740 to 760
9Cr1Mo 9Cr2Mo	6.4 ^a								740 to 780	740 to 770
12Cr1Mo-V	6.4 ^a									730 to 770

^a These materials require transformation to martensite prior to post-weld heat treatment (PWHT).

^b Only for filler of the type 2½Cr1Mo.

^c No PWHT required if the joint is welded with similar filler using TIG process and minimum specified weld thickness $a \leq 10$ mm.

^d No PWHT required on tube butt welds (W1) and attachment welds (W2) if all the following conditions are fulfilled: $d_o < 120$ mm and $a \leq 13$ mm.

^e No PWHT required on tube butt welds (W1) and attachment welds (W2) if all the following conditions are fulfilled: calculation temperature > 480 °C; nominal diameter $d_o < 120$ mm and minimum specified weld thickness $a \leq 13$ mm.

NOTE 1 Other material combinations not covered by the table above, and variations from the temperatures given in the table above, may be acceptable, provided the manufacturer can ensure that, by their use, the safety of the boiler is not impaired.

NOTE 2 The temperature for PWHT of dissimilar joints between austenitic and ferritic materials should be required for the ferritic side of the joint.

Figura 9. PWHT rif. Norma 12952-5

9. Prova di tenuta idrostatica

Dopo il completamento delle attività di riparazione è stato eseguito un test di tenuta idrostatica alla pressione di collaudo dell'attrezzatura di 208 barg.

La pressatura ha seguito il diagramma di seguito riportato.

Dopo la stasi alla pressione di collaudo, la pressione è stata ridotta a 115 barg per permettere di entrare nel generatore ed eseguire, in sicurezza, l'ispezione di tutti i giunti saldati.

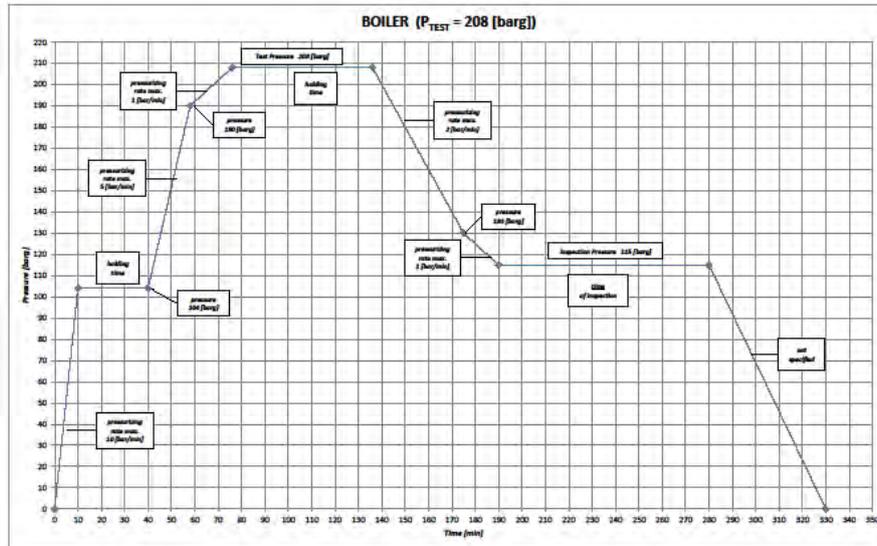


Figura 10. Diagramma di prova idraulica



Figura 11. Manometro alla pressione di prova idraulica

10. Conclusioni

La temperatura e la tipologia dei fumi, in concomitanza con l'elevata temperatura del vapore all'interno delle tubazioni, determinano fenomeni di usura dei banchi surriscaldatori SH3 posizionati nel terzo passaggio fumi. I fenomeni corrosivi sono causati dalla formazione di miscele eutettiche basso fondenti che, essendo liquide anche a basse temperature ($T_f < 200 \text{ }^\circ\text{C}$), risultano particolarmente corrosive. La concentrazione di HCl nei gas di combustione accelera i processi di degrado delle tubazioni.

L'intervento presentato ha previsto la sostituzione integrale degli scambiatori. La sequenza operativa presentata ha consentito una netta riduzione dei tempi di fermata caldaia.

Alcune componenti sono state rivestite in Inconel 625 per garantire maggiore resistenza alla corrosione.

L'insieme degli interventi presentati è stato eseguito seguendo la procedura prevista dall'art. 14 del DM 329/04 ed è stata trattata come riparazione. Tali interventi non hanno comportato modifica dei dati di progetto ma una mera sostituzione con saldatura di specifici componenti di caldaia. Le parti rivestite in Inconel hanno mantenuto le caratteristiche del progetto originario in termini di materiali, diametri e spessori. Il rivestimento protettivo in Inconel aggiunto non ha funzione strutturale.

11. Bibliografia

[1] Cocchiaro A, Liccardo C, Rossi M. Fascicolo tecnico riparazione boiler 3 – sett/ott 2019. Documento interno riservato A2A Ambiente S.p.a.

[2] Norma UNI EN 12952-2011

[3] Kamuk B. Consequences by operating at extreme steam parameters. Presentazione tenuta al WtERT EU Meeting 2010, October 12-14, Brno, Czech Republic.

[4] Main A, Maghon T. Concepts and experiences for higher plant efficiency with modern advanced boiler and incineration technology. Presentazione (paper 3541) tenuta al NAWTEC 18, May 11, 2010, Orlando, FL, USA.

[5] Rapporto CISE-SCC-94-95. Stato dell'arte sul problema della corrosione ad alta temperatura negli inceneritori di rifiuti.

[6] Iovene R, Malvezzi S, Moretti D. Analisi dei meccanismi di danno nei surriscaldatori di vapore all'interno di un termovalorizzatore – Atti SAFAP 2014

Requisiti di Damage Tolerance e Durability per la riparabilità delle attrezzature a pressione in materiale composito avanzato a matrice polimerica (*Polymer Matrix Composites, PMCs*). Procedure operative sulle riparazioni strutturali

D. Di Fonzo¹, G. Vaccaro²

¹ Inail - Uot di Palermo

² Inail – Dit

Sommario

Fino alla fine degli anni '50 il concetto di valutazione a fatica era risolto mediante metodologie retroattive di riparazione e irrobustimento della struttura del tipo *After the Fact*; pertanto si rese ben presto evidente che si doveva valutare lo stato di durata, stabilire un calcolo formale a fatica e i relativi programmi di certificazione. Più tardi, negli anni '60, venne introdotto nella progettazione a fatica il concetto di *Safe-Life* per la predeterminazione di una durata in sicurezza delle strutture sottoposte a carichi di natura aleatoria. Successivamente, verso gli anni '70, con lo sviluppo della meccanica della frattura lineare elastica (MFLE), vennero richieste strutture del tipo *Fail-Safe* basate sui requisiti di *Damage Tolerance* ovvero capaci di evitare il collasso strutturale, tollerando la crescita dei danneggiamenti per uno specifico intervallo di tempo con una specifica resistenza residua. Tali requisiti di durata a fatica sono definiti con il termine più generale di *Durability*, e la combinazione dei requisiti di tolleranza del danneggiamento e vita residua risulta essenziale per la buona riparabilità di un componente strutturale in materiale composito. A tal fine, si espongono le principali procedure operative sulle riparazioni strutturali mediante iniezione di resina + filler riempitivo, per laminazione incollata di rinforzi in tessuto, e i relativi cicli di *curing* e polimerizzazione. Nella presente memoria sono esposti gli elementi di riparazione strutturale utilizzati in campo aeronautico, seppur attualmente nel settore delle attrezzature a pressione costruite in materiale tradizionale metallico, ci si limita a utilizzare i compositi come rinforzo nelle riparazioni temporanee per il ripristino dell'integrità strutturale, mentre per le bombole in materiale composito CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) la norma EN ISO 11623:2015 contempla solo interventi di riparazione cosmetiche non invasive per il ripristino dell'estetica originale e la sigillatura del rinforzo.

1. Sviluppo della analisi a fatica, tolleranza del danneggiamento

Fino al termine della seconda guerra mondiale si ebbero numerosi incidenti in presenza di carichi dinamici molto bassi (aerei a getto militari, navi di classe Liberty), e più tardi nel 1954 anche un aereo civile della classe Comet ebbe un cedimento strutturale causato dalla propagazione di una cricca in prossimità di un oblò. Divenne chiara e impellente la necessità di "prevedere la durata" che una struttura avrebbe avuto se sottoposta a determinate sollecitazioni di natura aleatoria. Fino alla fine degli anni '50 ci si doveva accontentare di risolvere i problemi mediante metodologie retroattive di riparazione e irrobustimento della struttura "*after the fact*" che davano luogo a una determinazione statistica della vita operativa. I danneggiamenti di servizio venivano riparati con il cosiddetto processo del "*cut and try*", taglia e riprova, e la valutazione della vita a fatica ad ampiezza variabile veniva condotta essenzialmente secondo il criterio di danneggiamento cumulativo lineare elaborato dal Miner intorno al 1945, secondo cui il cedimento del materiale avveniva allorché il danno cumulativo per fatica raggiungeva un valore critico di rottura. Tuttavia l'inaspettata

perdita di diversi velivoli rese evidente le manchevolezze di un approccio tanto empirico, e pertanto si stabilì che i nuovi programmi di certificazione a fatica dovevano comprendere sia la storia delle tensioni statiche sia quelle dei carichi di natura aleatoria. Inoltre l'equazione del danno cumulativo non teneva conto dell'ordine di applicazione dei cicli di carico, del danno provocato dal carico continuo, dell'influenza della concentrazione delle tensioni dovuta alle discontinuità geometriche (effetto di intaglio). Gli studi sulla fatica iniziati da Griffith nel 1922 vennero estesi nel 1949 da Orowan e Irvin per tener conto della zona plasticizzata. Nel 1957 Irwin, basandosi sulle equazioni proposte da Westergaard nel 1939, sviluppa la Meccanica della Frattura Lineare Elastica (MFLE), già presente nelle progettazioni aeronautiche con il termine concettuale di durata in sicurezza *Safe-Life* i cui requisiti di vita a fatica erano specificati in termini di ore di servizio senza alcun cedimento. Nell'ambito della fatica, la risposta al quesito legato alla stima della durata residua di un componente danneggiato si ebbe dalla relazione esistente tra la velocità di avanzamento della cricca e lo stato tensionale presente nell'intorno dell'apice di questa. Il fattore K_I , detto fattore di intensificazione delle tensioni o fattore di forma (*Stress Intensity Factor*, SIF), è una costante legata alle dimensioni della cricca e all'entità del carico applicato. Nell'ipotesi che il carico applicato determini la propagazione del difetto per "apertura" della cricca in quanto posta ortogonale al carico (modo I), non si avrà la rottura ovvero la propagazione instabile del difetto fin quando lo stato tensionale a una certa distanza dall'apice della cricca (SIF) risulta inferiore a un valore critico massimo ammissibile K_{IC} (fattore di intensificazione degli sforzi, resistenza alla frattura del materiale) dipendente dal materiale. La condizione di resistenza è pertanto espressa dalla semplice relazione: $K_I = Y_I \sigma \sqrt{\pi a} \leq K_{IC}$. Dal confronto tra il fattore di intensificazione delle tensioni K_I e il fattore di intensificazione degli sforzi K_{IC} , Irwin allo stesso modo introduce il livello di integrità di una struttura difettata. Nel 1964 Paris fornisce un metodo per valutare la crescita delle dimensioni di un difetto sotto l'azione di carichi ciclici di natura aleatoria, introducendo il "Fattore di resistenza residua" (*Reserve factor*). Nel 1968 Rice introduce la Meccanica della Frattura elasto-plastica. Dal 1970 la sicurezza strutturale basata sulle verifiche convenzionali di fatica *Safe-Life* è stata abbandonata: la struttura deve essere progettata "*Damage Tolerant*" secondo il principio della rottura sicura *Fail-Safe*, e cioè capace di evitare il collasso, tollerando la crescita di danneggiamenti di fabbricazione o di servizio, per uno specifico intervallo di tempo con una specifica resistenza residua. I requisiti di *Damage Tolerance* dipendono da:

- a) strutture *Fail-Safe* a più elementi collaboranti che concorrono alla resistenza e che provocano l'arresto della rottura (accorgimenti speciali quali *crack-stoppers*);
- b) strutture *Slow Crack Growth* nelle quali il danneggiamento assunto cresce lentamente (bassa velocità di propagazione) senza raggiungere la lunghezza critica per uno specifico periodo di tempo;
- c) tempi di ispezione e CnD (un qualsiasi danno dovrà essere individuato prima che la resistenza residua si riduca a un livello inaccettabile).

Per evidenziare il fatto che oggi non è più la fatica bensì il soddisfacimento dei requisiti di *Damage Tolerance* che garantisce la sicurezza delle strutture primarie, le attuali normative aeronautiche si riferiscono ai requisiti di durata a fatica col termine più generale di *Durability*. Tale requisito garantisce costi minimi di manutenzione e ha quindi un'importanza essenzialmente economica. La scienza della Meccanica della Frattura e i requisiti di *Damage Tolerance* e *Durability* sono stati i precursori dello sviluppo di valutazioni e metodologie di analisi quantitative di normative internazionali quali ad esempio le procedure europee BS 7910, SINTAP, R6, ETM o le norme API 579, le API 580, le API 581, pubblicate rispettivamente in prima edizione nel gennaio 2000, maggio 2002, maggio 2000. Tali metodologie di analisi vengono effettuate per assicurarsi che i componenti siano eserciti in

condizioni di sicurezza e affidabilità, pur ospitando danneggiamenti di diversa natura, per il periodo di ulteriore esercibilità. La vita residua non intende fornire una stima del reale tempo a rottura, ma fornire fattori di sicurezza adeguati a stabilire intervalli periodici di ispezione, piani di monitoraggio e manutenzione ed eventuali riparazioni del componente. In tal senso appare evidente che per avere dati d'ingresso qualitativi per la determinazione della vita di un componente e della sua manutenzione, è determinante l'affidabilità delle tecniche di Controllo non Distruttivo (CnD) e la loro probabilità di rilevazione POD (*Probability of Detection*) di un certo tipo di danneggiamento.

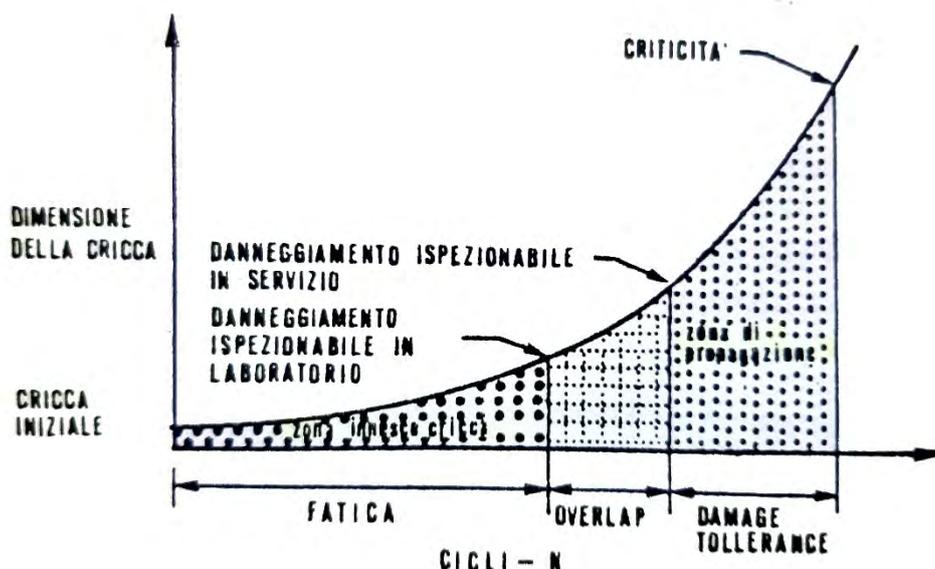


Figura 1. Vita di una struttura soggetta a fatica: nucleazione, propagazione del difetto e frattura finale

Nella valutazione di integrità e idoneità al servizio di una struttura difettata è quindi necessario non solo verificare se il difetto è da potersi considerare stabile al momento della sua identificazione, ma anche essere in grado di stimare se e come il danneggiamento crescerà in termini di parametri di meccanica della frattura, per effetto della variabilità dei carichi affaticanti nel corso del previsto servizio. La vita di una struttura soggetta a fatica può essere suddivisa in periodi (nucleazione di uno o più danneggiamenti, propagazione stabile del difetto, propagazione instabile o istantanea con rottura finale al raggiungimento di una dimensione critica). Affinché una struttura in materiale composito abbia una buona riparabilità deve combinare i requisiti di Damage Tolerance e Durability.

2. Meccanismi di danneggiamento

In un materiale composito gli elementi che possono essere sede di discontinuità sia nel processo di *manufacturing* sia di *service life*, sono essenzialmente tre:

- le fibre,
- la matrice,
- l'interfaccia tra fibra e matrice in cui avviene l'adesione fra le stesse.

I tipici meccanismi di danneggiamento sono attribuiti:

- a) dalle sollecitazioni di trazione, compressione, taglio ecc. (separazioni per scollaggio, delaminazione, ecc.);
- b) dai carichi ciclici (fatica termica di natura pneumatica, fatica idraulica);
- c) dagli elevati gradienti termici;

- d) dagli impatti da esercizio o da manutenzione (ammaccature seguite da scollaggio, depressioni, graffiature superficiali, scalfitture, perforazioni);
- e) dagli impatti con oggetti estranei esterni (*F.O.D. Foreign Object Damage*) o da un uso improprio (*Mishandling*): ammaccature, protuberanze, graffiature, incisioni;
- f) da impatti non visibili in superficie *Barely Visible Impact Damage (BVID)* interessanti gli strati interni del laminato;
- g) dalle condizioni ambientali circostanti (abrasioni, erosioni, attacchi chimici e/o biologici, fatica, fluidi, agenti atmosferici, temperatura);
- h) dall'invecchiamento (resine fragili) per esposizione ai raggi UV,
- i) dalla presenza d'acqua durante le fasi di polimerizzazione.

Essenzialmente possono verificarsi i seguenti danneggiamenti:

- 1) rottura (*splitting*) o micro-frattura delle fibre;
- 2) sfilamento o estrazione delle fibre (*pull-out*);
- 3) separazione tra materiali differenti o parti di un componente;
- 4) distacco dell'interfaccia fibra-matrice (*debonding*);
- 5) cricche o microfrattura della matrice;
- 6) separazione delle lamine nei laminati, mancato incollaggio (*bonding*), scollamento degli strati (delaminazione);

Nel corso della fabbricazione, si possono generare difetti quali:

- vuoti: costituiscono difetti comuni a molte strutture, localizzati con maggiore frequenza agli angoli dei componenti o in prossimità delle zone di transizione fondo-cilindro delle attrezzature a pressione;
- accumuli di resina;
- rottura o distorsione delle fibre;
- inclusioni eterogenee.

3. Classificazione e riparazione dei danneggiamenti

In campo aeronautico, per ogni zona strutturale danneggiata e per ogni tipologia di danno, è dato un diagramma che definisce i limiti di danno ammissibile, riparabile e non, in funzione di alcuni parametri dimensionali del danno (area, diametro, lunghezza, profondità, etc.). In figura, la zona A rappresenta l'area relativa ai danni ammissibili, riparabili mediante interventi di ripristino della finitura superficiale, estetici e sigillatura; la zona B rappresenta l'area relativa alle riparazioni temporanee; la zona C rappresenta l'area relativa alle riparazioni permanenti; la zona D la zona relativa ai danneggiamenti non riparabili.

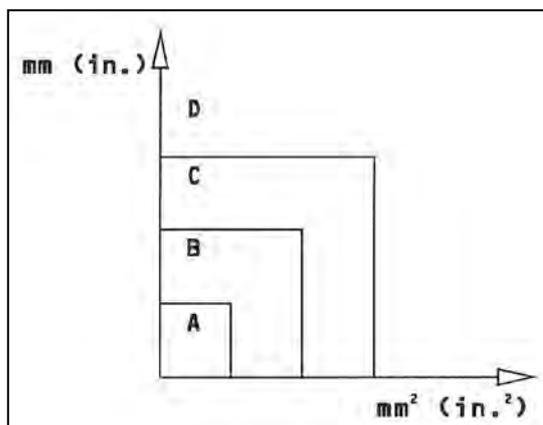


Figura 2. Limiti di danno ammissibile, riparabile e non, in funzione di alcuni parametri dimensionali del danno (area, diametro, lunghezza, profondità, etc.).

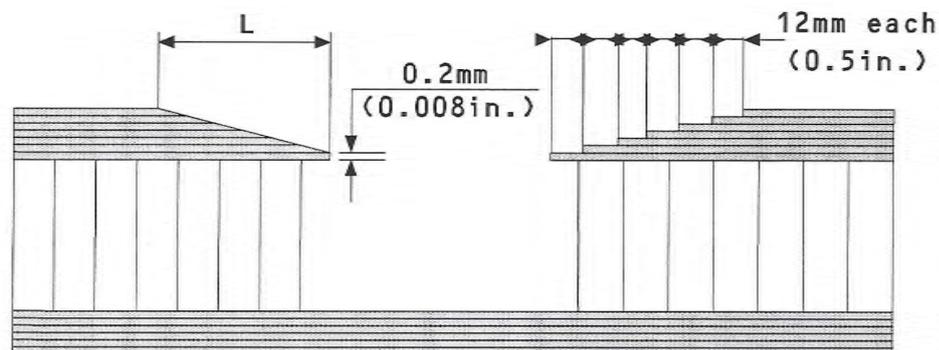
Fonte: SR Technics – Basic Maintenance Training Manual

Individuato un danneggiamento attraverso l'Esame Visivo o altro CnD, esso può essere valutato e classificato:

- *Trascurabile o Ammissibile*: danneggiamenti minori di lieve entità che non hanno effetti significativi sulla resistenza strutturale. Non necessitano di nessuna riparazione ad

eccezione di interventi cosmetici (*cosmetic repair, non-structural*) finalizzati al ripristino dell'estetica originale e dell'ermeticità, per prevenire l'attacco da agenti esterni (umidità, radiazioni ultraviolette, agenti chimici) sugli strati interni della struttura. In tale classificazione rientrano per analogia i danneggiamenti denominati di livello 2 "Soggetti a rifiuto, riparabili" contemplati dalla norma EN ISO 11623:2015 che illustra al prospetto 5 i criteri di accettazione/rifiuto per undici tipologie di danneggiamento. Tale norma classifica inoltre i danneggiamenti di livello 1 "Accettabili, non richiedono alcun tipo di intervento" e di livello 3 "Irreversibile, non riparabile".

- **Minore o Riparabile:** danno grave che necessita di interventi di riparazione strutturale le cui procedure sono generalmente contenute nel manuale di riparazione strutturale (*Structural Repair Manual – SRM*). La riparazione deve ripristinare le caratteristiche strutturali e funzionali del componente originaria. A titolo di esempio, si riporta una procedura di riparazione strutturale di un pannello sandwich, mediante sequenza di laminazione (stratificazione) di tessuto di rinforzo preimpregnato *prepreg*, analogo all'originario e di egual orientamento. Il carico è trasferito uniformemente per taglio attraverso tutta la superficie di sovrapposizione degli aderendi, si hanno sforzi di peeling ridotti grazie all'assenza di eccentricità nella condizione di carico. Noto lo spessore del tessuto (0,2 mm), si ricava il numero degli strati occorrenti per la riparazione (6 layers + 1 filler ply). In funzione del numero totale degli strati, dalla tabella si ottiene la corrispondente lunghezza (L = 72 mm) di rastremazione. Definiti i suddetti parametri, ciascun strato di tessuto sarà distanziato da una distanza pari a $72:6 = 12$ mm.



NUMBER OF REPAIR LAYERS	L	
	(mm)	(in.)
3	24	1.0
4	36	1.5
5	48	2.0
6	60	2.5
7	72	3.0
8	84	3.5
9	96	4.0
10	108	4.5

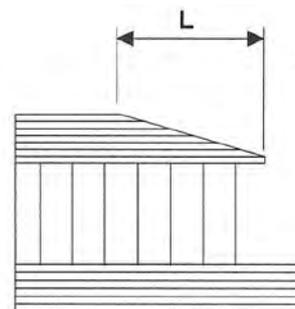


Figura 3. Sequenza di laminazione (stratificazione)
Fonte: SR Technics – Basic Maintenance Training Manual

- **Maggiore:** danno non riparabile per motivi strutturali ed economici. La riparazione non consentirebbe il ripristino delle prestazioni meccaniche, oppure tale intervento risulterebbe troppo costoso.

4. Area di minima ispezione e area minima di danno

Sui componenti in materiale composito in danno visivo è spesso esteso anche all'area circostante. Per essere sicuri di ispezionare una estensione d'area completa per un determinato danneggiamento, viene definita un'area di ispezione minima intorno al danno visibile. L'area minima d'ispezione, così come ad esempio riportato in specifici capitoli di alcuni manuali aeronautici di riparazione strutturale (*SRM Structural Repair Manual*), è definita da un cerchio che passa attraverso due punti distanti 100 mm dalle estremità dell'asse maggiore del danneggiamento. Quando inoltre la distanza X tra due o più aree danneggiate è inferiore ad un determinato valore, imposto nei manuali di manutenzione, potrebbe essere necessario valutare le aree danneggiate come un'unica area di danno.

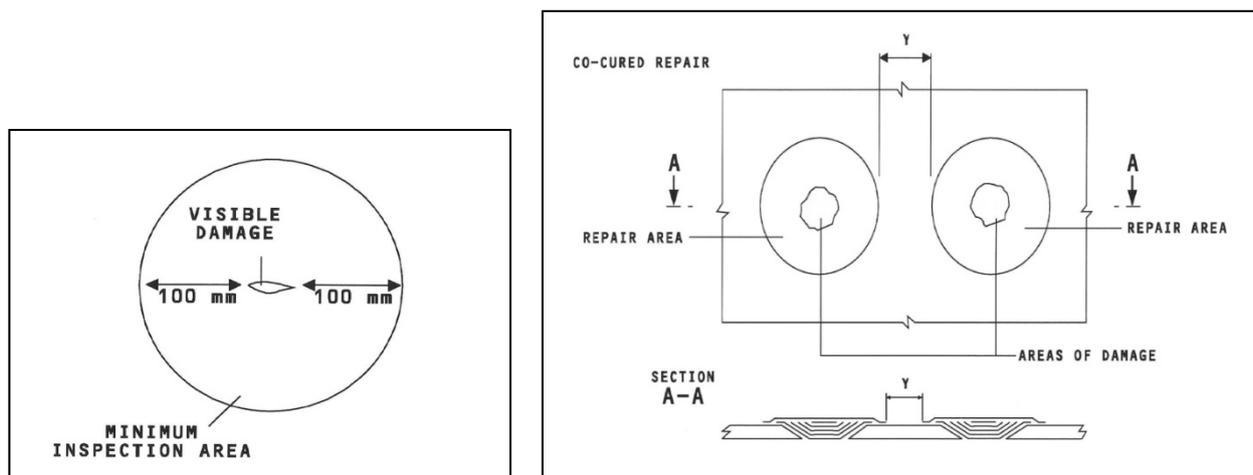


Figura 4. Area di minima ispezione e area minima di danno
Fonte: SR Technics – Basic Maintenance Training Manual

Non sono consentite sovrapposizioni di strati di riparazioni adiacenti, essendo imposta negli specifici manuali di riparazione strutturale una distanza minima $Y = 5 \text{ mm}$ tra una riparazione e l'altra. Se la distanza Y è inferiore alla minima consentita, le aree di danno sono considerate come un'unica area di danno.

5. Tecniche di riparazione

In linea generale le riparazioni sono divise in due categorie principali:

- senza applicazione di tessuti incollati (*without repair doubler*) per iniezione di miscela resina/catalizzatore + particelle disperse *filler* o fibre di vetro discontinue *chopped*;
- con applicazione di tessuti incollati in fibra di vetro FV, di carbonio FC, aramidica FA o con applicazione di tessuti ibridi (*with repair doubler*).

Indipendentemente dal tipo di riparazione la procedura d'intervento può essere così riassunta nei principali punti seguenti:

- 1) preparazione superficiale: asportazione della parte danneggiata mediante *cut-out*, rimozione dell'umidità, rimozione degli agenti inquinanti mediante leggera sabbiatura o semplice abrasione;
- 2) preriscaldamento dell'area del laminato oggetto della riparazione: al fine diminuire la viscosità della resina e aumentare il potere di penetrazione;
- 3) senza applicazione di tessuti: riempimento della zona danneggiata mediante resine polimeriche termoindurenti precatalizzate del tipo epossinitriliche o epossidiche miscelate a opportuni inerti (*filler*);

- 4) con applicazione di tessuti: laminazione di tessuto di rinforzo preimpregnato *prepreg* riproducendo la sequenza e l'orientamento di stratificazione d'origine;
- 5) compattazione: è effettuata mediante l'ausilio di un sacco a vuoto (*vacuum bag*) per estrarre l'aria rimasta intrappolata durante la stratificazione, le inclusioni gassose prodotte dai solventi, la resina in eccesso, ridurre l'umidità e ottimizzare il rapporto fibra/resina; nel processo si utilizzano depressioni nell'ordine di 0,1 bar;
- 6) polimerizzazione (gelificazione e indurimento): durante tale fase si applicano in autoclave prestabiliti cicli di temperatura e pressione; la fase di reticolazione può essere effettuata anche mediante il semplice uso di catalizzatori o acceleranti, termocoperte o lampade a infrarossi.

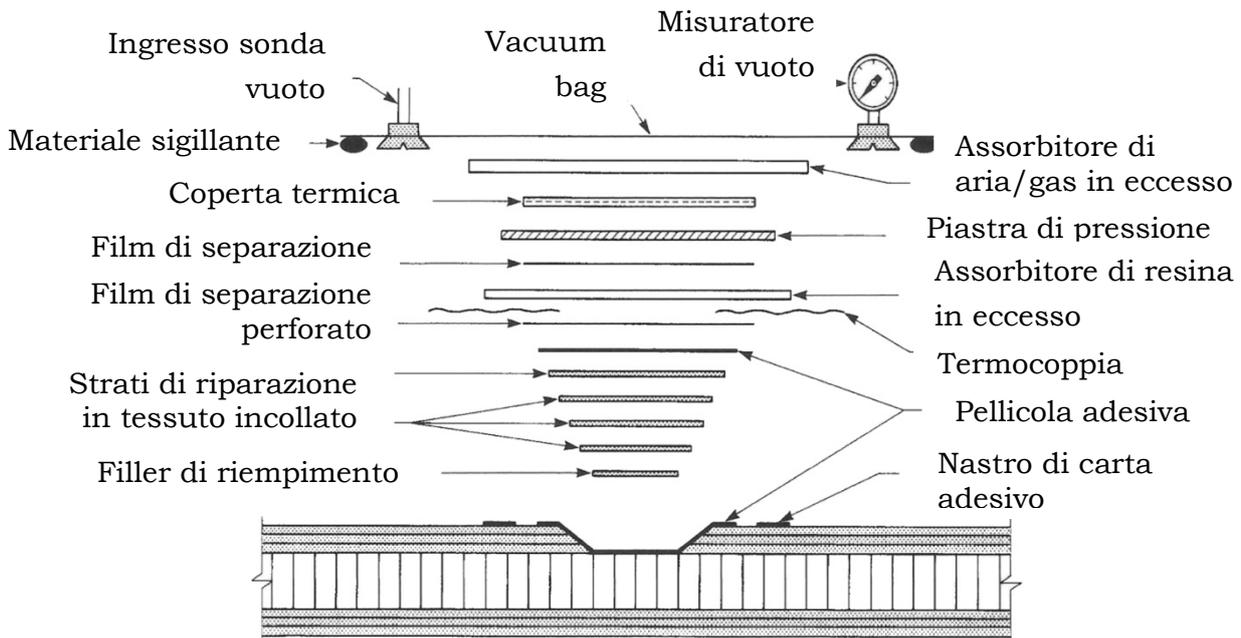


Figura 5. Sacco a vuoto - Vacuum Bagging Lay-Up

Fonte: Materiali compositi. Crivelli Visconti.

Considerato che tutte le riparazioni *pre-preg* devono essere curate con apporto di calore e sottovuoto, è consigliabile eseguire ogni tre strati di deposizione di tessuto un ciclo di *curing* con l'ausilio del sacco a vuoto (0,8 bar/5 min *Debulking*). Terminato il ciclo, si rimuove l'attrezzatura per il vuoto e si continua il lay-up. In figura 6 è riportato un esempio di un ciclo di *curing* a 120° C. Inizialmente si controlla la qualità della sigillatura applicando il vuoto senza aumento della temperatura. Per ottenere una riparazione ottimale è essenziale un vuoto minimo di 0,8 bar. Tenuto conto che la polimerizzazione esotermica dà luogo ad un aumento repentino della temperatura, al fine di evitare un *Overshoot* della temperatura bisogna avere uno stretto controllo del gradiente di termico in prossimità temperatura di *curing* richiesta (120° C). Durante la fase di raffreddamento al termine del ciclo di cura, il vuoto va interrotto solamente dopo aver raggiunto i 50° C.

Il ciclo di cura (*cure time*) prodotto all'interno dell'autoclave è di fondamentale importanza sulle prestazioni a fatica dei compositi. La pressurizzazione è ottenuta utilizzando generalmente CO₂ riscaldata e messa in pressione come richiesto dal ciclo di polimerizzazione. Il ciclo di cura va attentamente monitorato, al fine di assicurare una uniformità termica (assenza di gradienti termici nelle diverse zone dell'autoclave), un ottimale flusso di calore sul materiale, e garantire una uniforme distribuzione della pressione. Nello studio dei cicli di cura, particolare rilevanza risulta avere il controllo del

vuoto all'interno del sacco, nonché dei parametri di processo (pressione, temperatura di riscaldamento e raffreddamento) sia nei valori assoluti che nelle velocità di variazione. Il campo di utilizzo di tale tecnologia varia generalmente da 120 °C e 3 bar a 330 °C e 10 bar.

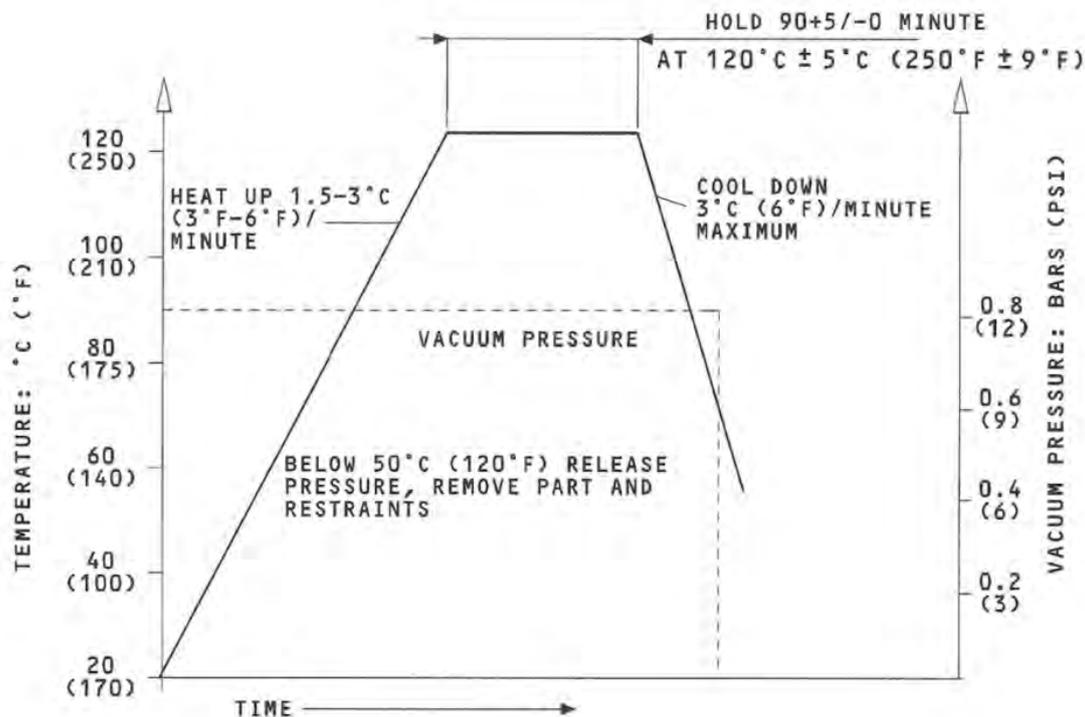


Figura 6. Curing Cycle

Fonte: SR Technics – Basic Maintenance Training Manual

Durante il processo di *curing* un adeguato valore dei parametri di pressione e temperatura ottiene il controllo della viscosità della resina, assicura il raggiungimento delle caratteristiche meccaniche e le performance di esercizio richieste al componente strutturale in composito. L'andamento sperimentale della viscosità in funzione del tempo e della temperatura per una resina epossidica, evidenzia l'iniziale decremento della viscosità all'aumentare della temperatura sino al raggiungimento di un valore minimo. A partire da tale punto la temperatura è mantenuta costante e inizia la reazione chimica di polimerizzazione della resina (formazione di legami incrociati tra macromolecole) che comporta un aumento della viscosità. Per l'applicazione della pressione bisogna distinguere due casi:

- Preimpregnato con perdita di resina, in cui è definito un campo di pressione variabile entro i limiti A e B. Il limite superiore A definisce il valore massimo della viscosità al di sopra del quale le bollicine di gas non lascerebbero il preimpregnato. Il limite inferiore B definisce il valore minimo di viscosità al di sotto del quale si avrebbe un flusso eccessivo di resina.
- Preimpregnato senza perdita di resina, la pressione non deve creare un flusso di resina ma va applicata nell'intervallo di gelificazione per compattare il preimpregnato.

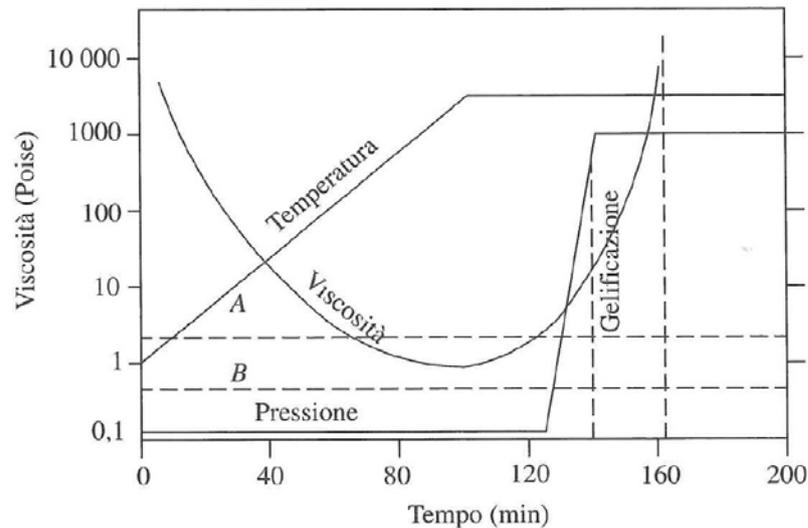


Figura 7. Diagramma della viscosità in funzione del tempo e della temperatura in un composito di resina epossidica e fibre di C.
Fonte: Materiali compositi. Crivelli Visconti.

6. Conclusioni

Le applicazioni dei materiali fibro-compositi avanzati a matrice polimerica, un tempo riservate ai settori ad alta tecnologia, hanno negli ultimi anni assunto un'importanza crescente in diversi ambiti industriali: dal settore nautico a quello sportivo, dei trasporti, civile, meccanico, chimico e petrolchimico. Nell'ambito specifico delle riparazioni per il ripristino totale di tutte le caratteristiche meccaniche e funzionali delle parti danneggiate realizzate in materiale composito, la buona riparabilità è garantita in campo aeronautico da un "high damage tolerance", da specifici criteri e procedure di intervento manutentivo, da precisi livelli di dettaglio e indicazioni contenuti nelle varie sezioni costituenti i manuali di riparazione strutturale. Nel campo delle attrezzature o insiemi a pressione facenti parte di impianti a ciclo continuo, nel caso in cui non si è più in grado di accertare il buono stato d'integrità strutturale, possono effettuarsi interventi temporanei di riparazione con o senza saldatura, secondo specifiche tecniche internazionali API 570, API 579 o nazionali UNI/TS 11325-5 previste al D. Lgs. 329/04, finalizzate a mantenere la stabilità strutturale per il tempo di ulteriore esercizio. Le tecnologie utilizzano schemi di deposizione manuale con rinforzi di tessuto in vetro o in carbonio sui quali viene deposta con l'aiuto di pennelli o rulli, la resina polimerica termoindurente precatalizzata. La polimerizzazione avviene di norma a temperatura ambiente senza l'ausilio di sacco a vuoto o autoclave. Nel caso di bombole in materiale composito CFRP costruite per avvolgimento di fili secondo la tecnica indicata con la dizione anglosassone *Filament Winding (FW)*, la norma EN ISO 11623:2015 contempla solo interventi di riparazione cosmetiche non invasivi per il ripristino dell'estetica originale e la sigillatura del rinforzo.

Bibliografia

Libri specifici

[1] Materiali Compositi, Tecnologie – Progettazione – Applicazioni. Ignazio Crivelli Visconti, Giancarlo Caprino, Antonio Langella. Hoepli Editore. Milano 2013.

[2] Materiali Compositi, Tecnologie e progettazione. Ignazio Crivelli Visconti. Tamburini Editore. Milano 1975.

[3] SR Technics, Basic Maintenance Training Manual. 6.3.1 Composites and Non-Metallics - Module 6 Materials & Hardware. 7.14.2 Composites and Non-Metallics - Module 7 Maintenance Practices.

[4] B. Zuccarello – Progettazione meccanica con materiali compositi. UNIPA.

Articoli in monografie

[5] Tecniche di Riparazione - Capitolo 60, Tecnologie e materiali aerospaziali - Ver. 01 - G. Sala, L. Di Landro, A. Airoidi, P. Bettini - Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale. Politecnico di Milano.

[6] Criticità durante la fase di ispezione periodica su attrezzature a pressione in Materiale Composito CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). D. Di Fonzo, G. Vaccaro, G. Gorrino, E. Pichini Maini, C. Mennuti, G. Augugliaro. Atti del convegno SAFAP 2016, Milano 15 e 16 novembre 2016.

[7] Ispezioni periodiche e tecniche di riparazione dei danneggiamenti sulle bombole in materiale composito CFRP. D. Di Fonzo, G. Vaccaro, G. Gorrino, E. Pichini Maini, C. Mennuti, G. Augugliaro. Atti del convegno AIPnD 2017, Milano 25, 26 e 27 ottobre 2017.

[8] Danneggiamenti sulle bombole in carboresina CFRP e nelle giunzioni filettate flangia-valvola. Le tecniche NdT applicabili in service life. D. Di Fonzo, C. Mennuti, G. Augugliaro. Atti del convegno AIPnD 2019, Milano 23, 24 e 25 ottobre 2019.

Riferimenti di legge e normativi

[9] D. Lgs. 25 febbraio 2000, n. 93: "Attuazione della Direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione" (PED).

[10] Direttiva 2010/35/UE recepita con D.Lgs. 12 giugno 2012 n.78 (TPED);

[11] Decreto 1° dicembre 2004, n. 329 "Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'art. 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.

[12] Direttiva 2014/68/UE (ex 97/23/CE) recepita con D. Lgs. 15 febbraio 2016, n. 26 (PED).

[13] Direttiva 2010/35/UE recepita con D. Lgs. 12 giugno 2012, n. 78 (TPED).

[14] EN ISO 11623: Bombole trasportabili per gas – Ispezione e prove periodiche delle bombole di materiale composito. 2002

[15] EN ISO 11623: Bombole per gas – Bombole di materiale composito – Ispezione e prove periodiche 2015

[16] Linea Guida: L'esame visivo su attrezzature a pressione ai fini delle verifiche di costruzione e di esercizio. ISPESL Dipartimento Omologazione e Certificazione – Dipartimento Tecnologie di Sicurezza. Gennaio 2006.

[17] ADR 2019 "Accordo europeo relativo al trasporto internazionale di merci pericolose su strada".

[18] Lettera Circolare INAIL DIT n. 1/2016 "Bombole per autorespirazione contenenti aria compressa, estintori portatili e bombole certificate come recipienti fissi ricadenti in ambito PED. Ispezioni periodiche".

Up-grading della piastra tubiera della caldaia a recupero di un impianto Claus

G. Chiofalo¹, S. Guarnaccia¹, N. Scarfati¹, A. Iacino²

¹ Raffineria di Milazzo

² Iacino Progetti

Sommario

La caldaia a recupero in un impianto Claus è sottoposta a condizioni operative molto severe, in quanto è progettata per raffreddare i gas che si producono all'interno del forno di reazione, a temperature superiori di 1300°C. La piastra tubiera della caldaia (tipologia a tubi di fumo), e la parte iniziale dei tubi, sono protetti da un rivestimento refrattario per resistere alle elevate temperature. Tuttavia la presenza di specie molto aggressive nella corrente, ricca di H₂S, e le temperature operative, possono determinare fenomeni di ossidazione a caldo. Inoltre anche sollecitazioni meccaniche, come ad esempio vibrazioni o distorsioni termiche, possono favorire il deterioramento del refrattario, e quindi un rapido danneggiamento della caldaia e conseguente fuori servizio.

In questa memoria vengono descritte le esperienze e le soluzioni migliorative adottate su una caldaia operante di un impianto Claus, che hanno consentito la risoluzione della problematica. Per favorire la trasmissione del calore, e quindi il raffreddamento dei gas, è stato rivisto il design della caldaia, prevedendo una piastra tubiera più sottile, e una modalità di saldatura dei tubi alla piastra tale da favorire il più possibile la trasmissione del calore e quindi il raffreddamento dei componenti.

Inoltre è stata rivista la scelta del materiale refrattario, adottando delle ferrule ceramiche speciali (two pieces), in grado di tollerare eventuali deformazioni della piastra tubiera.

L'efficacia delle soluzioni adottate è stata confermata dall'esperienza operativa e dalle ispezioni successive.

1. Introduzione

I processi di raffinazione del petrolio prevedono l'utilizzo di impianti per il recupero dello zolfo presente nella materia prima, denominati Sulfur Recovery Unit (SRU's), in cui viene utilizzato il processo Claus.

In questi impianti viene inviato lo zolfo sotto forma di H₂S, precedentemente separato dagli idrocarburi tramite processi di conversione e idro desolforazione, ed estratto tramite lo strappaggio di acque acide di processo o la rigenerazione di soluzioni amminiche, utilizzate per il lavaggio delle frazioni gassose.

All'interno degli impianti Claus si opera sostanzialmente una ossidazione termica e catalitica dello zolfo, che viene trasformato in zolfo metallico elementare, e che per l'elevata purezza trova impieghi in diversi settori industriali.

La reazione di ossidazione avviene secondo il seguente equilibrio, e si sviluppa prevalentemente nella prima sezione dell'impianto, all'interno di un forno che ha funzione di reattore termico:

(1)

In figura 1 si riporta il tipico schema di processo di un impianto Claus.

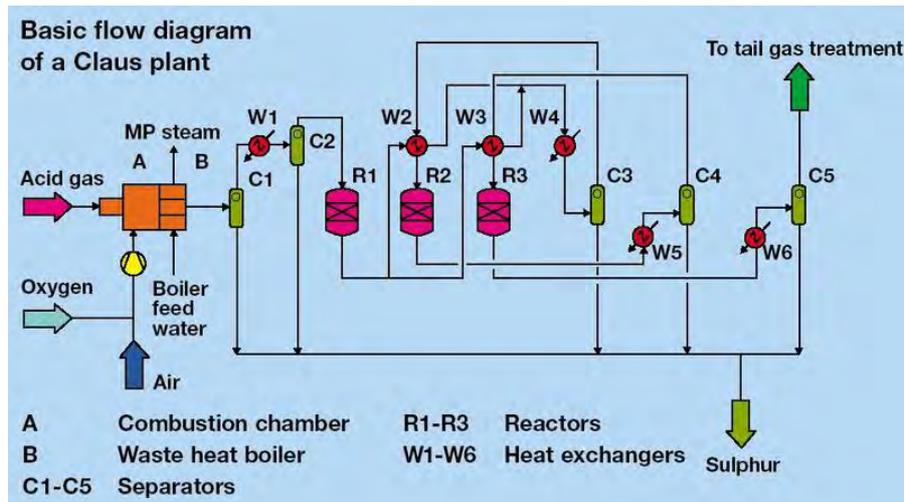


Figura 1. Tipico schema di processo di un impianto Claus

Molte configurazioni prevedono l'arricchimento con ossigeno della corrente d'aria inviata al reattore termico. Questa soluzione consente di fare aumentare la capacità di lavorazione dell'impianto e, grazie all'aumento delle temperature di combustione, rende possibile l'incenerimento di altre specie chimiche contenute nella carica (es. ammoniaca). Essendo la reazione fortemente esotermica, le temperature all'interno del reattore termico sono molto elevate ($> 1330\text{ }^{\circ}\text{C}$), ponendo delle sfide ingegneristiche importanti per la gestione della corrente di reazione, sia all'interno del forno, sia per il successivo raffreddamento e condensazione dello zolfo liquido che si è formato dalla reazione. Connessa al forno di reazione è installata una caldaia a recupero termico (Waste Heat Boiler), in cui si sfrutta il contenuto termico dei prodotti di reazione per produrre vapore. Comunemente vengono installate caldaie a tubi di fumo, con la piastra tubiera di ingresso che si affaccia verso la camera di combustione del forno.

A causa delle elevate temperature e della composizione dei fumi che li rende molto corrosivi, la caldaia a recupero (WHB) degli impianti Claus presenta diverse criticità.

Il componente indubbiamente più sollecitato della WHB è la piastra tubiera di ingresso dei fumi che è sottoposta a un elevatissimo gradiente termico, maggiore di 1000°C , per via delle elevate temperature lato forno e della temperatura dell'acqua di caldaia lato interno. Risulta pertanto fondamentale la funzione del rivestimento protettivo refrattario e l'adozione di opportuni accorgimenti costruttivi tali da consentire il mantenimento di tale rivestimento e favorire la trasmissione del calore, in modo da mantenere le temperature operative del metallo al di sotto di valori per i quali i fenomeni di corrosione a caldo risultino il più possibile contenuti.

Tali problematiche sono ormai ben note ai progettisti delle società fornitrici di impianti Claus che, dopo anni di osservazione e a seguito di *feed back* dagli utilizzatori, hanno messo a punto delle soluzioni che consentono di ottenere accettabili livelli di affidabilità e una vita utile del sistema piastra tubiera/tubi anche superiore a due cicli manutentivi (corrispondenti in genere a 8 anni).

Gli sforzi progettuali sono mirati a garantire condizioni operative il più possibile uniformi, soprattutto dal punto di vista termico, su tutta la piastra tubiera; limitare le sollecitazioni meccaniche di origine termica o vibrazionale, favorire il raffreddamento della piastra tubiera, utilizzare dei rivestimenti refrattari in grado di assorbire eventuali movimenti della piastra o transitori in caso di up-set, senza danneggiamenti o rotture significative che comprometterebbero la capacità di isolamento.

Di seguito le principali raccomandazioni adottate per le nuove costruzioni [1], [2], [3], [4]:

- **Realizzazione di caldaia e tubi di fumo con corpo cilindrico esterno.** Rispetto a una soluzione con separazione fasi liquida e vapore nel mantello cilindrico o tipo

“kettle”, garantisce delle condizioni operative più uniformi sui tubi e sulla piastra tubiera. La zona di installazione dei tubi è infatti completamente immersa nell’acqua di caldaia, le goccioline di vapore si separano nel corpo cilindrico, evitando fenomeni di vibrazione per vaporizzazione e successiva condensazione di bolle di vapore. Risulta minimizzata la presenza di goccioline di vapore sui tubi e sulla piastra, a beneficio dello smaltimento del calore: l’acqua in fase liquida trasporta un maggiore quantitativo di calore rispetto alla fase vapore.

- **Diametro dei tubi di caldaia (> 1 ½”)** e conseguentemente ampio interasse fori. Questa soluzione consente l’installazione di ferule ceramiche, a protezione imbocco tubi, con geometria che conferisce più robustezza al componente ceramico. Di contro, questa soluzione può richiedere tubi di caldaia più lunghi o di maggior numero a compensazione della superficie di scambio.
- **Penetrazione delle saldature di sigillo tubi/piastra.** Questa soluzione, limitando l’elemento di discontinuità tra tubi e piastra tubiera, favorisce la trasmissione del calore. Il caso limite [1] sarebbe la realizzazione di una saldatura a piena penetrazione, come da schizzo in Figura 2, questa soluzione comunque richiederebbe dei passi tra i tubi molto ampi, per potere consentire adeguatamente le operazioni di riempimento con metallo di apporto della gola.

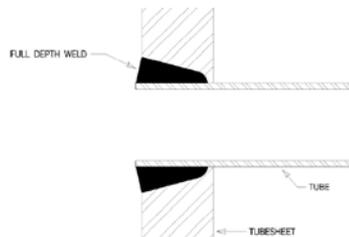


Figura 2. Modalità di saldatura tubi/piastra a “piena penetrazione” [1].

- **Ferrule ceramiche denominate “two pieces”.** Composte da un elemento interno che si inserisce all’interno del tubo, e da una testata esterna separate che compone il rivestimento della piastra tubiera, consentono di assorbire eventuali deformazioni della piastra tubiera, garantendo l’isolamento anche in seguito ad eventuali up-set di impianto. In figura 3 una schematizzazione di una tipologia a testata esagonale.

Figura 3. Ferula ceramica “two pieces” a testa esagonale.

Nella presente memoria verranno descritte alcune esperienze operative relative a una serie di miglioramenti costruttivi della piastra tubiera e del rivestimento refrattario della WHB di un impianto Claus che hanno consentito un considerevole recupero di affidabilità della macchina, senza dover procedere a stravolgimenti del lay-out dell’impianto.

2. Storia operativa e descrizione del sistema originario

Lo schema della caldaia a recupero considerata in questo caso studio è rappresentato in Figura 5. I dati della caldaia, a tubi di fumo, sono i seguenti: Tpr (LM)=250°C, Tpr (LT)=340 °C, Ppr (LM)=15 bar, Ppr (LT)=3,5bar. N° 901 tubi di scambio De=31,75mm, sp=4,47mm in A201 gr. A1, interasse 50mm. Materiale mantello e piastra tubiera Acciaio al Carbonio (P355 NH).

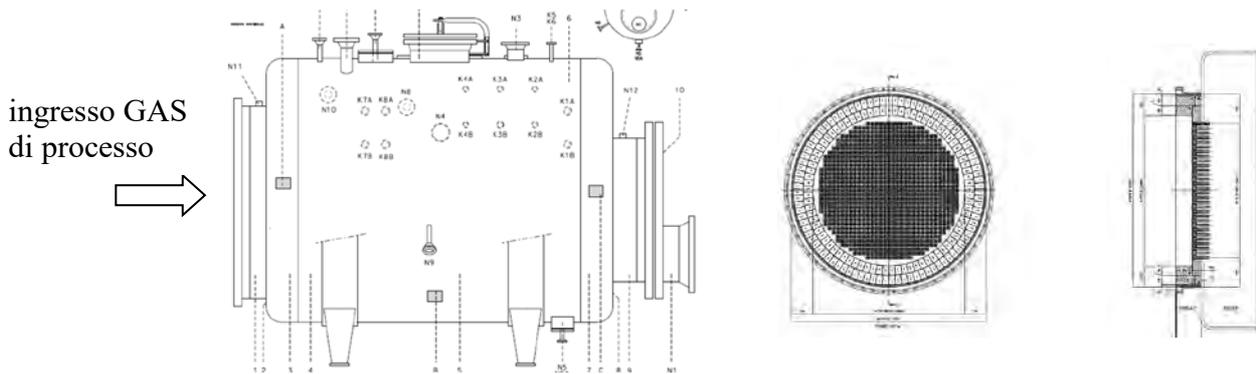


Figura 4. Configurazione generale caldaia a recupero, rappresentazione piastra tubiera e disposizione rivestimento refrattario

La storia operativa dell'attrezzatura è stata caratterizzata da diversi casi di failure, che hanno necessitato la ritubatura e il rifacimento del rivestimento refrattario a protezione della piastra tubiera.

L'analisi dello storico ispettivo evidenziava una significativa riduzione dell'affidabilità del sistema a partire dal revamping dell'impianto, consistente nell'integrazione dell'ossigeno di arricchimento al reattore termico e conseguente aumento delle temperature operative dei fumi che investivano la piastra tubiera.

I meccanismi di danno osservati sono riconducibili a ossidazione a caldo o corrosione da H_2S ad alta temperatura della piastra tubiera. Tali fenomeni si realizzavano in modo graduale o in forma molto accelerata, in funzione dell'entità del deterioramento della barriera di refrattario. Le immagini in Figura 5-6 rappresentano alcune evidenze ispettive riscontrate.

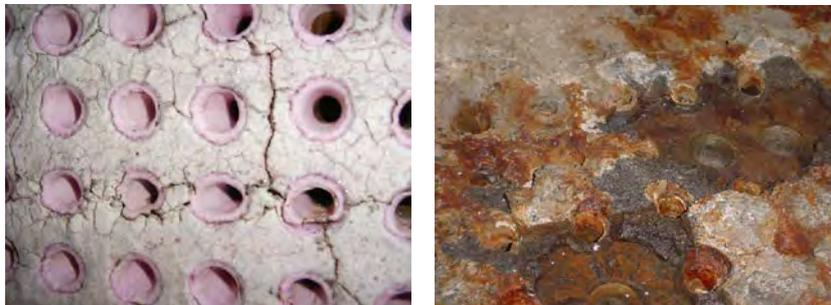


Figura 5. Deterioramento del refrattario e ossidazione piastra tubiera. Refrattario realizzato con modalità ferule "a becco di flauto" annegate in gittata refrattaria.



Figura 6. Rotture e distacco ferule ceramiche, con ossidazione piastra tubiera e tubi sottostanti.

Le analisi di guasto condotte e le consultazioni di società di ingegneria specializzate nel settore mettevano in luce la necessità di attuare una serie di interventi per superare punti di debolezza ritenuti causa dell'inaffidabilità del sistema, di seguito elencati:

1. Realizzazione nuova caldaia dotata di corpo cilindrico esterno per uniformare le condizioni operative della piastra tubiera
2. Modifica del forno di reazione, prevedendo una configurazione che consenta l'allentamento delle fiamme dalla piastra tubiera (allungare il forno).
3. Riposizionamento bocchello di uscita attualmente asimmetrico, che determina condizioni operative disuniformi sul fascio tubiero.
4. Aumento del diametro e del passo dei tubi.
5. Revisione del sistema di giunzione tubi/piastra tubiera, adottando saldature di testa o a piena penetrazione.
6. Modifica del rivestimento refrattario.

3. Accorgimenti per migliorare la conducibilità termica della piastra tubiera

L'adozione degli accorgimenti proposti, determinando una significativa modifica del lay-out dell'impianto, necessitava un periodo di fermo dell'unità molto prolungato, oltre a richiedere ingenti investimenti. Si preferì pertanto analizzare in dettaglio il progetto originario, in modo da individuare modifiche che fossero limitate alla caldaia a recupero.

Il primo aspetto analizzato è stato lo **spessore della piastra tubiera**.

Il progetto originale, determinato tramite il codice ISPESL VSG, prevedeva uno spessore di 40mm. Un'accurata applicazione dello stesso codice ha consentito la riduzione dello spessore a 30mm (arrotondando il valore di 28,9mm di calcolo), compensando il minor spessore con l'aumento, da 8 a 12, degli elementi di irrigidimento (tubi 4" sp 13,5mm A106 gr.B) che insistono sulla porzione di piastra libera, non interessata da tubi di scambio. In Figura 7 la nuova configurazione.

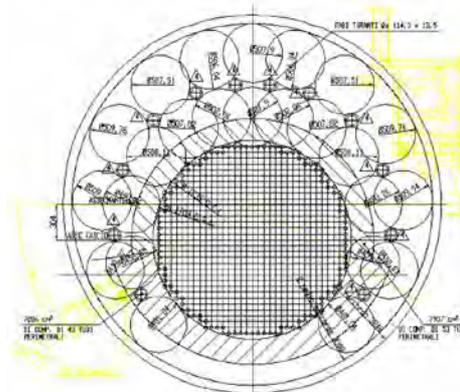


Figura 7. Nuova configurazione piastra tubiera per consentire riduzione di spessore da 40 a 30mm.

Un altro aspetto esaminato è stato la **modalità di giunzione tubi-piastra tubiera**. La configurazione originale, disponibile in Figura 8, prevedeva, oltre alla mandrinatura dei tubi, un cordone di altezza 4mm.

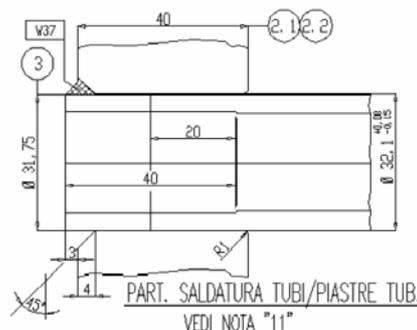


Figura 8. Configurazione originaria di giunzione tubi/piastra tubiera

Per questo particolare costruttivo sono state valutate due possibili soluzioni. La prima, rappresentata in Figura 9a, consisteva nell'arretramento del tubo all'interno della piastra tubiera e successiva saldatura d'angolo all'interno del foro con tecnica del TIG orbitale, in seguito scartata per rischio di formazione di cricche da sollecitazioni operative e conseguente perdita di tenuta, anche se valido da un punto di vista di resistenza alla corrosione. La seconda soluzione, la più affidabile e rappresentata in Figura 9b, consisteva nella realizzazione di un smusso attorno al tubo, della massima profondità tollerabile dal passo dei tubi di 50mm e spessore piastra 30mm. Al termine delle operazioni di saldatura, rasatura a filo piastra della sporgenza del tubo e della saldatura. La rasatura, come si vedrà in avanti, si rendeva necessaria per consentire l'installazione nella modalità più efficace del rivestimento refrattario.

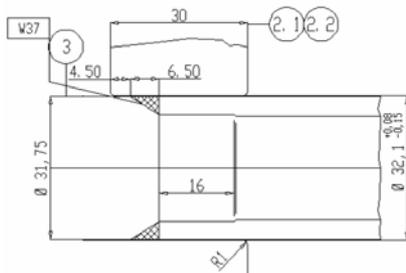


Figura 9a

Figura 9b

Infine, dopo l'intervento di ritubatura, è stato previsto un ciclo di **trattamento termico di ricottura (PWHT)** in forno, sull'intera apparecchiatura. Il trattamento, anche se non previsto dal codice di progettazione, è stato ritenuto utile per preservare le saldature dei tubi alla piastra da possibili formazioni di cricche derivanti dall'ambiente di servizio o sollecitazioni termiche.

4. Accorgimenti per migliorare l'efficienza del rivestimento refrattario

L'altro aspetto esaminato è stato il rivestimento refrattario. La configurazione originaria, riportata in Figura 10, prevedeva l'installazione di ferule ceramiche cilindriche (94% Allumina), inserite nella parte iniziale del tubo, e annegate in una gittata di cemento refrattario da 105mm di spessore, a costituire la barriera protettiva della piastra tubiera.

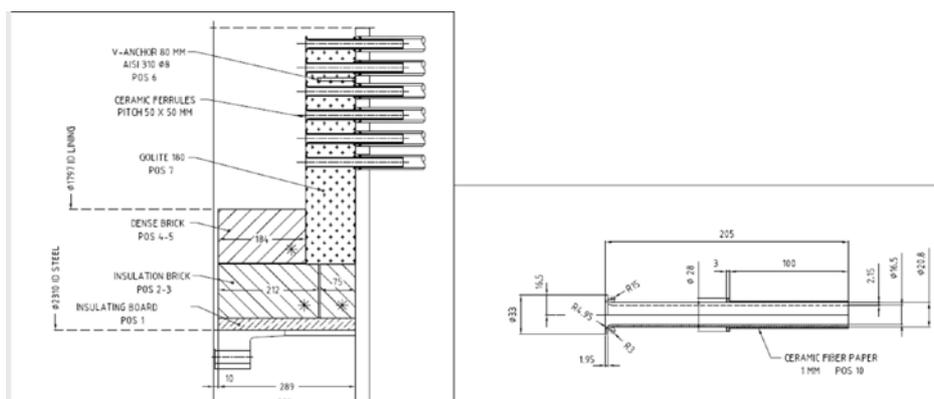


Figura 10. Rivestimento refrattario piastra tubiera, configurazione originaria.

In questa configurazione le ferule sono solidali a un unico blocco, e quindi poco tollerate sono eventuali vibrazioni o fenomeni di *steam blanketing* a cui può essere soggetta la piastra tubiera o per eventuali up-set. Si è passati quindi alla nuova configurazione di Figura 11.

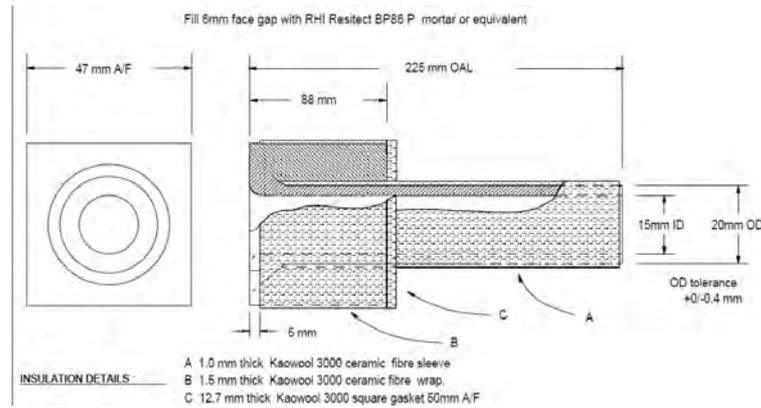


Figura 11. Rivestimento refrattario piastra tubiera, ferule “two pieces”

L'applicazione di questa tipologia di rivestimento riduce notevolmente la reale temperatura di esercizio della piastra tubiera e prevede uno strato di fibra ceramica da installare sulla sezione interna al tubo (part. A) che svolge un ruolo importante di isolamento.

Inoltre, la rasatura a filo piastra del cordone di sigillo dei tubi di scambio consente l'ottenimento di un rivestimento più aderente al metallo, grazie alla regolarità della superficie di appoggio, con maggiore proprietà isolanti. Nel grafico di Figura 12, fornito dal costruttore delle ferule, viene simulato il profilo termico del sistema refrattario-piastra tubiera-tubi. Come si vede in corrispondenza della saldatura tubi-piastra, la temperatura di design è di 199°C, pertanto i fenomeni di corrosione su questo particolare costruttivo sono molto contenuti.

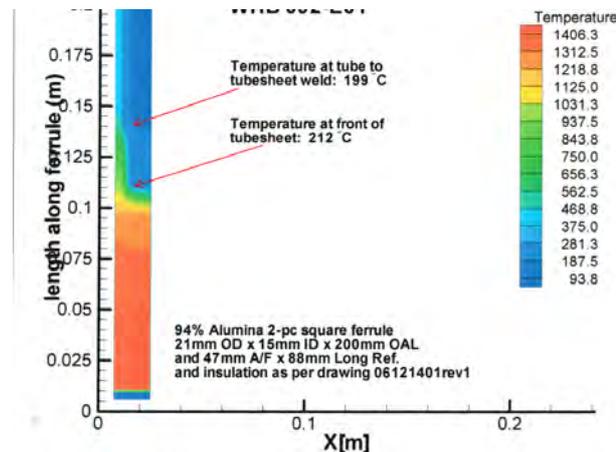


Figura 12. Profilo termico sistema refrattario-piastra tubiera-tubi

5. Conclusioni

L'insieme degli interventi attuati ha consentito il netto recupero dell'affidabilità del sistema, con investimenti relativamente contenuti e senza necessità di adottare soluzioni drastiche con modifiche del lay out di impianto.

Non sono più necessari frequenti interventi di ritubatura, risultato di rilievo in quanto, poiché previsto il PWHT su tutta l'apparecchiatura, tale procedimento non può essere applicato indefinitamente sul materiale per rischio di alterazioni microstrutturali dello stesso.

La configurazione attuale ha consentito il funzionamento regolare dell'impianto per due cicli di marcia di 2 anni, al termine di ciascuno dei quali è stata necessaria la sola sostituzione del rivestimento refrattario, operazione eseguibile a freddo senza interventi meccanici sull'attrezzatura.

Bibliografia

[1] Hank M. Hudson, Susan M. Grigson. Alternative Design Concepts to Improve Sulfur Facility Reliability. Atti della Conferenza: *2000 Laurance Reid Gas Conditioning Conference, The University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, February 28, 2000.*

[2] Arthur R. Leangrich, Donald N. Ewan, Chao-Hsing Tsai- The Ortloff Corporation. Sulfur Recovery Units Designed to be more Reliable. Atti della Conferenza: 1977 NPRA Annual Meeting, March 29, 1977, San Francisco, California.

[3] Robin Street, Mhin Rameshni, The Worley Parson Company. Sulfur Recovery Unit Expansion Case Studies. 125 West Huntington Drive, Arcadia, California.

[4] Mhin Rameshni, The Worley Parson Company. Water Wall Boiler For Air and Oxygen Fired Claus Sulphur Recovery Units. 125 West Huntington Drive, Arcadia, California.

La corrosione battericamente assistita nelle strutture metalliche interrato

D. Lega¹, M. Romitelli²

¹ Inail - Dit

² Libero professionista

Sommario

Le strutture metalliche interrato, quali per esempio tubazioni e serbatoi, svolgono un ruolo fondamentale per il trasporto e lo stoccaggio di acqua, prodotti petrolchimici, e prodotti chimici, e sono prevalentemente costituite da acciaio al C, il quale essendo poco resistente alla corrosione è generalmente dotato di un rivestimento protettivo o di una protezione catodica. La corrosione di tali sistemi costituisce un serio problema industriale in termini di perdita di produzione, contaminazione dell'ambiente, difficoltà nella riparazione, eventuale interruzione di servizi critici. In passato i processi corrosivi relativi ai sistemi interrati erano sempre stati considerati di natura abiotica e quindi fisico-chimici, mentre il contributo dei microrganismi alla corrosione era stato trascurato. Solo di recente è stato messo in luce il ruolo dei microrganismi nel processo corrosivo che in questi casi si presenta inaspettato e veloce, e conduce in tempi molto brevi, dell'ordine di qualche mese, alla perforazione del componente interessato. Fondamentale è il contributo del suolo, particolarmente ricco di microrganismi viventi quali microalghe, archeobatteri, funghi e batteri. A seguito di difetti nel rivestimento o nella protezione catodica i microrganismi naturalmente presenti nel suolo possono venire a contatto con la superficie del metallo e, attraverso il loro metabolismo, possono determinare ed accelerare la cinetica di reazioni catodiche ed anodiche determinando corrosioni localizzate molto veloci e stress corrosion cracking. In questa memoria viene illustrato lo stato dell'arte relativamente all'impatto dei microrganismi sulla corrosione delle strutture metalliche interrato, i meccanismi di tali corrosioni e la morfologia del danno in riferimento a diversi casi di studio.

1. Introduzione

Le strutture metalliche interrato svolgono un ruolo importante per il trasporto e lo stoccaggio di prodotti petrolchimici e chimici. La maggior parte di tali strutture è costituita da acciaio al C, un materiale economico, duttile e con una buona tenacità e saldabilità, ma che, per la propria composizione chimica, presenta nel suolo una scarsa resistenza alla corrosione e può essere soggetto a corrosione generale, corrosione localizzata e stress corrosion cracking. In ragione di ciò vengono utilizzate delle strategie di protezione dalla corrosione che consistono nell'utilizzo di rivestimenti e nella protezione catodica. I rivestimenti agiscono come una barriera fisica e dielettrica, essendo costituiti da materiali non conduttivi, quali per esempio resine o polimeri, tuttavia possono presentare dei difetti quali interruzioni, rughe o distacchi. Tali difetti possono determinare l'instaurarsi di una corrosione localizzata. I fenomeni di corrosione costituiscono circa il 25% delle cause di rottura o di perforazione delle strutture metalliche interrato, causando danni in termini di perdita di produzione, contaminazione dell'ambiente, difficoltà nella riparazione, eventuale interruzione di servizi critici. In passato i processi corrosivi relativi ai sistemi interrati erano sempre stati considerati di natura abiotica e quindi fisico-chimici. La corrosione generalizzata e la corrosione per areazione differenziale sono sempre stati considerati i meccanismi prevalenti nei suoli. La corrosione generalizzata è determinata dalla presenza dell'ossigeno disciolto nell'acqua contenuta nel suolo. La corrosione per areazione differenziale si instaura quando la struttura metallica è a contatto con porzioni di terreno aventi una diversa permeabilità all'ossigeno e

si formano le cosiddette pile geologiche. Solo di recente è stato messo in luce il ruolo della corrosione microbiologica nelle strutture metalliche interrate. La corrosione microbiologica (microbiologically influenced corrosion o MIC) è definita come una corrosione determinata e/o influenzata dalla presenza di microrganismi quali microalghe, batteri, funghi, archeobatteri. Almeno il 30% delle corrosioni delle strutture metalliche interrate sono determinate dai microrganismi e quindi sono corrosioni microbiologiche. In questa memoria viene illustrato lo stato dell'arte in merito ai principali meccanismi di corrosione microbiologica degli acciai al C nel suolo e le relative morfologie del danneggiamento. [1, 2, 3]

2. La corrosione microbiologica nel suolo

I microrganismi sono presenti in tutti gli ambienti contenenti acqua ed hanno la tendenza ad aderire e crescere sulle superfici metalliche dando luogo alla formazione di biofilms. Nel biofilm i microrganismi sono organizzati in aggregati di microcolonie e sono intrappolati in una matrice polimerica costituita da esopolisaccaridi, proteine e DNA extracellulare da loro prodotti. [4, 5, 6, 7, 8]

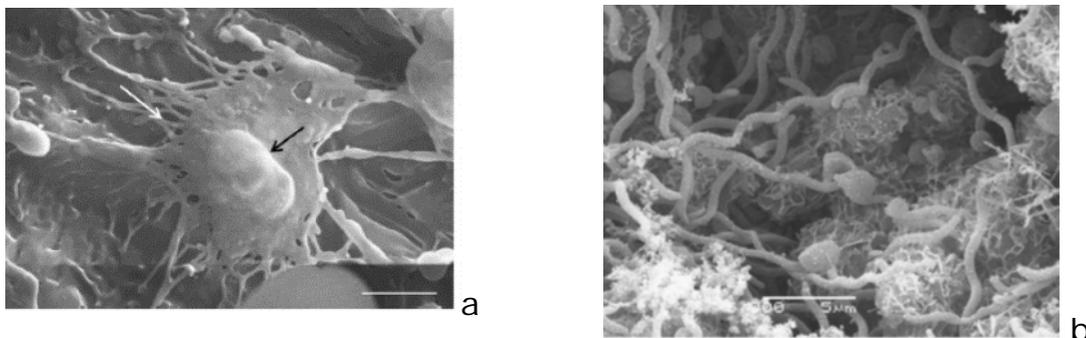


Figura 1. - a biofilm in un acciaio al C dopo 3 gg di immersione in un suolo. [9] - b biofilm in un acciaio basso legato dopo 1 mese di immersione in una cultura di *Desulfotomaculum* [10]

Gli effetti corrosivi dei microrganismi su una superficie metallica possono esplicitarsi mediante una serie di azioni: la produzione o il consumo di ossigeno, la produzione di acidi organici o minerali, la trasformazione dei composti dell'azoto o dello zolfo, la fermentazione o le reazioni di ossido-riduzione.[4,6,7] Il suolo ospita una grande varietà di microrganismi implicati nei fenomeni di corrosione delle strutture metalliche interrate, questi ultimi possono essere aerobici (batteri ossidanti il metallo, MOB), anaerobici (batteri solfato riduttori, SRB, e batteri ferro riducenti, IRB) o facoltativi (batteri produttori di acidi, APB).[9,11] La composizione della popolazione microbica dipende da fattori biotici ed abiotici come per esempio la granulometria delle particelle, la temperatura, il livello di nutrienti, l'ossigeno, il pH, la luce etc.. Nei suoli composti da particelle fini che limitano la diffusione dell'ossigeno e dell'acqua è più facile trovare colonie di microrganismi anaerobi. Alcuni studi hanno mostrato come la composizione della popolazione di microrganismi presenti nel suolo influenza significativamente quella del biofilm adeso sulla superficie del metallo. In fig. 2 viene mostrata la composizione della popolazione di microrganismi presenti in un suolo argilloso a Pernambuco in Brasile ed in fig. 3 la frazione di microrganismi presenti nel biofilm formatosi sulla superficie di un campione di acciaio al C API 5LX60 immerso in tale suolo per 15 gg. [11]

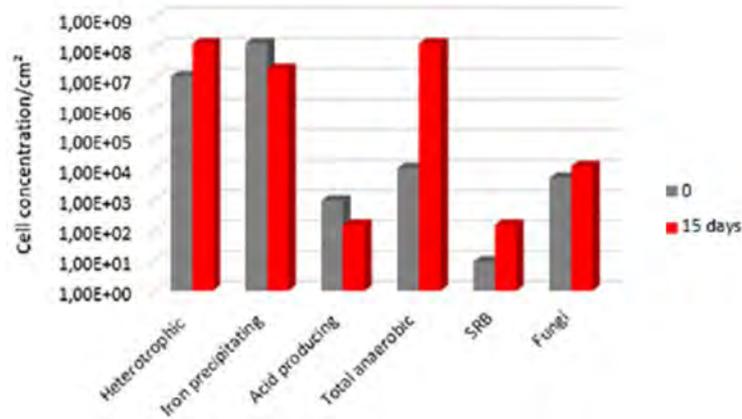


Figura 2. Popolazione microrganismi nel suolo argilloso di Pernambuco [11]

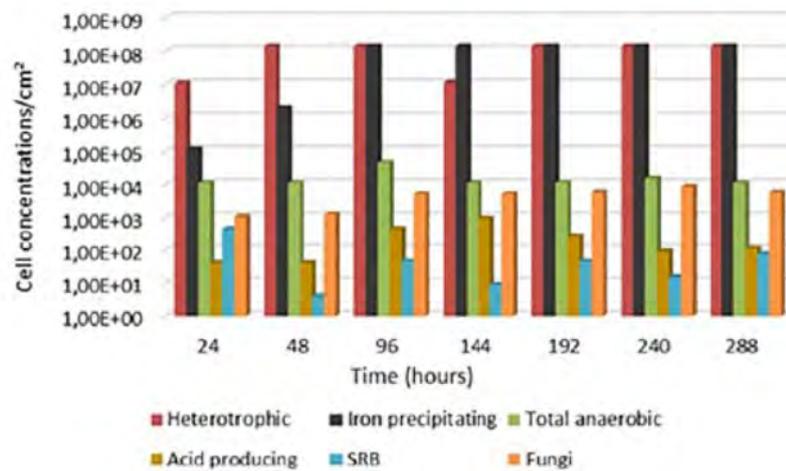


Figura 3. Popolazione di microrganismi formanti il biofilm sulla superficie di un acciaio al API 5LX60C esposto al suolo argilloso di Pernambuco per 15gg [11]

I batteri solfato riduttori sono ritenuti i più attivi nella degradazione delle strutture metalliche interrate e danno luogo a corrosioni veloci con velocità di avanzamento che vanno da 0,7 a 7,5 mm/anno. [12] In passato la valutazione della corrosività di un suolo si basava esclusivamente su fattori abiotici quali la granulometria, la presenza di acqua, il grado di aereazione, il pH, la resistività, il contenuto in cloruri e solfati etc. In relazione al progredire delle conoscenze sul ruolo della corrosione microbiologica sono stati sviluppati dei sistemi di valutazione modificati che tengono conto anche dei fattori biotici, ed in particolare della presenza di batteri anaerobi. In fig. 4 sono mostrati i fattori ritenuti più importanti nel valutare la corrosività di un suolo. Molti di tali fattori sono interdipendenti fra loro. [13, 14]

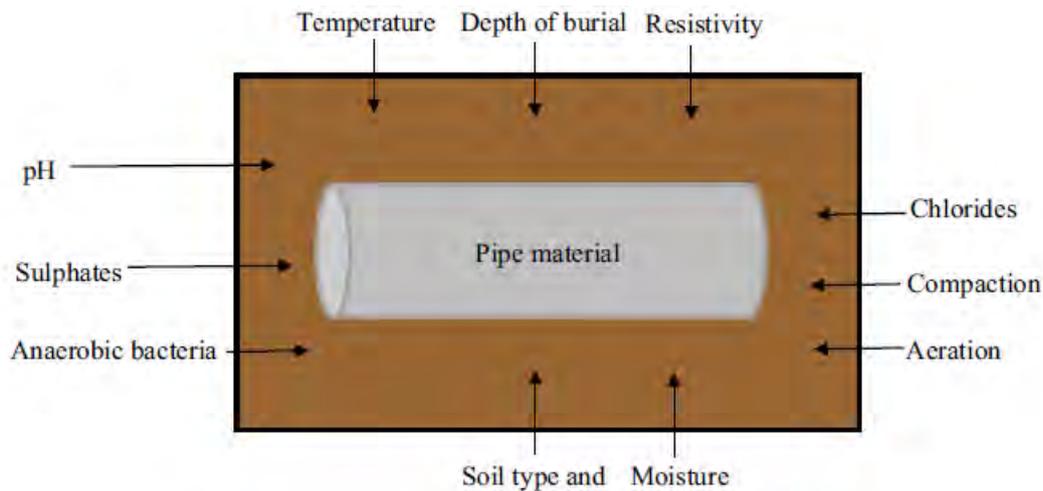


Figura 4. Fattori chiave che influenzano la corrosione di una struttura metallica interrata [13]

Alcuni di questi fattori sono organizzati in indici di valutazione della corrosività del suolo, un esempio è l'indice di "Steinrath modificato" che tiene conto oltre che di parametri quali la resistività, pH, potenziale redox, contenuto in cloruri, solfiti e solfati, anche dei batteri solfato riduttori in termini di numero di cellule batteriche per grammo di terreno.[15] Campioni di acciaio al C incubati per 100 giorni in suoli a carattere argilloso ed a carattere sabbioso, con diverso indice di Steinrath modificato, provenienti dalla località di Port of Suape (Brasile), evidenziano livelli di corrosione più elevati nei suoli argillosi con un indice più alto (tabella 1). La corrosione viene misurata come perdita di spessore, i risultati ottenuti sono mostrati in fig.5. [15]

Parametro del suolo	Suolo argilloso		Suolo sabbioso	
	Valore misurato	Indice di Steinrath	Valore misurato	Indice di Steinrath
Resistività Ohm.m	2000	-4	2000	-4
umidità	17,4	0	10	0
pH	4,4	-1	6,8	0
Potenziale redox mV	110,15	-2	58,45	-2
Cloruri mg/Kg	assenti	0	assenti	0
Solfiti mg/Kg	0,51	-4	0,13	-2
Solfati mg/Kg	0,2	0	0,24	0
SRB MPN/g	$1,2 \cdot 10^3$	-2	assenti	0
Classificazione del suolo	Molto corrosivo	-13	Poco corrosivo	-8

Tabella 1. Valutazione della corrosività dei suoli di Port Suape (Brasile)

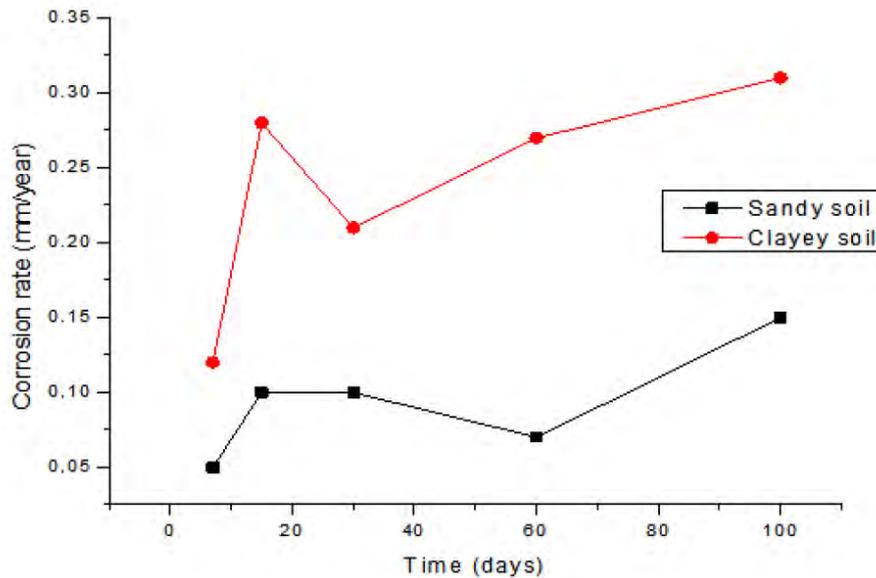
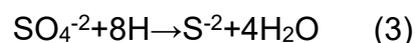
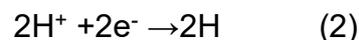
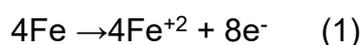


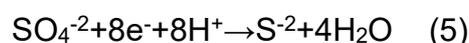
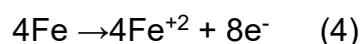
Figura 5. Velocità di corrosione di campioni di acciai al C nei suoli argillosi e sabbiosi, a diverso indice di Steinrath modificato (tabella1), provenienti da Port Suape (Brasile).

3. L'azione dei batteri solfato riduttori

I batteri solfato riduttori sono batteri anaerobici, presenti sia nelle acque che nei suoli, possono svilupparsi anche in presenza di ossigeno purché in quantità limitate. In particolare, sono presenti in suoli poveri di ossigeno, con un pH compreso fra 6 ed 8, contenenti ioni solfato, materia organica e minerale, e crescono soprattutto in un range di temperature compreso fra 20 e 30°C. Il meccanismo di corrosione è complesso e nel corso degli anni sono state sviluppate diverse teorie. La teoria classica è quella della depolarizzazione catodica, nata dallo studio della corrosione di una tubazione in acciaio al C interrata in un suolo povero di ossigeno. (Von Wolzogen Kuehr and Van der Vlugt 1934). [16,17,18,19,20] Le reazioni coinvolte sono le seguenti:

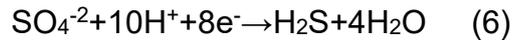


I prodotti di reazione all'anodo sono solfuro ed idrossido di Fe: FeS ed Fe(OH)₂. Una teoria sviluppata successivamente (EMIC, electrical microbial influenced corrosion, 1992) prevede invece l'utilizzo diretto degli elettroni da parte di alcuni batteri solfato riduttori quali per esempio desulfobibrio. Tali batteri possono utilizzare direttamente gli elettroni provenienti dalla ossidazione del Fe per la riduzione del solfato. Tale teoria nasce dallo studio di corrosioni particolarmente veloci di strutture metalliche in acciaio immerse in sedimenti marini. [16, 18] In questo caso le reazioni coinvolte sono le seguenti:

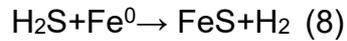


In presenza di substrati organici naturali alcuni batteri solfato riduttori, nell'ambito di una respirazione anaerobica, utilizzano il solfato come accettore di elettroni al posto dell'O₂ e convertono composti organici a basso peso molecolare ad anidride carbonica.

Considerando come composto organico di esempio lo ione acetato le reazioni coinvolte sono le seguenti:



L'acido solfidrico così prodotto è molto corrosivo nei confronti del metallo:



Questo meccanismo di corrosione è detto CMIC, Chemical microbial influenced corrosion ed è stato proposto nel 2006. [16, 17, 18, 20]

4. Forme di danneggiamento e casi di studio

La corrosione microbiologica da batteri solfato riduttori genera un danno localizzato nella forma di vaiolatura o corrosione interstiziale, caratterizzato da una velocità di avanzamento particolarmente elevata. [3, 7, 12, 15]. In fig.6 viene mostrata una tubazione interrata facente parte di un impianto petrolchimico interessata, sulla superficie esterna, da corrosione microbiologica. Si osserva un danno esteso con crateri di ampie dimensioni e numerose perforazioni.



Figura 6. Tubazione interrata in acciaio al C interessata da corrosione microbiologica da batteri solfato riduttori [21]

In caso di corrosione microbiologica, se il campione è stato correttamente conservato, l'analisi al microscopio elettronico rivela la presenza di un biofilm sulla superficie del metallo [3,7,12, 22] In fig.7 sono mostrate le micrografie SEM relative alla superficie esterna della tubazione mostrata in fig.6. Si osserva la presenza di un biofilm che ricopre tutta la superficie in prossimità delle zone corrose. L'analisi elementare con microsonda EDX della superficie del metallo è fondamentale per individuare la tipologia del processo corrosivo ed i microrganismi coinvolti. Nel caso della tubazione in esame la presenza di O, Ca, S, Fe è compatibile con la presenza di idrossido, solfuro e carbonato di Fe, prodotti generati dalla corrosione dei batteri solfato riduttori. [3,7,12, 21, 22] (fig.8)

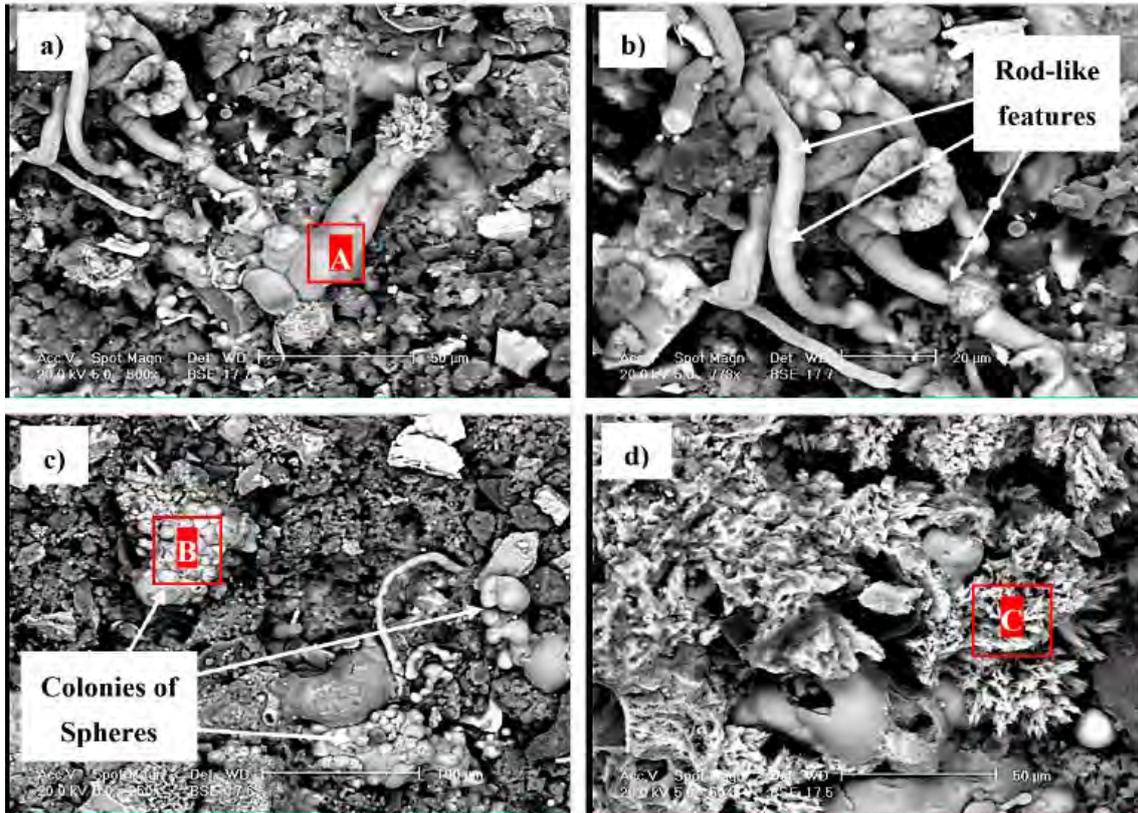


Figura 7. Biofilm sulla superficie di una tubazione interrata in acciaio al C interessata da corrosione microbiologica da batteri solfato riduttori [21]

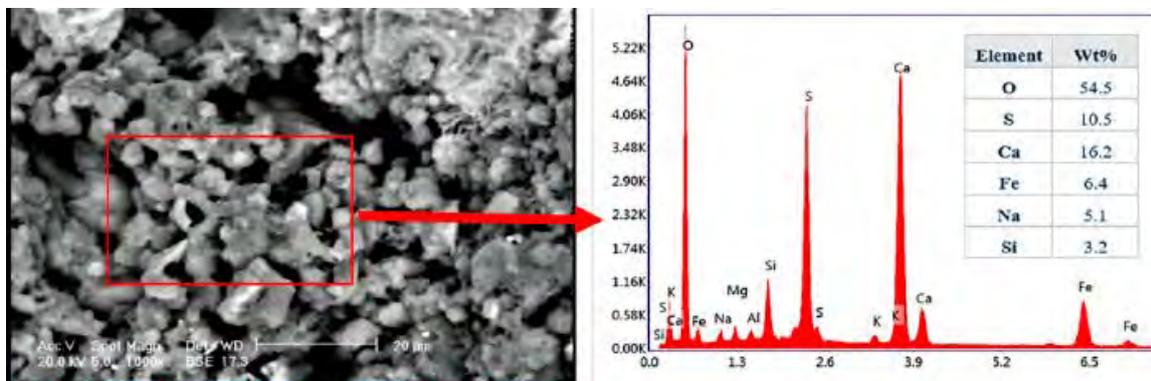


Figura 8. Analisi con microsonda EDX del biofilm presente su una tubazione interrata, la presenza di S, O e Ca è indice di una corrosione da batteri solfato riduttori. [21]

I batteri solfato riduttori hanno inoltre un ruolo attivo nella formazione e nell'avanzamento delle cricche in presenza di una tensione applicata secondo un fenomeno conosciuto come "SRB assisted cracking". [23]. Dalle prove di laboratorio effettuate è emerso che in presenza di una tensione il fenomeno corrosivo negli acciai al C determinato dai batteri SRB è più pronunciato, i crateri di vaiolatura sono più numerosi e manifestano una morfologia più articolata con delle cricche associate. In particolare, i provini immersi in suoli contenenti batteri SRB e sottoposti ad una tensione elastica presentano dei crateri di vaiolatura primari più ampi e numerosi rispetto ai provini immersi negli stessi suoli ma senza tensione applicata, inoltre sul fondo di tali crateri sono presenti sottili crateri secondari e/o delle cricche. Si è osservato inoltre che con il prolungarsi dell'esposizione tali crateri secondari si ampliano a loro volta, ed il processo si ripete. [23, 24] Esistono diverse ipotesi sul ruolo della

tensione nel processo corrosivo dei batteri SRB, una di queste è legata all'osservazione che la tensione determina la formazione di un biofilm più poroso, in cui la diffusione è facilitata, e ciò favorisce l'azione metabolica dei batteri. Una seconda ipotesi è basata invece sugli effetti già noti della deformazione sulla corrosione, in particolare, sul fondo del cratere di vaiolatura per effetto di una concentrazione degli sforzi si può raggiungere una deformazione plastica, ciò determina un incremento della velocità della dissoluzione anodica. [23, 24] Inoltre, numerosi studi di laboratorio dimostrano che i batteri SRB incrementano la possibilità di rotture per stress corrosion cracking negli acciai al C e basso legati. Provini di acciaio immersi in un suolo e sottoposti a prove di slow strain rate mostrano tempi di rottura più brevi e un comportamento fragile in presenza di batteri SRB rispetto alla situazione sterile. [25, 26, 27]. Il meccanismo proposto è quello di un hydrogen induced cracking. L' H_2S prodotto dalla trasformazione del solfato inibisce la ricombinazione dell'H atomico ad H_2 sulla superficie del metallo. In questo modo una frazione elevata di H atomico riesce a diffondere all'interno della matrice metallica formando delle bolle di gas H_2 presso le inclusioni metalliche determinando così una perdita di duttilità del metallo. [16, 18, 27] In fig.8 vengono mostrate le micrografie LOM dei crateri di vaiolatura presenti sulla superficie esterna di una tubazione interrata in acciaio API 5LX52 facente parte di un oleodotto in Iran. A ridosso dei crateri il rivestimento in polietilene presentava dei difetti, in particolare delle interruzioni che hanno consentito il contatto diretto del metallo con il suolo ricco di batteri solfato riduttori. I crateri sono rivestiti da un biofilm contenente batteri SRB e ricchi di prodotti di corrosione tipici di una corrosione SRB assistita. Si osserva la presenza di numerose cricche sul fondo dei crateri di corrosione in relazione al fenomeno "SRB assisted cracking" sopra descritto. [28]

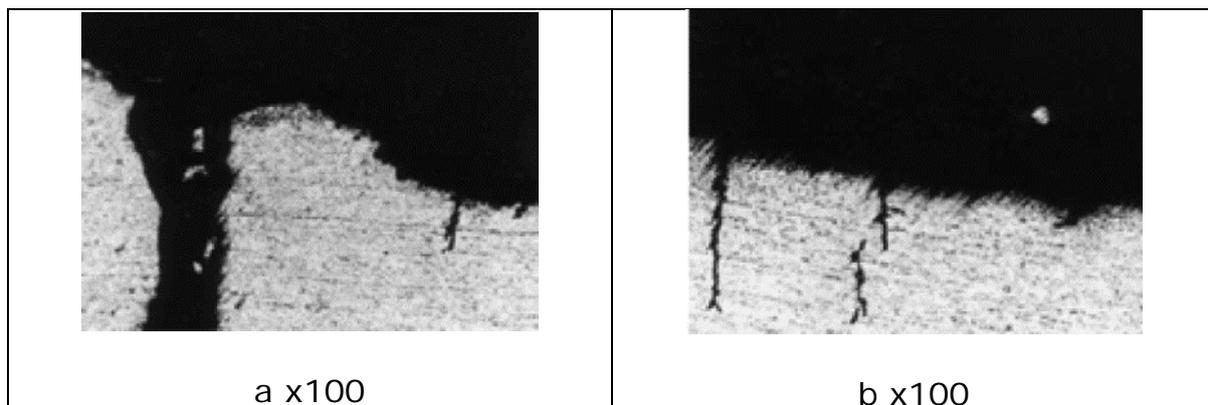


Figura 8. Presenza di cricche sul fondo dei crateri di corrosione rinvenuti su un acciaio API 5LX52 facente parte di un oleodotto interrato in Iran la cui rottura è avvenuta per SCC da carbonato-bicarbonato e SRB assisted cracking [28]

Nelle prove di laboratorio e nelle situazioni reali l'ampiezza e la numerosità delle cricche è legata alla numerosità di batteri SRB presenti nel terreno. Per esempio una serie di linee di tubazioni in Russia hanno manifestato una rottura per stress corrosion cracking trovandosi in un suolo ricco di batteri SRB, la numerosità e l'ampiezza delle cricche rinvenute è legata al numero di colonie di batteri SRB presenti nel terreno [29]

5. Conclusioni

In questa memoria è stato illustrato lo stato dell'arte relativamente all'impatto dei batteri solfato riduttori sulla corrosione delle strutture metalliche interrate. Sono state esaminate alcune caratteristiche del terreno che tendono a favorire la proliferazione dei batteri SRB. Sono stati descritti i principali meccanismi di tali corrosioni: depolarizzazione catodica,

EMIC, CMIC, SCC. Inoltre, è stata presentata la morfologia del danno in riferimento a casi reali. Dallo studio fatto è emerso che il fenomeno è particolarmente complesso ed attualmente non esistono modelli predittivi efficaci.

6. Bibliografia

- [1] Environments and Industries. External Corrosion of oil and natural gas pipelines. ASM Handbook vol. 13C.
- [2] Corrosion, Fundamental, Testing and Protection. Microbiologically Influenced Corrosion. ASM Handbook vol. 13A.
- [3] Failure analysis and Prevention. Biological Corrosion Failure. ASM Handbook vol. 11.
- [4] I. B. Beech, C. C. Gaylarde "Recent advances in the study of biocorrosion: an overview" *Rev. Microbiol.*, 1999 (30):177-190
- [5] G. B. Bixlerand, B. Bushan "Biofouling: lessons from nature" *Philos.T. R. Soc.* 2017 (A360): 2381-2417
- [6] H. A Videla, L. K. Herrera "Microbiologically influenced corrosion: looking the future" *Int. Microbiol.* 2005 (8): 169-180
- [7] B. J. Little, F. Mansfeld *Microbiologically Influenced Corrosion Nace International 1997* Houston Texas
- [8] I. B. Beech, J. Sunner "Biocorrosion: towards understanding interaction between biofilm and metals" *Curr. Opin. Biotech.* 2004 (15): 181-186
- [9] K.M. Usher, A.H. Kaksonen, I. Cole, D.Marney "Critical review: microbially influenced corrosion of buried carbon steel pipes" *Int. Biodeter. Biodeg.* 2014 (93) 84-106
- [10] D. Cetin, M. L. Aksu "Corrosion behaviour of low alloy steel in the presence of *Desulfotomaculum sp*" *Corros. Sci.* 51, 2009, 1584-1588
- [11] G.A. de Queiroz et al. "Biofilm formation and corrosion on carbon steel API 5LX60 in clayey soil" *Mat. Res.* 2018 (21): 3
- [12] R. Javaherdashti "Impact of sulphate reducing bacteria on the performance of engineering materials" *Appl. Microbiol. Biothec.* 2011(91) 1507-1517
- [13] M. Wasim et al. "Factors influencing corrosion of metal pipes in soils" *Environ. Chem.Lett.* 2018 (16): 861-879
- [14] Lorena de Arriba Rodriguez "Methods to evaluate corrosion in buried steel structures: a review" *Metals* 2018, 8, 334 www.mdpi.com/journal/metals
- [15] G.A. de Queiroz et al. "Soil corrosivity on API 5LX60 carbon steel around the region of port Suape, Brazil: influence of soil texture and associated microbial communities. *Braz. J. Petrol. Gas*, 2016 (10) 197-204
- [16] Enning D., Garrelfs J. "Corrosion of iron by sulfate reducing bacteria: new view of an old problem", *Appl. Environ. Microbiol.* 2014 (80) 1226-1236
- [17] Kakoei S., "Mechanisms of microbially influenced corrosion: a review", *World Appl. Sci.J.* 2012 (17) 524-531
- [18] Dennis R. Enning "Bioelectrical corrosion of iron by lithotrophic sulphate reducing bacteria" PhD Bremen 2012, <https://elib.suub.uni-bremen.de/edocs/00102721-1.pdf>

- [19] Yingchao Li ,Dake Xu,Changfen Chen,Xiaogang Li, Ru Jia, Dawei Zhang, Wolfgang Sand, Fuhui Wang, Tingyue Gu Anaerobic microbiologically influenced corrosion mechanisms interpreted using bioenergetics and bioelectrochemistry : a review J. Mater. Sci. Technol. 2018 (34): 1713-1718
- [20] D. Lega, C. Andenna and M. Romitelli “Microbiologically influenced corrosion: morphology of the damage, characteristics of biofilm and corrosion scale” EPERC International Conference Pressure Equipment Innovation and Safety, 2019, Rome 1-3 April
- [21] Peyman Taheri et al. “Microbiologically influenced corrosion of a pipeline in a petrolchemical plant” Metals 2019, 9, 459, www.mdpi.com/journal/metals
- [22] B.J.Little, J.S. Lee, R.I.Ray “Diagnosing microbiologically influenced corrosion: a state of the art review “Corrosion 2006 (62) 1006-1017
- [23] Tangquin Wu et al. “Sulphate reducing bacteria assisted cracking” Corros. Rev, 2019 (37): 231-244
- [24] Tangquin Wu et al. “Synergistic effect of sulphate reducing bacteria and elastic stress on corrosion of X80 steel in soil solution” Corros. Sci., 2014, (83): 38-47
- [25] Cheng Sun et al. “Stress corrosion cracking of X80 steel in the presence of sulphate reducing bacteria” J. . Mate. Sc. Technol. 2015 (31): 413-422
- [26] R. Javaherdashti et al. “Microbiologically assisted stress corrosion cracking of carbon steel in mixed and pure culture of sulphate reducing bacteria” Int.Biodeter. Biodeg. 2006 (58): 27-35
- [27] Dan Wang et al. “Synergistic effect of sulphate reducing bacteria and external tensile stress on the corrosion behavior of X80 pipeline steel in neutral soil environment” Eng. Fail. Anal., 2018 (91): 382-396
- [28] S.Sh.Abedi, A. Abdolmaleki, N. Adibi “Failure analysis of stress corrosion cracking and SRB induced cracking of a transmission oil product pipeline” Eng. Fail. Anal., 2007 (14): 250-261
- [29] V.P. Kholodenko et al. “Chemicomicrobiological diagnostics of stress corrosion cracking of trunk pipelines” Appl.biochem. Microbiol, 2000 (36): 594-601

Estensione sicura della vita a fatica di apparecchi a pressione: il caso di una grande autoclave per vetro laminato

L. Scano, F. Piccini

Studio Scano Associato - Udine

1. Sommario

La definizione della vita residua degli apparecchi a pressione è un cardine delle verifiche istituzionali di integrità di cui all'art. 12 del D.M. 329/04. Essa è comunemente valutata attraverso metodologie tipo Fitness-For-Service a valle dei Controlli-Non-Distruttivi e assume un carattere di grande rilevanza in regime di fatica oligociclica. Quando infatti il numero massimo di cicli a fatica stabilito dal Fabbricante dell'attrezzatura si esaurisce, e non è conveniente sostituirla anche per l'assenza di danneggiamento evidente, è possibile estenderne l'utilizzo sicuro adottando approcci FFS avanzati.

Nella presente memoria si illustra il caso di una grande autoclave ad aria compressa per vetro laminato ($V = 163000$ l, $PS = 15.0$ barg, $TS = -10/+150$ °C), esercita in condizioni di fatica oligociclica e sottoposta a verifica di integrità decennale allo scadere dei cicli di progetto. Una estesa campagna CND finalizzata alla valutazione del danno combinato da perdita di metallo e cricche da fatica, analisi FFS API 579-1 Level 3 basate su metodologie FEM/FEA e fracture-mechanics, e il conseguente piano di riconrollo, hanno permesso di estendere la vita sicura dell'attrezzatura almeno fino alla successiva verifica decennale, virtualmente raddoppiando il numero di cicli ipotizzato in sede di progetto. In particolare, essendo indipendente dal numero di cicli esercito, l'approccio fracture-mechanics ha chiaramente dimostrato la potenzialità di essere impiegabile anche all'esaurimento delle metodologie classiche di valutazione della vita a fatica.

2. Nomenclatura

a	Dimensione della cricca (mm)
C	Coefficiente API 579-1 della curva di fatica per dettagli saldati
C_P	Costante della legge di Paris
$C_{rate,LT}$	Tasso di corrosione di lungo periodo API 510 (mm/anno)
FCA_{10}	Margine di corrosione futura a 10 anni (mm)
f_E	Coefficiente peggiorativo dovuto a fattori ambientali
f_I	Coefficiente migliorativo dovuto a procedimenti benefici per le saldature
f_M	Coefficiente funzione dello stress ratio R
f_{MT}	Coefficiente di temperatura
h	Esponente API 579-1 della curva di fatica per dettagli saldati
$ 1/m_{ss}$	Coefficiente funzione del tasso di bending dello structural stress
K_I	Stress intensity factor per il failure mode I ($MPa \cdot \sqrt{m}$)
K_{Ic}	Tenacità del materiale ($MPa \cdot \sqrt{m}$)
m_{ss}	Coefficiente pari a 3.6
N	Numero massimo di cicli a fatica
n_P	Esponente della legge di Paris
R	Rapporto stress minimo/massimo del ciclo
RSF_a	Remaining Strength Factor ammissibile pari a 0.9
t_{ess}	Spessore equivalente (mm)
ΔS_{ess}	Ampiezza dello structural stress equivalente (MPa)
$\Delta \sigma$	Ampiezza dello structural stress (MPa)

3. Introduzione

Le attrezzature a pressione sottoposte al regime di controllo e ispezione periodica di cui al D.M. 329/04 [1] necessitano di valutazioni strutturali, al più decennali, volte a estendere il loro esercizio sicuro. Il D.M. 329/04 ha inserito infatti questo obbligo per l'Utilizzatore all'art. 12 "Verifiche di integrità in occasione delle verifiche periodiche".

L'analisi di integrità strutturale di apparecchi in pressione prevede normalmente un approccio multidisciplinare che segue il seguente iter:

- Identificazione dei meccanismi di danno agenti sull'attrezzatura.
- Definizione di un piano dei Controlli-Non-Distruttivi (CND).
- Esecuzione dei controlli e quantificazione degli eventuali danneggiamenti.
- Eventuale valutazione di integrità strutturale e/o Fitness-For-Service in funzione dell'esito dei controlli.
- Definizione della vita residua e dell'intervallo di ricontrollo dell'apparecchio.

I danneggiamenti potenzialmente agenti su un recipiente in pressione in servizio sono molteplici e vasta è la letteratura tecnica a riguardo, come ad esempio la norma API RP 571 [2]. Tipologia del fluido, materiale da costruzione e condizioni di esercizio sono i parametri fondamentali che indirizzano verso l'identificazione del danno atteso. In particolar modo, il regime di funzionamento ciclico (fatica oligociclica) rappresenta un fattore decisivo per la valutazione della vita sicura di un apparecchio a pressione, in sede di progetto prima, e di esercizio poi.

Nella presente memoria viene descritto il caso di una grande autoclave ad aria compressa per vetro laminato ($V = 163000$ l, $PS = 15.0$ barg, $TS = -10/+150$ °C) esercita in regime di fatica oligociclica (Figura 1).



Figura 1. Autoclave per vetro laminato oggetto di valutazione

L'apparecchio aveva quasi esaurito il numero di cicli di lavoro previsti a progetto alla data della prima verifica decennale di integrità (18000 cicli eserciti, 20000 cicli a progetto) ed è stato quindi sottoposto a una campagna CND estesa e a una dettagliata analisi tipo Fitness-For-Service in accordo allo standard API 579-1 [3] al fine di estendere la sua vita sicura. L'analisi, condotta con approccio tipo Level 3, coadiuvato dall'utilizzo di modelli FEM/FEA dedicati e metodiche basate tanto sulle classiche curve S/N che sulla meccanica della frattura, ha permesso di quasi raddoppiare la vita a fatica di progetto e di orientare i CND periodici verso le componenti maggiormente sollecitate. In particolar modo, l'approccio fracture-mechanics risulta decisamente interessante per valutare la vita residua a fatica di

apparecchi allo scadere del numero di cicli calcolato in maniera classica, o nel caso di attrezzature molto vecchie di cui non è possibile ricostruire con certezza lo storico di esercizio.

4. Descrizione dell'apparecchiatura e Controlli-Non-Distruttivi

L'autoclave per vetro laminato oggetto di valutazione è un recipiente a pressione cilindrico ad asse orizzontale installato su selle di supporto. Il mantello è stato fabbricato per saldatura di virole in acciaio al carbonio sp. 22 mm, il fondo posteriore è di tipo torosferico sp. 25.2 mm, mentre la porta anteriore, a parete sferica sp. 25.2 mm, è dotata di un sistema di blocco a C-clamp serrate idraulicamente su due flange di connessione saldate al mantello e alla stessa (Figura 2).

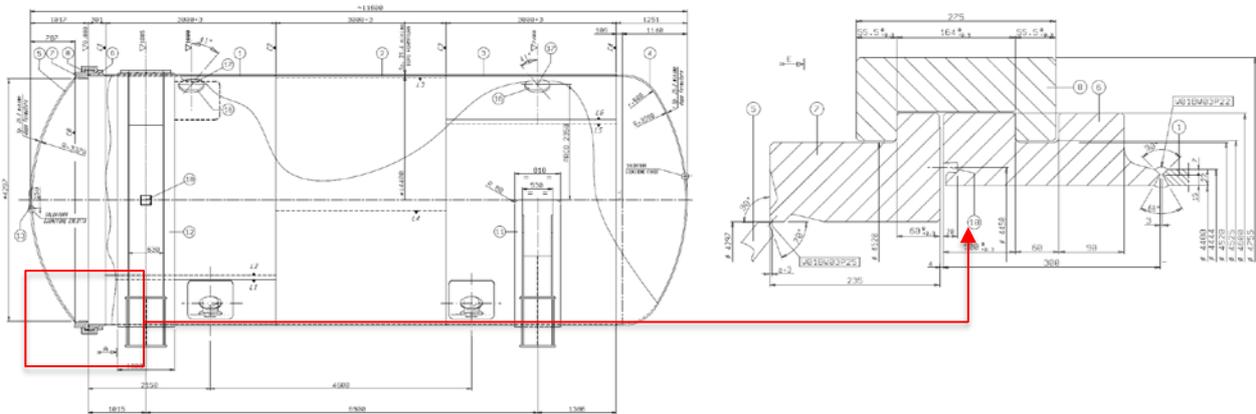
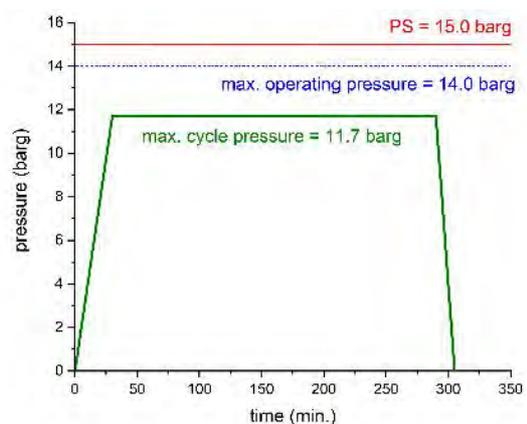


Figura 2. Disegno di progetto dell'autoclave e dettaglio del sistema di chiusura con C-clamp

L'autoclave è esercita con aria compressa in condizioni di funzionamento ciclico per pressione interna variabile da 0.0 a 11.7 barg. I dati di progetto e di esercizio salienti sono:

Pressione di progetto (PS):	15.0 barg
Pressione taratura PSV:	14.0 barg
Temperatura di progetto (TS):	150 °C
Materiale da costruzione:	P355NH EN 10028-3 [4]
Sovrappessore di corrosione:	0.0 mm
Vita a fatica (progetto):	20000 cicli
Codice di progetto:	EN 13445-3 [5]

Numero di cicli eserciti alla data della verifica: 18000



Sulla base delle condizioni di esercizio è stato definito un piano di controllo volto a valutare il danneggiamento per perdita di metallo (corrosione sulla superficie interna delle membrature per condensa dell'umidità dell'aria di servizio) e per la presenza di difetti indotti da fatica (cricche). Sono stati previsti CND di tipo superficiale e volumetrico con l'estensione indicata in Tabella 1.

Danno atteso	Componente	Tipo di controllo	Estensione del controllo
Perdita di metallo	Fondi e mantelli	VT/UTS	100% grid max. 500x500 mm
	Bocchelli	VT/UTS	100% 4/8 pos. circonfer. 2 pos. longit.
Fatica	Tutte le saldature	VT	100%
	Saldature circolari su flange di connessione porta e fondo posteriore	UT/MT	100%
	Saldature circolari intermedie virola cilindrica	UT/MT	25%
	Saldature longitudinali	UT/MT	75%
	Saldature bocchelli DN > 50	UT/MT	100%
	Saldatura flangia motore	UT/MT	100%
	Saldature wear-pad selle	UT/MT	100%
	Saldature composizione selle	MT	10%
	C-clamp	PT	100%
	Materiale base fondi	UT/MT	100%
Tirante attacco porta	UT	50%	

Tabella 1. Piano dei CND per l'autoclave

I CND sono stati eseguiti in un'unica sessione di controllo di cinque giorni impiegando cinque tecnici Livello II ISO 9712 [6] per i diversi metodi di ispezione impiegati.

Nel complesso sono stati eseguiti più di 2000 rilievi puntuali di spessore con sonda UT piana in accordo alle Linee Guida INAIL 2012 [7]. I dati strumentali sono quindi stati valutati su base statistica confermando l'ipotesi di perdita di metallo generalizzata ($COV_{API\ 579-1} < 10\%$). Il tasso di corrosione massimo di lungo periodo secondo API 510 [8] è risultato pari a:

$$C_{rate,LT} = 0.101 \text{ mm/anno}$$

Particolare cura è stata riservata all'esame UT difettoscopico delle saldature di collegamento tra il mantello, la porta sferica e le flange di connessione e blocco con C-clamp (Figura 3). Tali giunzioni erano state infatti individuate come critiche attraverso una stress-analysis preliminare condotta per definire l'estensione del piano di controllo.



Figura 3. Controllo UT sulla saldatura mantello / boccaporto

Gli esami difettoscopici non hanno rilevato difetti nei componenti investigati, nei limiti delle tolleranze degli strumenti di controllo (circa 1.0 mm).

5. Analisi di integrità Fitness-For-Service

Al fine di determinare l'estensione di vita sicura dell'autoclave, per azione combinata del danno da corrosione generalizzata e fatica, è stata condotta un'analisi tipo Fitness-For-Service in accordo al codice API 579-1. In particolar modo sono state impiegate le seguenti sezioni:

- Perdita di metallo generalizzata: API 579-1 Sec. 4 Level 3
- Fatica: API 579-1 Sec. 14 Level 2 (curve S/N), Sec. 9 Level 3 (crack-growth)

Il punto di partenza per tutte le analisi è stata la realizzazione di un modello FEM/FEA globale di dettaglio dell'autoclave corrosa al termine del periodo di riqualificazione pari a 10 anni. Lo spessore delle membrane rilevato in sede di CND è stato quindi peggiorato attraverso un margine di corrosione futura $FCA_{10} = C_{rate,LT} \cdot 10 = 1.01$ mm. Ogni virola e componente è stata quindi modellata tramite elementi solidi aventi spessore pari al minimo calcolato e dimensione pari a 30.0 mm, con raffinamento della mesh a 10.0 mm a livello delle saldature di composizione (Figura 4). Il numero complessivo di nodi del modello FEM globale è risultato superiore a 12 milioni.

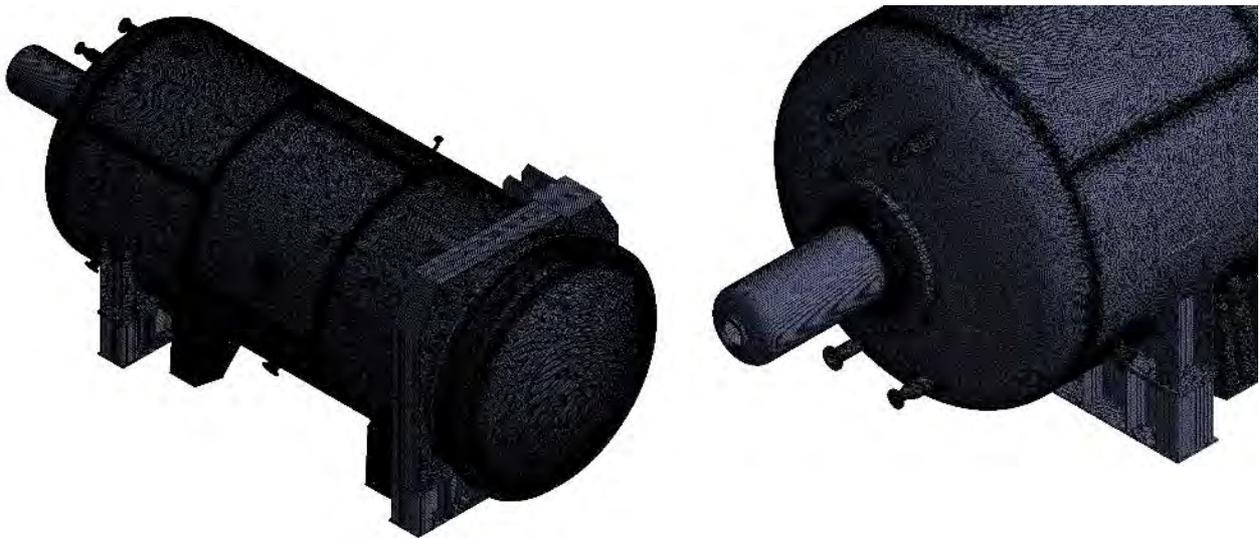


Figura 4. Modello FEM/FEA globale dell'autoclave

La stabilità delle membrane corrose è stata valutata per l'azione della pressione interna di progetto e di tutti i carichi sostenuti tramite analisi elastica lineare e classificazione delle tensioni utilizzando il software commerciale ANSYS Mechanical. L'analisi, in accordo a API 579-1 Annex 2D e Sec. 14, ha valutato i seguenti failure mode: plastic collapse (Annex 2D, par. 2D.2.2), ratcheting (Sec. 14, par. 14.4.3.5), local failure (Annex 2D, par. 2D.3.2). Per valutare correttamente l'andamento degli sforzi nei punti di discontinuità sono stati realizzati diversi sub-model di dettaglio sui quali si è provveduto alla linearizzazione degli sforzi. L'andamento di questi ultimi è riportato, per l'autoclave nel suo complesso e per la saldatura di collegamento tra mantello e boccaporto, in Figura 5.

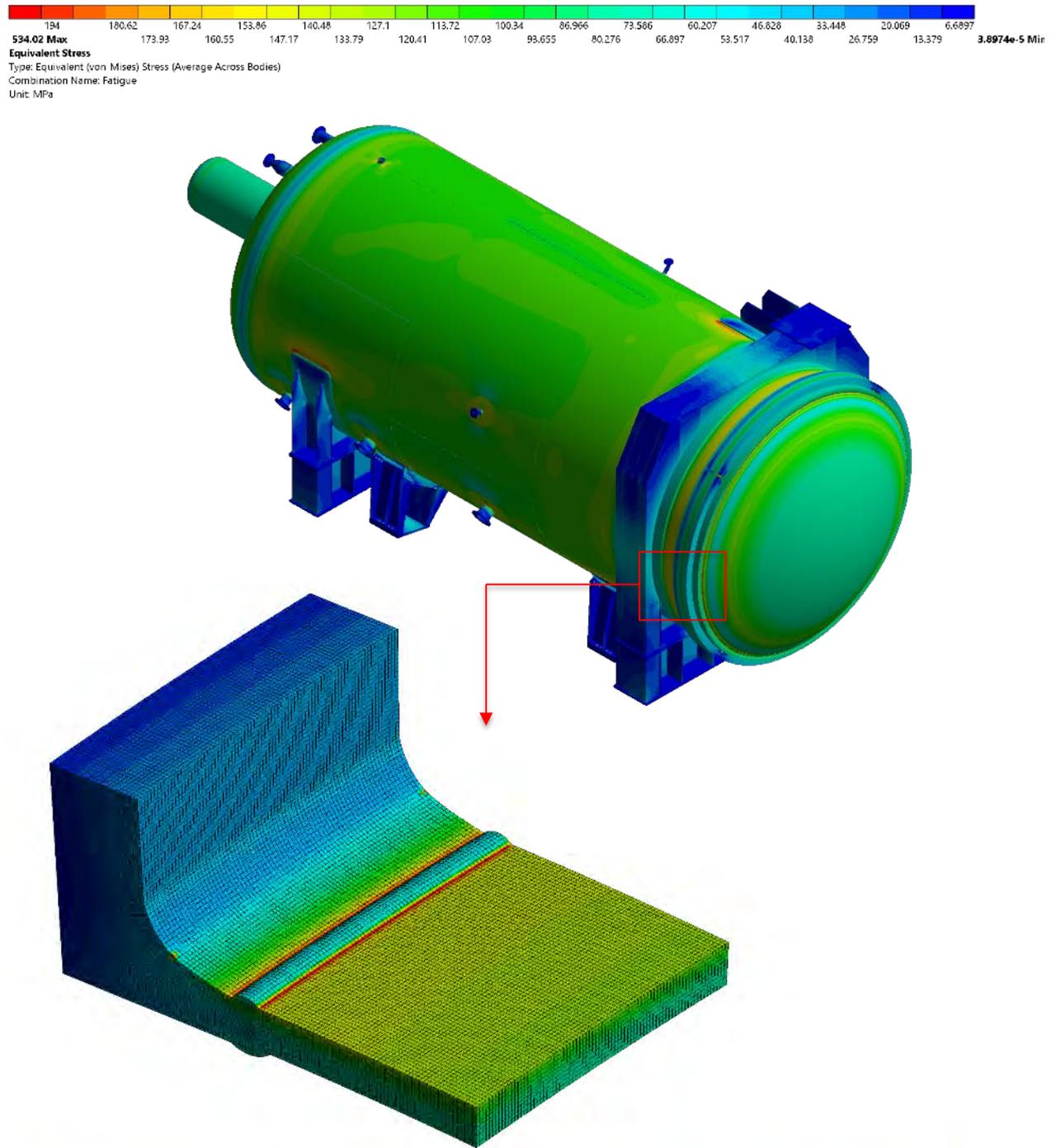


Figura 5. Andamento degli sforzi di Von Mises: modello globale (sopra) e sub-model di dettaglio della saldatura di collegamento tra il mantello e il boccaporto

I calcoli eseguiti hanno dato esito soddisfacente, validando quindi la stabilità strutturale dell'autoclave nelle condizioni di spessore minime previste alla fine dell'intervallo di riqualificazione.

Una volta accertata la stabilità dell'autoclave corrosa per l'azione di tutti i carichi statici e valutato lo shakedown delle azioni secondarie, è stato valutato il funzionamento ciclico. La vita a fatica di progetto era pari a 20000 cicli, di cui 18000 effettivamente eserciti alla data della verifica. Il Fabbricante dell'attrezzatura aveva eseguito il calcolo a fatica in accordo alla Sezione 17 della norma EN 13445-3, adottando un approccio semplificato basato sull'ampiezza di pressione equivalente. In sede di verifica è stato verificato se questo approccio avesse effettivamente sottostimato la vita dell'apparecchio. Sono state eseguite due valutazioni:

- Calcolo "classico" (curve S/N) del numero massimo di cicli a fatica per le saldature corrose tramite analisi elastica lineare e structural stress in accordo ad API 579-1 Sec. 14, par. 14.4.3.4 (Method C).
- Analisi secondo la meccanica della frattura per propagazione (crack-growth) di una cricca di progetto sulla saldatura maggiormente sollecitata in accordo ad API 579-1 Sec. 9, par. 9G.6.

Il primo metodo ha visto impiegate le curve di fatica per materiale saldato presenti nell'API 579-1. L'ampiezza di sforzo da introdurre in tali curve è quella derivante dallo structural stress linearizzato e normale al piano di cricca (Figura 6).

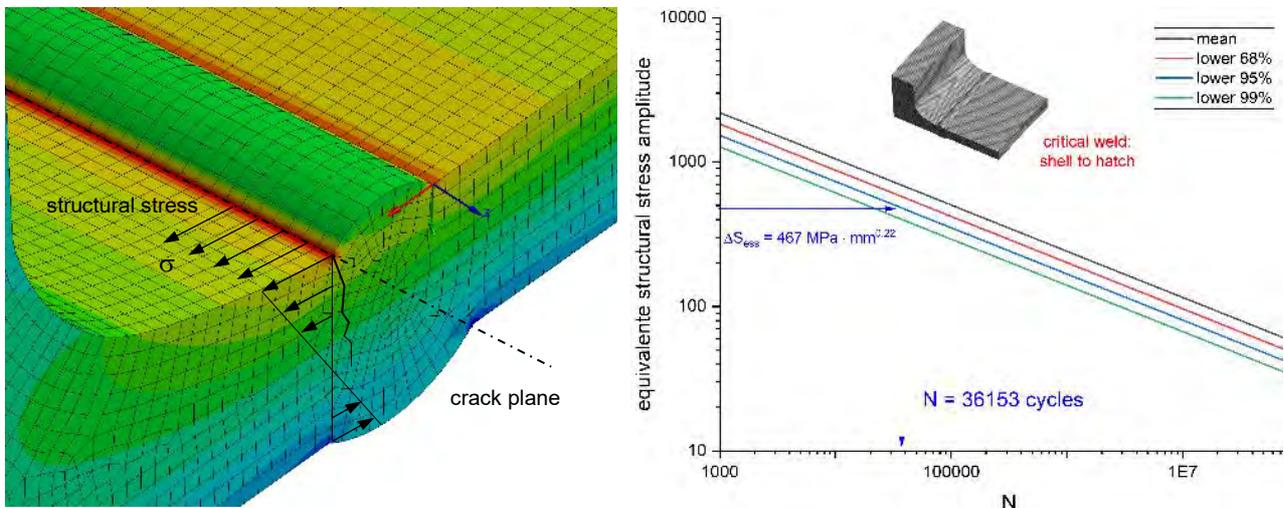


Figura 6. Determinazione dello structural stress normale al piano di cricca del piede di saldatura maggiormente sollecitato (sinistra) e curve di fatica per materiale saldato (destra)

Il numero massimo di cicli a fatica N è stato calcolato in funzione dei coefficienti C e h delle curve di fatica, dei coefficienti relativi a eventuali processi di miglioramento, fattori ambientali o termici (f_i , f_e , f_{MT}), e dell'ampiezza dello structural stress equivalente ΔS_{ess} :

$$N = \frac{f_I}{f_E} \left(\frac{f_{MT} \cdot C}{\Delta S_{ess}} \right)^{\frac{1}{h}} \quad (1)$$

$$\Delta S_{ess} = \frac{\Delta \sigma}{t_{ess} \left(\frac{2-m_{ss}}{m_{ss}} \right) \cdot I^{m_{ss}} \cdot f_M} \quad (2)$$

Nel calcolo di ΔS_{ess} , t_{ess} è lo spessore equivalente limitato inferiormente e superiormente a 16.0 e 150.0 mm, rispettivamente, $m_{ss} = 3.6$, $l^{1/m_{ss}}$ è funzione del rapporto tra la componente di bending e quella membrane+bending dello structural stress σ , mentre f_M dipende dal rapporto degli stress R del ciclo di fatica, pari a 0 nel caso in esame.

L'analisi dello stato di sforzo dell'intera autoclave corrosa, comprensivo del dettaglio di tutte le saldature, ha portato a identificare come critica quella di collegamento tra il mantello e il boccaporto, per la quale è stato calcolato un numero massimo di cicli a fatica pari a circa 36000, quasi il doppio di quelli definiti dal Fabbricante in sede di progetto. Con tale approccio, la vita residua dell'apparecchio è risultata pari a 18000 cicli, ovvero 10 anni.

Il secondo metodo è stato scelto per valutare l'impatto di eventuali difetti nelle saldature, rimasti non rilevabili strumentalmente. È stata quindi condotta un'analisi di meccanica della frattura, stimando la propagazione di un'ipotetica cricca semi-ellittica avente dimensione pari al doppio di quella rilevabile al controllo UT (2.0 mm, coefficiente di sicurezza = 2). Tale cricca è stata modellata al piede della saldatura maggiormente sollecitata tra mantello e boccaporto, nelle condizioni di minimo spessore previste a 10 anni (Figura 7).

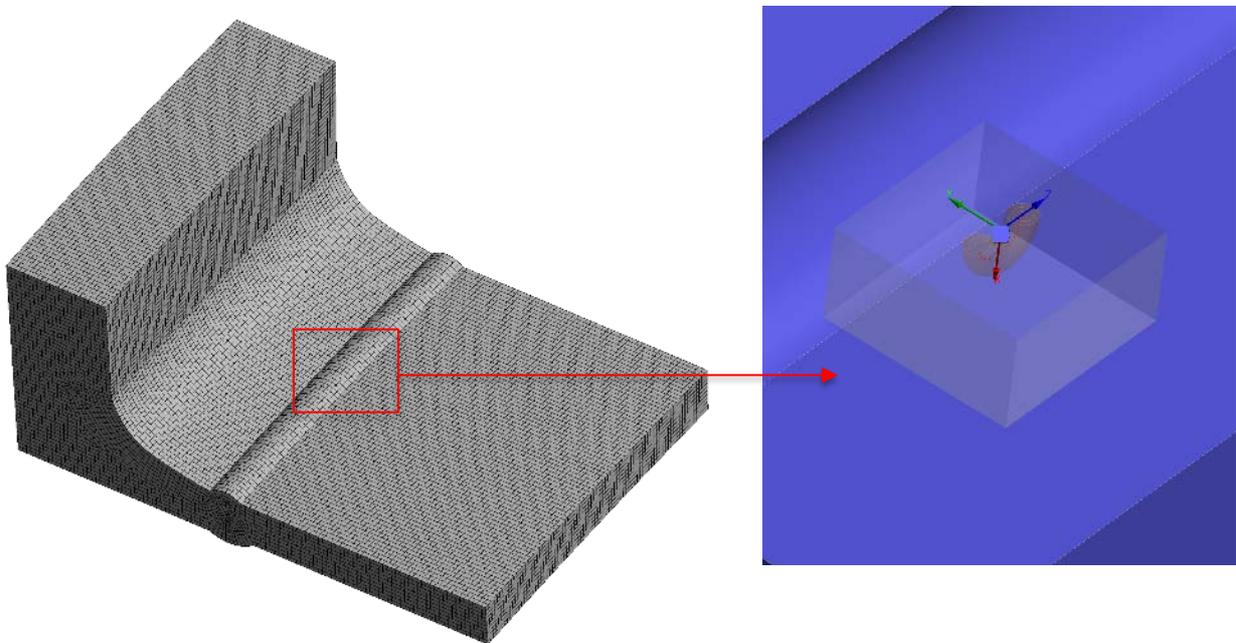


Figura 7. Cricca semi-ellittica al piede della saldatura di collegamento tra mantello e boccaporto

L'analisi crack-growth è stata condotta attraverso FEA elastica-lineare e legge di Paris con coefficienti del materiale ricavati dall'equazione 9F.98 dell'API 579-1 (acciai ferritici operanti in ambiente corrosivo):

$$\frac{da}{dN} = C_P \cdot \Delta K^{n_P} = 7.27 \cdot 10^{-8} \cdot \Delta K^{3.0} \quad (3)$$

È stata calcolata la dimensione della cricca a 10 anni o 18000 cicli di pressurizzazione, ottenendo un valore pari a 19.0 mm e l'andamento della crescita in profondità riportato in

Figura 8. Tale figura riporta inoltre il valore dello sforzo di Von Mises e di K_I al bordo del difetto al termine della vita residua dell'autoclave.

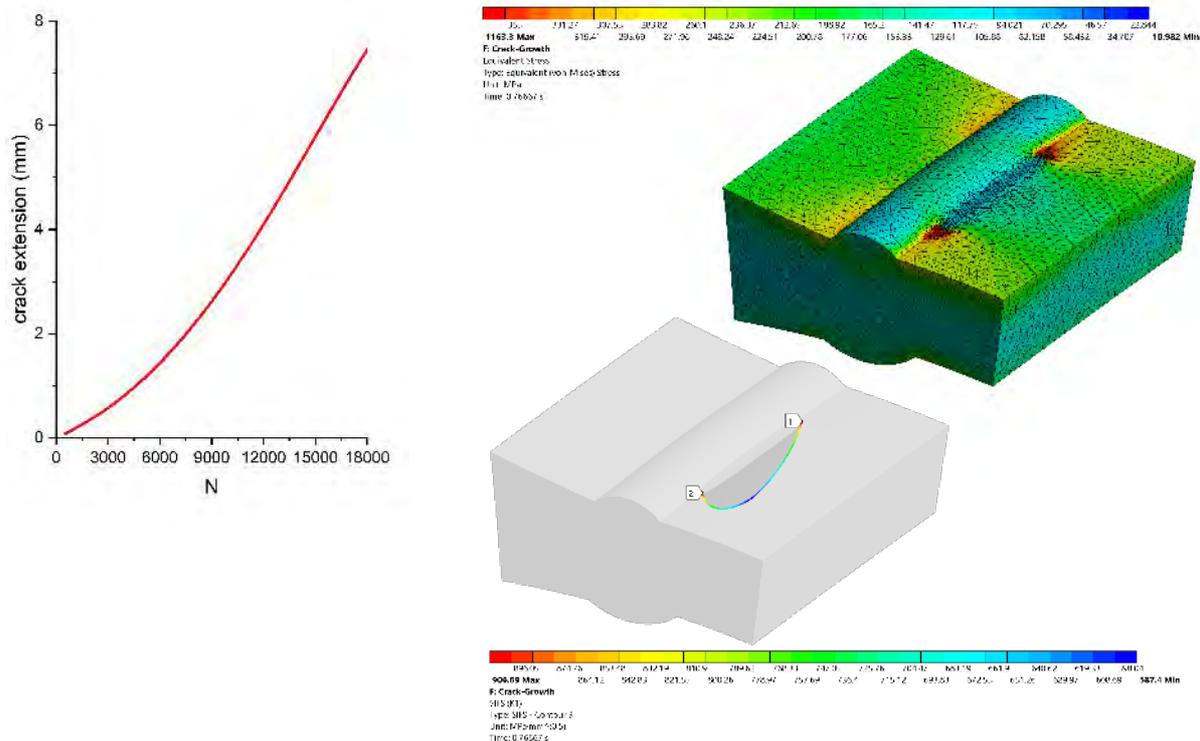


Figura 8. Profondità della cricca in funzione del numero di cicli (sinistra), stress di Von Mises e K_I al bordo del difetto a 18000 cicli (destra, fine prossimo periodo di riqualificazione e vita residua)

Lo stress intensity massimo all'apice della cricca dopo 10 anni è risultato uguale a $28.5 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$, inferiore al dato cautelativo di tenacità K_{Ic} consigliato dall'API 579-1 per gli acciai al carbonio e pari a $47.3 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ (Sec. 9.F). Il difetto è quindi da considerarsi stabile alle condizioni ultime di analisi.

Come richiesto al par. 9G.5 dell'API 579-1, è stata infine eseguita una valutazione statica per verificare la protezione a collasso plastico del dettaglio criccato, alla fine della vita residua. Il calcolo FEA è stato condotto utilizzando un modello di materiale elasto-plastico con curva stress-strain di Ramberg-Osgood (par. 2E.3.3) e fattore amplificativo dei carichi pari a $2.4 \cdot \text{RSF}_a = 2.16$, in accordo al par. 2D.2.4 (elastic-plastic stress-analysis). La verifica è stata garantita dalla convergenza dell'analisi non-lineare. La Figura 9 presenta la deformazione plastica all'apice della cricca e la curva di incrudimento utilizzata.

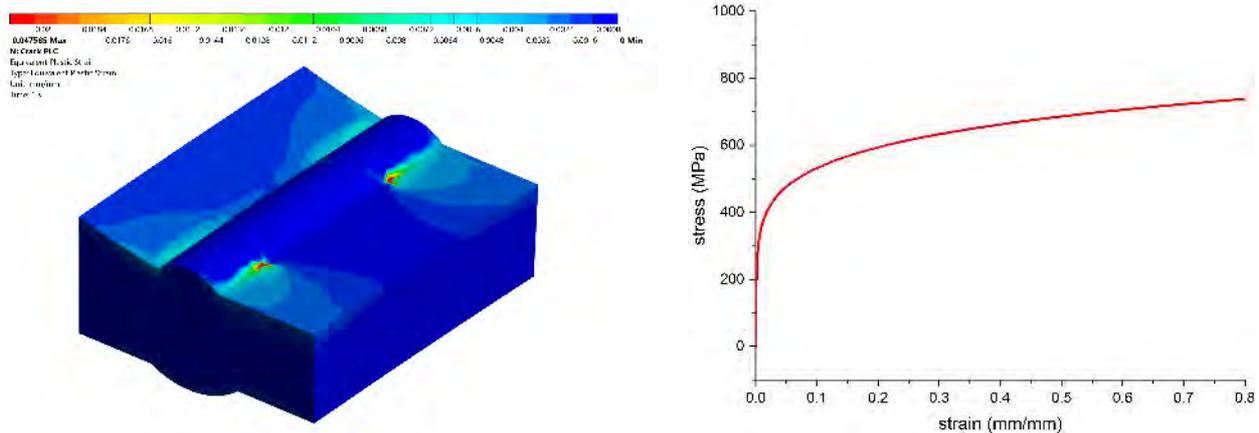


Figura 9. Deformazione plastica all'apice della cricca e curva di incrudimento del materiale da costruzione.

Come si può notare, tale approccio fracture-mechanics ha il grande vantaggio di essere impiegabile anche quando l'attrezzatura ha terminato il numero di cicli a fatica calcolato con metodi classici, sia in presenza che in assenza di difetti rilevati tramite CND. Sarà infatti il metodo di scelta per la prossima analisi di integrità dell'autoclave oggetto della presente memoria allo scadere della nuova vita residua stabilita in sede di riqualificazione.

6. Conclusioni

La presente memoria ha illustrato l'analisi di integrità condotta su una grande autoclave ad aria compressa per vetro laminato giunta quasi a fine vita per fatica oligociclica.

Una volta programmati ed eseguiti i CND sulle membrature dell'attrezzatura, e avendo confermato l'assenza di difetti strumentalmente rilevabili, è stata condotta un'analisi Fitness-For-Service in accordo al codice API 579-1 per perdita di metallo generalizzata in condizioni di funzionamento ciclico.

Attraverso analisi FEM elastiche lineari, è stata valutata la stabilità delle membrature corrose rispetto al collasso plastico, al ratcheting e agli effetti di triassialità. Successivamente, è stata condotta l'analisi a fatica utilizzando, in prima istanza, un metodo basato sulle curve S/N dei dettagli saldati e una stress-analysis di dettaglio degli stessi. Tale approccio ha portato a ridefinire la vita residua dell'autoclave a 18000 cicli, quasi raddoppiando quella definita in sede di progetto. Infine, è stata effettuata un'analisi di meccanica della frattura, ipotizzando la presenza di una cricca non rilevabile strumentalmente al piede della saldatura maggiormente sollecitata. Tale difetto è stato fatto propagare con metodica crack-growth fino al limite di 18000 cicli, confermando la sua stabilità in condizioni ultime. Questo approccio potrà inoltre essere utilizzato allo scadere della nuova vita residua, tanto in presenza che in assenza di difetti rilevati tramite CND.

7. Bibliografia

- [1] D.M. 1/12/2004 n. 329 "Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle apparecchiature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del Decreto Legislativo 25 Febbraio 2000, n. 93"
- [2] API RP 571, "Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, Third Edition", American Petroleum Institute, 2020
- [3] ASME, "API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service", American Society of Mechanical Engineers, New York, 2016

- [4] EN 10028-3, "Prodotti piani di acciai per recipienti a pressione - Parte 3: Acciai saldabili a grano fine, normalizzati", 2017
- [5] EN 13445-3, "Recipienti a pressione non esposti a fiamma - Parte 3: Progettazione", 2021
- [6] ISO 9712-1, "Prove non distruttive - Qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive", 2012
- [7] INAIL, "Esame visivo e spessimetria", 2012
- [8] API 510, "Pressure Vessel Inspection Code: In-service Inspection, Rating, Repair, and Alteration", American Petroleum Institute, 2014

Meccanica della frattura in ambiente corrosivo: alcuni test di caratterizzazione su campioni SENT e SENB

R. Amoriello, L. Cantoni, R. Gussoni, M. Piloni, C. Sampietri

Element Materials Technology Milan S.R.L.

Sommario

La caratterizzazione frattomeccanica dei materiali riveste una fondamentale importanza nelle valutazioni di idoneità al servizio (FFS – Fitness for Service/ECA – Engineering Critical Assessment) di componenti di impianto.

Per una corretta valutazione di tali caratteristiche sono fondamentali la scelta del tipo di provino da sottoporre a prova ed il tipo di carico/ambiente da applicare nel corso della prova.

I campioni SENT (Single Edge Notched Tension) danno generalmente parametri meno conservativi rispetto ai campioni CT (Compact Tension)/ SENB (Single Edge Notched Bending) per i calcoli ECA e FFS in caso di tubazioni contenenti difetti soggetti a flessione. In generale per l'acciaio al carbonio un aumento della concentrazione di H₂S, come avviene ad esempio negli impianti di raffinazione, causa una diminuzione della tenacità alla frattura dovuta principalmente all'effetto di infragilimento da idrogeno.

Di conseguenza, la dimensione massima tollerabile dei difetti (come può essere prevista dai calcoli ECA) risulta essere più piccola se si prende in considerazione l'effetto H₂S. In termini di idoneità al servizio (FFS), questo significa, per la stessa dimensione del difetto, una localizzazione iniziale sul diagramma di valutazione dei guasti più vicina (o addirittura all'interno) alla zona critica.

L'esecuzione di prove SENT in ambiente corrosivo sembra fornire dati per ECA/FFS più vicini al comportamento reale dei materiali, bilanciando i parametri meno conservativi tipici della geometria del provino utilizzato con le condizioni più stringenti dovute all'ambiente corrosivo rappresentativo dell'esercizio.

Un certo numero di test di caratterizzazione sono stati progettati e completati (utilizzando campioni realizzati in API5L X65 [1]) al fine di effettuare un confronto tra le curve JR ottenute in aria e le curve JR ottenute in ambiente corrosivo [2]. In questo articolo saranno discussi principalmente i test su campioni SENT, anche se gli stessi test sono stati fatti su campioni SENB.

Nel seguito vengono riportati gli acronimi utilizzati nel testo:

API	American Petroleum Institute
CT	Compact Tension
DCPD	Direct Current Potential Drop
DNV	Det Norske Veritas
ECA	Engineering Critical Assessment
FFS	Fitness for Service
SENB	Single Edge Notched Bending
SENT	Single Edge Notched Tension

1. Configurazione di prova

La selezione dei materiali, la procedura di montaggio e la preparazione del campione prima dell'esecuzione della prova devono garantire l'assenza di qualsiasi contaminazione e la presenza continua di gorgogliamento di H₂S durante tutte le fasi della prova, dal pre-carico alla fine della prova di meccanica della frattura. Allo scopo sono stati accuratamente

progettati dei recipienti asimmetrici per garantire la corretta concentrazione della soluzione secondo le norme / specifiche del cliente (si veda Figura 1).



Figura 1. Recipienti per il contenimento della soluzione di prova

Prima del test per la determinazione della tenacità (J-R curve), i campioni vengono precaricati in H_2S e assoggettati a preselezionati valori di sforzo utilizzando speciali telai di carico in grado di applicare un carico costante fino a 250kN. La stabilità del carico viene monitorata durante tutto il tempo di pre-carico così come l'eventuale propagazione delle cricche presenti nei provini: i test vengono fermati in caso di propagazione della frattura e i campioni vengono analizzati. Le registrazioni dei dati vengono salvati e resi disponibili per indagini e controlli futuri. Il monitoraggio delle cricche si ottiene utilizzando un sistema DCPD (Direct Current Potential Dop) commutato elettronicamente in modo sequenziale e ciclico tra tutti i frame di pre-carico. Il periodo di pre-caricamento è tipicamente di 1 settimana (si veda Figura 2).



Figura 2. Telaio di pre-caricamento

Al termine della fase di pre-caricamento, i campioni vengono rimossi dal telaio di pre-caricamento e spostati al telaio per l'esecuzione del test di meccanica della frattura utilizzando un carrello speciale appositamente progettato per garantire la presenza costante di H_2S e una corretta movimentazione in piena sicurezza anche nel caso di campioni pesanti.

I test di meccanica della frattura vengono effettuati a velocità molto bassa ($3.16 \cdot 10^{-3} \text{MPa} \sqrt{\text{m}}/\text{s}$ per campioni SENT, usando il DCPD, e $5 \cdot 10^{-3} \text{MPa} \sqrt{\text{m}}/\text{s}$ per campioni SENB).

Gli amplificatori elettronici, i filtri, il duty cycle e la frequenza di campionamento sono stati progettati per avere un'alta precisione su tutto il periodo di misura. Il software che abbiamo sviluppato per controllare il DCPD permette una stima in tempo reale della crescita del difetto durante il test. Poiché il test è fatto con gorgogliamento di H₂S, una cura speciale è stata presa per garantire condizioni di salute e sicurezza adeguate e la protezione dell'apparato di misurazione. La temperatura della soluzione era nell'intervallo $24^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ per tutta la durata del test, tipicamente tra 8 e 12 ore.

2. Caratterizzazione dell'apparato di prova

Al fine di garantire l'accuratezza dei dati, sono state effettuate molte caratterizzazioni dell'apparato di prova. Qui di seguito sono riportati alcuni esempi.

La variazione di carico monitorata per 168 ore è risultata inferiore a 0.3 % (si veda Figura 3).

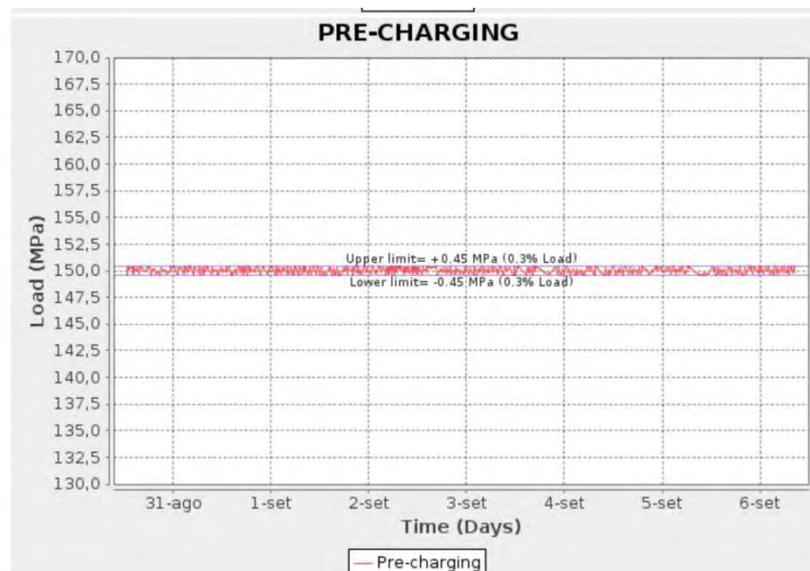


Figura 3. Verifica della stabilità del precarico

La variazione nella misura della profondità della precricca (con precricca ferma), misurata come 3 std. dev. su 1000 misurazioni, è risultata inferiore a 0.025 mm (si veda Figura 4).

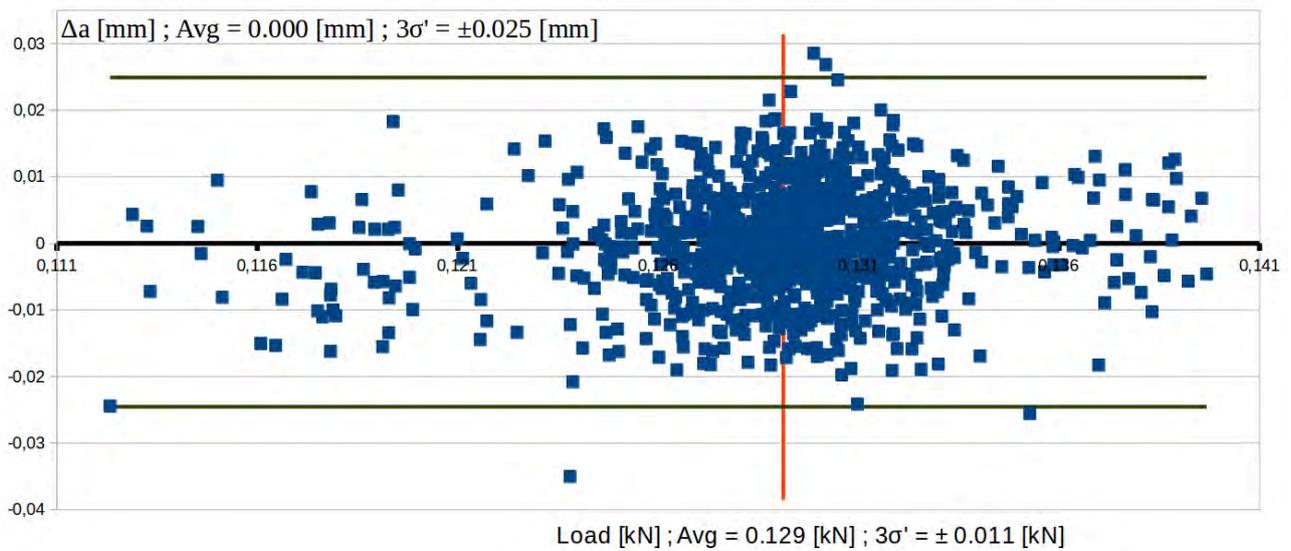


Figura 4. Verifica della ripetibilità di misura del DCPD a difetto fermo (1000 punti di misura in 12 ore)

La differenza tra la lunghezza del difetto valutata mediante DCPD e la lunghezza realmente misurata è inferiore al 10% con un'accuratezza sulla lunghezza finale inferiore all'11% (massimo tollerato 15%) (si vedano Figure 5 – 6).

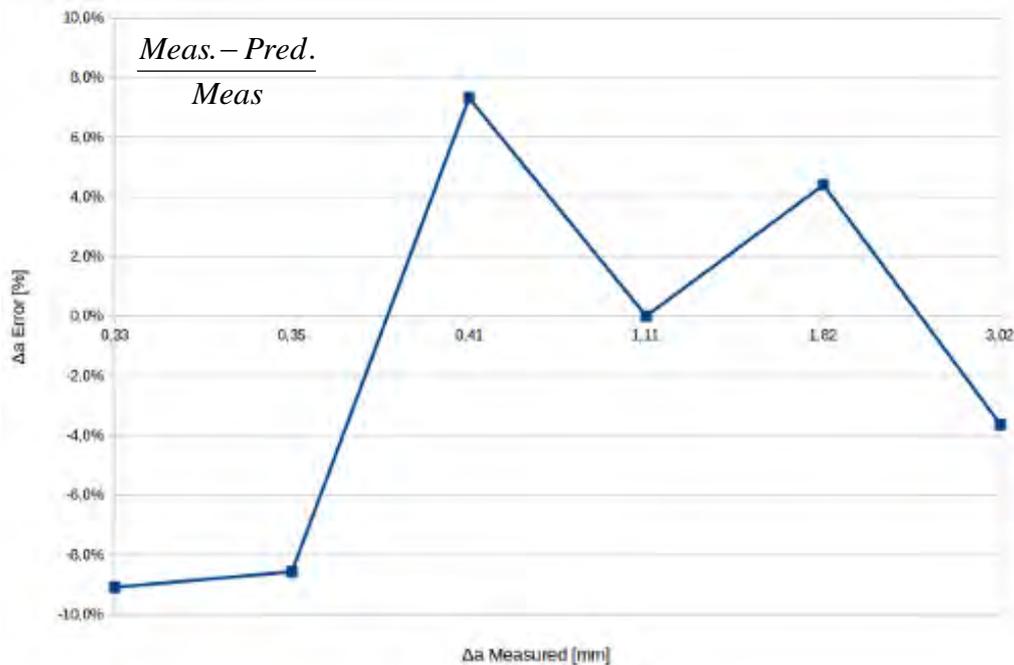


Figura 5. Verifica della misura DCPD per piccole propagazioni del difetto in condizioni statiche (errore $\Delta a < 10\%$)

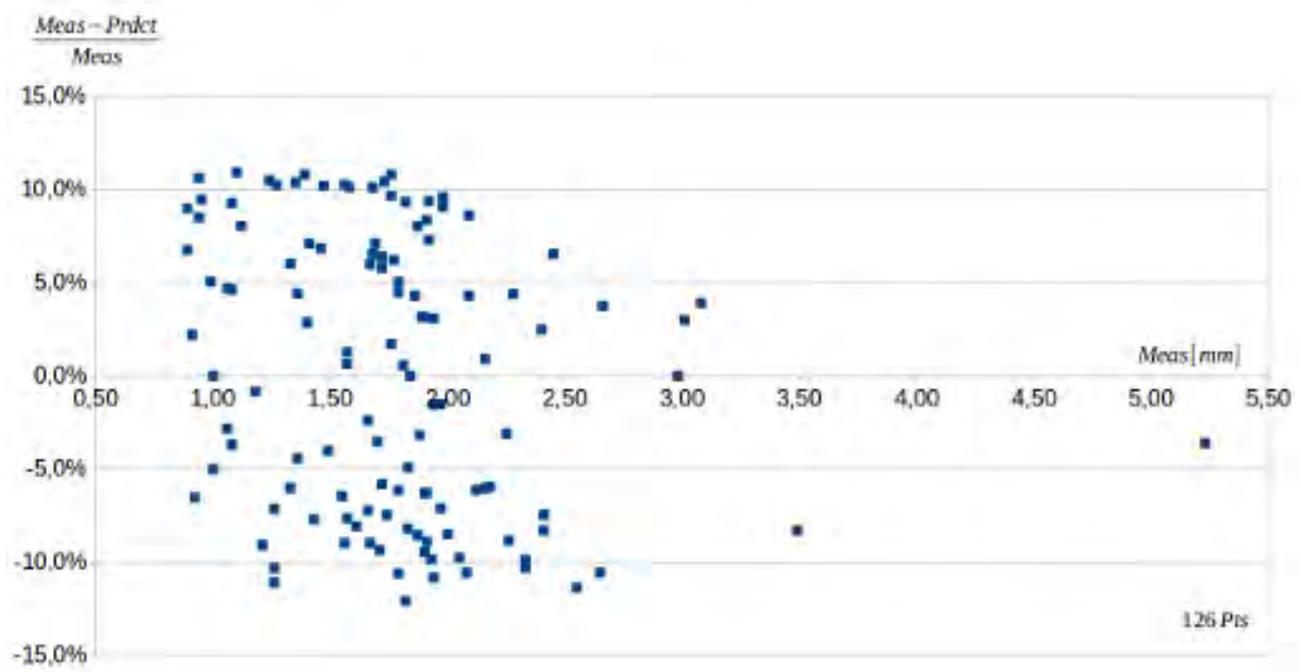


Figura 6. Verifica della misura DCPD sulla dimensione finale del difetto (errore $\Delta a < 11\%$)

3. Condizioni di prova

Le prove sono state effettuate alle seguenti condizioni:

Soluzione di prova	NACE B con pressione parziale di H ₂ S pari a 0.2 bar (20%) bilanciata con N ₂ , contenuto massimo di O ₂ < 10 ppb
Prearico	1 settimana a 150 MPa
Velocità di prova	$0.1 \frac{N}{s\sqrt{mm^3}}$ (only WM); $0.4 \frac{N}{s\sqrt{mm^3}}$, $4.0 \frac{N}{s\sqrt{mm^3}}$ (HAZ and WM)

Tabella 1. Condizioni di prova

4. Risultati

Qui di seguito i risultati dei test sui campioni SENT (materiale API5L X65, geometria BxB 36mm, difetto superficiale NQ dal lato del cap in HAZ (Heat Affected Zone) e WM (Weld Metal)).

Le saldature sono state eseguite utilizzando la stessa squadra di saldatura, le stesse attrezzature e lo stesso lotto di materiale. Ogni serie di punti sperimentali rappresenta la media e la dispersione dei dati (dev. std.) di 10 campioni. Altri 10 campioni sono stati testati in WM in aria per confronto (si vedano Figure 7 – 8).

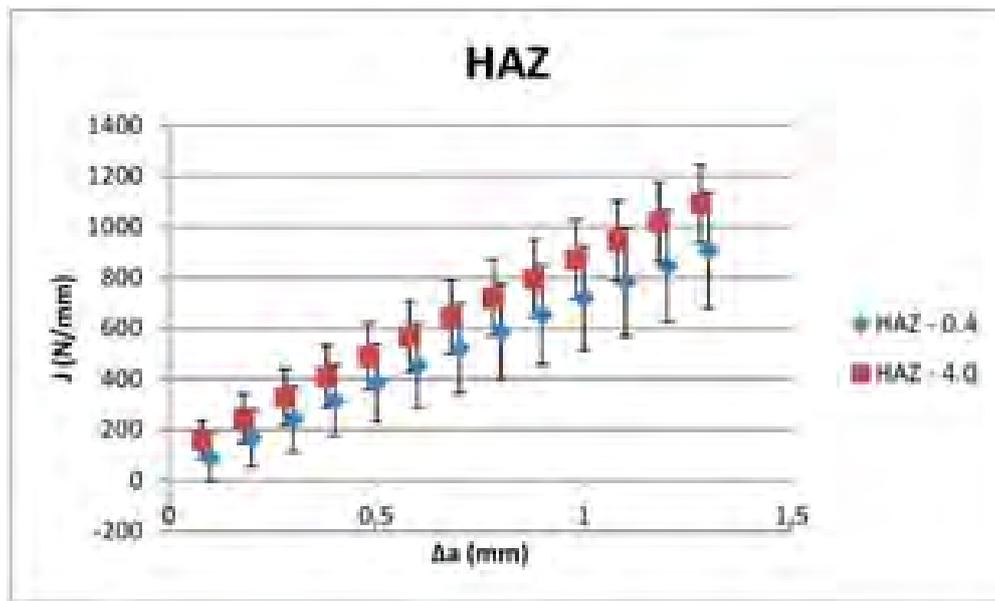


Figura 7. Confronto tra le J-R curve per la HAZ ottenute a differenti velocità di prova in condizioni "sour"

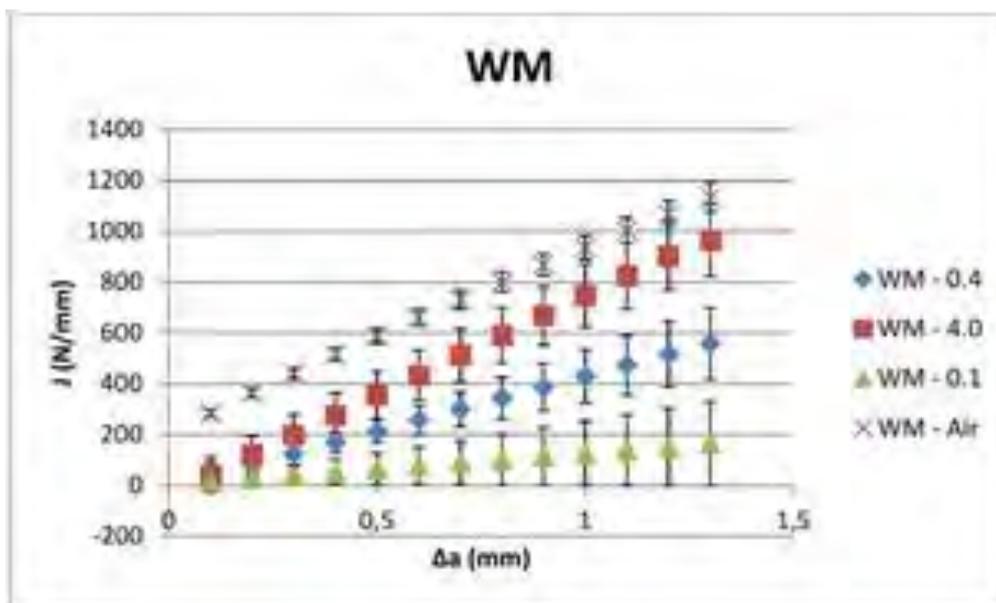


Figura 8. Confronto tra le J-R curve per il WM ottenute a differenti velocità di prova in condizioni "sour" e in aria

L'effetto combinato dell'ambiente acido e delle diverse velocità di prova è evidente: più alta è la velocità più i dati sono vicini alle curve "in aria".

Gli effetti rilevanti associati al precarico e alla prova in condizioni "sour" sono:

- l'aumento della dispersione dei dati rispetto alle curve "in aria" (almeno due volte);
- per tutti i campioni "in condizioni sour" J è quasi 0 nella prima parte della curva di propagazione (Δa da 0 a $\approx 0,1$ mm).

Nel caso di SENT di grandi dimensioni come quelle testate, l'effetto delle tensioni residue diventa rilevante per i campioni sottoposti a precarico per una settimana. Durante i primi test che abbiamo effettuato all'inizio della fase di prequalifica, abbiamo notato una certa propagazione spontanea della cricca dopo pochi giorni di precarico a 150MPa. Le

successive misurazioni dello stress residuo hanno evidenziato che la lavorazione per la preparazione dei campioni e il pre-carico allo 0,4% hanno solo mitigato il loro valore.

5. Conclusioni

I test di meccanica della frattura effettuati in condizioni "sour" (in presenza di H₂S) dopo un periodo di pre-carica in soluzione H₂S sembrano fornire risultati più vicini al comportamento reale del materiale nell'applicazione.

Una procedura di prova dedicata e un'apparecchiatura specifica sono stati progettati e caratterizzati per garantire risultati affidabili che possono essere utilizzati per analisi FFS / ECA.

I dati sperimentali mostrano un effetto significativo del tipo di ambiente e della velocità di prova adottati durante la caratterizzazione a meccanica della frattura dei materiali esaminati.

6. Bibliografia

[1] API, API5L "Specification for Pipe Line"

[2] DNV, DNVGL-RP-F108 "Assessment of Flaws in Pipeline and Riser Girth Welds"

La gestione dell'ageing negli stabilimenti Seveso nazionali: analisi di incidenti e buone pratiche ispettive

R. Marrazzo, F. Vazzana

VAL-RTEC - Ispra

Sommario

Tra gli obblighi per gli stabilimenti industriali soggetti al D.Lgs. 105/2015, è prevista la predisposizione di un piano per il monitoraggio e controllo dei rischi legati all'“ageing”, di attrezzature e sistemi, che possono portare ad una perdita di contenimento di sostanze pericolose.

Partendo da alcuni incidenti industriali, sono fornite le risultanze dell'analisi, essendo stati indentificati, quali cause significative, meccanismi legati all'ageing. Viene presentata una panoramica circa gli standard e linee guida concernenti la tematica, focalizzando l'attenzione sul ruolo della Pubblica Amministrazione nelle attività di indirizzo nel controllo di tali rischi. Sono proposte descrizioni delle metodologie implementate, da parte delle aziende, mediante specifiche procedure di “asset integrity management”, con focus sulle buone pratiche per la valutazione della risposta alla questione dell'ageing.

Il paper descrive le principali risultanze delle ispezioni sul SGS, con particolare riferimento alle criticità emerse circa la problematica dell'ageing e dell'asset integrity di installazioni industriali (rischi, per perdite di contenimento, legati a deterioramento e degradazione causati da corrosione, erosione, stress, fatica).

Gli impianti industriali sono soggetti a fenomeni di degradazione in base agli stress cui sono sottoposti, oltre che agli effetti di modifiche operative, ragion per cui è utile conoscere i tassi di decadimento delle prestazioni per programmare la manutenzione, ed identificare i NDT più adatti. Gioca un ruolo la corretta implementazione del SGS, che prevede che ogni attrezzatura sia soggetta a programmi di controllo, per assicurare la continuità operativa in sicurezza, potendo costituire le metodologie RBI e FFS una valida risposta in tal senso.

1. Introduzione

Tra i vari obblighi per i gestori di stabilimenti industriali soggetti al D.Lgs. 105/2015, implementazione italiana della direttiva 2012/18/EU (c.d. Seveso III), è prevista la predisposizione di un piano per il monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento (c.d. “ageing”), di attrezzature e sistemi, che possono portare ad una perdita di contenimento di sostanze pericolose, incluse le necessarie misure di prevenzione e protezione.

Va infatti notato che il concetto del controllo dei rischi legati all'invecchiamento è ben specificato, nel dettato normativo, essendo citato a più riprese nel D.Lgs. 105/2015:

- Allegato 3 (informazioni relative al SGS-PIR). Tra gli elementi di cui tener conto ai fini dell'attuazione del SGS sono trattati gli aspetti del controllo operativo: ... (omissis) monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento delle attrezzature installate nello stabilimento e alla corrosione... (omissis);
- Allegato B (LG per attuazione del SGS-PIR). Tra i contenuti tecnici del SGS, elemento fondamentale è il controllo operativo: ... (omissis) Devono, inoltre, essere previsti piani di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento (corrosione, erosione, fatica, scorrimento viscoso) di apparecchiature e impianti che possono portare alla perdita di contenimento di sostanze pericolose, comprese le necessarie misure correttive e preventive... (omissis);

- Allegato H (Criteri per svolgimento ispezioni). È previsto uno specifico punto di verifica, inerente alla tematica, nelle Liste di riscontro per ispezioni SGS-PIR (punto 4.i “Controllo Operativo”).

2. Incidenti industriali e invecchiamento impianti

L'analisi di alcuni eventi incidentali industriali, occorsi di recente presso stabilimenti chimici e petrolchimici nazionali, ha evidenziato come i meccanismi di ageing siano stati identificati quali cause significative, in termini di fattori tecnici e gestionali correlati al controllo operativo del SGS. I contenuti dell'analisi sono sintetizzati nel seguito:

- Raffineria, 30/04/2006 “Incendi ed esplosioni in tubazioni” (Figura 1). Descrizione: Rilascio di greggio da tubazione di trasferimento nel sottopassaggio della strada che attraversa lo stabilimento. Sviluppo incendio da innesco accidentale con coinvolgimento di tubazioni di altri gestori e successive esplosioni (effetto domino) - Cause: Età (più di 25 anni) e stato di conservazione della tubazione (fenomeni di corrosione progressiva) - Azioni intraprese: Ispezioni visive e progettazione azioni correttive. Necessità di attività di ricostruzione - Azioni previste/programmate: Analisi di rischio specifiche. Richieste di AA.CC. (Autorità Competenti) in seguito a istruttoria. Revisione del piano di ispezione e controllo tubazioni.



Figura 1. Il rack della pipeline a seguito dell'evento

- Raffineria, 01/05/2006 “Perdita da fondo serbatoio” (Figura 2). Descrizione: Fuoriuscita di greggio da lesione sul fondo di serbatoio a tetto galleggiante e conseguente rilascio all'interno del bacino di contenimento - Cause: Elevata corrosione e area deteriorata - Azioni intraprese: Isolamento del serbatoio. Trasferimento di prodotto in altro serbatoio mediante tubazione temporanea - Azioni previste/programmate: Serbatoio fuori servizio. Ripristino e manutenzione bacino e serbatoio. Inserimento doppio fondo su serbatoio.



Figura 2. Perdita a seguito di rottura del fondo serbatoio

- Impianto Chimico, 25/05/2017 “Rilascio H₂SO₄ da tubazione sotterranea di alimentazione”. Descrizione: Danno accidentale di tubazione di H₂SO₄ (acido solforico), che connette il parco stoccaggi (n. 6 Serbatoi fuori terra) con un serbatoio interrato. Rilascio di H₂SO₄ nel canale interrato. Cedimento strutturale di uno dei serbatoi e rotazione relativa del bacino di contenimento - Cause: Perdita di H₂SO₄ che penetra nel sottosuolo da tubazione. Avanzata corrosione in sezione di condotta non accessibile ai controlli. Supposta durata del rilascio di c.a. 40 gg. (c.a. 45 t di H₂SO₄ rilasciato) - Azioni intraprese: Serbatoio di H₂SO₄ svuotato del prodotto. Linea di alimentazione intercettata e serbatoio isolato. Monitoraggio e verifica strutture. Muro di contenimento perimetrale del bacino rinforzato, per assicurarne la tenuta - Azioni previste/programmate: Programmata manutenzione e monitoraggio corrosione sui serbatoi di H₂SO₄ e sulle tubazioni di carico, con calcolo dei ratei di corrosione sul breve e lungo termine e della vita residua (nuova procedura).
- Raffineria, 07/03/2018 “Presenza di gasolio in piezometri vicino serbatoio di stoccaggio”. Descrizione: A seguito di campionamento su 2 piezometri presso serbatoio di stoccaggio gasolio, rinvenuta presenza di surnatante (idrocarburico) dello stesso tipo. Rilascio di c.a. 1000 mc nel sottosuolo - Cause: Perdita da serbatoio di stoccaggio per corrosione sul fondo singolo, sebbene interessato da manutenzione sul fondo nei 2 anni precedenti (lamiere sovrapposte sul fondo esistente) - Azioni intraprese: Trincea drenante a nord della vasca e messa in servizio di nuovi piezometri. Aggiornamento del protocollo operativo per il monitoraggio idrochimico e piezometrico delle acque sotterranee - Azioni previste/programmate: Doppio fondo per tutti i serbatoi a fondo singolo con prodotti idrocarburici (funzione viscosità). Revisione programma di gestione invecchiamento serbatoi.

Da quanto su indicato si evince come i meccanismi di ageing rappresentino una potenziale causa di incidenti industriali. L'analisi dei fattori tecnici e organizzativi di tali eventi evidenzia infatti problemi di “asset integrity” delle installazioni pericolose, consistenti, fondamentalmente, in deterioramento e degrado causati da corrosione, erosione, fatica, ecc. Le azioni correttive identificate, predisposte a cura delle AA.CC. e dei gestori, sono consistite in: modifiche del PEI (Piano di Emergenza Interna), investigazione post evento e analisi di rischio, controlli su installazioni ed impianti (tubazioni, serbatoi, bacini, ecc.). In connessione a tali azioni, l'industria ha implementato una serie di metodi per valutare la risposta al problema dell'ageing, che si sono tradotti in attività di ripristino e manutenzione, aggiornamento di procedure e istruzioni operative, pianificazione specifica per elementi tecnici critici per la prevenzione degli incidenti rilevanti.

3. Riferimenti normativi, standard nazionali e linee guida

Oltre a quanto già esplicitato circa la specificazione, nel D.Lgs. 105/2015, del concetto del controllo dei rischi legati all'invecchiamento, si evidenzia l'esistenza di un corpus normativo importante, tra cui:

- Standard nazionali per l'implementazione del SGS, identificati quale “stato dell'arte” nel D.Lgs.105/2015: UNI 10617 “Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Requisiti essenziali”; UNI 10616 “Impianti a rischio di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Linee guida per l'attuazione della UNI 10617”; UNI 10672 “Impianti di processo a rischio di incidente rilevante. Procedure di garanzia della sicurezza nella progettazione”; UNI 11226 “Impianti a rischio di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Parte 1 e Parte 2 (audit)”.
- Standard europei quali la norma UNI EN 16991 “Quadro di riferimento per le ispezioni basate sul rischio”.

- Standard tecnici per attrezzature in pressione e metodologie di ispezione e controllo: UNI/TS 11325-8 “Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 8: Pianificazione delle manutenzioni su attrezzature a pressione attraverso metodologie basate sulla valutazione del rischio (RBI)”; UNI/TS 11325-9 “Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 9: Idoneità al servizio (Fitness For Service)”; API RP 581 “Risk-Based Inspection Technology”; API 579 1/ASME FFS-1 “Fitness for service assessment standard”; EEMUA 159 “Above ground flat bottomed storage tanks. A guide to inspection, maintenance and repair”.
- LLGG, emesse nell’ambito del Coordinamento per l’uniforme applicazione sul territorio nazionale (art. 11 D.lgs. 105/2015) “Valutazione sintetica dell’adeguatezza del programma di gestione dell’invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso” [1]. Esse rappresentano uno strumento pratico per verificare che il gestore di stabilimenti Seveso abbia predisposto i piani di monitoraggio e controllo dei rischi di invecchiamento. È un metodo basato sull’attribuzione di penalità e compensazioni, che propone al gestore la scelta tra diverse misure di controllo da adottare in proporzione alla propensione all’invecchiamento risultante. Può essere utilizzato autonomamente dal gestore, anche ai fini di verifica/controllo/conferma delle metodologie già in utilizzo in stabilimento [2; 3].

4. L’esempio del sistema di contenimento primario quale possibile approccio alle buone pratiche

Adeguate premessa da fare riguarda i requisiti base per l’attuazione degli standard manutentivi, accennati in precedenza, tenendo conto del fatto che differenti “asset” di stabilimento possono essere soggetti a fenomeni di invecchiamento, ed in particolare [4]: Sistemi di contenimento primari; Misure di controllo e mitigazione (barriere); Sistemi di controllo elettrico e strumentale; Strutture.

Il controllo operativo di stabilimento prevede, nell’ambito dell’attuazione del SGS, procedure ed istruzioni operative che costituiscono la base per la scelta di uno specifico piano di ispezione e controllo di attrezzature e linee critiche, la cui identificazione discende da una corretta analisi dei rischi. Gli adeguati regimi manutentivi che ne discenderanno vanno attuati in relazione a politiche di manutenzione basate sul rischio (RBM – Risk Based Maintenance), il cui fine è consentire la riduzione dei rischi di perdita di contenimento di sostanze pericolose da elementi tecnici critici per la prevenzione degli incidenti rilevanti.

In tale ottica va inquadrato il concetto di invecchiamento, che si rammenta non essere connesso all’età dell’apparecchiatura, bensì alle modifiche che la stessa ha subito nel tempo, in termini di grado di deterioramento e/o di danno subito. Tali fattori comportano una maggiore probabilità che si verifichino guasti nel tempo di vita (di servizio) dell’apparecchiatura, ma non sono necessariamente associati ad esso. Nel caso di apparecchiature o impianti, l’invecchiamento può comportare un significativo deterioramento e/o danno rispetto alle sue condizioni iniziali, che può comprometterne la funzionalità, disponibilità, affidabilità e sicurezza [5]. È giusto il caso di rammentare, a tal riguardo, la classica rappresentazione della variazione del rateo di guasto, per una apparecchiatura, mediante la “curva a vasca da bagno” (Figura 3), che riporta le tipiche quattro fasi della “vita” della stessa apparecchiatura (invecchiamento progressivo) [6].

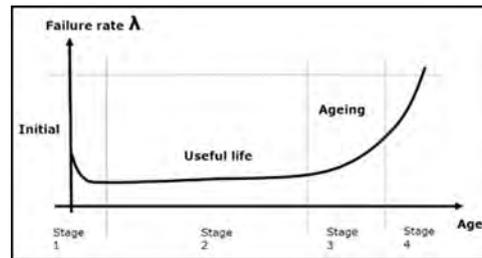


Figura 3. Probabilità di guasto di una popolazione di apparecchiature

Per quanto concerne il controllo dell'integrità meccanica, si riporta nel seguito un utile riferimento per un possibile approccio alla buona pratica manutentiva, avendo come esempio il caso del sistema di contenimento primario in uno stabilimento Seveso. Gli step previsti sono:

- Definire i meccanismi di degradazione, in base a tipologia serbatoi, natura dei fluidi stoccati, ecc., differenziando tra corrosione e meccanismi non legati a corrosione.
- Definire e personalizzare le tecniche di ispezione, in aggiunta alle già previste ispezioni interne e esterne, che saranno di tipo NDT (Non Destructive Test), quali: Liquidi penetranti; Magnetoscopia; Vacuum box; Ultrasuoni (lungo raggio); Scintilla (spark test); Emissioni acustiche.
- Determinare la frequenza delle ispezioni, in base a: Caratteristiche costruttive; Tecniche di riparazione e materiali; Natura del prodotto stoccato; Condizioni precedente ispezione; Ratei corrosione; Presenza sistemi di prevenzione corrosione; Potenziale contaminazione suolo, acqua, aria; Presenza doppi fondi o altri sistemi; Sistemi di rilevazione perdite con serbatoi in servizio.

È importante che venga programmato un piano di manutenzione "mirata", secondo i dettami della già citata RBM, seguendo metodologie di approccio che ben si prestano ad essere integrate nella struttura di un SGS già implementato ed attuato. Tra queste si ricordano: il metodo RBI (Risk Based Inspection), che consente l'attuazione di specifiche attività di ispezione in base alle effettive condizioni di funzionamento di apparecchiature ed impianti; il metodo FFS (Fitness for service), mediante il quale è possibile mantenere in servizio, con adeguato monitoraggio, apparecchiature ed impianti che presentano un degrado strutturale. Va da ultimo sottolineato un aspetto rilevante, ovvero la ricaduta degli effetti della gestione delle modifiche, cui è tipicamente soggetto uno stabilimento Seveso, sulla valutazione dell'ageing e della relativa gestione dell'asset integrity. È infatti da considerare la reale difficoltà nell'identificare nuovi rischi di corrosione, in caso di modifiche a impianti e processi, tendendo a sottostimare l'effettivo impatto di queste stesse su tali meccanismi di degrado, soprattutto in casi "temporanei". Ai fini di dare una idea di quali potrebbero essere delle tipiche attività di modifica, relativamente ai sistemi di contenimento primari, su cui porre l'attenzione nella valutazione delle problematiche di ageing, si evidenziano:

- Inserimento di ugelli aggiuntivi / modifica esistenti
- Installazione agitatore su vessel esistente
- Aumento / diminuzione capacità serbatoio
- Modifica condizioni di processo
- Retrofitting serpentine riscaldamento
- Installazione/rimozione isolamento esterno

È quindi necessario tenere traccia della storia operativa e dei relativi problemi emersi, durante le attività di modifica condotte, in termini di ore di lavoro, cicli di carico/scarico, escursioni operative, modifiche condizioni e processi, ecc.

5. L'analisi delle ispezioni sul SGS

Viene di seguito fornita una analisi delle principali risultanze, lezioni apprese e ritorno di esperienza delle ispezioni sul SGS, condotte ai sensi dell'art. 27 del D.Lgs. 105/2015 negli ultimi 3 anni su base nazionale. È stato in particolare svolto un esame di c.a. 160 rapporti finali di ispezione che ha portato ad evidenziare, in c.a. il 20% dei casi, problemi di corretta gestione della integrità meccanica di impianti ed attrezzature. Sono infatti emerse criticità e non conformità gestionali, che hanno comportato la emissione di raccomandazioni/prescrizioni, con specifico riferimento ai rischi legati all'invecchiamento e asset integrity di installazioni pericolose ispezionate.

Tra le non conformità suddette, si riportano le principali:

- Considerare ed analizzare le problematiche legate all'ageing di attrezzature ed installazioni, che possono portare a perdita di sostanze pericolose, includendo uno specifico piano di monitoraggio e controllo e le conseguenti misure correttive e preventive.
- Nessuna evidenza di piano di monitoraggio dei rischi legati all'invecchiamento, a meno degli obblighi cogenti.
- Procedura di asset integrity management presente ma parzialmente implementata (nessuna evidenza).
- Mancanza di una procedura specifica, che preveda i seguenti aspetti: Analisi dei meccanismi di degradazione possibili, con valutazione dei tempi di vita di impianti/apparecchiature; Piano di monitoraggio fisso o variabile nel tempo e tecniche relative; Azioni preventive e correttive in essere/da implementare.

6. Conclusioni

Risulta evidente che gli impianti degli stabilimenti industriali sono soggetti a fenomeni di degradazione in base agli stress statici/dinamici cui sono sottoposti, oltre che agli effetti di modifiche operative, ragion per cui è utile conoscere i tassi di decadimento delle prestazioni per programmare adeguate attività di manutenzione. Il Gestore deve in particolare considerare le variazioni che le attrezzature subiscono, nel tempo, per capirne i meccanismi di deterioramento e degrado, così da identificare i NDT più adatti per la valutazione dello stato di danno. Scopo della gestione delle attività manutentive è infatti controllare e mantenere i rischi a livelli accettabili, assicurando continuità operativa e condizioni di stabilità per prevenire perdite di contenimento di sostanze pericolose.

Gioca un ruolo considerevole la corretta implementazione del SGS, che prevede che ogni attrezzatura sia soggetta a programmi di controllo, pianificati al fine di assicurare la continuità operativa in sicurezza: compito del Gestore è la formalizzazione di criteri specifici per la definizione dei regimi manutentivi più adatti. È infatti importante stabilire una strategia chiara, valida per l'intero ciclo di vita degli impianti, considerata anche la particolare rilevanza su siti caratterizzati dalla presenza di sostanze pericolose per via delle conseguenze in caso di perdita di integrità. In tal senso, le metodologie RBI e FFS possono costituire una valida risposta nella gestione delle problematiche di asset integrity e delle relative correlazione con i fenomeni di ageing.

7. Bibliografia

[1] MATTM. (2018, aprile). Valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso. Coordinamento per l'uniforme applicazione sul territorio nazionale di cui all'art. 11 del decreto legislativo 26 Giugno 2015 n. 105

https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/rischio_industriale/ValutazioneInvecchiamento_finale.pdf).

[2] Bragatto, P. and Milazzo, M.F. (2016, settembre). "Risk due to the Ageing of Equipment: Assessment and Management", Chemical Engineering Transactions 53 (2016), 253-258.

[3] Milazzo, M.F. and Bragatto, P. (2019, marzo). "A framework addressing a safe ageing management in complex industrial sites: The Italian experience in «Seveso» establishments", Journal of Loss Prevention in the Process Industries 58 (2019), 70-81.

[4] HSE. (2010, novembre). "Plant ageing - Management of equipment containing hazardous fluids or pressure". Research Report RR509. Health & Safety Executive, London UK.

[5] OECD. (2017, marzo). AGEING OF HAZARDOUS INSTALLATIONS. Series on Chemical Accidents No. 29. ENV/JM/MONO(2017)9.

[6] HSE. (2010, agosto). "Plant Ageing Study – A Summary Guide". Research Report RR823. Health & Safety Executive, London UK.

L'approccio gestionale al problema "invecchiamento" negli stabilimenti Seveso

P. Bragatto¹, E. Bemporad¹, C. Delle Site¹, A. Pirone¹, M.R. Vallerotonda¹, F. Bellamino², T. Vairo³, M.F. Milazzo⁴

¹ Inail – Dit

² Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte Torino

³ Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Ligure Genova

⁴ Dipartimento di Ingegneria - Università di Messina

Sommario

La direttiva 2012/18/EU (Seveso III), recepita con il D.Lgs 105/15, pone particolare attenzione sui rischi connessi all'invecchiamento degli impianti. Fin dal 2018, l'Italia si è dotata di uno strumento operativo, sviluppato, nell'ambito del coordinamento ex art. 11 del D.Lgs 105/15, sviluppato da un gruppo di lavoro trans-istituzionale e pubblicato dall'allora MATTM (oggi MTE). Il metodo viene utilizzato da circa tre anni nelle visite ispettive ex art. 27 del D.Lgs. 105/15, per verificare l'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento dei sistemi critici. Il metodo è noto come AFB (ageing fish bone) essendo appunto basato sul classico schema "fishbone". AFB considera tutti i fattori che, positivamente o negativamente, contribuiscono all'invecchiamento, sia quelli fisici (meccanismi di danno, guasti e riparazioni, protezioni attive e passive, controlli e verifiche periodiche, etc.) sia quelli organizzativi (conoscenza dei meccanismi, valutazione dei rischi, gestione delle competenze, programmazione, etc.). Nel 2021 è stata rilasciata una nuova versione, che tiene conto dell'esperienza acquisita in tre anni e dei suggerimenti degli ispettori, aggiornando il modello senza cambiare l'approccio di base. La prima versione riguardava i soli sistemi di contenimento statico, la nuova versione include anche i sistemi dinamici (pompe e compressori). Questo lavoro discute le motivazioni dell'approccio integrato adottato nel metodo AFB, confrontandolo con quelli seguiti nel contesto europeo. Sono analizzate le novità introdotte nella nuova versione per superare i limiti riscontrati nei primi tre anni di utilizzo dello strumento operativo.

1. Introduzione

I rischi connessi all'invecchiamento degli impianti di processo è una questione ben presente nella teoria e pratica del settore Seveso da circa venti anni. Volendo fare un po' di storia si dovrebbe partire dai primi documenti sulla "Risk Based Inspection" RBI dell'American Petroleum Institute, pubblicati a partire dal 2002. Le norme API, nel loro insieme, costituiscono la prima sintesi fra la ricerca nel campo della scienza della corrosione e l'esperienza pratica e organizzativa negli impianti produttivi [1]. L'approccio RBI è, ancora adesso, nelle diverse possibili declinazioni, alla base delle soluzioni adottate per prolungare in sicurezza la vita utile dei sistemi di contenimento primari. Il termine "invecchiamento" non è presente nell'API ma, nell'ambito Seveso, si fa risalire ad un famoso workshop ESREDA presso il JRC di Ispra, che produsse un report [2], ritenuto ancora oggi fondamentale per definire terminologia e ambiti di applicazione, poi adottati da tutti. Seguendo le definizioni ESREDA si distinguono tre tipi di effetto che il tempo può avere sugli impianti. Il primo è sicuramente il deterioramento fisico dei materiali che ne diminuisce le caratteristiche funzionali e favorisce guasti e rotture. Il secondo effetto è quello dell'obsolescenza per cui le attrezzature, anche se integre, non sono più adeguate essendo cambiato il contesto (e.g.

incompatibilità con i nuovi standard, la mancanza di parti di ricambio). Il terzo effetto non colpisce i sistemi fisici, ma la parte immateriale: procedure, modelli organizzativi e competenze che, se non aggiornate opportunamente, possono non essere appropriati per le nuove esigenze. Nel presente lavoro l'attenzione è tutta sul primo effetto, il deterioramento fisico. Nel paragrafo 2 si discute di come la questione sia stata affrontata nei paesi che hanno recepito la direttiva Seveso III. Il paragrafo 3 è tutto dedicato al metodo AFB (ageing fish-bone) adottato in Italia fin dal 2018. Nel paragrafo 4 si tratta di come i punti di debolezza riscontrati nei primi tre anni di applicazione del metodo siano stati superati da una nuova versione AFB 2.0. Il quinto paragrafo è sugli sviluppi futuri, in una prospettiva di transizione ecologica.

2. Breve panoramica del contesto europeo

La Direttiva Seveso III, pubblicata nel 2012, poneva l'attenzione sulla necessità di integrare nel sistema di gestione della sicurezza attività pianificate per controllare i pericoli dovuti alla corrosione e, più in generale, all'invecchiamento degli impianti. La Direttiva non dava indicazioni dettagliate su come verificare in sede ispettiva l'adeguatezza di questi piani, lasciando ai singoli stati la libertà di implementare i controlli con le modalità più opportune. La questione "invecchiamento" investe vari aspetti della gestione della sicurezza, fra cui la conoscenza dettagliata dei processi chimico-fisici (ed eventualmente biologici) che possono portare al danneggiamento dei materiali, i metodi e le tecnologie di ispezione, le strategie di manutenzione, la gestione di modifiche e documentazione tecniche. I processi di deterioramento possono avere caratteristiche diverse in funzione dei vari settori industriali, come pure i tempi di vita attesa degli impianti.

In Italia ha sempre avuto grande importanza la filiera della raffinazione, che comporta per le attrezzature condizioni di esercizio piuttosto severe. Questo, unitamente all'età media degli impianti, fa sì che il problema "invecchiamento" venga ritenuto prioritario sia dall'industria che dalle autorità. La questione "invecchiamento" è riconosciuta da tempo come una delle maggiori criticità del settore Seveso in tutta Europa. In quasi tutti i paesi si è ripetuta la storia verificatasi in Italia: la maggior parte dei grandi impianti chimici e petroliferi in esercizio sono stati costruiti fra gli anni sessanta e gli anni settanta. Negli anni successivi i grandi investimenti impiantistici sono diventati sempre più difficili. Per questo, molti degli impianti oggi in esercizio hanno oltre cinquanta anni di vita alle spalle. I dati dei vari paesi non cambiano di molto e si stima che almeno un terzo degli incidenti che si verificano negli impianti di processo europei siano dovuti al deterioramento degli impianti e alla gestione inadeguata dell'invecchiamento [2]. L'attenzione da parte delle autorità nazionali cominciò nei primi anni duemila con i primi documenti delle autorità britannica [4] e francese [5] e poi con gli studi della commissione europea [6] e dello OECD [7] e dei Paesi Bassi [8], che evidenziavano come la corrosione e le altre forme di deterioramento fossero causa di numerosi incidenti occorsi a partire dal 2000 negli impianti chimici e nelle raffinerie. Nel Regno Unito l'autorità competente per la normativa Seveso ha anche sviluppato strumenti operativi, a vantaggio sia dei gestori di stabilimento che degli ispettori¹.

A livello sovra nazionale il MAHB/JRC/EU ha messo a punto i CIC "common inspection criteria" sulla manutenzione dei sistemi primari di contenimento². Non si tratta di uno standard, ma di una serie di indicazioni utili per condurre efficaci ispezioni sulla gestione dell'integrità degli impianti, argomento che si sovrappone in parte alla gestione dell'invecchiamento. I CIC sono comunque compatibili con AFB. Un ulteriore riferimento

¹ www.hse.gov.uk/comah/guidance/mechanical-integrity-delivery-guide.pdf

²

minerva.jrc.ec.europa.eu/en/shorturl/minerva/cicmaintenance_of_primary_containment_systemsfor_matedfinalv2

per la valutazione della gestione dell'invecchiamento per i serbatoi di stoccaggio è la linea guida dell' Energy Institute³.

3. La prima linea guida italiana

La risposta italiana alle indicazioni della Direttiva 2012/18/UE è stata molto concreta ed operativa. La legislazione nazionale di recepimento, il D.Lgs. 105/2015, che riporta fedelmente il testo della Direttiva, richiede al gestore di predisporre un piano per controllare il pericolo "invecchiamento" (allegato B art. 14), inoltre, nella lista di riscontro per le ispezioni (allegato H, appendice 3) esplicita l'obbligo per le commissioni ispettive di verificare l'adeguatezza di tale piano. Il coordinamento per l'uniforma applicazione della Seveso III, istituito dal citato decreto all' art. 11, ritenne necessario fornire alle commissioni ispettive un metodo pratico per verificare l'adeguatezza della gestione dell'invecchiamento, assicurando risultati attendibili senza allungare i tempi delle ispezioni, né appesantire i compiti assegnati ai gestori. Il gruppo di lavoro partì da una ricerca di INAIL e Università di Messina, che aveva sviluppato un metodo di tipo "fishbone" per pesare i diversi fattori che potevano accelerare o rallentare l'invecchiamento delle attrezzature [9]. Chiavi di successo del metodo furono l'uso di criteri semplici che permisero di arrivare ad una sintesi condivisa e, soprattutto, la capacità di mettere assieme nella valutazione sia fattori fisico-chimici che fattori organizzativo-gestionali.

Il metodo consiste in una serie di moduli da compilare (6 per i fattori che accelerano l'invecchiamento e 6 per quelli che lo rallentano) con dati e valutazioni quantitative basate su evidenze verificabili. In qualsiasi stabilimento Seveso ben organizzato i dati richiesti sono facilmente disponibili, ma spesso gestiti in modo separato fra i diversi reparti, in particolare relativamente ai reparti manutenzione e HSE (salute sicurezza e ambiente). Per una gestione efficace dell'invecchiamento è essenziale che all'interno del sistema di gestione della sicurezza, che di solito fa capo al HSE, vi sia un coinvolgimento molto stretto e continuo del reparto manutenzione e in particolare dell'unità per le ispezioni di integrità.

Il lavoro per lo sviluppo del metodo durò quasi due anni, coinvolgendo le organizzazioni datoriali (Federchimica, Assogasliquidi, Unione Petrolifera) così da assicurare che il metodo fosse veramente applicabile. Il contributo accademico ha assicurato un ponte continuo con la ricerca scientifica sull'argomento e in particolare con i progetti finanziati da INAIL sull'argomento. Il metodo è stato pubblicato ad aprile 2018⁴ ed utilizzato con una regolarità a partire dalla campagna ispettiva 2018-19 per gli stabilimenti di soglia superiore. Nella prima fase è stato mantenuto un carattere "sperimentale" e non cogente, ma in breve si è affermato come unico metodo applicabile nei ristretti vincoli di tempo e risorse imposte dalle visite ispettive. Nella prima versione il metodo era applicabile ai sistemi di contenimento primario, critici ai fini Seveso. In pratica si tratta di tutti i recipienti in pressione e i serbatoi atmosferici contenenti sostanze pericolose, la cui rottura può produrre un incidente rilevante. Sono incluse anche le linee, sempre che il loro hold-up sia sufficiente a generare incidenti rilevanti. I fattori di invecchiamento sono legati alla vulnerabilità delle apparecchiature e alle loro condizioni effettive; mentre i fattori di longevità sono legati alla capacità di proteggere e recuperare le apparecchiature, gestire le informazioni e prevedere le condizioni future. Lo schema mostrato in Figura 1 rappresenta in una sola immagine tutto il metodo AFB facendo riferimento alla prima versione della linea guida. Nella parte superiore della figura sono

³ publishing.energyinst.org/topics/asset-integrity/guidance-on-assessing-and-managing-ageing-plant-at-bulk-liquid-storage-facilities

⁴

www.mite.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/rischio_industriale/ValutazioneInvecchiamento_fi_nale.pdf

riportati i fattori di invecchiamento o acceleranti (rosso), in quella inferiore i fattori di longevità o frenanti (verde). Alla base del metodo vi è il sistema di punteggio. I punteggi vanno da 1 a 4 per tutti i fattori. I fattori di invecchiamento hanno un peso negativo e i fattori di longevità hanno un peso positivo. Un equilibrio tra punteggio negativo e positivo è la condizione necessaria per avere una valutazione positiva del sistema di gestione dell'invecchiamento.

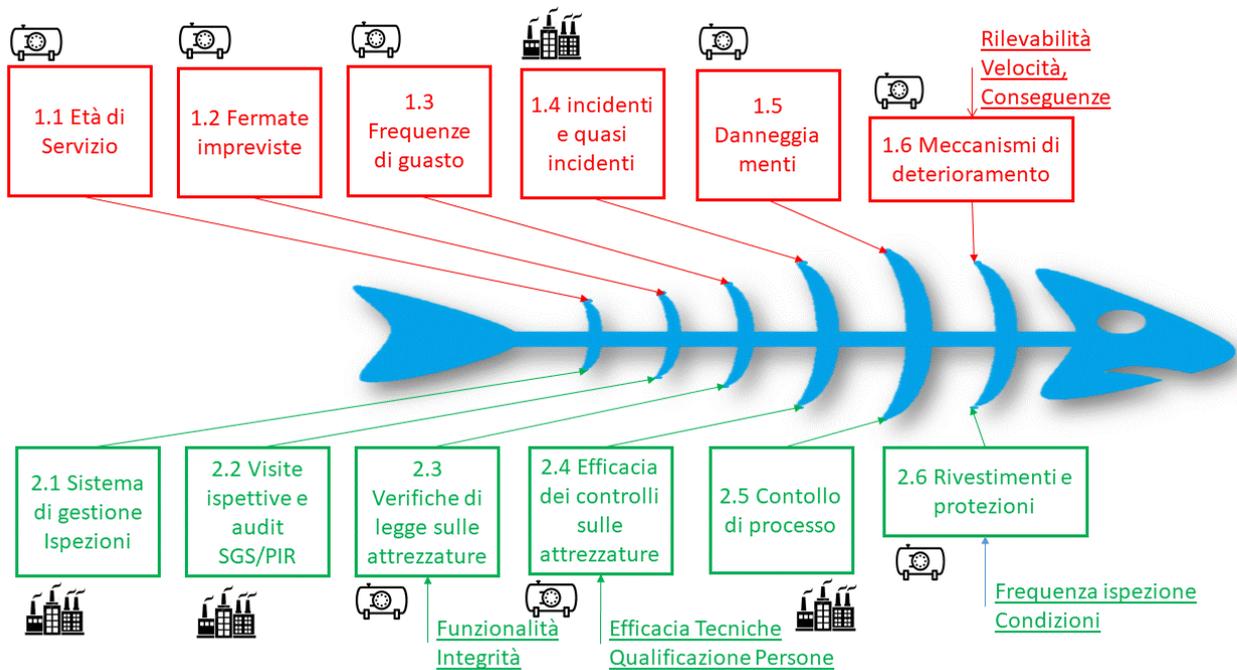


Figura 1. Il modello "fishbone" con i fattori che frenano e accelerano l'invecchiamento.

1 Fattori acceleranti (penalità) ζ	Metodo valutazione	2 Fattori frenanti (compensazioni) χ	Metodo valutazione
1 Età di servizio	ogni elemento critico	1 Sistema di gestione ispezioni	intero stabilimento
2 Fermate impreviste	ogni elemento critico	2 Visite ispettive e Audit SGS-PIR	intero stabilimento
3 Frequenze di guasto	ogni elemento critico	3 Verifiche di legge su attrezzature	ogni elemento critico
4 Incidenti e quasi incidenti	intero stabilimento	4 Efficacia delle ispezioni	ogni elemento critico
5 Danneggiamenti	ogni elemento critico	5 Controllo di processo	intero stabilimento
6 Meccanismi di deterioramento	ogni elemento critico	6 Rivestimenti e Protezioni	ogni elemento critico

Tabella 1. Fattori Acceleranti e Fattori Frenanti

La maggior parte dei fattori "fisici" è legata al materiale, ai parametri operativi e alle condizioni delle apparecchiature e la loro valutazione deve essere, di conseguenza, ripetuta per ogni singolo sistema di contenimento, ritenuto critico per il rilascio di sostanze pericolose. Per i fattori di tipo organizzativo, fra i quali il sistema di gestione delle ispezioni, le visite ispettive e gli standard per il controllo la valutazione va fatta invece una volta sola per l'intero stabilimento. Nella Tabella 1 si riportano tutti i fattori acceleranti e frenanti,

specificando se vanno valutati per ogni singolo elemento critico e mediati, oppure vanno valutati a livello di intero stabilimento. Nella Figura 1 due icone intuitive indicano quali fattori relativi ai singoli sistemi fisici e quali siano quelli relativi alla conoscenza, all'informazione e al comportamento, che hanno valenza per l'intero stabilimento. In questo articolo non c'è spazio per una discussione completa sui fattori, e si rimanda alle precedenti pubblicazioni per i dettagli [10]. In questa sede è importante evidenziare alcuni criteri seguiti, quali il ruolo degli standard e l'importanza dell'esperienza raccolta. L'adozione di standard riconosciuti e, in subordine, di buone pratiche riconosciute sono promosse assegnando punteggi più alti. I documenti idonei per la gestione dell'invecchiamento includono API 584 [11], API 581 [12], EEMUA 159 [13], ISO 55000 [14]. Anche l'adozione di standard riconosciuti per la qualificazione del personale addetto ai controlli (ISO 9712) [15] e per la sicurezza funzionale (IEC 61511) [16] danno luogo a premi nel calcolo dell'indice complessivo. Ove non disponibili standard o linee guida riconosciute, l'esperienza raccolta in oltre venti anni di applicazione sistematica della "Seveso" ha fornito i riferimenti per calibrare il metodo. Ai fini del calcolo i singoli fattori della Tabella 1 per l'invecchiamento (ζ_i), eccetto $i=4$ e per la longevità (χ_i), a parte $i=1, 2$ e 5 , andranno valutati su ogni elemento critico e mediati su tutti gli elementi. L'indice di longevità χ è la media dei fattori parziali di longevità χ_i delle stesse tabelle. L'indice totale (I_{total}) è la somma tra l'indice di longevità e l'indice di invecchiamento (negativo):

$$\zeta = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{i=6} \zeta_i \quad (1)$$

$$\chi = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{i=6} \chi_i \quad (2)$$

$$I_{total} = -abs(\zeta) + \chi \quad (3)$$

dove i rappresenta il numero dei fattori di invecchiamento/longevità.

Se l'indice totale è positivo gli ispettori SGS valutano positivamente la gestione dell'invecchiamento, altrimenti prescrivono l'adozione di ulteriori misure per il controllo dell'invecchiamento.

4. La seconda versione della linea guida

Il gruppo di lavoro non ha chiuso le attività con la prima pubblicazione, ma ha seguito le prime fasi di applicazione, cercando di raccogliere le difficoltà e le critiche degli ispettori sul campo, nonché i suggerimenti dei gestori. È nata così una versione 2.0 delle linee guida, rilasciata esattamente 3 anni dopo la prima versione⁵. La nuova versione mantiene lo schema originario del metodo AFB con i vari fattori e sub-fattori che concorrono, negativamente o positivamente, all'invecchiamento. Il presente capitolo discute le principali novità introdotte.

4.1 Estensione alle macchine rotanti

La novità principale è l'estensione ai sistemi dinamici non compresi nella prima versione. Negli impianti di processo i sistemi dinamici più importanti sono le macchine rotanti, le pompe e i compressori. Nelle macchine, a differenza di tubi e recipienti, le parti in movimento

5

vengono regolarmente controllate e sostituite e il concetto della vita utile residua perde di significato. I diversi punti del metodo AFB sono stati analizzati uno per uno, per capire come includere i sistemi dinamici. I fattori di tipo organizzativo-gestionale non sono discussi qui in quanto applicabili a tutti i tipi di apparecchiature. Le macchine rotanti e altri sistemi dinamici sono inclusi nell'analisi dei rischi e, in alcuni casi, sono considerati critici per incidenti rilevanti. Nell'esperienza industriale, una serie di incidenti è in realtà dovuta a guasti di macchine rotanti deteriorate. I sistemi dinamici devono essere distinti tra sistemi con parti fisse e mobili. Il deterioramento dei materiali può provocare fessurazioni, fori e rotture complete della parte fissa (cassa) con conseguenti perdite di contenimento, analogamente ai sistemi statici. Le macchine rotanti sono sottoposte a strategie di manutenzione predittiva e condizionale per garantire la massima disponibilità. Queste strategie richiedono la sostituzione delle parti consumabili e la prevenzione di guasti durante le operazioni, con conseguenti interruzioni nel funzionamento. Ove necessario, le macchine sono anche ridondanti per evitare che guasti o interventi di manutenzione mettano l'impianto fuori servizio per lungo tempo. Il regolare funzionamento dei sistemi dinamici è invece importante per i sistemi statici, che potrebbero risentire delle vibrazioni indotte.

4.2.1 Fattori acceleranti

Nelle macchine rotanti, la maggior parte dei danni è dovuta all'interazione tra il materiale e l'ambiente interno ed esterno con meccanismi simili a quelli che si verificano nei sistemi statici. I cicli meccanici e termici inducono fatica, che può portare a deformazioni plastiche o raggrinzimento delle superfici e contribuisce all'infragilimento e alla rottura delle parti. Impurità e turbolenza del fluido causano erosione e cavitazione. Ulteriori forme di deterioramento interessano in modo specifico parti in movimento o eventualmente parti fisse a diretto contatto con parti in movimento. Il contatto meccanico delle parti in movimento provoca usura, scheggiature, graffi, solchi e altre deformazioni.

Per i sistemi rotanti, a differenza dei sistemi statici, la sostituzione delle parti mobili usurate è sicuramente una pratica normale ed è necessaria un'attenta gestione del magazzino ricambi per garantire la massima disponibilità. L'unica parte sicuramente non sostituibile è l'involucro che può essere considerato simile ad un sistema statico. I danni registrati per le parti in movimento non sono direttamente rilevanti per l'invecchiamento, in quanto la loro sostituzione è inclusa nelle normali pratiche di manutenzione per i sistemi dinamici.

Le macchine rotanti sono soggette a strategie di manutenzione predittiva e basata sulle condizioni. Queste consentono all'operatore di ottimizzare tempestivamente la sostituzione delle parti sostituibili e di prevenire il verificarsi di guasti imprevisti, con conseguenti interruzioni dell'operatività. La ridondanza è un'ulteriore strategia per ridurre al minimo l'impatto delle fermate. Pertanto, gli arresti non pianificati non sono rilevanti per l'invecchiamento, poiché le macchine rotanti sono dotate di sicurezza automatizzata e non hanno effetti negativi sui materiali.

4.2.2 Fattori frenanti

Nella pratica industriale non esistono sistemi passivi o attivi contro la corrosione delle macchine rotanti. Il fattore protezione fisica non è quindi applicabile per pompe e compressori. Mentre la maggior parte delle normative nazionali obbliga a ispezioni periodiche di integrità per le apparecchiature di contenimento statico, le regole per le macchine sono molto diverse. Pertanto, anche l'applicazione del fattore risultati delle ispezioni perde di significato. A differenza delle apparecchiature statiche, la manutenzione dei macchinari e le ispezioni non sono affatto separabili. Per questo motivo le ispezioni di integrità non sono importanti per i sistemi dinamici in generale, ma lo sono per la cassa, come discusso nei paragrafi precedenti. In quei casi le tecniche di ispezione e, di conseguenza, i criteri di valutazione sono simili a quelli dei sistemi statici.

4.2.3 Monitoraggio

La buona gestione del macchinario rotante, con il frequente controllo delle condizioni, è un fattore essenziale per la sua longevità. Il monitoraggio continuo delle vibrazioni, in particolare, è una tecnica consolidata, applicata nella pratica industriale di raffinerie e impianti petrolchimici. Il monitoraggio, invece, mira a garantire condizioni operative regolari e a programmare le sostituzioni al momento opportuno. Il monitoraggio delle vibrazioni è una tecnologia collaudata da molti anni e molti articoli su questo argomento sono disponibili nella letteratura scientifica [17]. Molte raffinerie sono pronte a verificare lo stato di salute di pompe e compressori, elaborare i segnali acustici e prevedere la vita utile residua prevista RUL [18]. Pertanto, per i sistemi dinamici il monitoraggio dei macchinari secondo standard riconosciuti, come API 670 [19] costituisce la migliore tecnica possibile ed assicura il punteggio più alto nella valutazione del fattore 2.4 “efficacia dei controlli”.

Un adeguato monitoraggio di pompe e compressori evita di indurre vibrazioni indesiderate sulle tubazioni collegate, mentre un carico vibratorio eccessivo accelera il meccanismo di fatica, che a sua volta è sinergico con i meccanismi di corrosione.

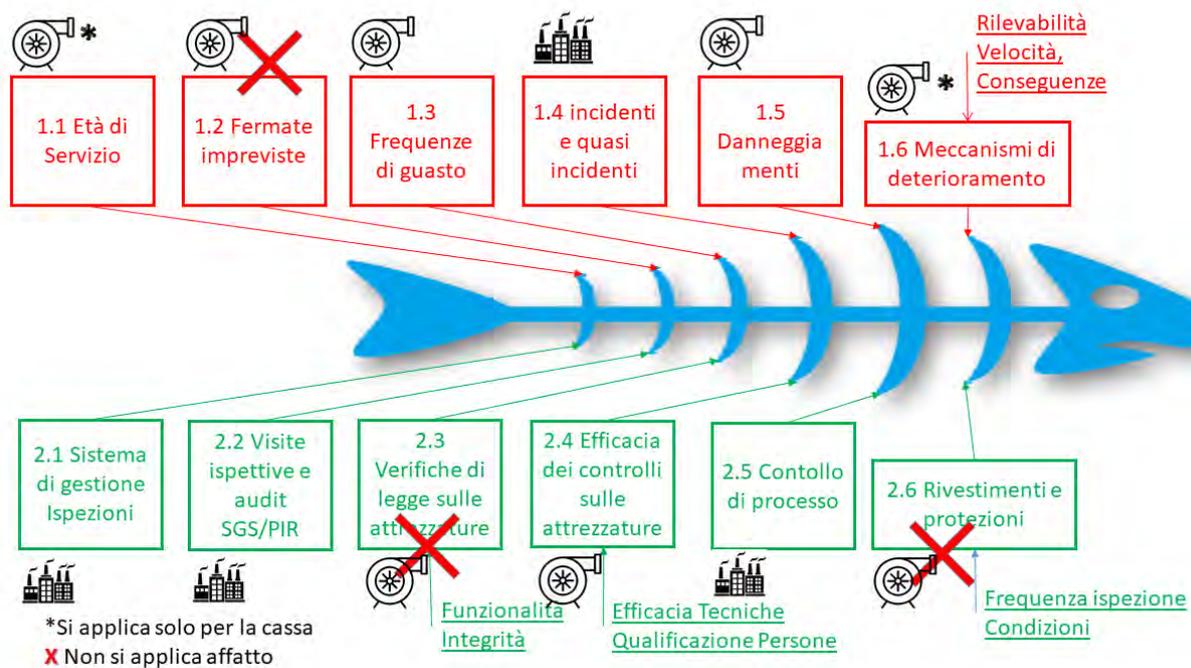


Figura 2. Modello Fishbone per la gestione dell'invecchiamento di sistemi statici e dinamici

4.2.4 Adattamento del metodo AFB alle macchine rotanti

La Figura 2 fornisce una rappresentazione del metodo, come modificato per le macchine rotanti in particolare. La discriminazione tra i fattori a livello di attrezzatura e a livello di stabilimento, mostrata nella Figura 2, è la stessa della versione originale. Sono stati considerati i soli fattori a livello di attrezzatura singola, che necessitavano di modifiche, per passare da sistemi statici a sistemi dinamici. In particolare fra i fattori acceleranti non è applicabile il fattore “fermate impreviste”, mentre per i fattori “età di servizio” e “meccanismi di deterioramento” si fa riferimento solo a quelli che coinvolgono la cassa, unica parte non soggetta a riparazioni e sostituzioni periodiche. Fra i fattori ritardanti non sono applicabili il fattore “verifiche di legge” ed il fattore “rivestimenti e protezioni”. I sistemi statici e dinamici richiedono strategie di controllo diverse, ma gli approcci non sono in conflitto e devono essere armonizzati nel piano generale per il controllo dell'invecchiamento. L'idea di

includere sia statico che dinamico nello stesso sistema di gestione è stata introdotta dal progetto RIMAP (Risk-Based Inspection and Maintenance for European Industries) [20] Il nuovo standard europeo per il quadro di ispezione basato sul rischio, EN 16991 [21], ha implementato il concetto RIMAP ed è la soluzione migliore per una gestione integrata di attrezzature e macchinari.

4.3 Miglioramenti del metodo

Nel corso dei tre anni di applicazione il gruppo di lavoro ha raccolto le molte segnalazioni del metodo. In generale sono stati riconosciuti da tutti alcuni punti di forza, come la trasparenza e oggettività del metodo, la velocità e semplicità di applicazione. Di contro si sono raccolte lamentele sul fatto che il meccanismo delle “medie” finiva in alcuni casi per nascondere possibili problemi su singoli sistemi. Ulteriori punti deboli sono la relativa difficoltà d’uso per gli stabilimenti più semplici e la mancanza di una “zona grigia” per i fattori molto prossimi allo zero. I miglioramenti attuati hanno cercato di superare difetti e limiti, mantenendo tutti i punti di forza riconosciuti.

4.3.1 Analisi di consistenza

Per validare i risultati è indispensabile una verifica della coerenza dei fattori di longevità con i fattori di invecchiamento. In particolare, per ogni singolo sistema di contenimento critico, i controlli di adeguatezza dovrebbero essere relativi all’età/tempo di esercizio e ai meccanismi di deterioramento, nonché ai guasti e ai danni precedentemente rilevati. Se le condizioni delle singole apparecchiature sono critiche, dovrebbero essere adottate le migliori tecniche disponibili per il controllo dell’integrità ed eventualmente per i sistemi di protezione fisica, adeguando se necessario i piani di gestione dell’invecchiamento. Per indagare sulla consistenza interna, sono stati definiti l’indice di invecchiamento e longevità individuale con le Eq. (4) e (5). Sono sostanzialmente i fattori ζ e χ applicati ad un singolo item critico e, per il j-esimo item critico, possono essere espressi come:

$$\zeta_j = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{i=6} \zeta_{ij} \quad (4)$$

$$\chi_j = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{i=6} \chi_{ij} \quad (5)$$

Uno screening della consistenza interna è dato dalla covarianza tra la distribuzione ζ e χ secondo la seguente equazione:

$$Cov(\chi, \zeta) = \frac{\sum_{j=1}^N (\chi_j - \bar{\chi})(\zeta_j - \bar{\zeta})}{N} \quad (6)$$

L’uso combinato di varianza e covarianza è fondamentale per superare le critiche degli ispettori, preoccupati della possibilità di ottenere punteggi migliori senza reali miglioramenti.

4.3.2 Varianza

Il caso di uno stabilimento dotato di apparecchiature, con età di esercizio molto diverse, potrebbe trarre in inganno, in quanto una serie di elementi molto nuovi (tubi o recipienti) potrebbe annullare il contributo molto più elevato delle apparecchiature più vecchie. Allo stesso modo, alcuni sistemi caratterizzati da moderati meccanismi di degrado potrebbero annullare il contributo dei più aggressivi meccanismi di degrado. Questo problema è critico

per il fattore ζ_1 "età/tempo di servizio" e ζ_6 "meccanismi di deterioramento". Pertanto, per questi due fattori, va calcolata anche la varianza:

$$Var(\zeta_i) = \frac{\sum_{j=1}^{j=N} (\zeta_{ij} - \bar{\zeta}_i)^2}{N} \quad (7)$$

$$i = 1; \quad i = 6 \quad N = \text{numero di sistemi critici}$$

Ciò ha senso solo per i fattori di invecchiamento ζ_1 e ζ_6 , perché per loro gli estremi sono più importanti dei valori medi. Gli altri fattori di invecchiamento utilizzano algoritmi diversi per ottenere il punteggio complessivo, quindi non c'è motivo di introdurre la varianza.

4.3.3 Software ed altre facilitazioni d'uso.

Per facilitare l'uso del metodo, che nella nuova versione prevede qualche semplice calcolo statistico è stato anche sviluppato un software "ufficiale", rilasciato attraverso i canali istituzionali⁶. Infine c'è stata un'apprezzabile iniziativa di Assogasliquidi, che ha prodotto una linea guida sull'applicazione del metodo ai depositi di GPL. La linea guida, approvata dal gruppo di lavoro, è un ulteriore passo per l'applicazione del metodo a tutto il settore Seveso.

4.4 Utilizzo dei risultati

L'indice totale, ovvero la somma dell'indice di longevità e di invecchiamento, potrebbe essere leggermente positivo o leggermente negativo. In questa zona grigia, le decisioni potrebbero essere discutibili, poiché piccole differenze nel calcolo dei punteggi individuali potrebbero cambiare le decisioni finali da positive a negative o viceversa. Pertanto, per un punteggio totale compreso tra -0,5 e +0,5, si suggerisce agli ispettori di dare comunque delle raccomandazioni, evitando giudizi sia decisamente positivi che negativi. È stato già proposto di utilizzare i valori dell'indice totale per mettere a punto i tassi di guasto generici ed eventualmente regolare la valutazione della vita utile residua prevista RUL per le apparecchiature critiche [22].

5. Nuove sfide legate alla transizione energetica

Guardando al futuro, si potrebbe pensare che il problema invecchiamento è destinato ad esaurirsi da solo con la transizione ecologica e l'entrata in esercizio di impianti completamente nuovi, che andranno a sostituire gli impianti di concezione tradizionale, in esercizio ormai da troppi anni. Bisogna tenere conto che i tempi della transizione saranno lunghi e ci sarà, per almeno quindici anni, la necessità di utilizzare, anche se in modo decrescente, fonti fossili, in particolare il petrolio, sia per la produzione di carburanti che per alimentare gli impianti petrolchimici, essenziali per molte filiere produttive. Gli investimenti verranno, ragionevolmente, concentrati sui nuovi impianti ecosostenibili, mentre per le produzioni tradizionali gli impianti esistenti continueranno ad essere utilizzati e dovrà, conseguentemente, essere addirittura aumentata l'attenzione ai rischi connessi al prolungamento in esercizio degli impianti. Nella fase di transizione si utilizzeranno spesso anche impianti preesistenti per prodotti nuovi. In particolare, per i carburanti eco sostenibili (blue o green) si potranno utilizzare i serbatoi e linee esistenti, se ancora in buone condizioni. I meccanismi di deterioramento ed i relativi sistemi di controllo andranno attentamente riconsiderati, per garantire nel tempo i livelli di sicurezza richiesti. Per questi

⁶ <https://www.mite.gov.it/pagina/documenti-di-indirizzo-linee-guida-o-altra-documentazione-di-interesse>

motivi sarà necessario, nell'ambito delle ispezioni Seveso, continuare ad usare con attenzione il metodo AFB, per mantenere un elevato livello di attenzione sulla gestione dell'invecchiamento.

Nell'ambito delle tecnologie abilitanti dell'industria 4.0, sono stati sviluppati molti sensori di pochissimo ingombro e basso costo, idonei ad un vero monitoraggio pervasivo sull'integrità delle attrezzature più critiche. La numerosità dei dati che possono essere raccolti in questo modo è sufficiente per alimentare dei modelli prognostici, che consentono di stimare in modo molto più preciso il tempo di vita utile delle attrezzature. Questa prospettiva è già una realtà in laboratori di ricerca e sperimentata in vari impianti pilota. Nella sua evoluzione il metodo AFB verrà esteso per tener conto di tutti gli input sensoristici, in modo da permettere una rivalutazione quasi in tempo reale dei livelli di sicurezza. Anche per la stima del tempo di vita attesa l'utilizzo di prognostica avanzata consentirà di superare le limitazioni attuali. In questo modo il metodo AFB potrebbe essere utile non solo all'ispettore, ma anche al gestore che potrebbe utilizzare le valutazioni, continuamente aggiornate, per indirizzare la gestione degli impianti e, in particolare, le attività manutentive. Sfruttando maggiormente le tecnologie abilitanti 4.0 sarà possibile estendere la vita degli impianti, almeno fino al giorno in cui i nuovi impianti, basati su tecnologie carbon-free, saranno in grado di rispondere da soli a tutte le esigenze produttive.

Obsolescenza ed invecchiamento organizzativo, fino adesso non inclusi nelle linee guida dell'invecchiamento, saranno i temi affini che non potranno essere elusi nelle future versioni.

Ringraziamenti

Si ringrazia il collega Fabrizio Vazzana di Ispra, per l'attiva partecipazione al gruppo. Si ringraziano unem (ex Unione Petrolifera), Assogasliquidi e Federchimica per i preziosi suggerimenti ricevuti sulla definizione e applicazione del metodo.

Bibliografia

- [1] Bragatto, P. Delle Site, C. Faragnoli, A. Opportunities and Threats of Risk Based Inspections *Chemical Eng. Trans.* 26 (2012) 177-182.
- [2] ESReDa, 2006, Ageing of Components and Systems, Eds: Petterson L. Simola. K. An ESReDa Working Group Report.
- [3] Kieskamp, K., Heezen, P. Geus, E. "Ageing Seveso installations in the Netherlands." *Chem. Eng. Trans.* 77 (2019): 415-420.
- [4] HSE Plant ageing, Management of equipment containing hazardous fluids or pressure, Research Report RR509, (2006) Health & Safety Executive London UK
- [5] INERIS International Benchmark on regulations and practices as regards managing industrial installation ageing (2009) Report DRA-09-102957-07985C Verneuil F
- [6] EUR Report 26331 (2013) Corrosion related accidents in petroleum refineries. Ispra I
- [7] OECD, 2017, Environment, Health and Safety Publications, Ageing of hazardous installations, ENV/JM/MONO/2017/9, Paris, F
- [8] Kooi, E.S., Manuel, H.J., Mud, M., Bellamy, L.J., 2020. Fifteen years of incident analysis 2004-2018. RIVM report 2020-0115. Bilthoven, NL
- [9] Bragatto, Paolo, and M. F. Milazzo. "Risk due to the ageing of equipment: Assessment and management." *Chemical Eng. Trans.* 53 (2016): 253-258.
- [10] Milazzo, M. F., Bragatto, P. A framework addressing a safe ageing management in complex industrial sites " *J. of Loss Prevention* 58 (2019): 70-81.

- [11] API Integrity Operating Window RP 584, 2014, Washington, USA
- [12] API, Risk-Based Inspection Technology RP581, 3rd ed., 2016, Washington, USA.
- [13] EEMUA Users' guide to the inspection, maintenance and repair of aboveground vertical cylindrical steel storage tanks, P159 5th ed. 2018, London, UK.
- [14] ISO 55000 Asset management Overview, principles terminology, 2014, Geneva CH
- [15] ISO 9712 Non-destructive testing - Qualification and certification of NDT personnel, 2012, Geneva CH.
- [16] IEC 61511 Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector, 2016, Geneva CH
- [17] Kanemoto, S., N. Yokotsuka, N. Yusa, M.. Diversity and integration of rotating machine health monitoring methods *Chemical Eng. Trans.*, 33, 2013, 169-174.
- [18] Khadersab, A., S. Shivakumar Vibration Analysis Techniques for Rotating Machinery and its effect on Bearing Faults. *Procedia Manufacturing* 20, 2018, 247-252.
- [19] API Machinery Protection Systems Standard 670 5th ed. 2014 New York USA
- [20] Stanojević, P., A. Jovanović, S. Kirin, M. Misita, B. Orlić, and S. Eremić, Some achievements in RBIM implementation according to RIMAP approach. *Structural Integrity and Life* 15, 2015, 79-84
- [21] UNI EN 16991 Quadro di riferimento per le ispezioni basate sul rischio - Risk Based Inspection Framework, 2018, Milano
- [22] Bragatto, P., Pirone, A., Vallerotonda, M. R., & Milazzo, M. F. Safety Report Updating for Aged Seveso Plants. *Chemical Eng. Trans.* 82, 2020, 13-18.

CASE OF STUDY - Applicazione del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature critiche con particolare riferimento alle macchine rotanti

A. Cafaro¹, G. Del Gobbo¹, V. Galasso², M. Pellegrino¹, L. Politi¹, F. A. Sciancalepore³, A. Sibilano²

¹ Stabilimento Versalis S.p.A. di Brindisi

² Inail - Uot di Taranto

³ Inail - Uot di Bari

Sommario

La direttiva 2012/18/UE (Seveso III) impone l'obbligo di gestire il rischio associato all'invecchiamento ed alla corrosione degli impianti come da allegato 3 del D. lgs. 105/2015 di recepimento della direttiva stessa in ambito SGS-PIR, all'interno del controllo operativo.

È stata quindi emessa nell'aprile del 2018 e successivamente revisionata nel marzo 2021 una linea guida che fornisce uno strumento per la valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature installate. Nella recente revisione entrano nello studio, oltreché i sistemi di contenimento primari statici, anche quelli dinamici. Tale metodo di analisi, di tipo fish-bone, può essere utilizzato sia dal gestore dello stabilimento, come metodo di autovalutazione, che dagli auditor di enti esterni, in occasione di visite ispettive ex art. 27 D. Lgs 105/2015.

Nella presente memoria tecnico-scientifica si illustra l'applicazione della suddetta tecnica di analisi (con un metodo a indici) alle attrezzature critiche dei servizi ausiliari della logistica dello stabilimento Versalis di Brindisi. Partendo dall'inventario delle apparecchiature coinvolte nelle sequenze incidentali ipotizzabili, come evidenziate dall'attuale Rapporto di Sicurezza o desunti dall'analisi dell'esperienza operativa, vengono analizzati e calcolati gli indici relativi ai fattori che favoriscono e che limitano il fenomeno di invecchiamento; ai risultati viene poi effettuata una valutazione finale sull'adeguatezza del sistema di gestione (proponendo eventuali azioni di miglioramento, qualora necessarie) un'analisi di coerenza per ulteriore validazione dei risultati, un confronto tra l'applicazione della vecchia linea guida e la recente emissione del marzo 2021.

Il presente *use case* ha anche il fine di testare la speditezza nell'applicazione del metodo proposto.

1. Introduzione

La direttiva 2012/18/UE (Seveso III) impone l'obbligo di gestire il rischio associato all'invecchiamento degli impianti. A tal riguardo, nel marzo del 2021, è stata emessa la nuova revisione della linea guida [1] che fornisce al gestore di stabilimento uno strumento per la valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature a pressione, tramite un metodo ad indici di tipo fish-bone.

Nella presente memoria tecnico-scientifica si illustra l'applicazione di tale tecnica di analisi ai servizi ausiliari della logistica dello stabilimento Versalis di Brindisi

Dopo una prima sezione dedicata alla descrizione sintetica della sezione dello stabilimento coinvolta nello studio, vengono elencate le relative attrezzature critiche risultanti dal Rapporto di Sicurezza 2021 [2] trasmesso al Ministero, oppure dall'analisi dell'esperienza operativa, dettagliando il tipo di servizio e la motivazione dell'inclusione nello studio. Successivamente, si procede al calcolo dei singoli indici previsti dal metodo,

illustrando le motivazioni e la fonte dei valori inputati nei fogli di calcolo allegati alla linea guida per ciascuna attrezzatura ed elaborando i dati stessi per ottenere i valori sintetici finali [1]. Infine, dalle risultanze dell'analisi effettuata, si traggono conclusioni di dettaglio relative all'adeguatezza del sistema di gestione in essere e considerazioni di carattere generale sulla speditezza di applicazione del metodo utilizzato.

2. Descrizione dei servizi ausiliari della logistica dello stabilimento Versalis di Brindisi

Lo stabilimento petrolchimico Versalis di Brindisi è costituito da tre impianti per la produzione di etilene/propilene (P1CR), butadiene (P30B) e polietilene (PE 1/2); per poter garantire la marcia degli impianti nello stabilimento sono presenti servizi alla produzione quali i Servizi Ausiliari (SAU) (gestione stazione di pompaggio e distribuzione acqua mare di raffreddamento, gestione reti di distribuzione utilities, sistemi torce, impianto di trattamento acque) e la sezione logistica che è l'oggetto dello studio.

Questa sezione è articolata in diverse sottosezioni di seguito brevemente introdotte:

DA601	stoccaggio del propilene criogenico in un serbatoio dalla capacità nominale di 15000m3
GPL	parco stoccaggio prodotti costituito da 19 sfere, 2 sferoidi, 5 serbatoi cilindrici orizzontali "tumulati"; include una serie di pompe per la movimentazione interna dei prodotti del petrolchimico quali Miscela C4, propilene a Tamb., butadiene, butilene, butene, miscela propilene, gpl.
S13	impianto di stoccaggio ed evaporazione etilene contenente dei serbatoi cilindrici verticali che ricevono etilene dal reparto criogenico P39 e dall'impianto di cracking P1CR.
P41	impianto per lo stoccaggio della soda caustica ed esene.
P39	stoccaggio dell'etilene criogenico in due serbatoi cilindrici, il Da301 ed il DA501 di 5000 e 10000m3 rispettivamente
P39	deposito prodotti petroliferi liquidi; è essenzialmente costituito da serbatoi che ricevono prodotti dal molo o colaggio dal P1CR, oppure stoccaggio per successivo trasferimento ad altri reparti.
INTERCONNECTING	per la movimentazione (ricevimento/spedizione) di materie prime e prodotti liquidi
Pontile	per il carico/scarico; la sezione include anche un impianto di recupero vapori di BK.
Pensiline	per il carico scarico di ferro cisterne ed autocisterne contenenti gas petroliferi liquefatti

Tabella 1. Elenco sezioni del reparto logistica

Di seguito si riporta la planimetria generale con in viola e blu le aree interessate dallo studio:



Figura 1. Planimetria dello stabilimento Versalis di Brindisi

3. Lista delle apparecchiature critiche

Il campo di applicazione del metodo ad indici proposto nella linea guida oggetto di analisi è quello dei sistemi di contenimento primari statici (quali serbatoi, scambiatori, forni, reattori, miscelatori, separatori, colonne, tubazioni) e dinamici (pompe, compressori, turbine). Per i sistemi dinamici occorre distinguere tra parti fisse e parti in movimento. Ai fini del presente metodo viene considerato il deterioramento della sola parte fissa, cioè della cassa.

Nello specifico il metodo si applica alle attrezzature critiche ai fini dell'incidente rilevante (secondo le definizioni riportate in allegato H, punto 1 del D. Lgs 105/2015), ossia a quelle attrezzature coinvolte nelle sequenze incidentali ipotizzabili nello stabilimento o desunti dall'analisi dell'esperienza operativa. Si considerano, inoltre, tutti i sistemi di contenimento che sono suscettibili degli stessi meccanismi di deterioramento di cui alle normative tecniche settoriali e che in esercizio possono contenere sostanze pericolose in quantitativi sufficienti a determinare un incidente rilevante (art.3, lettera "o", del D. Lgs 105/2015).

Si riporta in allegato alla presente relazione (Allegato A) l'elenco delle attrezzature critiche dell'area logistica, suddiviso per le 9 sezioni (per un totale di 448 item).

Da questa suddivisione discendono altrettanti studi di aging dedicati in quanto ogni sezione rappresenta un impianto/sezione d'impianto con una sua specificità sia come input/output sia come servizio offerto.

In Allegato B sono riportati i fogli di calcolo con i relativi risultati dello studio.

In Allegato C infine sono riportati, per ogni sezione, i soli item statici in modo da poter effettuare delle analisi comparate.

4. Applicazione del metodo ad indici

4.1 Generalità

Definite le attrezzature critiche si procede alla valutazione del programma di gestione dell'invecchiamento dell'impianto, applicando un'analisi di tipo fish-bone che individua n°6 fattori con effetto accelerante e n°6 fattori con effetto rallentante sul fenomeno stesso.

I fattori acceleranti e frenanti si traducono rispettivamente in penalità e compensazioni la cui somma algebrica consente di esprimere un giudizio sull'adeguatezza del sistema di gestione (se positiva) o di mettere in evidenza eventuali carenze e individuare apposite aree di miglioramento (se negativa). Un'analisi di coerenza finale, riportata su apposito foglio di calcolo ed a compilazione automatica, effettua un'ulteriore verifica sulla credibilità dei dati.

4.2 Calcolo dei fattori acceleranti

Di seguito si riporta l'analisi e il risultato del calcolo dei singoli indici che favoriscono il fenomeno di invecchiamento.

4.2.1 Età di servizio

Tale fattore è definito come il rapporto “età reale/età massima di progetto (tempo di vita atteso)” di ciascuna attrezzatura critica, espresso in forma percentuale. In funzione di tale valore, viene attribuito a ciascun item un punteggio secondo le indicazioni fornite dalla tabella 1 “penalità per età” a pag.10 della linea guida [1]. Il fattore è la media dei suddetti punteggi.

Laddove presenti dati storici, come età massima di esercizio delle attrezzature si sono considerati i risultati derivanti da studi di vita residua ed analisi delle spessimetrie; in assenza di tali informazioni ed in particolare per le linee, l'età massima è stata assunta pari a 40 anni in quanto considerato limite temporale oltre il quale si rende necessaria una valutazione in conformità alla UNI11706 [3] per il degrado metallurgico del materiale. Per i sistemi dinamici l'età massima è stata assunta pari a 40 anni in quanto, come da linea guida, è possibile ipotizzare una condizione di esercizio sicuro per lungo tempo se opportunamente mantenuta l'attrezzatura.

Il rapporto percentuale “età reale/età massima di progetto (tempo di vita atteso)” è in ogni caso $\leq 90\%$, pertanto il punteggio attribuito ad ogni sezione è pari ad 1 oppure leggermente superiore (il massimo scostamento lo si ha per la sezione S13 per cui l'indice è pari a 1,29).

Escludendo dall'analisi i sistemi dinamici (come nella versione 2018 della linea guida) per il modulo 1 non si sono riscontrate significative variazioni, come mostrato nella seguente tabella, eccetto per la sezione P3 in cui esiste un leggero scostamento dell'età reale dei sistemi statici (attorno ai 60anni) rispetto a quelli dinamici (attorno ai 30 anni); pertanto escludendo questi ultimi l'età reale complessiva si innalza e così anche il valore assoluto del relativo indice.

4.2.2 Fermate impreviste

Questo fattore è il rapporto fra il numero delle fermate impreviste e il numero di fermate totali di ciascuna attrezzatura critica, espresso in forma percentuale. Si assume un periodo di riferimento pari a 10 anni (dal 2011 al 2021). In funzione di tale valore, viene attribuito a ciascun item un punteggio secondo le indicazioni fornite dalla tabella 2 “penalità per fermate impreviste” a pag. 11 della linea guida [1]. Il fattore è la media dei suddetti punteggi.

Per 7 sezioni su 9, poiché questo modulo si applica ad impianti di processo di tipo continuo, il contributo relativo a tale modulo sarà nullo (cioè tale modulo non sarà

conteggiato nel computo finale) trattandosi essenzialmente di pompe, stoccaggi di tipo “permanente”, etc).

Per le sezioni DA601 e Pensiline la presenza di apparecchiature (scambiatori e recipienti) a ciclo continuo tale modulo assume valore 4, a causa delle due fermate impreviste avvenute negli anni 2018 e 2019. Nel computo finale tale valore incide comunque per un peso inferiore ad uno (0.69 per DA601, 0.25 per le Pensiline) pertanto sebbene corrispondente alla massima penalità, di fatto non comporta un forte aggravio sull'indice compensato finale.

4.2.3 Frequenze di guasto

Questo fattore comprende solo i guasti degli elementi critici. Il fattore considera il numero di guasti realmente registrati nel periodo di riferimento. Questo numero va confrontato con i valori attesi in base alle frequenze di guasto riportate nel database di riferimento utilizzato per la redazione del Rapporto di Sicurezza [2] (allegato 10 opi HSE 106 versalis qhse r.08) oppure presenti nelle linee guida di settore (API 581[6], purple book, OREDA 2009 [17]). Per ogni attrezzatura critica, occorre riportare il numero di guasti registrati sul numero di guasti attesi. Il numero di guasti atteso è dato dal prodotto di riferimento per il numero di anni del periodo di osservazione, pari a 10 (dal 2011 al 2021). Il fattore viene definito secondo le indicazioni fornite dalla tabella 3 “penalità per tassi di guasto” a pag. 12 della linea guida [1].

Per le sezioni DA601, pensiline, pontile, il fattore assume valore 1. Per l'S13 assume valore 2; per GPL, P39, interconn., P3, P41 si è ottenuto un valore pari a 4; tale valore risulta fortemente influenzato dalla presenza dei sistemi dinamici per le sezioni P39, P41 e S13.

4.2.4 Incidenti e quasi incidenti

È un fattore complessivo che prende in considerazione tutti gli eventi significativi (incidenti, quasi incidenti, anomalie); per “elemento significativo”, in accordo al D.Ls. 105/2015 allegato H punto 1, definizioni, lettera a si intende “*qualunque incidente, quasi incidente o anomalia di funzionamento o di gestione che metta in evidenza possibili carenze gestionali interessate dal verificarsi dell'evento e che permetta di focalizzare l'attenzione su possibili miglioramenti sia in termini specifici di risposta puntuale all'evento sia in termini generali di adeguamento dello stabilimento nel suo insieme e del suo sistema di gestione della sicurezza (SGS-PIR).*” Il periodo di riferimento è sempre degli ultimi 10 anni, e nessun tipo di attrezzatura va escluso.

Il relativo indice si ottiene dal rapporto percentuale fra “eventi significativi” riconducibili a fenomeni di deterioramento e il numero totale di eventi riportati negli ultimi 10 anni.

Bisogna considerare esclusivamente i dati che, in sede di verifica ispettiva SGS, vengono riportati nella sezione 2 (“Analisi dell'esperienza operativa”) della appendice 2 “Criteri e procedure per la conduzione delle ispezioni” ex art. 27 D.lgs. 105/2015 (vedi Allegato H).

Per tutte le sezioni si è avuto un valore pari a 4.

Il valore si basa sui dati contenuti nei nostri data-base relativamente a tali accadimenti e per i quali è sempre stata condotta una accurata analisi per individuazione delle cause e delle relative azioni correttive.

Non si riscontrano variazioni significative considerando soltanto i sistemi statici secondo la vecchia procedura.

4.2.5 Danneggiamenti

Questo fattore si riferisce ai “danneggiamenti gravi”, (cioè si compromette o riduce la funzionalità dell'attrezzatura e deve, conseguentemente, essere riparato al più presto, al fine di ripristinare le condizioni iniziali d'integrità). Sono considerati gravi i difetti che avevano richiesto la messa fuori servizio dell'attrezzatura fino al ripristino della piena

funzionalità dell'attrezzatura; quelli già inseriti nel modulo 3 non vanno inclusi anche in questo modulo.

L'indice è ottenuto dal rapporto tra il numero di danneggiamenti o difetti gravi che sono stati rilevati nel corso degli ultimi 10 anni durante le ispezioni e il numero di attrezzature critiche presenti nello stabilimento.

Riguardo le macchine rotanti consideriamo solo quei danneggiamenti alle parti fisse che richiedono ricostruzioni (gli interventi di ricambio delle parti deteriorate non saranno considerati in accordo alla nuova linea guida).

Ad eccezione della sezione S13 (7 danneggiamenti gravi su 24 attrezzature critiche totali considerate, per una corrispondente percentuale del 29% e punteggio pari a 4), nel resto delle sezioni i danneggiamenti gravi, ove presenti, hanno sempre riguardato una percentuale minima delle attrezzature, e comunque sotto l'1% (punteggio 1).

Non vi sono scostamenti considerando i soli sistemi statici in quanto i danneggiamenti hanno riguardato quasi esclusivamente i sistemi statici pertanto la introduzione dei dinamici non ha inciso.

4.2.6 Meccanismi di deterioramento

Questo fattore è legato ai meccanismi fisici e chimici di deterioramento delle attrezzature critiche.

Per i sistemi statici un riferimento importante, per la conoscenza dei meccanismi di deterioramento, è dato dalla API 571 [4] che identifica, nei soli impianti petroliferi, almeno 63 differenti meccanismi che agendo sui materiali possono portare, nel tempo, ad una compromissione delle caratteristiche delle attrezzature. Si considera, per ogni meccanismo, anche la difficoltà di rilevare in tempo i primi effetti sul materiale, la velocità di propagazione e le conseguenze corrispondenti. Per ogni attrezzatura critica considerata, dati tutti i meccanismi di deterioramento considerati, si deve considerare il prevalente ad eccezione di sistemi complessi quali colonne. Per ogni meccanismo, si attribuisce un punteggio di gravità da 1 a 4 a velocità di propagazione, rilevabilità, conseguenze. Il punteggio complessivo è la media dei tre.

Per le macchine rotanti, ai fini del presente metodo, vanno considerati solo i meccanismi di deterioramento che riguardano le parti fisse delle macchine. I criteri di valutazione sono analoghi a quelli dei sistemi statici.

Per la maggior parte delle sezioni aver considerato anche i sistemi dinamici ha portato ad una riduzione degli indici in quanto per le macchine rotanti i meccanismi di deterioramento principali considerati sono essenzialmente quelli erosione/corrosione per i quali il valore medio del fattore penalizzante è 2.3, nettamente inferiore rispetto quello medio dei sistemi statici (mediamente attorno ai 3.0).

4.3 Calcolo dei fattori frenanti (compensazioni)

Di seguito si riporta l'analisi e il risultato del calcolo dei singoli indici relativi ai fattori che limitano il fenomeno di invecchiamento.

4.3.1 Sistema di gestione delle ispezioni

Questo fattore è dedicato alla pianificazione delle ispezioni e dei controlli sulle attrezzature, affinché gli impianti operino in sicurezza in tutto il ciclo di vita.

Il punteggio, per questo fattore, viene assegnato tenendo conto del livello delle informazioni e della conoscenza che esse garantiscono.

- Al livello 1, la periodicità dei controlli sarà quella di legge/del fabbricante/norma di settore;
- Al livello 2, le procedure gestionali di ispezione e manutenzione sono basate sulle condizioni e valutazione del rischio, dell'affidabilità o della disponibilità;

- Al livello 3 il gestore adotta una linea guida o una buona pratica specifica per la gestione delle ispezioni, almeno per attrezzature e impianti critici ai fini degli incidenti rilevanti (per i sistemi statici si fa riferimento a linee guida o pratiche di settore tra le quali citiamo: API 580:2012 [5], API 581:2016[6], ASME PCC-3-2007 [7], UNI 11325-8:2016 [8], basate su approccio RBI; per i sistemi dinamici l'approccio è di tipo RCM, quindi le linee guida sono: SAE JA 1011:1998 [9] e SAE JA 1012A:2002 [10]).

Il punteggio è attribuito secondo la tabella 7 pag 18 della linea guida ed è pari a 3 per ogni sezione sia nel caso dei soli sistemi statici che di quelli statici + dinamici.

4.3.2 Verifiche ispettive e Audit del SGS-PIR

Questo fattore fa riferimento ai risultati di visite ispettive delle autorità e di audit indipendenti sul SGS-PIR effettuati nel periodo di riferimento pari a 10 anni. Facendo riferimento alla scheda riepilogativa del paragrafo 7.1 del rapporto finale di ispezione (allegato H, appendice II, parte II, sezione 5 del D.lgs. 105/2015).

Il punteggio viene ricavato dalle percentuali di non conformità minori e maggiori secondo quanto indicato nella tabella 8; Il punteggio totale di questo fattore di compensazione è dato dalla media dei due punteggi parziali. Il punteggio è attribuito secondo la tabella 8 pag 18 della linea guida ed è pari a 1 per ogni sezione sia nel caso dei soli sistemi statici che di quelli statici + dinamici.

4.3.3 Verifiche di legge su attrezzature

Questo fattore tiene conto dei risultati delle verifiche di funzionalità e integrità (incluse quelle di cui all'allegato VII del D.lgs. 81/08) sulle attrezzature critiche e del rispetto delle scadenze temporali di tali verifiche, nel periodo di riferimento pari agli ultimi 10 anni.

Le attrezzature che non sono soggette a verifiche normative da parte di enti esterni non rientrano nell'applicazione del presente punto. Rientrano nel calcolo i risultati positivi dei test (prove) che verificano la funzionalità e l'integrità delle attrezzature nelle modalità di legge (come indicato in Tabella 9). Per Interc., P3, P41, Pontile, tale modulo non è applicabile perché gli item non sono soggetti a verifiche di legge.

Per le restanti sezioni invece il calcolo ha portato ad un valore generalmente pari a 4, corrispondente al massimo fattore frenante per questo modulo.

Non vi sono scostamenti considerando i soli sistemi statici.

4.3.4 Efficacia dei controlli sulle attrezzature

Questo fattore tiene conto dell'estensione delle misure effettuate, in termini di frazioni percentuali di attrezzature direttamente misurate, del livello di affidabilità delle misurazioni e dell'appropriatezza delle misurazioni in funzione dei meccanismi di deterioramento in atto.

Per l'efficacia delle ispezioni bisogna considerare i vari tipi di misura ed in particolare, l'estensione, il grado di copertura ottenibile e la probabilità di rilevare i danni o difetti in funzione delle loro dimensioni caratteristiche. Nella Tabella 10a (pagina 22 della linea guida INAIL 2021), si riportano i criteri da usare per associare i punteggi alle tecniche utilizzate (non applicabile per macchine rotanti)

In Tabella 10 b (pagina 23 della linea guida INAIL 2021 [1]) si riportano invece i punteggi da assegnare alle diverse qualificazioni possibili.

Per ogni attrezzatura critica occorre considerare il livello di adeguatezza ed efficacia delle ispezioni effettuate, facendo riferimento alla Tabella 10a, nonché il livello di qualificazione del personale addetto alle prove non distruttive, come da Tabella 10b. Si deve calcolare, poi, la media dei valori ottenuti per ciascuna attrezzatura per avere un punteggio per ognuna di esse; infine, si calcola la media di tutti i punteggi medi delle attrezzature.

Per le macchine rotanti si utilizza invece la tabella 10c (pagina 23 della linea guida INAIL 2021 [1]) in quanto non è possibile separare ispezione e manutenzione: la strategia

manutentiva prevede comunque azioni diverse intese sia come ispezioni periodiche che come sostituzione di parti usurate.

L'introduzione dei sistemi dinamici ha portato complessivamente ad una riduzione dell'indice del modulo 10 in quanto per i soli sistemi statici è presente, tanto per gli ispettori Versalis che per quelli della ditta esecutrice dei controlli, una certificazione di secondo livello alla quale è associato il punteggio massimo, pari a 4. Per i sistemi dinamici il valore del modulo, positivo, pari a 3, deriva dalla condizione che non è presente a tappeto su tutte le macchine un sistema di rilevamento delle vibrazioni in continuo, bensì un giro strutturato secondo un piano di controllo vibrazioni.

4.3.5 Controllo di processo

In ogni sezione dello stabilimento è presente sia un sistema di controllo con registrazione dei dati, che un blocco automatico separato: per tale motivo è stato attribuito un valore per l'indice pari a 3. La valutazione viene condotta in base alle indicazioni riportate nella tabella 11 "Compensazione per la sicurezza funzionale" a pag.23 della linea guida [1].

4.3.6 Rivestimenti e protezioni

Questo fattore tiene conto delle condizioni di eventuali rivestimenti interni (es. cladding e lining) o esterni delle apparecchiature, qualora presenti. Sulla base delle indicazioni riportate nella tabella 12 "compensazione per protezioni specifiche" a pag.24 della linea guida [1], si attribuiscono a ciascuna apparecchiatura due punteggi relativi rispettivamente alla frequenza di ispezione e alle condizioni rilevate nell'ultima ispezione e se ne calcola la media. Il fattore è calcolato, infine, mediando tutti i valori ottenuti.

Per alcune sezioni il modulo 12 non è applicabile in quanto non sono previsti dei rivestimenti specifici per le apparecchiature critiche in oggetto.

Non vi sono scostamenti considerando i soli sistemi statici.

5. Elaborazione dei punteggi e valutazione finale

L'elaborazione dei punteggi viene effettuata sommando algebricamente i fattori relativi alle penalità (da assumere con segno negativo) e i fattori relativi alle compensazioni (da assumere con segno positivo), per ottenere l'indice compensato IC ed eventualmente inserendo opportuni pesi derivanti dal modulo della analisi di coerenza.

5.1 Risultati studio per la logistica

Si riporta di seguito, la tabella riepilogativa dei risultati ottenuti:

				DA601	GPL	P39	INTERC.	P3	P41	PENSILINE	PONTILE	S13	
Numero di item critici				32	175	45	83	35	14	4	36	24	
Fattori acceleranti	M 1	età	Valore	1,00	1,02	1,02	1,01	1,26	1,00	1,00	1,00	1,29	
			Peso	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	M 2	fermate	Valore	4,00	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	4,00	N/A	N/A
			Peso	0,69	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,25	N/A	N/A
	M 3	guasti	Valore	2,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	1,00	1,00	2,00
			Peso	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	M 4	near miss	Valore	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
			Peso	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	M 5	rotture	Valore	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00
			Peso	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	M 6	meccanismi di danno	Valore	2,32	2,42	2,76	1,88	2,10	2,21	2,58	2,57	2,56	2,56
			Peso	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Media fattori acceleranti				2,30	2,49	2,24	2,38	2,47	2,44	2,02	1,91	2,41	
Fattori frenanti	M 7	sistema gestione	Valore	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	
			Peso	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	M 8	audit	Valore	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
			Peso	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	M 9	risult.verif. e prove	Valore	4,00	4,00	4,00	N/A	N/A	N/A	4,00	N/A	2,50	
			Peso	0,56	0,21	0,33	N/A	N/A	N/A	0,25	N/A	0,54	
	M 10	adeguatezza controlli	Valore	3,61	3,29	3,53	3,01	3,31	3,18	2,88	3,42	3,67	
			Peso	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	M 11	controllo processo	Valore	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	
			Peso	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	M 12	rivestimenti	Valore	N/A	2,50	N/A							
			Peso	N/A	0,03	N/A							
Media fattori frenanti				2,82	2,64	2,74	2,50	2,58	2,54	2,56	2,60	2,65	
Penalizz.deviazione standard età													
Penalizz. deviazione standard meccanismi					- 0,1								
Penalizz. Incoerenza							- 0,1	- 0,1	- 0,1				
Indice Compensato (IC)				0,52	0,05	0,50	0,02	0,01	0,00	0,54	0,69	0,24	

Tabella 2. Risultati dello studio

Per 4 sezioni su 9 l'applicazione della linea guida ha dato un risultato maggiore/uguale di 0,5, quindi la gestione dell'invecchiamento è risultata "adeguata". Per le restanti sezioni il risultato è stato comunque positivo ma inferiore a 0,5 quindi "migliorabile".

La nuova linea guida oltre ad avere esteso lo studio dell'invecchiamento delle attrezzature ai sistemi di contenimento dinamici, cioè alle macchine rotanti per la sola parte fissa (cassa), ha apportato ulteriori due novità: il calcolo di un peso, per ogni modulo e l'analisi di coerenza per valutare gli elementi di variabilità che, nascosti o dall'uso delle medie, potrebbero ridurre la credibilità dei risultati.

-Analisi dei pesi: per il reparto GPL, P39, P41 l'introduzione di un peso diverso da 1 come nella vecchia linea guida 2018 è stato molto impattante sul risultato finale. Riguardo il fattore frenante "prove e verifiche di legge" per il GPL e per il P39 il valore ottenuto pari a 4 è stato infatti fortemente ridotto dal peso del 79% per il GPL (quindi è diventato 0,84) e del 67% per il P39 (divenuto 1,32). Per il P41 ha inciso parecchio il peso del fattore frenante 6 "rivestimenti" che ha portato ad una riduzione del valore ottenuto, 3,00, del 64% (divenuto quindi 1,08). Ciò nonostante gli indici hanno comunque dato un risultato positivo, a conferma della sicurezza ed a conferma della corretta gestione.

-Analisi di coerenza: è stata introdotta come ulteriore correzione alla determinazione del conclusivo indice compensato, per bilanciare situazioni di presenza di valori estremi che un banale utilizzo delle medie nei calcoli potrebbe nascondere (in particolare per età e meccanismi di danno) e situazioni di incoerente presenza di fattori frenanti (es. "efficacia delle ispezioni" e/o "rivestimenti e protezioni") rispetto a quelli acceleranti (es. "età di servizio" e/o "meccanismi di deterioramento") segnale di una pianificazione poco coerente nella gestione dell'invecchiamento.

-Indice Compensato

L'indice compensato pesato ottenuto è riportato nella tabella ad inizio paragrafo 5.1, determinato dalla somma algebrica delle rispettive somme pesate dei fattori acceleranti e frenanti, corretto dai 3 indici di cui alla analisi di coerenza solo per le sezioni GPL, Inteconnecting, P3 e P41. Le analisi condotte sui pesi e sulla coerenza dei dati consentono di affermare che la nuova linea guida ha offerto comunque uno studio più articolato, meticoloso e restrittivo, in cui viene messa in discussione anche la credibilità del dato inserito, rendendo il risultato più affidabile e veritiero.

5.2 Confronto tra risultati studio GPL e sfera F357

In precedenza, nel 2018, è stato effettuato un caso studio su una sfera del reparto GPL utilizzando la prima linea guida INAIL emessa per lo studio sull'invecchiamento.

I pesi per ogni modulo erano stati assunti pari ad uno. Di seguito si riporta una tabella comparativa dei risultati dei 12 moduli e dell'indice compensato per l'intero reparto e per la singola sfera:

IC (indice compensato)	Fattori acceleranti						Fattori ritardanti						IC
	Mod. 1	Mod. 2	Mod. 3	Mod. 4	Mod. 5	Mod. 6	Mod. 7	Mod. 8	Mod. 9	Mod. 10	Mod. 11	Mod. 12	
GPL	1,02	N/A	4	4	1	2,42	3	1	4	3,29	3	2,5	0,05
Sfera di GPL F357	4	N/A	1	1	1	2	2	1	4	2,5	2	2,5	5

Tabella 3. Confronto tra risultati reparto GPL e singola sfera 357 dello stesso reparto

Possiamo notare come siano profondamente diversi i moduli 1, 3 e 4 relativi ad i guasti e ad i near miss quando si considera un singolo item critico oppure la totalità di una sezione come il GPL che ha ben 175 item critici considerati nello studio. La stessa discrepanza rimane invariata anche se si considerano solo tutti gli item di tipo statico della medesima sezione, ossia la citata variazione in valore assoluto dei tre indici non è determinata dall'inserimento degli item di tipo dinamico. Al di là di questo i risultati dei restanti moduli appaiono molto simili nonostante la diversa linea guida applicata, l'assenza dei pesi variabili ed eventualmente l'incidenza negativa derivante dall'analisi di coerenza.

6. Conclusioni

Una prima lettura dei risultati evidenzia una tendenza generale del comparto logistica in linea con la gestione dell'invecchiamento, avendo ottenuto per tutte le sezioni risultati da "adeguato" a "migliorabile", e mai "carente" o "molto carente"

Pur non riscontrandosi, per tutte le sezioni, risultati negativi, si evidenzia tuttavia un sensibile scostamento dei risultati di IC tra le sezioni, segno evidente che tutta la logistica ha avuto presso lo stabilimento una storia non uniforme in termini di episodi rilevanti di revamping e/o manutenzione straordinaria: ne è principale evidenza proprio la sezione che ha traguardato il risultato migliore, il pontile, che nell'anno 2019 ha visto ultimare un progetto di manutenzione straordinaria e razionalizzazione con specifica commessa i cui lavori sono stati concordati anche con Enti esterni di controllo. I risultati meno positivi si riscontrano sulle sezioni GPL, Inteconnecting, P3, P41 e S13: su tutte queste sezioni, ad eccezione del P41, si sarebbe ugualmente ottenuto un IC positivo ma comunque inferiore a 0,5 anche se lo studio avesse riguardato i soli Item statici.

Con riferimento alle cinque sezioni con indice IC migliorabile, si riscontra ancora che il valore conclusivo risulta, per tutte le sezioni, essere fortemente influenzato da:

- Due indici acceleranti ricorrenti con valore assoluto più alto, e con peso sempre pari ad 1: sono i "guasti" ed i "near miss" in quanto, per entrambi i moduli, il valore ottenuto dallo studio è stato di 4.0 e per giunta con peso pieno.

Questo conduce ad osservare che un sensibile miglioramento lo si potrebbe ottenere focalizzandosi proprio su questi due moduli: attuare delle politiche di riduzione dei guasti attraverso una variazione delle frequenze ispettive e manutentive sugli item

maggiormente coinvolti, oppure laddove possibile, e strategicamente conveniente, inserire dei sistemi di monitoraggio in continuo;

- b) Un indice frenante ricorrente con valore assoluto alto associato ad un peso estremamente basso: sono “audit” (con valore e peso pari ad 1) e “risultati verifiche e prove” (che associa su alcune sezioni peso minimo pur con risultati massimi). In particolare, il modulo “risultati, verifiche e prove”, per il GPL, assumerebbe valore 4, cioè il massimo, ma a causa del peso attribuitogli pari a 0.21, il valore che realmente ha poi partecipato al calcolo dell’IC è stato 0.84. Ne consegue che il modulo ha subito una riduzione di ben 3.16 punti; portando l’IC per effetto del peso a 0.05, senza la quale si sarebbe attestato ben al di sopra del valore minimo indicato per una gestione “adeguata”; anche per l’S13 vale un analogo discorso sul medesimo modulo: il peso è stato di 0.54 che ha ridotto il modulo di 1.35 punti riducendo l’IC ad un valore compreso fra le soglie “adeguato” e “migliorabile”.

Un ultimo indice frenante con valore assoluto pari ad uno ricorrente a cui si associa un peso unitario: trattasi del fattore “audit”. *Ne deriva che una riduzione delle non conformità anche solo del 20% nei prossimi audit (agendo quindi sul sistema di gestione) consentirebbe un aumento di tale fattore fino al valore 2 con incremento dell’IC di un’unità e conseguente risultato finale “adeguato”. Questo traguardo sarebbe maggiormente vantaggioso in quanto tale indice è relativo all’intero stabilimento, quindi anche gli IC degli altri reparti diversi dalla logistica andrebbero a risentirne positivamente.*

7. Bibliografia

- [1] Valutazione sintetica dell’adeguatezza del programma di gestione dell’invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso, INAIL, ISPRA, ARPA, ARPAV, ARPAL, MATTM, Italia, marzo 2021.
- [2] Rapporto di Sicurezza 2021 ai sensi dell’art. 15 del D.Lgs. 105/2015 dello stabilimento Versalis di Brindisi, Tecnologia Ricerca Rischi S.r.l., giugno 2021
- [3] UNI11706: Attrezzature a pressione-Valutazione dello stato di conservazione delle attrezzature e gli insiemi a pressione a seguito del degrado strutturale e metallurgico da eserc. dei materiali.
- [4] API 571: Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry.
- [5] API, 2016, Risk-Based Inspection RP580, 3rd ed., American Petroleum Inst., Washington, USA
- [6] API, 2016, Risk-Based Inspection Technology RP581, 3rd ed., American Petroleum Inst., Washington, USA
- [7] ASME, 2007, PCC-3 Inspection Planning Using Risk-based Methods. American Society of Mechanical Engineers, New York, USA
- [8] UNI 11325-Parte 8 (2013) Pianificazione delle manutenzioni su attrezzature a pressione attraverso metodologie basate sulla valutazione del rischio (RBI) Milano Italia
- [9] SAE JA 1011:1998 Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maint. (Rcm) Processes
- [10] SAE JA 1012A:2002 [10] A Guide to the Reliability-Centered Maint. (Rcm) Standard
- [11] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, N. 105. Att. della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.
- [12] OREDA, 2009: offshore reliability data handbook
- [13] UNI 10617:2012 Impianti a rischio di incidente rilevante Sistemi di gestione della sicurezza Requisiti essenziali, Milano Italia

I permessi di lavoro nell'ambito dei sistemi di gestione della sicurezza negli stabilimenti a rischio di incidente rilevante

A. Pirone¹, E. Floridi², F. Vazzana³, A. De Rosa⁴, G. Caruso⁵, T. Vairo⁶, M.R. Vallerotonda¹, S.M. Ansaldo¹, F. Geri⁷, C. Delle Site¹

¹ Inail - Dit

² Mite – Dir. Generale per la Crescita Sostenibile e la Qualità dello Sviluppo

³ ISPRA

⁴ Min. Int. - Dip. dei Vigili del Fuoco, del Soccorso Pubblico e della difesa civile

⁵ Arpa Lazio – DPL Servizio Sicurezza Impiantistica

⁶ Arpa Liguria (Genova)

⁷ PCM - Dipartimento della Protezione Civile

Sommario

I gestori degli stabilimenti soggetti al D.lgs. 105/2015 devono redigere un documento che definisce la propria politica di prevenzione degli incidenti rilevanti da attuare tramite mezzi e strutture idonei ed un sistema di gestione della sicurezza predisposto in conformità all'allegato 3 ed alle linee guida di cui all'allegato B del decreto.

La verifica delle misure tecniche, organizzative e gestionali messe in atto dal gestore nel SGS PIR è effettuata da un'apposita Commissione che, tra le altre cose, esamina anche il fattore gestionale "controllo operativo" nell'ambito del quale si analizzano i componenti critici dell'impianto e la gestione delle attività di manutenzione che, salvo qualche eccezione, sono soggette a permessi di lavoro. Il presente lavoro vuole fornire una panoramica delle problematiche connesse alla predisposizione ed al rilascio dei permessi di lavoro emerse dall'analisi delle schede dell'esperienza operativa compilate dai gestori degli stabilimenti di soglia superiore soggetti al D.Lgs. 105/2015. L'articolo trae origine dalle attività effettuate dal gruppo di lavoro "Esperienza operativa negli stabilimenti Seveso", istituito nell'ambito del Coordinamento per l'uniforme applicazione sul territorio nazionale ex art. 11 del D.Lgs. 105/15", finalizzate ad approfondire la tematica e redigere un documento divulgativo che ne riporti la sintesi. Le problematiche individuate sono supportate da casi studio e sono discusse approfondendo gli aspetti strettamente legati al SGS PIR utili a fornire indicazione ai gestori degli stabilimenti ed a tutti gli *stakeholders*.

1. Introduzione

Il decreto legislativo 26 giugno 2015, n. 105 ha recepito la direttiva 2012/18/UE (cd. Seveso III), relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose. L'articolo 11 del decreto ha previsto l'istituzione, presso il Ministero della transizione ecologica (Mite, già Mattm), del Coordinamento per l'uniforme applicazione sul territorio nazionale (di seguito Coordinamento nazionale) al fine di assicurare, anche mediante gruppi di lavoro, l'elaborazione di indirizzi e di linee guida in relazione ad aspetti di comune interesse e permettere un esame congiunto di temi e quesiti connessi all'applicazione del decreto stesso [1]. Nell'ambito del Coordinamento è stato sviluppato un progetto con l'obiettivo di pubblicare un bollettino periodico su argomenti tratti dall'analisi degli eventi significativi riportati nelle schede dell'esperienza operativa (di cui alla parte II - sezione 2 dell'allegato H del decreto) compilate dai gestori degli stabilimenti di soglia superiore ed acquisite dalle Commissioni incaricate di accertare l'adeguatezza della politica di prevenzione degli incidenti rilevanti posta in atto dal Gestore conducendo un esame pianificato e sistematico dei sistemi tecnici, organizzativi e di gestione nel corso delle

ispezioni effettuate ai sensi dell'art. 27 del D.lgs. 105/2015. Per lo sviluppo dei bollettini sono considerati gli eventuali incidenti, ma soprattutto i quasi incidenti e gli eventi minori occorsi presso gli stabilimenti soggetti alla normativa "Seveso". L'approccio utilizzato, infatti, mira ad individuare gli eventi caratterizzati da una maggiore frequenza e/o che sono comuni a realtà aziendali anche non simili. Si tratta di "intercettare" le problematiche che emergono soltanto effettuando un'analisi congiunta delle informazioni contenute nelle schede, relativamente ad uno specifico argomento, e che non sarebbero immediatamente evidenti se l'analisi fosse effettuata soltanto sul gruppo di documenti forniti dal gestore nel corso dell'ispezione. In tal modo, è possibile migliorare l'analisi per la prevenzione degli incidenti chimici che, di fatto, si traduce nella capacità di utilizzare la documentazione disponibile per individuare in anticipo i precursori di eventi gravi. Tale approccio è alla base dei lavori del gruppo di lavoro "Esperienza operativa negli stabilimenti Seveso" che opera nell'ambito del Coordinamento nazionale per il raggiungimento delle finalità sopra descritte. Il punto di partenza sono le schede dell'analisi dell'esperienza operativa che fanno parte della documentazione acquisita dalla Commissione durante le ispezioni condotte a livello nazionale. Lo studio presenta le attività svolte ed i risultati raggiunti dal gruppo di lavoro relativamente ai permessi di lavoro (PdL) per la predisposizione di un bollettino. In particolare, il paragrafo 2 descrive il contesto di riferimento dell'argomento oggetto del bollettino; nel paragrafo 3, sono evidenziati gli obiettivi del lavoro. Le modalità operative adottate dal gruppo e la metodologia seguita per la predisposizione dei bollettini sono riportate nel paragrafo 4. Il paragrafo 5 riporta i risultati ottenuti; infine, i paragrafi 6 e 7 trattano rispettivamente i suggerimenti che è possibile fornire agli ispettori ed ai gestori sulla base dei risultati ottenuti e le conclusioni del lavoro.

2. Contesto di riferimento

2.1 L'analisi dell'esperienza operativa negli stabilimenti "Seveso"

Il D.lgs. 105/15 ha riformulato la normativa per il controllo del pericolo di incidente rilevante introducendo importanti novità anche sullo svolgimento dell'attività ispettiva articolata in fasi ben definite (pianificazione, autorizzazione, controllo, verifica). In linea, invece, con la normativa previgente, sono stati confermati gli obblighi in capo al Gestore, primo tra tutti quello di organizzare la gestione dei rischi attraverso documenti strutturati e continuamente aggiornati, tra i quali la raccolta degli eventi incidentali, dei near-miss e delle anomalie che avvengono nel proprio stabilimento o in altri similari. La raccolta dei suddetti eventi rappresenta un aspetto fondamentale per la gestione dei rischi; infatti, se adeguatamente strutturata, costituisce uno strumento indispensabile per individuare gli elementi tecnici, organizzativi e gestionali "deboli", sui quali risulta necessario intervenire per prevenire il verificarsi di un incidente o mitigarne le conseguenze.

Attraverso un'attenta analisi degli incidenti e dei quasi incidenti, si può evidenziare quali siano i pericoli più ricorrenti che, pur essendo noti, continuano tuttavia a provocare eventi indesiderati, anche se di minore impatto o senza conseguenze. È interessante sottolineare che, tra i segnali deboli che sono registrati, alcuni sono relativi a rischi emergenti non del tutto presi in considerazione nell'analisi di rischio tra le cause degli eventi, si pensi ad esempio agli eventi meteorologici eccezionali. Il potenziale informativo presente nelle schede dell'esperienza operativa è notevole e l'attenzione sui casi occorsi più significativi non è certamente un argomento nuovo nel settore in esame. Lo stesso Major Accident Reporting System (e-MARS) [2], il sistema europeo che raccoglie dagli Stati membri le informazioni sugli incidenti rilevanti avvenuti nell'Unione Europea ai sensi dell'art. 26 del D.lgs. 105/15, nasce con la volontà di comprendere le cause di un incidente e di fornire indicazioni utili sia ai gestori che alle Autorità competenti per reagire in maniera efficace a problematiche più o meno note, sulla base delle lezioni apprese. Dall'esame delle

informazioni riportate nelle schede dell'esperienza operativa è, quindi, possibile ottenere utili indicazioni tanto agli ispettori che ai gestori degli stabilimenti, da divulgare attraverso materiale informativo specifico. Esperienze consolidate in tal senso sono già presenti nel panorama internazionale di settore, ad esempio, i fact-sheets sviluppati dal CCPS Process Safety Beacon dell'American Institute of Chemical Engineers (AIChE) che rappresentano un foglio notizie rivolto principalmente al lavoratore [3], i documenti divulgati dal Barpi (Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels) che, a partire dall'archivio di incidenti riportati nel database ARIA, propone casi studio su problematiche ricorrenti [4] ed il MAHBullettin elaborato sulla base degli incidenti rilevanti registrati nel database e-mars. I documenti disponibili fanno però riferimento ad incidenti accaduti; poco è, invece, disponibile circa una raccolta dei quasi incidenti in ambito Seveso i cui esiti siano condivisi tanto con le imprese che con le Autorità. L'attività del gruppo di lavoro prende forma dalla volontà di analizzare le informazioni sui quasi incidenti disponibile e riferita ad impianti presenti sul territorio nazionale al fine di:

- condividere all'interno della comunità delle Autorità competenti le informazioni disponibili per pervenire ad un'organizzazione condivisa delle informazioni raccolte sui near-miss negli stabilimenti Seveso;
- fornire indicazioni tecniche (generali o settoriali) per il miglioramento della sicurezza nel caso di problematiche ricorrenti;
- identificare le criticità e le opportunità in relazione all'innovazione tecnologica nei sistemi di controllo e promuovere lungimiranza nella prevenzione degli incidenti chimici.

Ad oggi, sono già stati pubblicati sul sito del Mite, area del Coordinamento nazionale, due bollettini tematici relativi ai serbatoi con tetto galleggiante [5] ed agli indicatori/misuratori di livello [6].

2.2 SGS PIR e permessi di lavoro

I gestori degli stabilimenti soggetti agli adempimenti del D.lgs. 105/2015 devono predisporre un documento che definisce la propria politica di prevenzione degli incidenti rilevanti da attuare tramite mezzi e strutture idonei da implementare nell'ambito del sistema di gestione della sicurezza ai fini della prevenzione degli incidenti rilevanti (SGS PIR) predisposto in conformità all'allegato 3 ed alle linee guida di cui all'allegato B del decreto. Il SGS PIR deve trattare tutti gli elementi gestionali previsti dal decreto tra i quali rientra il "controllo operativo" (allegato 3, punto b-iii) che include la manutenzione dell'impianto, del processo e delle apparecchiature. Per una definizione dettagliata dei contenuti del SGS PIR relativi al controllo operativo, il riferimento è il paragrafo 3.4 dell'allegato B che per le procedure di manutenzione (sotto paragrafo 3.4.4) specifica che "le attività devono essere opportunamente autorizzate e documentate, anche attraverso specifici sistemi di permessi di lavoro e accesso".

I permessi di lavoro (PdL) sono oggetto di verifica nel corso delle ispezioni. L'adozione, mediante specifica procedura, di un sistema di permessi di lavoro per autorizzare, gestire e documentare l'esecuzione di lavori all'interno di un impianto in esercizio, consente di ridurre il rischio correlato alle attività di verifiche, controlli, ispezioni, manutenzioni, costruzioni e/o montaggi, smantellamento di parti o componenti. È utile che gli interventi di manutenzione siano svolti in modo pianificato attraverso l'utilizzo di permessi di lavoro scritti che precisino responsabilità, mezzi, tempi, interfacce, limiti di intervento, precauzioni, segnalazioni; di procedure o istruzioni di lavoro comprendenti tutte le indicazioni atte a prevenire incidenti rilevanti e a garantire l'incolumità degli operatori (ad esempio le ispezioni preliminari, le eventuali operazioni di bonifica e i controlli da effettuare prima di procedere alle attività, le appropriate verifiche dei sistemi di sicurezza e in generale tutte le informazioni necessarie); di piani di controllo che precisino il controllo iniziale delle autorizzazioni, le verifiche preliminari di operabilità, i controlli finali prima della rimessa in esercizio.

Occorre tenere presente che, per definizione, il permesso deve mettere in evidenza ed informare i lavoratori dei rischi specifici inerenti all'area di lavoro ed alle attività da svolgere [7].

2.2.1 *Contenuti del permesso di lavoro*

In particolare, i permessi di lavoro e le altre istruzioni devono specificare:

- il tipo di attività da svolgere, la specifica dell'apparecchiatura su cui svolgerlo e la rispondenza delle parti di ricambio;
- i pericoli associati all'attività;
- le modalità di presa in carico dell'apparecchiatura dall'unità responsabile del suo controllo in condizioni normali di esercizio;
- le istruzioni per bonificare l'apparecchiatura o l'area prima dell'intervento;
- i sistemi/procedure di sicurezza per proteggere gli operatori dai pericoli come per esempio la disalimentazione, la predisposizione di lucchettature e blocchi (tecniche di Lockout-tagout);
- i dispositivi di protezione individuale da indossare;
- ove richiesto, il monitoraggio delle condizioni di lavoro e delle prestazioni del lavoratore durante lo svolgimento dell'attività (per esempio nei lavori in spazi confinati);
- le procedure da seguire per svolgere l'attività non di routine (riparazione, sostituzione, ispezione, ecc.) incluse le eventuali procedure di disinstallazione/re-installazione del componente;
- le ispezioni, prove o altro da effettuare per verificare che l'apparecchiatura e/o l'area interessata siano perfettamente idonee a tornare operative;
- la sequenza di operazioni da seguire per la rimessa in esercizio dell'apparecchiatura, inclusi i controlli di pre-avviamento, ispezioni e prove come per esempio la verifica di assenza di gocciolamenti, di allineamento degli elementi rotanti, di rimozione dei lucchetti e blocchi, ecc.;
- le modalità di passaggio di riconsegna formale dell'apparecchiatura e/o dell'area all'unità responsabile del suo controllo in condizioni normali di esercizio.

Un utile riferimento per la predisposizione del permesso di lavoro è costituito dalla norma UNI 10449:2008 [8].

2.2.2 *Informazione, addestramento e qualificazione*

Tutto il personale che deve svolgere attività critiche per la sicurezza, incluse le attività di manutenzione (siano lavoratori interni allo stabilimento o dipendenti da ditte appaltatrici o sub-appaltatrici, in generale fornitori di prodotti o servizi) deve ricevere una adeguata formazione e informazione sui rischi, sulle corrette procedure da seguire e sui permessi di lavoro necessari per eseguirle.

In caso di attività particolari, per le quali la legislazione nazionale richieda specifiche qualifiche (ad esempio lavori elettrici, manutenzione di apparecchiature ATEX, spazi confinati), il gestore deve predisporre particolari procedure per tenere conto di tali disposizioni sia per i propri dipendenti (attraverso una qualificazione) che per i dipendenti di ditte appaltatrici (verificando le qualifiche del personale esterno).

È utile che coloro che gestiscono i permessi di lavoro siano coinvolti nelle attività di analisi dei rischi e degli incidenti in modo da sviluppare la giusta consapevolezza dei rischi e la conoscenza degli specifici pericoli insiti nelle attività che sono chiamati ad autorizzare. Allo stesso tempo, come per altri aspetti operativi, il coinvolgimento del personale nella predisposizione delle procedure favorirebbe lo svolgimento del lavoro in sicurezza [7].

3. Obiettivi

L'attività svolta dal gruppo di lavoro è finalizzata alla pubblicazione di un bollettino periodico, a livello nazionale, su argomenti specifici esaminati sulla base degli eventi significativi riportati nelle schede dell'esperienza operativa.

L'obiettivo del presente articolo è analizzare le informazioni che sono state estratte dalle schede dell'esperienza operativa disponibili su questo argomento presentando le criticità ricorrenti collegate all'emissione ed all'applicazione del PdL e/o alla relativa procedura. I risultati ottenuti sono presentati nel bollettino "Permessi di lavoro" che costituisce il terzo bollettino predisposto nell'ambito del Coordinamento nazionale.

4. Metodologia

La modalità di studio ed analisi adottata dal gruppo di lavoro, validata nell'ambito del Coordinamento nazionale, prevede una fase organizzativo-gestionale, a cura del Coordinamento stesso e di un sottogruppo di indirizzo/redazione, ed una fase specifica di studio ed elaborazione dei contenuti del bollettino, che coinvolge un gruppo operativo costituito in seguito alla raccolta delle adesioni sull'argomento da sviluppare.

La Figura 1 riporta le attività previste per la predisposizione dei bollettini ed i sottogruppi coinvolti.

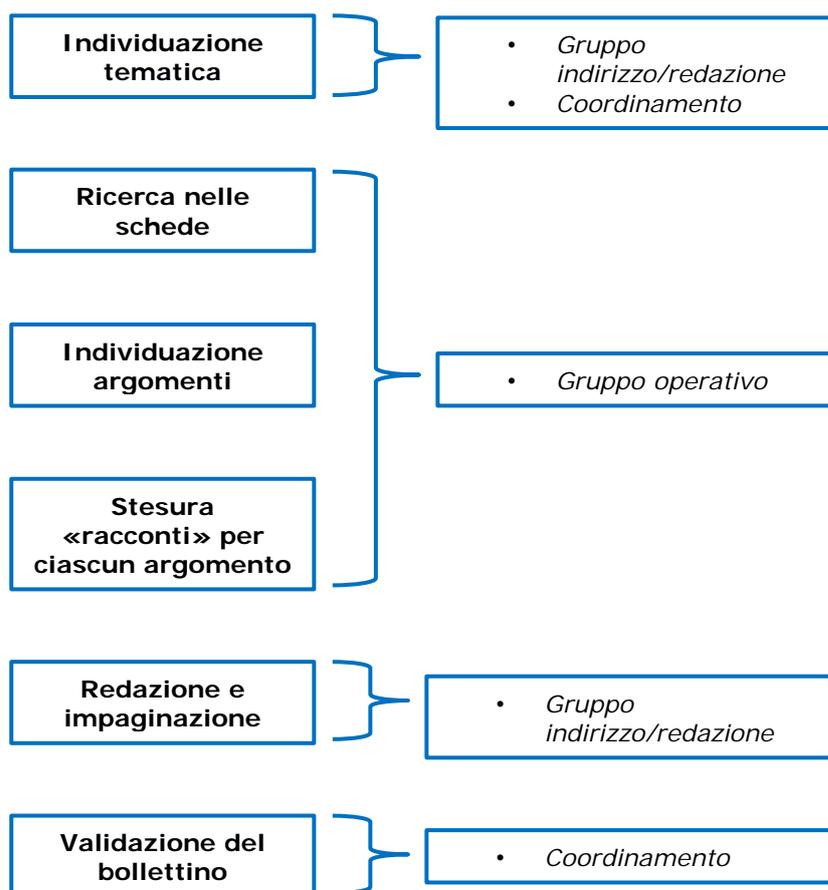


Figura 1. Fasi per lo sviluppo di un bollettino

La metodologia utilizzata (descritta nei successivi paragrafi) utilizza anche applicativi informatici sviluppati dal Laboratorio VII del Dipartimento di Innovazioni Tecnologiche (Dit) di Inail per la gestione della raccolta documentale, per effettuare sia l'archiviazione che la gestione delle informazioni delle schede dell'esperienza operativa.

4.1 Fase operativa: come sviluppare un bollettino

Il punto di partenza è la ricerca nell'archivio delle schede dell'esperienza operativa relative all'argomento da studiare.

Per ogni scheda (opportunosamente anonimizzata) sono disponibili le seguenti informazioni: la data di accadimento dell'evento, il titolo, la descrizione dell'evento, il sistema critico interessato, la sostanza pericolosa coinvolta. La fase di ricerca ed esame delle schede procede come di seguito descritto:

1. è effettuata una ricerca nell'archivio documentale utilizzando termini che consentano di rappresentare al meglio la tematica; si può procedere per livelli di raffinamento successivi, fino a convergere ad un insieme di documenti che soddisfano la ricerca e sono "candidati" ad essere inseriti nel bollettino;
2. sulla base delle informazioni presenti nelle schede, sono individuati gli argomenti che si presentano in comune e quindi più ricorrenti; si tratta degli aspetti che determinano la struttura del bollettino";
3. viene redatto il bollettino e ciascun argomento inserito nel documento è presentato sotto forma di "racconto" facendo riferimento agli eventi più rappresentativi. È proposta una struttura dialogica secondo lo schema "a domanda, rispondo" nel quale la domanda deve sintetizzare la situazione, il comportamento o la condizione che si intende mettere in evidenza, la risposta è un breve riassunto di quanto è accaduto, con riferimento alle schede dell'evento. Si evidenzia che "la risposta" non rappresenta una soluzione al quesito riportato, né l'obiettivo è quello di rappresentare in modo dettagliato le caratteristiche dell'argomento trattato; l'intento è fornire un *alert* sugli aspetti riconducibili ad eventi realmente accaduti e che possono continuare a verificarsi.

5. Risultati

5.1 Ricerca nelle schede dell'esperienza operativa

Per l'argomento "permesso di lavoro" è stata effettuata la ricerca nelle schede dell'esperienza operativa utilizzando i seguenti termini: *permesso di lavoro, permit to work, pdl, pwt*.

La ricerca ha restituito un totale di 46 schede; di queste ne sono state considerate 43 in quanto la compilazione di due schede non si è mostrata esaustiva ai fini di una successiva elaborazione (informazioni relative all'evento ovvero alle misure adottate non adeguate alla possibilità di individuare la principale criticità dell'evento) ed una scheda non è risultata classificabile in uno specifico argomento.

5.2 Individuazione degli argomenti ricorrenti

I principali eventi individuati nelle schede sono stati incendi/principi di incendi e sversamenti/rilasci/gocciolamenti.

Le principali criticità evidenziate sono state raggruppate nei seguenti argomenti:

- errata applicazione del permesso di lavoro ed in particolare la mancata esecuzione delle attività previste dal permesso di lavoro (26 schede);
- errata applicazione del permesso di lavoro per mancanze legate ad altre procedure del SGS PIR (13 schede);

- errata compilazione delle sezioni previste nel permesso di lavoro (3 schede).

Nel caso dell'errata applicazione del permesso di lavoro, la ricerca è stata raffinata dettagliando ulteriori argomenti. Infatti, dall'esame delle 26 schede selezionate è emerso che 8 schede riportavano problematiche connesse alla non corretta consegna degli impianti prima dell'inizio dell'attività di manutenzione; in particolare è stata riscontrata l'incompleta definizione delle corrette modalità di isolamento e bonifica di apparecchiature e linee all'interno delle procedure/istruzioni operative del SGS-PIR.

In 11 schede sono state identificate criticità connesse alla non corretta riconsegna degli impianti al termine dell'attività manutentiva; soprattutto relativamente al mancato controllo dell'impianto ed al ripristino delle condizioni di sicurezza al momento della consegna ovvero al riscontro di una situazione di non corretta operatività/mancato ripristino delle condizioni operative.

Le rimanenti 7 schede hanno evidenziato la non corretta applicazione del permesso di lavoro in relazione a specifiche operazioni previste dal permesso stesso; ad esempio, utilizzo di attrezzature non consentite, mancata verifica dei lavori da parte della figura individuata in procedura, assenza dell'operatore della ditta committente, se previsto, durante operazioni considerate maggiormente critiche.

Per quanto riguarda le 13 schede che fanno risalire l'errata applicazione del permesso di lavoro a carenze attinenti ad altre procedure del sistema di gestione è emerso che le procedure da rivedere erano quelle relative alla valutazione dei rischi da interferenze ed alle modalità di comunicazione e coordinamento tra i lavoratori della ditta appaltante e committente.

L'esame delle schede ha consentito, inoltre, di individuare ulteriori ambiti di riflessione relativamente allo svolgimento di specifiche operazioni: lo svolgimento di lavori a caldo (7 schede) e le modalità di isolamento e bonifica di apparecchiature e linee prima dell'avvio della manutenzione (5 schede). In particolare, si sono verificati incendi/principi di incendi durante l'esecuzione di lavorazioni a caldo che, in 4 casi, hanno comportato l'accensione accidentale di ciuffi di erba secca a causa delle scintille scaturite da operazioni di taglio.

5.3 Stesura del "racconto"

Il bollettino è stato predisposto individuando la domanda che vuole identificare e richiamare la criticità individuata dall'esame delle schede.

La volontà è quella di formulare un interrogativo che possa da una parte incuriosire il lettore e dall'altra focalizzare, in maniera talvolta provocatoria, l'attenzione sull'argomento che, in molti casi, può non sembrare importante, ma lo diventa nel momento in cui continua ad essere oggetto di una scheda di esperienza operativa ossia di un incidente o di un quasi incidente che ricorre in vari stabilimenti, anche se non è noto.

Le risposte a queste domande sono brevi report di quanto è avvenuto nei casi registrati.

La tabella 1 riporta in forma sintetica la struttura dialogica applicata.

Nella prima colonna sono riportati gli argomenti selezionati sulla base dell'esame delle 43 schede dell'esperienza operativa sui permessi di lavoro, nella seconda colonna la domanda formulata a fronte dell'argomento.

La terza e la quarta colonna forniscono la risposta alla domanda evidenziando rispettivamente la criticità specifica e gli eventi a cui si fa riferimento, considerati rappresentativi dell'argomento individuato.

Argomento	Domanda	Risposta	
		Argomento su cui si sono riscontrate criticità	Descrizione eventi
Corretta consegna degli impianti prima dell'inizio dell'attività di manutenzione	Prima di iniziare, sono effettuati i controlli ?	Indicazioni sulle modalità di presa in carico e sulle azioni per le ispezioni preliminari.	<ul style="list-style-type: none"> - una linea di processo non è risultata completamente svuotata e si è verificato un inizio di decomposizione di una sostanza rimasta nel serbatoio - fuoriuscita di gasolio e rifiuto durante l'attività di taglio di un tratto di linea per l'incompleta definizione delle modalità di isolamento e bonifica - controlli prima dell'intervento hanno evidenziato la mancanza degli estintori e del rilevatore di esplosività previsti
Corretta riconsegna degli impianti al termine dell'attività manutentiva;	Al termine, la situazione è ripristinata?	Ispezioni e prove prima della riconsegna e ripristino delle condizioni di sicurezza	<ul style="list-style-type: none"> - errata installazione e mancato collaudo di una pompa alla base della fuoriuscita di prodotto da flangia e dell'incidento di un lavoratore - fuoriuscita di liquido dal tubo di recupero vapori a seguito del sovrariempimento di una ferrocisterna a causa dell'utilizzo di una pompa senza aver effettuato prove di funzionamento
Applicazione del permesso di lavoro rispetto a carenze attinenti ad altre procedure del SGS PIR	Valutazione dei rischi: si può fare di più?	Rischi specifici inerenti all'area di lavoro ed al lavoro stesso	<ul style="list-style-type: none"> - esplosione con il cedimento di un serbatoio che ha coinvolto un operatore per incompleta valutazione del rischio di formazione di atmosfera esplosiva - innesco di vapori di benzina durante l'esecuzione di lavori a caldo; è stato introdotto un permesso d'area per coordinare più efficacemente lavorazioni interferenti - lo sversamento di prodotto sull'area del bacino di contenimento di un serbatoio ha comportato l'introduzione di un annesso tecnico per lavori di particolare complessità
	La comunicazione è efficace?	Comunicazione tra tutti i lavoratori coinvolti nelle attività di manutenzione (modalità e tempistiche)	<ul style="list-style-type: none"> - accensione di propellente in un'area carico forno statico a causa della mancanza di coordinamento - sversamento da pompa in manutenzione scollegata senza aver inserito cieche e aver chiuso alcuna valvola per insufficiente comunicazione sulle tempistiche del PdL durante il carico di un'autobotte
	Perché è importante la supervisione?	<i>Supervision chain</i> nelle diverse fasi operative	<ul style="list-style-type: none"> - mancanza del presidio di personale interno durante la perdita di propilene nella fase di line breaking
Svolgimento di specifiche operazioni	A quali attività fare attenzione?	Controllo e manutenzione delle aree circostanti a quelle dell'intervento	<ul style="list-style-type: none"> - Durante l'esecuzione di lavori a caldo si è verificata la combustione di erba secca.

Tabella 1. Domande e risposte per la stesura del bollettino

6. Suggerimenti per ispettori e gestori

Per quanto riguarda il bollettino "Permessi di lavoro", l'esame delle schede dell'esperienza operativa ha confermato che il permesso di lavoro rappresenta un aspetto delicato nell'ambito delle attività di manutenzione e, più in generale, nella definizione delle procedure

SGS PIR. I lavoratori preposti alla gestione della sicurezza dello stabilimento da una parte ed i rappresentanti delle autorità di controllo dell'altra devono maggiormente approfondire la definizione delle modalità di svolgimento e delle misure di sicurezza prima della manutenzione garantendo strategie di controllo per il rispetto delle stesse. È necessario dare una maggiore attenzione alle attività che prevedono lavori a caldo e verificare se eventualmente presente una specifica procedura per questa tipologia di lavori. In particolare, la Commissione deve ricevere evidenza che nella procedura o nella modulistica prevista siano definite le aree di esecuzione dei lavori, le misure di sicurezza da attuare (ad esempio misure di protezione quale l'utilizzo di teli anticalore a norma), i criteri da adottare per la pianificazione dei lavori tenendo conto della presenza di altre ditte (interferenza) o di periodi di minore attività. La Commissione deve, inoltre, verificare come a livello gestionale sia effettuata la pulizia delle aree e sia garantita l'assenza di materiali combustibili. Tale aspetto tiene conto del contesto ambientale e naturalistico in cui l'impianto è situato. Relativamente alla definizione delle responsabilità ed alla supervisione delle attività nel corso del loro svolgimento, devono essere verificate le azioni di sensibilizzazione e formazione messe in atto, anche se non previste da obblighi di legge. Viene utile verificare se nei contratti con le ditte terze e/o nella procedura di approvvigionamento di beni e servizi, siano previsti, tra i requisiti di sicurezza, aspetti di specifica verifica del personale su particolari attività risultate più critiche. La procedura ed il permesso di lavoro devono dettagliare come avviene la comunicazione degli esiti dell'intervento e quali attività sono eseguite ai fini della verifica di corretta esecuzione e rimessa in esercizio. In tale contesto, rientra la comprensione delle indicazioni riportate dal personale che ha eseguito i lavori sulla specifica sezione del permesso di lavoro e approfondimenti sulle modalità di esecuzione della manutenzione nel corso delle interviste al personale sia interno che delle ditte terze preposte alla manutenzione.

7. Conclusioni

Al momento della predisposizione del presente articolo, il bollettino "Permessi di lavoro" è stato presentato al Coordinamento nazionale e risulta in fase di pubblicazione. Lo studio effettuato, in linea con gli obiettivi generali del progetto, mira a fornire indicazioni che possano essere utili ai funzionari degli Organi tecnici impegnati nelle ispezioni ex art. 27 del D.lgs. 105/15. Le indicazioni sono disponibili anche per i gestori delle aziende nell'ambito della propria gestione dei pericoli di incidente rilevante e nella definizione delle attività informative periodiche e di eventi formativi specifici. Infine, le conclusioni delle analisi, possono essere utilizzate dalle Autorità competenti per la definizione di indirizzi, individuati sulla base di problematiche rilevanti, o nella definizione di controlli mirati.

Ringraziamenti

Si esprime un sentito ringraziamento per il supporto proficuo e costruttivo fornito dall'Architetto Andrea Santucci.

Bibliografia

- [1] <https://www.mite.gov.it/pagina/coordinamento-luniforme-applicazione-sul-territorio-nazionale-art-11-dlgs-1052015> (ultimo accesso: 09/09/2021)
- [2] <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content> (ultimo accesso: 09/09/2021)
- [3] <https://www.aiche.org/ccps/process-safety-beacon> (ultimo accesso: 09/09/2021)
- [4] <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr> (ultimo accesso: 09/09/2021)

- [5] https://www.mite.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/rischio_industriale/bollettino_01_2019_tetto_galleggiante.pdfhttps://www.mite.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/rischio_industriale/bollettino_01_2019_tetto_galleggiante.pdf (ultimo accesso: 09/09/2021)
- [6] https://www.mite.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/rischio_industriale/bollettino_02_2019_livellostati.pdf (ultimo accesso: 09/09/2021)
- [7] EU Technical Working Group on Seveso Inspections, Permit to Work, <http://minerva.jrc.ec.europa.eu>, MAHB n.2/2014
- [8] UNI 10449:2008 “Manutenzione - Criteri per la formulazione e gestione del permesso di lavoro”

Modellazione del comportamento di serbatoi criogenici per lo stoccaggio ed il trasporto di GNL esposti ad incendio

T. Iannaccone, G.E. Scarponi, V. Cozzani

LISES - Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

Sommario

Il presente contributo descrive una metodologia per la valutazione del rischio di cedimento di serbatoi di GNL esposti ad incendio, basandosi sulla modellazione CFD della risposta del serbatoio stesso al flusso termico generato dalle fiamme. Inoltre, viene introdotta una coppia di indicatori (ottenuti rielaborando i risultati dell'analisi numerica) che, dato uno specifico scenario incidentale, fornisce una metrica semplificata per la valutazione del rischio di cedimento del serbatoio.

A scopo dimostrativo, la metodologia è applicata ad un insieme di casi studio in cui vengono variati i principali parametri costruttivi ed operativi quali le dimensioni del serbatoio ed il livello di riempimento.

1. Introduzione

L'interesse per il gas naturale liquefatto (GNL) come potenziale alternativa energetica a ridotto impatto ambientale per i trasporti marittimi e stradali è aumentato considerevolmente nell'ultima decade [1]. Questo ha portato alla nascita di un numero crescente di progetti per lo sviluppo di una rete di distribuzione e stoccaggio di tale combustibile [2], che comprende l'utilizzo di serbatoi criogenici di medie e grandi dimensioni. Ciò pone importanti interrogativi dal punto di vista della sicurezza, che si estendono all'intera filiera produttiva ed alla relativa rete di distribuzione [3–5]. In quest'ambito, il rischio legato alla possibile esposizione ad incendio di serbatoi criogenici per lo stoccaggio ed il trasporto di GNL a seguito di eventi incidentali rappresenta un aspetto di particolare importanza. In tali circostanze, l'aumento della pressione interna ed il concomitante indebolimento della struttura del serbatoio possono portare al collasso del serbatoio stesso, provocando ulteriori incendi ed esplosioni [3,6,7]. Risulta perciò di fondamentale importanza prevenire questo tipo di eventi attraverso una progettazione adeguata dei sistemi di protezione e la adozione di procedure di intervento appropriate. Per essere efficaci, è necessario che entrambe queste misure di mitigazione siano basate sulla conoscenza dettagliata del comportamento dei serbatoi criogenici in caso di esposizione ad incendio. In questo senso, la modellazione avanzata rappresenta uno strumento fondamentale per lo studio approfondito di tale scenario incidentale. Il presente contributo descrive una metodologia basata sulla modellazione CFD del comportamento di serbatoi di GNL esposti ad incendio. Tale modello, validato attraverso il confronto con dati sperimentali, è applicato ad una serie di casi studio in cui vengono variati i principali parametri costruttivi quali le dimensioni del serbatoio ed il livello di riempimento. Infine, la metodologia prevede il calcolo di due indicatori (ottenuti rielaborando i risultati dell'analisi numerica) che, dato uno specifico scenario incidentale, forniscono una metrica semplificata per la valutazione del rischio di cedimento del serbatoio.

2. Metodologia

La metodologia per l'analisi della risposta ad incendio di serbatoi di GNL è illustrata in Figura 1. Il primo step è rappresentato dalla definizione dei dettagli geometrici del serbatoio da analizzare e dall'individuazione del flusso termico determinato dall'incendio. In seguito, si procede alla creazione della griglia di calcolo. Il terzo step consiste nella simulazione del comportamento termo-fluidodinamico del serbatoio attraverso l'utilizzo di un modello CFD bi-dimensionale. Il modello considerato nel presente contributo è stato sviluppato in studi precedenti presso l'Università Di Bologna [8]. Questo si basa sulla soluzione delle equazioni di Navier-Stokes in regime transitorio mediate secondo Reynolds. Infatti, il moto di convezione naturale che si sviluppa all'interno del serbatoio a seguito del riscaldamento dovuto all'incendio esterno è turbolento. In questo senso, è stato attivato il modello di turbolenza a due equazioni $k-\omega$ SST. Inoltre, data la presenza di due fasi, liquido e vapore, e della possibilità di un cambiamento di fase in entrambe le direzioni, sono stati inclusi nell'analisi un modello multifase ed uno di evaporazione/condensazione. I dettagli sulle equazioni componenti i modelli ed del setup numerico adottato per la loro soluzione sono riportati altrove [8].

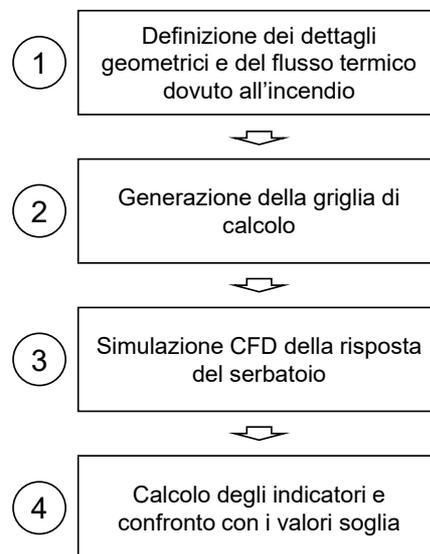


Figura 1. Schema della metodologia per l'analisi della risposta di serbatoi di GNL esposti ad incendio

Attraverso il modello CFD è possibile ottenere informazioni dettagliate quali: la curva di pressurizzazione, le mappe di temperatura sulle pareti interne ed esterne ed all'interno del fluido, il campo di velocità del fluido stesso. Sebbene tali dati risultino di fondamentale importanza per caratterizzare e per comprendere il comportamento del serbatoio esposto ad incendio, è utile disporre di un insieme limitato di indicatori che, dato uno specifico scenario incidentale, forniscono una metrica semplificata per la valutazione del rischio di cedimento del serbatoio. In particolare, nella presente metodologia, sono stati introdotti due indicatori, le cui definizioni sono riportate in Tabella 1.

Indicatore	Formula	Scopo
TI	$\frac{S_{max}}{A_c}$	Quantificazione dell'indebolimento della struttura dovuto alle alte temperature
PI	$1 - \frac{MAWP - P_t}{MAWP - P_0}$	Quantificazione della riduzione del margine di sicurezza rispetto alla pressione di progettazione

S_{max} : Area della parete del serbatoio in cui la temperatura eccede la massima temperatura di progetto (MDP) (variabile nel tempo)
 A_c : Area critica
MAWP: Pressione massima di progetto
 P_t : pressione all'interno del serbatoio (variabile nel tempo)
 P_0 : pressione operativa

Tabella 1. definizione degli indicatori TI e PI

Il primo indicatore, TI, fornisce una misura dell'indebolimento del serbatoio interno dovuto all'aumento della temperatura. Il parametro S_{max} è l'estensione dell'area sulla superficie del serbatoio interno in cui la temperatura eccede la massima temperatura di progetto (MDP). Secondo lo standard EN 13458.2:2002, per serbatoi di acciaio austenitico isolati, tale temperatura è di 50 °C. Il parametro A_c rappresenta il valore oltre il quale l'estensione dell'area indebolita S_{max} è tale da rendere credibile la perdita di integrità del serbatoio. Questa, secondo i risultati di uno studio precedente [9] è pari a 0.48 m². Il secondo indicatore, PI, fornisce una misura di quanto l'aumento di pressione dovuto al riscaldamento del fluido all'interno del serbatoio si avvicini al valore massimo per il quale il serbatoio stesso è stato progettato. Per entrambi gli indicatori è possibile individuare il valore 1 come la soglia oltre la quale lo scenario di incendio in analisi è in grado di compromettere l'integrità del serbatoio. Come illustrato in Figura 1, la stima degli indicatori TI e PI ed il confronto con i valori soglia vengono effettuati nell'ultimo step della metodologia. È importante sottolineare che tale confronto fornisce una metrica semplificata di rapida applicazione per valutare il rischio di cedimento. Una stima più accurata del tempo di rottura del serbatoio stesso richiederebbe infatti un'analisi meccanica approfondita (ad esempio una modellazione agli elementi finiti).

3. Definizione dei casi di studio

Con lo scopo di illustrare l'utilizzo della metodologia e di esplorare come alcuni parametri, tra i quali il livello di riempimento e la taglia, influenzano il comportamento di un serbatoio contenente GNL in condizioni di incendio, sono stati definiti vari casi studio ai quali applicare la metodologia descritta in precedenza.

In particolare, si sono presi in considerazione due tipi di serbatoio. Il primo è un serbatoio tipicamente utilizzato per lo stoccaggio di GNL per propulsione navale, solitamente installato sul ponte della nave. A questo scopo si utilizzano generalmente serbatoi di tipo C, progettati secondo gli standard dell'International Maritime Organization. Queste unità sono formate da due serbatoi cilindrici concentrici separati da un'intercapedine mantenuta sotto vuoto contenente materiale isolante (generalmente perlite). Il secondo serbatoio preso in considerazione è di quelli solitamente utilizzati per il trasporto stradale di GNL. Questi sono generalmente progettati secondo le prescrizioni dello standard EN 13530-2:2002. Analogamente ai serbatoi di tipo C installati sulle navi, essi sono costituiti di due serbatoi cilindrici concentrici separati da un'intercapedine mantenuta sotto vuoto contenente materiale isolante. Tanto per il serbatoio per il trasporto navale che per quello per il trasporto stradale sono stati considerati tre diversi livelli di riempimento 85, 50 e 15 % (intesi come la percentuale di volume del serbatoio occupata dalla fase liquida). In questo

modo sono stati ottenuti 6 casi studio, i cui parametri caratteristici sono riportati in Tabella 2. Per quanto riguarda lo scenario di incendio, si è preso in considerazione un incendio da pozza che avvolge completamente il serbatoio. La temperatura di fiamma è stata fissata a 860 °C, sulla base di misure sperimentali [10].

ID	Tipo di serbatoio	Grado di riempimento	Diametro interno [m]	Spessore isolante[m]	Pressione operativa [bar]	MAWP/MDT [bar/°C]	Capacità nominale [m ³]
A85	Trasporto navale	85%	4.3	0.25	6.0	11.0/50	240
A50		50%					
A15		15%					
B85	Trasporto stradale	85%	2.3	0.12	1.0	3.0/50	58.0
B50		50%					
B15		15%					

Tabella 2. Lista dei casi studio e dei valori dei parametri principali ad essi associati.

Test di incendio condotti su serbatoi per lo stoccaggio di liquidi criogenici simili a quelli considerati nei casi di studio hanno evidenziato come le deformazioni indotte dalle alte temperature possano portare alla rottura del vuoto nell'intercapedine che ospita l'isolante [10]. Questo porta ad un incremento della conducibilità termica dell'isolante stesso. Pertanto, in via conservativa, si è assunto che la perdita di vuoto nei serbatoi presi in esame avvenga non appena questi sono esposti ad incendio. Ciò si traduce nell'assumere un valore di conducibilità termica per lo strato di perlite pari pari a 300 mW/(m·K) (in presenza di vuoto tale valore sarebbe inferiore e circa pari a 90 mW/(m·K).

I dati riportati in Tabella 2, assieme alle informazioni riguardanti il tipo di incendio preso in considerazione, esauriscono la definizione dei parametri richiesti al primo step della metodologia illustrata in Figura 1. Il passo successivo consiste nella creazione della griglia di calcolo. La Figura 2 mostra la griglia di calcolo utilizzata per il serbatoio per il trasporto stradale, ottenuta adottando i parametri di discretizzazione proposti da Iannaccone e collaboratori [8]. In questo modo si sono ottenute griglie di calcolo con un numero di elementi pari a 163382 per il serbatoio per il trasporto navale ed a 69533 per quello per il trasporto stradale. I pannelli a e b della Figura 2 illustrano come, sfruttando la simmetria del problema, sia stato possibile limitare l'analisi ad una sola metà della sezione del serbatoio. Il pannello c evidenzia come la griglia sia particolarmente raffinata nella regione di fluido adiacente alla parete in acciaio. Questo è necessario per risolvere adeguatamente i gradienti di temperatura che, in questa zona del dominio di calcolo, sono particolarmente elevati.

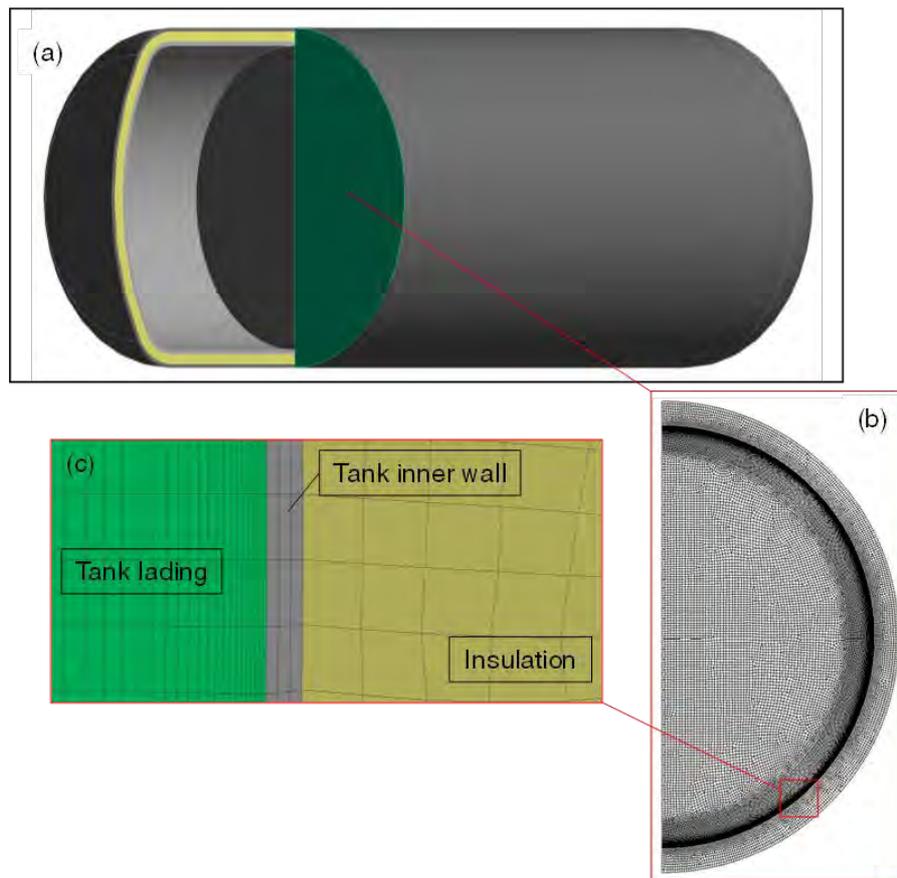


Figura 2. Illustrazione del dominio di calcolo considerato nella simulazione CFD (pannello a), della griglia di calcolo (pannello b) e particolare della griglia di calcolo in prossimità della parete interna del serbatoio.

4. Risultati

In questo paragrafo vengono riportati i principali risultati ottenuti applicando gli step 3 e 4 della metodologia illustrata in Figura 1, partendo da quelli generati dalle simulazioni CFD (step 3). La Figura 3 mostra le curve di pressurizzazione per i serbatoi per il trasporto navale (pannello a) e stradale (pannello b). Appare evidente come la pressurizzazione sia più rapida per livelli di riempimento basso (casi A15 e B15), mentre risulta più lenta in quelli in cui un maggior volume è occupato dalla fase liquida (A85 e B85). Nel caso dei serbatoi per trasporto navale, il valore della pressione massima di design si raggiunge solamente nel caso A15. Questo avviene dopo circa 95 min dall'inizio dell'incendio. Al contrario, per i serbatoi per il trasporto stradale, il valore di MWAP viene raggiunto dopo circa 60 min nel caso B15 e dopo circa 90 min negli altri due. È interessante notare come, per tutti i casi analizzati, la curva di pressurizzazione presenti una fase iniziale della durata di circa 20 min in cui la velocità di crescita della pressione è molto limitata, per poi accelerare. Il valore massimo di pressurizzazione, pari a 0.59 bar/min si è ottenuto per il caso B15, seguito da 0.51 bar/min per il caso A15.

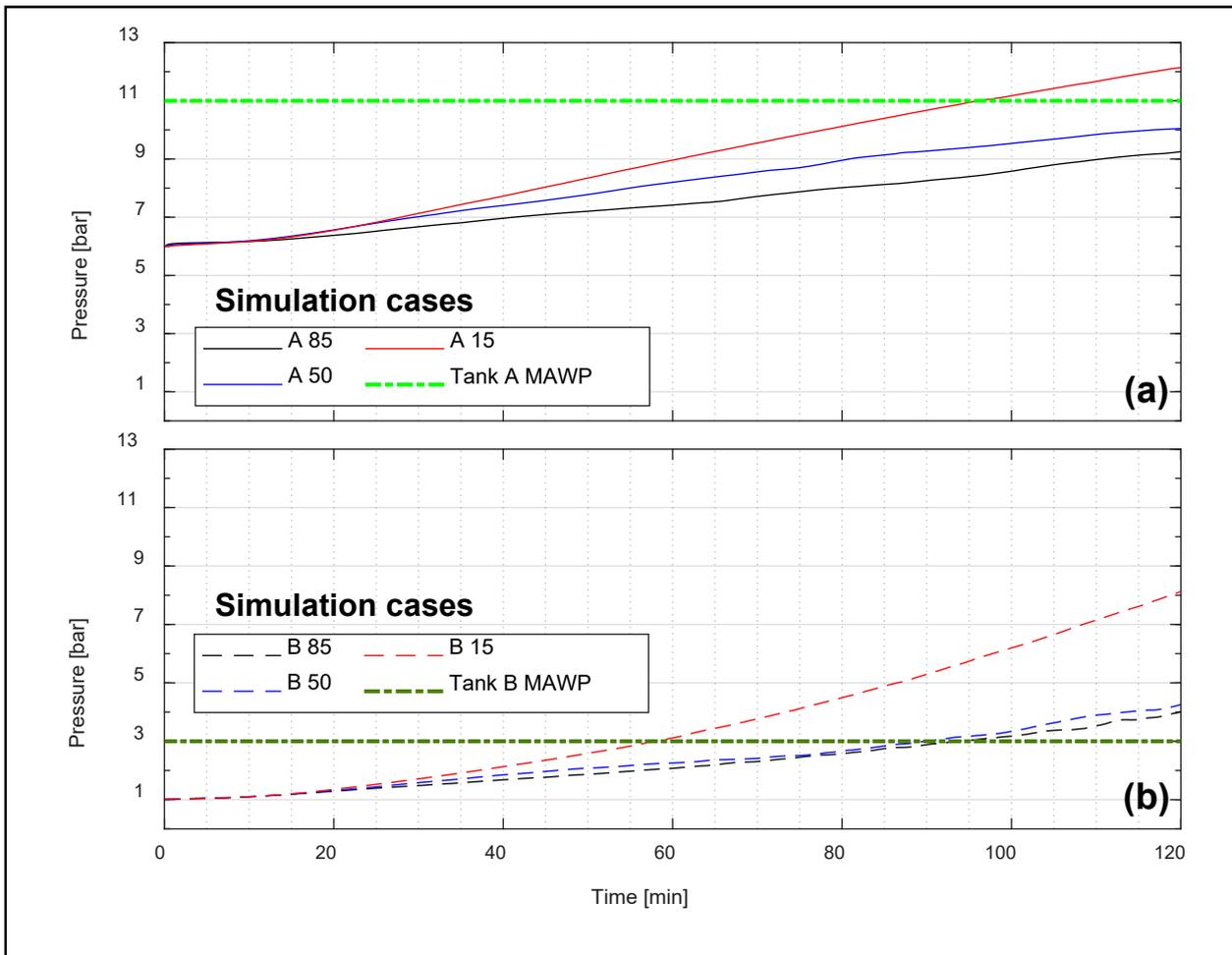


Figura 3. Curve di pressurizzazione ottenute per i serbatoi per il trasporto navale (pannello a) e stradale (pannello b).

Un ulteriore risultato di interesse, apparentemente non immediatamente legato quanto l'innalzamento di pressione alla possibilità di incorrere nel cedimento del serbatoio, è la distribuzione di temperatura nella fase liquida. La Figura 4 mostra l'evoluzione temporale della temperatura della fase liquida per il caso A50. Si può notare chiaramente come questa sia non omogenea: il liquido a contatto con le pareti si riscalda, generando un moto di convezione naturale che produce un accumulo di liquido caldo al di sotto del pelo libero. Questo fenomeno, largamente osservato anche sperimentalmente, prende il nome di stratificazione termica e promuove la pressurizzazione del serbatoio, la quale risulterebbe più lenta se il calore proveniente dalla parete venisse distribuito in maniera omogenea nella fase liquida [11]. La capacità di un modello di catturare correttamente la stratificazione termica è perciò fondamentale per ottenere una curva di pressurizzazione accurata. E' stato infatti dimostrato come modelli semplificati che trascurano tale fenomeno possano produrre risultati di pressurizzazione non conservativi, inaccettabili nel campo della sicurezza dello stoccaggio e del trasporto di sostanze pericolose [12].

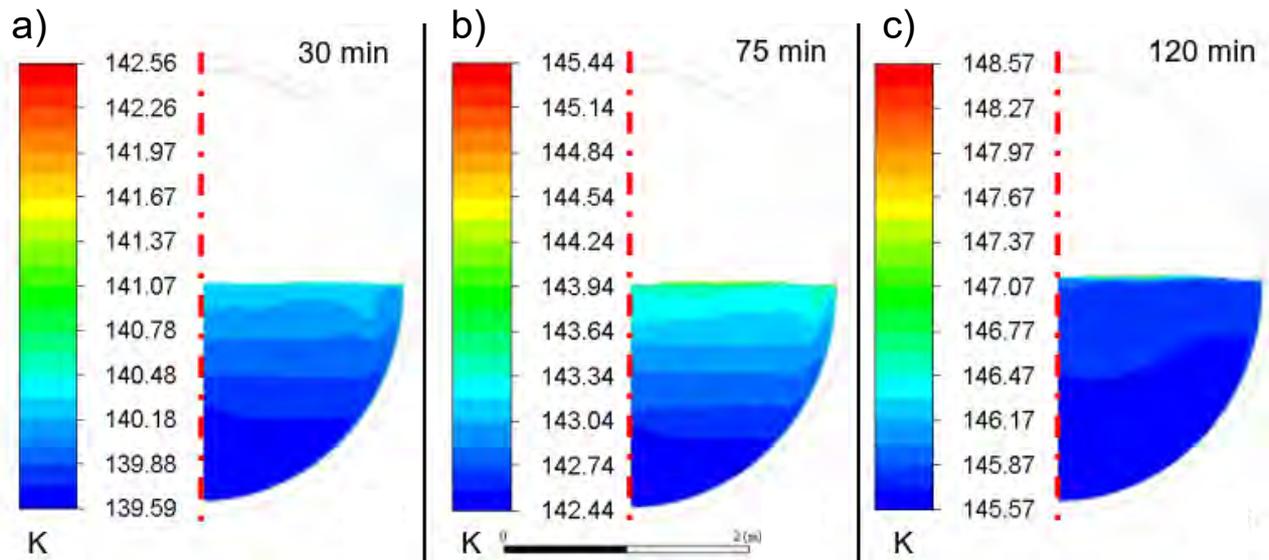


Figura 4. Distribuzione della temperatura nella fase liquida per il caso A15 dopo 30, 75 e 120 min di esposizione.

In aggiunta ai dati di pressurizzazione e di temperatura della fase liquida, le simulazioni CFD permettono di ottenere risultati dettagliati in termini di campo di moto nelle due fasi, temperature di parete, identificazione delle zone di interessate da evaporazione/condensazione. Tuttavia, per motivi di spazio, questo tipo di dati non è stato mostrato nel presente contributo ma è riportato altrove [8].

L'ultimo step della metodologia illustrata in Figura 1 consiste nella valutazione degli indicatori TI e PI, allo scopo di individuare il margine di sicurezza rispetto alle regioni in cui è il rischio di cedimento del serbatoio è elevato.

La Figura 5 mette in relazione i valori di TI e PI per i 6 casi studio analizzati, valutati per periodi di esposizione pari a 60, 90 e 120 min.

A seconda di tali valori, è possibile identificare 3 zone nel piano TI, PI:

- 1) Una zona di sicurezza (rettangolo verde in figura 5), nella quale TI e PI sono entrambi minori di 1, in cui è possibile escludere il rischio di cedimento
- 2) Una zona critica (rettangolo rosso in figura 5), nella quale entrambi gli indicatori sono maggiori di 1, in cui il rischio di cedimento è alto
- 3) Una zona intermedia (rettangoli gialli in figura 5), nella quale solo uno dei due indicatori è minore di 1, in cui non è possibile escludere il cedimento del serbatoio

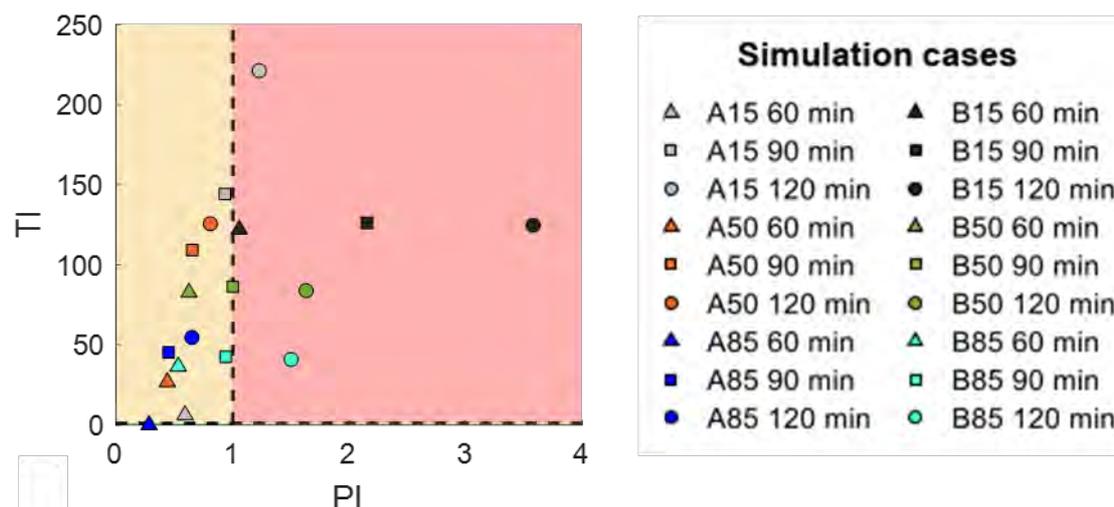


Figura 5. Valori di TI e PI per i 6 casi studio analizzati, valutati per periodi di esposizione pari a 60, 90 e 120 min

La maggior parte dei punti riportati in Figura 5 ricade nella zona gialla, a causa dell'elevato valore di TI. Ciò sta ad indicare che, almeno per tempi di esposizione relativamente bassi, l'aspetto più critico per l'integrità del serbatoio è l'indebolimento dovuto alle alte temperature. Con l'aumentare del tempo di esposizione si può notare come, per tutti i casi ad eccezione del A85, ci si sposti nella regione critica, in cui tanto l'indebolimento meccanico quanto l'innalzamento della pressione raggiungono valori che mettono a repentaglio l'integrità del serbatoio. In questi casi, risulta perciò necessario prendere in considerazione l'adozione di misure atte a mitigare il rischio di cedimento.

5. Conclusioni

La riduzione del rischio di cedimento di serbatoi per lo stoccaggio ed il trasporto di GNL in caso di incendio passa attraverso la comprensione dei fenomeni che caratterizzano il serbatoio stesso durante questo tipo di scenario. A tale scopo, è stata presentata una metodologia basata sulla modellazione CFD del comportamento di serbatoi di GNL esposti ad incendio. Oltre all'analisi termo-fluido dinamica, che fornisce informazioni dettagliate sulle curve di pressurizzazione, sulla distribuzione di temperatura nel fluido, nelle pareti d'acciaio e nello strato di isolante, la metodologia permette una valutazione rapida e semplificata del rischio di cedimento del serbatoio attraverso la stima di indicatori. L'analisi di una serie di casi di studio realistici ha dimostrato tale metodologia sia uno strumento utile a valutare i tempi di pressurizzazione e l'indebolimento della struttura del serbatoio dovuta all'aumento delle temperature. Inoltre, attraverso la sua applicazione, è possibile valutare l'impatto di alcuni parametri, quali il livello di riempimento e le dimensioni del serbatoio, sulla risposta del serbatoio stesso in caso di esposizione ad incendio esterno. In particolare, si è notato che all'aumentare del diametro del serbatoio, la pressurizzazione è più lenta. Inoltre, ad alti livelli di riempimento, il liquido causa un effetto di mitigazione per quanto riguarda l'innalzamento della temperatura (e quindi l'indebolimento) della parete interna del serbatoio.

I risultati forniti dalla metodologia possono rivelarsi utili ai fini di valutare la necessità di installare sistemi di sicurezza atti a mitigare il rischio di cedimento

6. Bibliografia

- [1] Speirs J., Balcombe P., Blomerus P., Stettler M., Brandon N., Hawkes A., Can natural gas reduce emissions from transport, *Heavy Goods Veh. Shipp.* 2019
- [2] International Gas Union (IGU), *World LNG report*, Barcelona, Spain. 2017
- [3] Dan S., Lee C.J., Park J., Shin D., Yoon E.S., Quantitative risk analysis of fire and explosion on the top-side LNG-liquefaction process of LNG-FPSO, *Process Saf. Environ. Prot.* 2017; 92: 430-441
- [4] Kalathil M.J., Renjith V.R., Augustine N.R., Failure mode effect and criticality analysis using dempster shafer theory and its comparison with fuzzy failure mode effect and criticality analysis: A case study applied to LNG storage facility, *Process Saf. Environ. Prot.* 2020; 138: 337–348
- [5] Markowski A.S., Siuta D., Selection of representative accident scenarios for major industrial accidents, *Process Saf. Environ. Prot.* 2017; 111: 652–662
- [6] Oggero A., Darbra R.M., Muñoz M., Planas E., Casal J., A survey of accidents occurring during the transport of hazardous substances by road and rail., *J. Hazard. Mater.* 2006; 133: 1–7
- [7] Pitblado R.M., Woodward J.L., Highlights of LNG risk technology, *J. Loss Prev. Process Ind.* 2011; 24: 827–836
- [8] Iannaccone T., Scarponi G.E., Landucci G., Cozzani V., Numerical simulation of LNG tanks exposed to fire, *Process Saf. Environ. Prot.* 2021; 149: 735–749
- [9] Scarponi G.E., Landucci G., Tugnoli A., Cozzani V., Birk A.M., Performance assessment of thermal protection coatings of hazardous material tankers in the presence of defects, *Process Saf. Environ. Prot.* 2017; 105: 393–409
- [10] Kamperveen J.P., Spruijt M.P.N., Reinders J.E.A., Heat Load Resistance of Cryogenic Storage Tanks-Results of LNG Safety Program, *Utr. TNO.* 2016
- [11] Birk A.M., Scale effects with fire exposure of pressure-liquified gas tanks, *Loss Prev. Process Ind.* 1995; 8: 275–290
- [12] Scarponi G.E., Landucci G., A.M. Birk, Cozzani V., Three dimensional CFD simulation of LPG tanks exposed to partially engulfing pool fires, *Process Saf. Environ. Prot.* 2021; 150: 385–399

Le perdite di contenimento negli stabilimenti Seveso: uno studio sulla base delle schede dell'esperienza operativa

M. R. Vallerotonda, S. M. Ansaldi, A. Pirone, P. Agnello

Inail - Dit

Sommario

Il D.lgs. 105/2015, di recepimento della Direttiva Seveso III, prevede la pianificazione e programmazione delle ispezioni sul sistema di gestione della sicurezza per il controllo del pericolo di incidenti rilevanti (SGS PIR). Tra la documentazione acquisita dalla Commissione ispettiva incaricata di svolgere l'ispezione ci sono le schede dell'esperienza operativa nelle quali il gestore riporta incidenti, quasi incidenti ed anomalie occorse nello stabilimento o in altri simili negli ultimi dieci anni. Lo studio e l'analisi di questi eventi sono un aspetto fortemente sollecitato anche dalla normativa di settore, ma negli ultimi anni è sempre più richiesto un approccio più concreto ai fini della valutazione dell'efficacia del SGS PIR. In quest'ottica, a partire dalle campagne ispettive Seveso successive all'emanazione del D.lgs. 105/2015, l'Inail ha avviato una sistematica raccolta delle schede dell'esperienza operativa relative agli stabilimenti di soglia superiore.

Lo scopo del presente lavoro è caratterizzare gli eventi connessi alle perdite di contenimento negli stabilimenti di soglia superiore (in particolare raffinerie ed impianti di processo) sulla base delle informazioni presenti in tali schede. L'analisi si focalizza sugli eventi relativi alle perdite di contenimento che coinvolgono diversi tipi di apparecchiature (tra cui linee, serbatoi, scambiatori, pompe o strumentazione, valvole, allarmi, dispositivi di misura). La maggior parte di questi documenti specifica quali barriere hanno fallito e quali hanno funzionato per prevenire o mitigare l'escalation delle conseguenze. La metodologia utilizza strumenti di ricerca basati su tecniche di intelligenza artificiale.

I risultati ottenuti consentono di individuare i casi più ricorrenti e sono preziosi per gli ispettori al fine di indirizzare le future ispezioni, per i gestori degli stabilimenti per avere delle conoscenze condivise e, come eventuale ulteriore ricaduta, utili per la definizione di indirizzi normativi.

1. Introduzione

Le ispezioni sul SGS PIR effettuate negli stabilimenti assoggettati al D.lgs. 105/2015 [1] sono effettuate sulla base di una dettagliata metodologia, riportata nell'allegato H del decreto stesso, che prevede l'utilizzo di una lista di riscontro relativa alla disamina degli elementi gestionali richiesti dall'allegato 3 del decreto, l'analisi e la prova dei sistemi tecnici adottati per gli scenari incidentali derivanti dall'analisi di rischio e l'esame dell'esperienza operativa presentata dal gestore dello stabilimento relativa alla raccolta ed all'analisi degli eventi significativi (incidenti e quasi incidenti) occorsi negli ultimi dieci anni presso lo stabilimento e/o in stabilimenti simili.

La verifica dell'adeguatezza del SGS PIR dall'esame degli incidenti e dei quasi incidenti, è un approccio che ha trovato applicazione nelle verifiche ispettive soprattutto in seguito all'emanazione della nuova normativa di settore.

Sulla base degli eventi riportati dal gestore dello stabilimento nelle schede dell'esperienza operativa, la Commissione avvia la discussione analizzando le barriere di sicurezza di carattere tecnico, organizzativo e gestionale secondo un approccio di tipo "risk based" che consente di individuare le criticità del sistema di sicurezza. In Italia, la pratica di effettuare un'ispezione SGS PIR centrata sull'esame delle schede dell'esperienza operativa per una

valutazione globale dell'efficienza del sistema stesso, è stata presentata da alcuni precursori già qualche anno fa da Agnello et al. [2] ed ha trovato applicazione nelle campagne ispettive ai sensi del D.lgs. 105/2015.

La volontà di valorizzare le informazioni contenute nelle schede dell'esperienza operativa si è concretizzata in un progetto più esteso a supporto sia dei componenti delle Commissioni ispettive che dei gestori. Il presente articolo mira ad evidenziare il potenziale informativo contenuto nelle schede dell'esperienza operativa focalizzandosi su quelle relative agli impianti chimici di processo. Il lavoro è articolato come segue: nel paragrafo 2 sono presentati gli obiettivi; nel paragrafo 3 è illustrata la metodologia proposta e la procedura utilizzata per estrarre le informazioni dall'archivio. Il paragrafo 4 descrive i risultati relativi a casi studio analizzati, mentre il 5 contiene le conclusioni.

2. Obiettivi

In Italia, per lo svolgimento delle ispezioni sul sistema di gestione PIR presso gli stabilimenti soggetti al D.lgs. 105/15 si utilizza una lista di controllo che consta di 27 punti e 150 sottopunti. Durante tale attività gli ispettori acquisiscono e discutono molti documenti che descrivono la gestione della sicurezza nello stabilimento tra i quali due tipi di relazione compilati dal gestore: le esperienze operative e la tabella eventi-misure. Nel primo documento vengono inseriti gli incidenti e i quasi incidenti accaduti nello stabilimento in esame o in altri simili. Nel secondo il gestore riporta, sulla base degli scenari individuati dall'analisi del rischio e ritenuti credibili, le barriere di sicurezza, tecniche e organizzative, per prevenire tali eventi o per mitigarne le conseguenze.

L'analisi di questi documenti fornisce agli ispettori spunti per approfondire e/o dare priorità ad alcuni aspetti della lista di controllo. In particolare, l'analisi degli eventi registrati, considerati potenziali incidenti intercettati e interrotti per caso, fortuna o abilità, offre l'opportunità di analizzarli rispetto al SGS PIR, per individuarne i punti deboli e far emergere le criticità del sistema di gestione della sicurezza implementato. Pertanto, in settori complessi, comprese le industrie chimiche e petrolchimiche, in cui gli incidenti rilevanti possono essere eventi catastrofici con gravi conseguenze per la salute umana, l'ambiente e lo stabilimento, l'analisi dei quasi incidenti e delle anomalie è fortemente incoraggiata.

L'importanza di analizzare i quasi incidenti è ormai riconosciuta non solo dalla comunità scientifica, ma anche da chi lavora e gestisce ambienti complessi. Andriulo & Gnoni [3] e Phimister & al. [4] constatano che l'analisi di quanto si registra in stabilimento viene generalmente fatta a livello di direzione per prendere eventuali decisioni mirate al miglioramento del proprio sistema di gestione della sicurezza. Gnoni & Saleh [5] dimostrano che i near miss sono discussi alla luce dei principi di sicurezza, indipendentemente dal contesto industriale in cui avvengono, specificando che i metodi generalmente utilizzati per la gestione della conoscenza, inclusi il ragionamento basato sui casi e il text mining, sono utilizzati anche per estrarre informazioni utili al miglioramento della sicurezza. Suzuki & al. [6] propone un approfondimento sul potenziale delle tecniche di gestione della conoscenza per la gestione delle informazioni contenute nelle schede dei quasi incidenti.

L'obiettivo è quello di analizzare e caratterizzare gli eventi registrati per evidenziare le cause più ricorrenti e, laddove possibile, fornire indicazioni per indirizzare la formazione degli ispettori e aggiornare l'attività ispettiva. Il campo di applicazione della Direttiva Seveso in Italia riguarda molti settori industriali differenti tra di loro; in questo lavoro sono state prese in considerazione le esperienze operative registrate negli impianti chimici di processo riguardanti le perdite di contenimento.

Lo studio rientra nell'ambito di un approccio più generale relativo alla diffusione della "cultura della sicurezza" costantemente perseguito dagli autori. In questo contesto, merita di essere comunque sottolineato che lo studio degli incidenti e quasi incidenti deve prescindere dalla ricerca del "colpevole", ma deve mirare a comprendere le cause e valutare le conseguenze

di un evento per poter imparare ed apprendere conoscenze e soluzioni utili ad una platea più vasta. Pertanto, non rientra tra gli scopi del presente lavoro indagare circa eventuali responsabilità ovvero relativamente a conclusioni errate e inadeguata attuazione delle norme di sicurezza.

3. Metodo

In Inail, a partire dalle ispezioni 2016 con l'entrata in vigore del D.Lgs. 105/2015, è iniziata l'organizzazione sistematica delle schede delle esperienze operative, raccolte dagli ispettori Seveso che operano su tutto il territorio nazionale. L'obiettivo di ricerca molto ambizioso è quello di analizzare i documenti ed estrarre la conoscenza in essi contenuta per divulgarla ad ispettori, autorità competenti, gestori, lavoratori ed anche ricercatori.

L'archivio delle esperienze operative contiene attualmente circa 4000 segnalazioni, raccolte in quattro anni di ispezioni da circa 100 ispettori in tutta Italia.

Tale archivio è organizzato assegnando a ciascun documento dei metadati o attributi, tra cui il tipo di settore industriale e l'anno di ispezione. Tutte le altre informazioni sono estratte applicando tecniche avanzate di *text mining* al contenuto testuale del documento. Nelle attività di ricerca svolte in questo ambito negli anni, sono stati utilizzati diversi strumenti, dai motori semantici Ansaldi et al. [7], alle tecniche più sofisticate di Intelligenza Artificiale Ansaldi et al. [8] e Ansaldi et al. [9], al fine di individuare quelli migliori per estrarre più agevolmente i concetti chiave.

Utilizzando un motore di ricerca semantico si possono sfruttare le funzionalità di gestione dei dizionari, delle tassonomie, dei sinonimi che sono aspetti caratteristici di questo tipo di strumento. Come illustrato in Ansaldi et al. [10], utilizzando il sistema IBM OmniFind™, sono state definite alcune semplici tassonomie corrispondenti ai temi che caratterizzano gli elementi chiave coinvolti inclusi: eventi, attrezzature e attività lavorative.

Negli ultimi anni, le tecniche di intelligenza artificiale, tra cui quelle di Machine Learning, cioè di apprendimento automatico, stanno diventando più prestanti per affrontare problemi relativi alla gestione di enormi quantità di dati. Si stanno inoltre potenziando quelle in ambito di Processamento del Linguaggio Naturale PLN e si stanno diffondendo in molti settori industriali che necessitano una gestione documentale in termine di singoli contenuti, non solo di generici file. Recentemente anche per l'archivio delle esperienze operative si sono adottati strumenti più sofisticati, basati su approcci di Intelligenza Artificiale, in particolare quelli contenuti nella suite Watson™ di IBM (Ansaldi et al. Esrel 2020).

Utilizzando questi strumenti si è sviluppato il sistema EsOplA (Esperienze Operative e Intelligenza Artificiale) Ansaldi et al. [9] per l'estrazione di informazioni e conoscenza mediante interrogazioni in linguaggio naturale. Il sistema si basa sul riconoscimento e l'estrazione di elementi caratteristici e delle loro relazioni in accordo con un modello concettuale definito ed utilizzato per il training del sistema.

Le entità che caratterizzano il modello ruotano intorno all'evento che definisce il quasi incidente o incidente, esse sono: l'attrezzatura o il componente interessati, la sostanza, l'attività lavorativa che si stava svolgendo, le barriere organizzative e tecniche interessate, il personale coinvolto. Il modello contiene anche le relazioni tra le entità, una generale che mette in corrispondenza due elementi, altre più specifiche. Tra queste *coinvolge* determina il collegamento di un'entità con una sostanza; *parte_di* indica che un componente è parte di un'attrezzatura; *causa* denota un elemento quale causa di un evento. Per ogni documento processato il sistema estrae in modo automatico le istanze del modello concettuale, perciò si ottiene una rappresentazione matematica della descrizione del quasi incidente.

Il sistema EsOplA fornisce le funzionalità di ricerca mediante sia linguaggio naturale sia la scelta di elementi specifici del modello, entrambe adottate in questo studio. L'utilizzo di questi strumenti ovviamente non sostituisce l'esperienza e la competenza dell'ispettore, ma ne facilita il lavoro. Le funzionalità di ricerca implementate forniscono infatti un supporto

all'ispettore che permette di ridurre il numero di report trovati evidenziando quelli più rilevanti rispetto alle interrogazioni inserite e abbina l'uso di classificazioni e tassonomie ai sinonimi in modo da ricercare concetti e non semplici parole chiave.

3.1 Specifiche del metodo proposto

Le schede delle esperienze operative, come già detto, comprendono gli eventi più significativi, tra cui anomalie, quasi incidenti e incidenti, avvenuti negli ultimi dieci anni presso gli stabilimenti. Tutti questi eventi sono accaduti a causa di una più o meno grave deviazione dalle normali condizioni operative, procedurali o organizzative comportando una perdita di contenimento con o senza conseguenze.

Il valore delle schede di esperienza operativa sta soprattutto nel racconto stesso; infatti esse riportano la descrizione dell'evento e i risultati dell'analisi, effettuata dal gestore, che dovrebbe evidenziare le cause, le barriere che hanno fallito e quelle che hanno funzionato per fermare l'evoluzione verso un incidente rilevante, ed inoltre quali interventi sono stati programmati.

Pur utilizzando lo stesso formato, le schede sono compilate con differente livello di dettaglio, alcune sono molto scarse di informazioni, altre sono invece esaurienti sia nella descrizione che nei risultati dell'analisi effettuata.

Questa diversità fornisce un'immagine veritiera di quanto succede negli stabilimenti a rischio di incidente rilevante, ma aumenta la complessità di estrazione delle informazioni e della conoscenza.

Le considerazioni che emergono dalla ricerca effettuata su questo tipo di archivio non portano sempre a conclusioni utili, perché potrebbero mancare informazioni atte a descriverne il contesto; tuttavia è possibile comunque estrarre spunti di riflessione a supporto dell'ispettore durante le ispezioni.

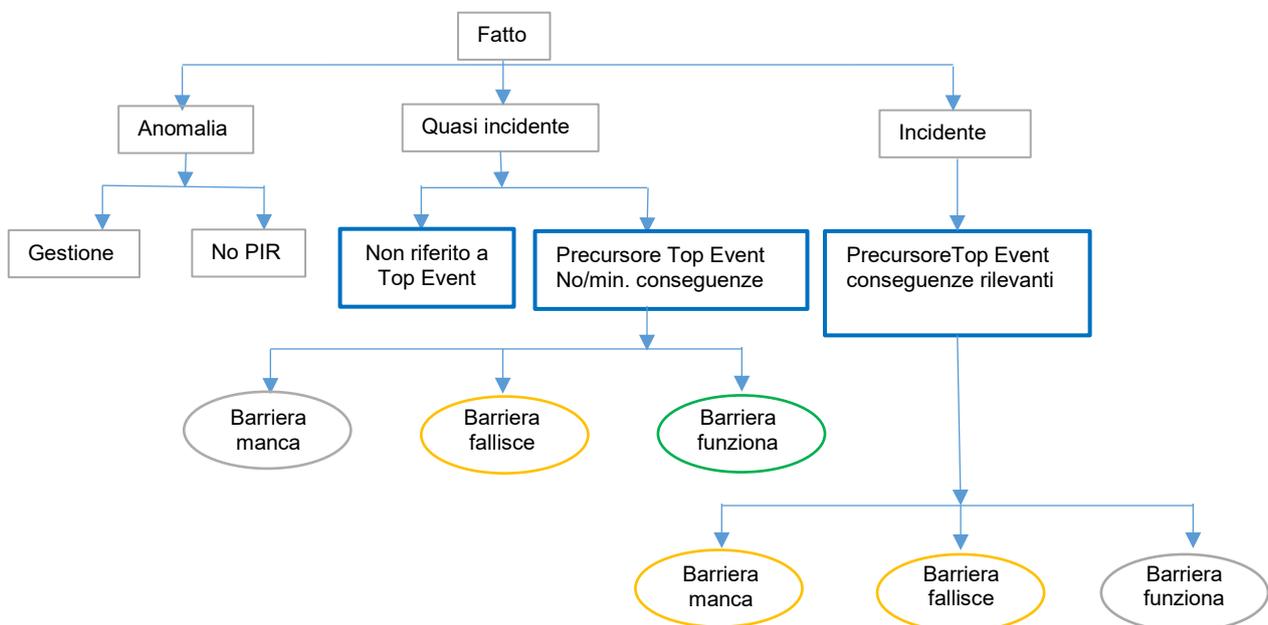


Figura 1. Classificazione delle esperienze operative

Lo schema di Figura 1 illustra una classificazione delle diverse tipologie di esperienze operative raccolte nell'archivio. Le caselle corrispondono ai tipi di eventi e alle loro relazioni rispetto all'evento principale, e alle conseguenze. Relativamente ai quasi incidenti si distingue se possono essere considerati precursori di eventi incidentali rilevanti oppure no, in questo secondo caso il gestore ha comunque ritenuto importante segnalarli per evidenziare situazioni pericolose che sono state analizzate. Alcune esperienze operative,

sebbene non abbiano coinvolto sostanze pericolose, sono meritevoli di attenzione perché riguardano componenti che, se messi fuori uso, potrebbero portare all'interruzione del funzionamento dell'impianto o a conseguenze peggiori.

Per gli incidenti e i quasi incidenti, intesi come eventi senza o con minori conseguenze, si cerca di capire, dall'analisi riportata nella scheda, quali siano le barriere tecniche o organizzative che hanno funzionato, che hanno fallito o che mancavano.

Utilizzando le funzionalità di EsOpIA, per lo studio si è proceduto cercando innanzitutto le diverse tipologie di perdita di contenimento, si è quindi applicato il filtro sul tipo di attività industriale, nell'insieme risultante sono state analizzate le attrezzature coinvolte e le barriere distinguendo il tipo di ruolo che hanno avuto, se hanno funzionato o meno, oppure se sono risultate mancanti e, pertanto, si propone di implementarle.

Poiché le barriere e il loro comportamento sono il punto chiave su cui si basa la ricerca è stato compilato un elenco preliminare di misure adottate partendo dalle tabelle eventuali misure.

Barriera di prevenzione		Barriera di protezione	
Operazione	Componente	Operazione	Componente
Regolazione	Tutti i tipi di valvole	Contenimento	Bacino, pavimentazione
Misura/controllo	Livellostati, pressostati, termostati	Rilevamento	Rilevamento gas, annusatori
Allarme	Alto, altissimo, basso (i.e. livello, temperatura, flusso, pressione)	Rilascio	Dischi di rottura, sfiati
Isolamento	Coibentazione, verniciatura	Emergenza	Blocco del sistema

Tabella 1. Barriere di prevenzione e protezione

La Tabella 1 mostra un elenco, certamente non esaustivo, di barriere di sicurezza: le prime due colonne si riferiscono alle barriere preventive, mentre le altre due descrivono le misure tecniche per mitigarne le conseguenze. Ogni barriera è descritta attraverso la sua funzionalità (colonna Operazione) e i relativi dispositivi come indicato nei sistemi critici (colonna Componente).

4. Risultati

In questa sezione si ripropongono i risultati ottenuti con la metodologia applicata all'archivio documentale delle "esperienze operative" (E.O.) per gli impianti di processo chimico. Applicando la suddetta metodologia sono stati estratti i documenti relativi a specifiche perdite di contenimento quali gocciolamento/trafilamento, perdita, rilascio e incendio per un totale di 395 schede.

Le perdite di contenimento, sia di maggiore che di minore entità, hanno coinvolto attrezzature come serbatoi, scambiatori, pompe, tubazioni e/o strumentazione, quali valvole, allarmi e dispositivi di misura.

Non tutte le schede sono state considerate nello studio; tra quelle scartate alcune (circa 60) riportano una descrizione piuttosto scarna ed è difficile comprendere il contesto in cui si è verificato l'evento, altre (circa 45) riguardano principalmente l'ambito occupazionale e quindi non risultano pertinenti con il presente studio.

L'attività di ricerca implementata nell'archivio documentale è, di fatto, un processo iterativo che combina diversi concetti al fine di scoprire le ricorrenze simili più frequenti. Le Tabelle 2, 3, 4 e 5 riportano i risultati.

4.1 Ricerca per tipo di evento

Questa sezione illustra i risultati ottenuti cercando alcuni tipi di perdite di contenimento, quali: *gocciolamento* (20 schede), *perdita* (187 schede), *rilascio* (54 schede) e l'evento *incendio* (29 schede).

Ciascuna tabella è organizzata in 6 colonne che indicano l'attrezzatura e le eventuali parti coinvolte, le cause individuate dall'analisi, le barriere tecniche e/o organizzative che hanno fallito e quelle che hanno funzionato, l'ultima colonna (N°) indica il numero totale di schede di pertinenza. I numeri tra parentesi indicano il numero di schede che contengono quell'informazione. Nelle schede non sempre ci sono tutte le informazioni cercate, perciò dove queste non siano esplicitamente menzionate nelle tabelle si evidenzia con ND che non ci sono dati disponibili.

Nella Tabella 2, quindi, la prima riga indica che sono state individuate 4 schede (N°) che hanno parlato di problemi di gocciolamento di un serbatoio (Attrezzatura) di cui una relativa al fondo (Componente); per tali eventi le cause individuate sono la corrosione. Inoltre, in due schede si parla di fallimento dei controlli, in un caso di problemi di formazione, in due casi è scattata con successo la procedura di emergenza e in due casi il bacino di contenimento ha contenuto la perdita. In alcune celle della Tabella 2 è stato inserito ND per indicare che mancano alcune informazioni, ad esempio il tipo di componente coinvolto nel gocciolamento delle pompe (riga 3, colonna 2) o quale barriera sia fallita o quale abbia funzionato nella perdita da guarnizione (riga 5, colonne 4 e 5).

Attrezzatura	Componente	Causa	Barriera fallita	Barriera funzionante	N°
Serbatoio (4)	Fondo (1)	Corrosione (4)	Manutenzione/controlli (2), formazione (1)	Procedura emergenza (2), bacino contenimento (2)	4
Tubazione (2)	Guarnizione (2)	Usura (1)	Manutenzione/controlli (1), controlli (1)	Procedura emergenza (2)	2
Pompa (4)	ND	Rottura (2), sovrappressione (2)	Manutenzione/controlli (4)	Procedura emergenza (4)	4
Compressore (1)	Parastrappi (1)	Rottura (1)	Manutenzione/controlli (1)	Procedura emergenza (1)	1
ND	Guarnizione (1)	Danneggiamento (1)	ND	ND	1
ND	Flangia (4)	Errata manutenzione (1)	Manutenzione/controlli (4)	Procedura emergenza (2)	4

Tabella 2. Gocciolamento

Dall'approfondimento dei documenti relativi al gocciolamento potrebbero essere molteplici gli spunti di riflessione, si evince, ad esempio, che i casi più numerosi hanno riguardato serbatoi, pompe e flange e che le cause maggiormente rilevate sono legate a fenomeni di corrosione, usura e danneggiamento. Gli eventi legati al gocciolamento/trafilamento di prodotto sono da intendere come di minima entità e, pertanto, spesso non fanno entrare in funzione barriere di protezione e/o mitigazione, se non quelle strettamente legate alla bonifica del terreno/pavimento interessato con interruzione dell'attività e ripristino immediato delle operazioni. Tali eventi restano, comunque, di notevole interesse perché fanno emergere l'approccio che i gestori attuano per le problematiche ad essi correlati.

Le schede relative alle perdite di prodotto e che, perciò, coinvolgono un quantitativo più importante rispetto alla precedente tipologia, sono le più numerose e forniscono una più ampia analisi. Come si desume dalla Tabella 3, anche in questo ambito le attrezzature maggiormente coinvolte sono i serbatoi, le pompe, le valvole e, soprattutto, le tubazioni; mentre, a livello di componenti risultano per lo più compromesse le guarnizioni, le valvole e gli accoppiamenti flangiati. Nelle perdite, purtroppo, le cause più diffuse restano quelle legate all'usura e al danneggiamento delle attrezzature e/o dei loro componenti, oltreché all'errore umano che può essere dovuto a mancata o insufficiente formazione o a disattenzione nell'attuare le procedure presenti in impianto. Non mancano, inoltre, casi legati ad anomala applicazione e/o rispetto delle procedure di approvvigionamento beni e servizi. Se, poi, si concentra l'attenzione sulle barriere fallite, i numeri più elevati sono legati alle

operazioni di manutenzione e controlli disattesi o non attuati o, peggio, attuati in modalità non idonea. Occorre rilevare, però, un dato positivo legato al fatto che tali documenti sono relativi a quasi incidenti e, quindi, ad eventi che non sono evoluti in incidenti rilevanti veri e propri poiché sono intervenute barriere di protezione e/o mitigazione a bloccarne la sequenza. Tra le barriere maggiormente intervenute vi sono le procedure di emergenza e bonifica, oltre ai sistemi di allarme e ai bacini di contenimento.

Attrezzatura	Componente	Causa	Barriera fallita	Barriera funzionante	N°
Serbatoio (18)	Guarnizione (4), livellostato (3), manometro (1)	Usura (4), errore umano (3), rottura sistema rilevamento (1)	Manutenzione/controlli (10), sistema misura livelli (2), formazione (7)	Procedura emergenza (10), manutenzione/controlli (1)	18
Reattore (12)	Guarnizioni (5), valvola (1), accoppiamento flangiato (1)	Foro (1), usura (2), errore umano (2), incompatibilità prodotto (1)	Manutenzione/controlli (6), formazione (6), sistema blocco (2)	Procedura emergenza (6), sistema allarme (2)	12
Cisterna (3)	ND	Valvola di fondo (1), usura (1), fatica (1)	Manutenzione/controlli (1)	Procedura emergenza (3), bacino contenimento (1)	3
Colonna (2)	Valvola (2)	Errore umano (1)	Manutenzione/controlli (1)	Procedura emergenza (2), sistema allarme (1)	2
Scambiatore (2)	Guarnizione (1), valvola (1)	Anomalia pressione (1)	Manutenzione/controlli (2), formazione (1)	Sistema rilevamento (1), procedura emergenza (1)	2
Pompa (20)	Guarnizione (3), flangia (3), cuscinetti (3)	Rottura tenuta (5), usura (8), sovrappressione (2), mancata lubrificazione (1)	Manutenzione/controlli (17), analisi sicurezza (2), formazione (10), permesso di lavoro (1)	Procedura emergenza (9), bacino contenimento (3)	20
Compressore (4)	Valvola (1)	Errato serraggio (2), tenuta (2)	Manutenzione/controlli (2)	Sistema rilevamento fughe (1), sistema allarme (1), procedura emergenza (1)	4
Tubazione (52)	Giunto (2), guarnizione (4), flangia (3), coibentazione (3)	Sollecitazione termica (1), danneggiamento (14), errato utilizzo (1), usura (3), errore umano (3)	Manutenzione/controlli (24), formazione (22), messa in opera non idonea (2), sistema blocco (1), procedura non idonea (2)	Procedura emergenza (34), bacino contenimento (3), sistema rilevamento perdite (3)	52
Collettore (3)	Raccordo (1)	Errore umano (2)	Manutenzione/controlli (1)	ND	3
Valvola (16)	Flangia (4), guarnizione (2)	Sollecitazioni meccaniche (1), danneggiamento (2), usura (1), rottura per errore umano (1), errata costruzione (1), errore umano (4)	Manutenzione/controlli (10), formazione (5), approvvigionamento beni (1)	Procedura emergenza (7), sistema rilevamento (2), sistema allarme (2)	16
ND	Accoppiamento flangiato (11)	Errato serraggio (5), errore umano (3), danneggiamento (1)	Manutenzione/controlli (5), formazione (6), procedura (2)	Procedura emergenza (4), sistema allarme (1)	11
Flangia (6), manichetta (5), flessibile (1)	Guarnizione (7)	Usura (4), scelta errata (1), danneggiamento (5), errore umano durante montaggio (1)	Manutenzione/controlli (7), formazione (7), approvvigionamento beni (1), sistema rilevamento (1)	Procedura emergenza (11), sistema allarme (1), bacino contenimento (1), sistema blocco impianto (1)	12

Tabella 3. Perdita

I quasi incidenti identificati come rilasci di sostanza pericolosa (vedi Tabella 4) sono altrettanto numerosi e hanno coinvolto per lo più tubazioni, pompe e serbatoi. Anche in questi contesti i componenti implicati sono stati i dischi di scoppio e le guarnizioni, mentre tra le cause più diffuse si annoverano l'usura e/o danneggiamento, oltreché l'errore umano. Tra le barriere fallite ci sono la manutenzione e la formazione; di contro, tra quelle funzionanti sono state individuate prevalentemente le procedure di emergenza e, in tre casi, le corrette procedure di carico/scarico che hanno consentito evidentemente di limitare l'evento.

Attrezzatura	Componente	Causa	Barriera fallita	Barriera funzionante	N°
Serbatoio (4)	Livellostato (1), valvola (1)	Eccessivo riempimento (3), rottura livellostato (1), rottura valvola (1)	Bacino contenimento (1), formazione(1)	Procedura di carico (3)	4
Reattore (3)	Guarnizione (1), flangia (1), disco di scoppio (1)	Usura (1), errore umano (1)	Manutenzione/controlli (2), bacino contenimento (1), permesso di lavoro (1), formazione (1), procedura (1)	Procedura emergenza (1)	3
Cisterna (4)	ND	Errore umano (2), errore misura livello (1)	Formazione (2), procedura scarico (1)	Sistema rilevamento (1), procedura emergenza (1)	4
Generatore (1)	Tenuta (1)	ND	Sistema allarme (1), manutenzione/controlli (1)	Sistema blocco impianto (1)	1
Condensatore (2)	Sfiato (1), disco di scoppio (1)	Usura (1), fatica (1)	Manutenzione/controlli (2)	ND	2
Pompa (5)	Guarnizione (1)	Danneggiamento (2), usura (1), errore umano (2)	Manutenzione/controlli (3), formazione (3)	Procedura emergenza (3), sistema blocco (1)	5
Tubazione (14)	Guarnizione (2)	Usura (3), errore umano (1)	Procedura (3), manutenzione/controlli (3)	Bacino contenimento (2), manutenzione/controlli (1)	14

Tabella 4. Rilascio

Tra i casi di incendio o, per meglio dire, principio di incendio, è stato riscontrato che le attrezzature più coinvolte, oltre a serbatoi e tubazioni, sono i reattori, mentre le cause sono soprattutto legate ad errata manutenzione ed usura (vedi Tabella 5). In un solo caso è emerso che l'evento è stato dovuto all'utilizzo di un materiale non idoneo al processo. Tra le barriere fallite vi sono la manutenzione, svolta in modo non appropriato o, peggio, non effettuata, mentre tra quelle funzionanti, molto spesso, compaiono le procedure di emergenza.

Attrezzatura	Componente	Causa	Barriera fallita	Barriera funzionante	N°
Serbatoio	ND	Errata manutenzione (2), usura (1)	Manutenzione (2) procedura (1)	Procedura emergenza (2)	4
Reattore	Coibentazione (2)	Errata manutenzione (2), usura (2)	Manutenzione (5), sistema blocco (1)	Procedura emergenza (3)	6
Pompa	Tenuta meccanica (1)	Non idoneità al processo (1)	Analisi sicurezza (1), manutenzione (1)	Procedura emergenza (2)	2
Tubazione	Accoppiamento flangiato (1)	Corrosione (1), materiale non idoneo (1)	Manutenzione (5), approvvigionamento (1), formazione (1)	Procedura emergenza (2)	5

Tabella 5. Incendio

4.2 Azioni di miglioramento individuate dai gestori a seguito dell'analisi delle E.O.

L'analisi delle esperienze operative svolta dai gestori è propedeutica a valutare possibili margini di miglioramento con la possibilità e/o necessità di implementare sistemi tecnici, impiantistici e gestionali per evitare che uno o più eventi possano accadere di nuovo. Un elemento interessante emerso dalle schede più complete ed esaustive è quello legato alle azioni/migliorie che i gestori hanno individuato a seguito dell'analisi dell'evento e che intendono attuare nel medio/lungo termine.

Nello specifico, dall'analisi delle schede relative alle perdite per *gocciolamento* in un caso il gestore, sebbene la perdita sia stata di scarsa entità e non abbia neanche fatto scattare le barriere di protezione, ha deciso di installare un sistema di rilevamento vapori.

Per quanto riguarda le azioni di miglioramento individuate dai gestori a seguito di *perdite* di prodotto è stato riscontrato che in ben 12 casi la soluzione individuata è quella di installare sistemi automatici di rilevamento parametri e di allarme e, in altrettanti casi, quello di aggiornare e/o implementare, laddove assente, una più dettagliata procedura di manutenzione e controlli delle attrezzature. In 11 casi ci si è resi conto che le perdite sarebbero state sicuramente più localizzate e avrebbero avuto risvolti ancor più circoscritti se ci fosse stato un bacino di contenimento e/o pavimentazioni adeguate, seppure non espressamente previste da normativa di settore. I gestori, pertanto, hanno provveduto alla loro introduzione. In 8 casi si è reso necessario installare sistemi di blocco impianto, mentre in 3 casi sono stati inseriti componenti di sicurezza ridondanti. Solo in due casi i gestori hanno valutato la necessità di aggiornare e/o modificare le procedure di scelta e approvvigionamento beni e servizi e, sempre in 2 casi, di aggiornare l'analisi di sicurezza.

Dall'analisi delle schede compilate a seguito di *rilasci* di sostanze pericolose è emerso che i gestori in 7 casi hanno provveduto ad installare sistemi automatici di controllo e/o misura dei parametri di processo e, in 4 casi, sistemi automatici di allarme. In 2 circostanze la soluzione identificata è stata quella di costruire un bacino di contenimento.

Le schede relative agli *incendi* mostrano, invece, che in due contesti i gestori hanno optato per installare sistemi automatici di rilevamento e in altrettanti di costruire un bacino di contenimento o pavimentare. Mentre, in 1 caso è stato installato un sistema di allarme ed in un altro si è provveduto a coibentare l'attrezzatura.

5. Conclusioni

Lo studio propone una metodologia per estrarre conoscenza da un archivio di documenti relativi ai quasi incidenti al fine di evidenziare i casi più ricorrenti, in modo da affrontare in modo più efficace le ispezioni successive.

L'uso di sistemi di text mining e motori di ricerca avanzati su archivi documentali si sta diffondendo in vari ambiti; l'estrazione della conoscenza dai documenti è, però, condizionata dalla qualità dei documenti e, quindi, nel caso in esame dalle schede compilate dai gestori. Infatti, pur adottando un formato condiviso in tutta Italia, i report non sono omogenei in quanto la loro compilazione è soggettiva e il livello di dettaglio molto diverso.

L'analisi delle schede dell'esperienza operativa ha confermato che i miglioramenti attuabili dai gestori per ridurre il numero di incidenti sono strettamente legati a possibili adeguamenti sia tecnico/impiantistici che organizzativo/procedurali, confermando anche che potenziando il sistema di gestione si rende maggiormente efficace la conduzione sicura degli impianti.

Inoltre, quanto emerso dallo studio svolto è di supporto alle Commissioni ispettive che non possono entrare nel merito delle scelte attuate dal gestore, ma durante l'ispezione possono formulare domande e/o osservazioni per meglio valutare l'adeguatezza dell'approccio dei gestori nell'analisi dell'esperienza operativa. Infatti, sebbene gli eventi accaduti siano, per la quasi totalità, eventi che non hanno fatto registrare danni di importante entità a persone, ambiente o cose materiali, è emerso che spesso le cause che li generano sono più o meno

le stesse; pertanto, è necessario che i gestori da un lato e gli ispettori dall'altro sviluppino una maggiore sensibilità per prevenire e gestire le situazioni descritte.

Inoltre, spesso la regolare attività è compromessa da incidenti dovuti all'uso di materiali o componenti non idonei o da quelli per mancata o inattuata manutenzione o, peggio, per manutenzione impossibile da svolgere poiché l'attrezzatura è ubicata in posizione non facilmente accessibile. Numerosi sono anche i casi legati alle inadeguate condizioni di pulizia degli impianti o delle coibentazioni mal tenute che possono innescare eventi anomali, quali ad esempio principi di incendio.

Nel presente studio sono stati considerati i documenti relativi agli impianti chimici di processo che, sicuramente, risultano piuttosto complessi e variegati. Questo aspetto, non di poco conto, è correlabile al fatto che tali impianti comprendono diverse attività industriali e diverse sostanze, mentre in altre tipologie industriali è possibile riscontrare aspetti simili nei processi o attività altamente standardizzate. La metodologia proposta può essere applicata ad altri tipi di stabilimenti con la certezza che l'analisi fatta sui casi reali sia un valido supporto per migliorare vari aspetti quali la formazione, l'analisi del rischio e la gestione dei documenti di sicurezza. I risultati ottenuti da questo approccio saranno proposti sotto forma di schede tecniche e suggerimenti specifici per gli addetti ai lavori, sia gestori che ispettori.

Bibliografia

- [1] Decreto Legislativo 2015 n. 105 Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose. (GU Serie Generale n. 161 del 14-07-2015 - Suppl. Ordinario n. 38).
- [2] Agnello, P., Ansaldi, S.M., Bragatto, P.A., Plugging the gap between safety documents and workers perception; to prevent accidents at Seveso establishments. *Chemical Engineering Transactions*, 2012, 26, pp. 291-296, doi: 10.3303/CET1226049.
- [3] Andriulo, S., Gnoni, M. G., Measuring the effectiveness of a near-miss management system: an application in an automotive firm supplier. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 132, 154-162.
- [4] Phimister, J.R., Oktem, U., Kleindorfer, P.R., Kunreuther, H., Near-miss incident management in the chemical process industry. *Risk Analysis*, 2003, 23, 3, pp. 445-459.
- [5] Gnoni, M.G., Saleh, J.H., How near miss management systems and system safety principles could contribute to support high reliability organizations. *Safety and Reliability - Theory and Applications. Proceedings of the 27th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2017*, pp. 3099-3104.
- [6] Suzuki, M., Batres, R., Fuchino, T., Shimada, Y., Chung, P.W., A knowledge-based approach for accident information retrieval. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2006, 21 (C), pp. 1057-1062.
- [7] Ansaldi, S.M., Pirone, A., Vallerotonda, M.R., Bragatto, P.A., Agnello, P., Delle Site, C., How inspections outcomes may improve the foresight of operators and regulators in Seveso industries. *Chemical Engineering Transactions*, 2018, 67, 367-372.
- [8] Ansaldi, S.M., Simeoni, C. Di Francesco, A., Martini, R., Di Piramo, L., Fattori, F., Extracting knowledge from near miss reports using machine-Learning techniques. *Proceeding of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and management Conference*, 2020.

[9] Ansaldi, S.M., Agnello, P., Pirone, A., Vallerotonda, M.R., Near Miss Archive: a Challenge to Share Knowledge Among Inspectors and Improve Seveso Inspections, *Sustainability* 2021, 13, 8456. <https://doi.org/10.3390/su13158456>.

[10] Ansaldi, S.M., Pirone, A., Vallerotonda, M.R., Agnello, P., Bragatto, P.A., Near miss repository from Seveso inspections: cognitive methods to exploit knowledge, *Loss Prevention* 2019, 16-19 June, Delft, The Netherlands, *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 77/2019, pp. 421-426.

Sicurezza nel trasporto di merci pericolose su strada: lezione appresa dall'analisi di alcuni incidenti occorsi negli ultimi anni

E. Bemporad¹, C. Delle Site², N. Palumbo³, G. Sepede⁴, F. Buti¹

¹ Inail Dit - Organismo Notificato per direttive europee

² Inail Dit - Laboratorio Impianti a pressione e stabilimenti a rischio di incidente rilevante

³ Inail - Uot di Brescia

⁴ Ingegnere

Sommario

L'accordo internazionale sul trasporto delle merci pericolose su strada (ADR), recepito a livello europeo e quindi nazionale, costituisce un corpus normativo ampio ed articolato che disciplina, oltre al trasporto, anche tutte le fasi ad esso direttamente ed indirettamente connesse ai fini della sicurezza. Tale corpus normativo si è evoluto nel tempo verso un'armonizzazione crescente, ma resta comunque centrato sui pericoli con un approccio del tipo deterministico. L'introduzione di un sistema di valutazione dei rischi tramite un approccio probabilistico nella legislazione nazionale sul trasporto delle merci pericolose su strada sarebbe comunque tecnicamente possibile oltre che auspicabile e diverse metodologie sono state proposte a tale fine in letteratura.

Il presente lavoro, partendo da una panoramica di dati sul trasporto di merci pericolose su strada e da una descrizione di sintesi di queste metodologie, alcune delle quali evidenziano l'utilità di un'analisi incidentale, pur con alcuni limiti, effettua un breve excursus degli incidenti più significativi occorsi negli ultimi anni durante il trasporto di sostanze pericolose su strada, sul territorio nazionale e internazionale, schematizzandone, ove le informazioni siano sufficientemente affidabili, il tipo e la quantità di sostanza coinvolta, le circostanze, la dinamica, le cause accertate o presunte, i danni rilevati e le azioni intraprese.

Il lavoro offre, in definitiva, uno spunto per verificare ed eventualmente integrare alcuni scenari-tipo di rischio, in funzione della merce pericolosa trasportata e delle caratteristiche del mezzo/contenitore utilizzato. Se ne trarrà anche la "lezione appresa" identificando eventuali azioni di miglioramento tecnico e normativo possibili, non trascurando un cenno alle potenzialità che le nuove tecnologie automatiche di sicurezza possono offrire al fine di prevenire il ripetersi di tali eventi o mitigarne le conseguenze.

1. Introduzione

1.1 Il trasporto di merci pericolose su strada nell'UE

Fino al 2005 il Conto Nazionale Trasporti [1], ad oggi Conto Nazionale delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili ha costituito la principale fonte di dati sul trasporto nazionale di merci pericolose su strada. Ad oggi è l'Eurostat a riportare i dati sul trasporto delle merci pericolose nei vari paesi UE. Le figure 1 e 2 riportano rispettivamente la quantità di merci pericolose trasportate annualmente su strada nei 28 paesi dell'UE dal 2010 al 2019 e la ripartizione percentuale delle stesse per classe di pericolo ADR con riferimento al 2019 [2]. Si osserva che al 2019 si è raggiunto un valore pari a ca. 80 milioni di t-km e, tra i paesi in cui il trasporto è più rilevante, l'Italia si pone al quarto posto, dopo Germania, Spagna e Polonia, seguita dal Regno Unito. Come tipologia di merce predominano marcatamente i liquidi infiammabili (53,1%) seguiti dai gas compressi, liquefatti o disciolti sotto pressione (13,7%) e dalle materie corrosive (11,7%).

I cambiamenti rispetto agli anni precedenti risultano poco rilevanti e la distribuzione tra i gruppi di prodotti è rimasta abbastanza simile nel tempo. Poiché le merci pericolose rappresentano una piccola parte di tutte le merci trasportate su strada, vi sono notevoli incertezze nei risultati delle indagini su questo tipo di merci [2].

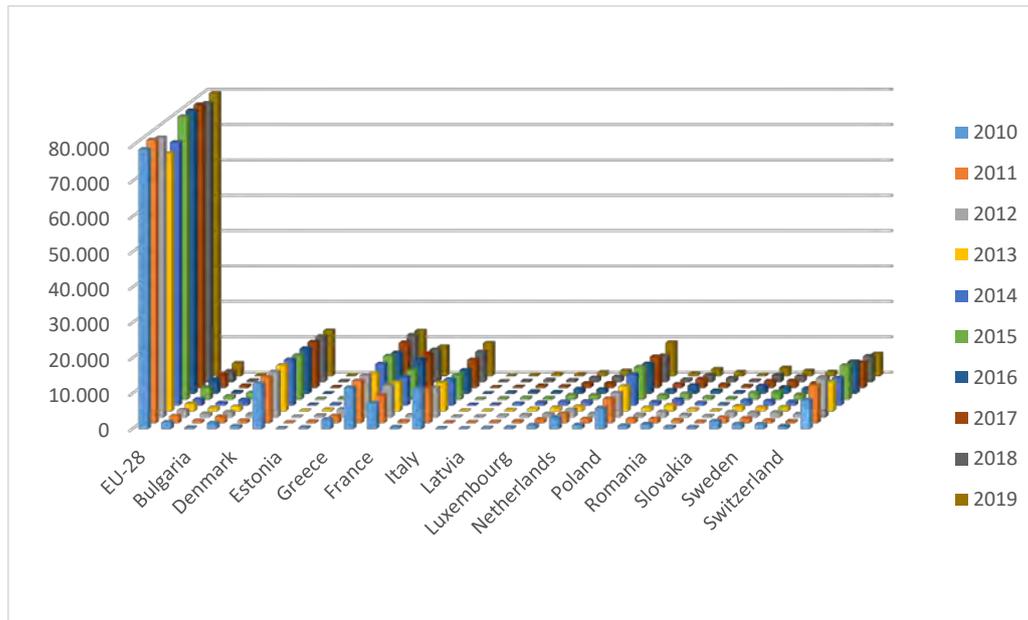


Figura 1. Quantità di merci pericolose trasportate annualmente su strada nell'UE per paese di origine dal 2010 al 2019 [Mt-km] [fonte dati: Eurostat [3]]

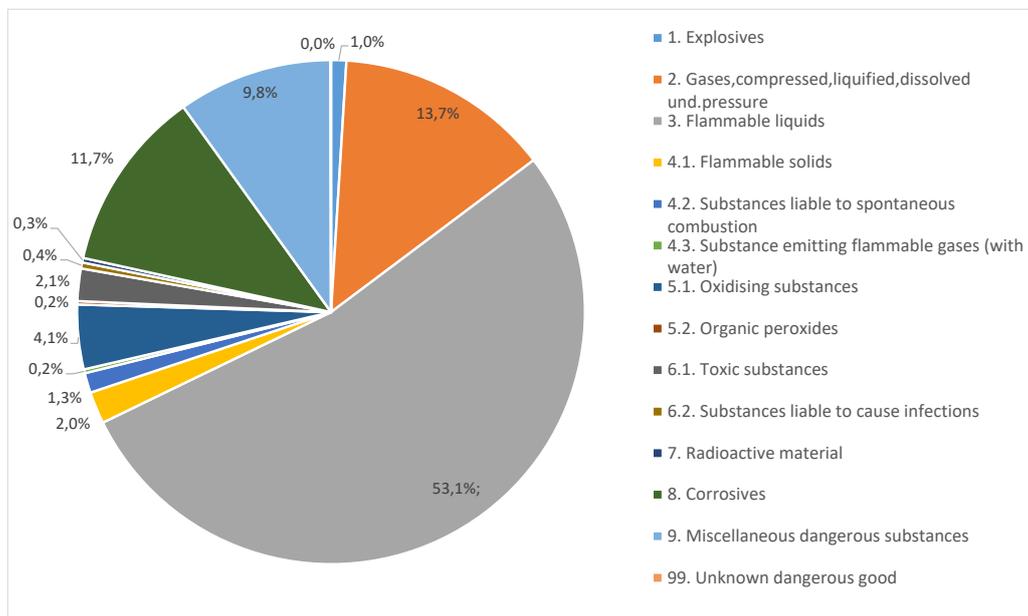


Figura 2. Ripartizione del trasporto di merci pericolose su strada nell'UE-28 per classi di pericolo ADR (2019) (fonte dati: Eurostat [3])

1.2 Normativa sul trasporto delle merci pericolose

Il trasporto delle merci pericolose su strada è disciplinato dall'art.168 del Codice della Strada, d.lgs. 285/1992 secondo cui, ai fini del trasporto su strada sono considerati materiali

pericolosi quelli appartenenti alle classi indicate negli allegati all'accordo europeo relativo al trasporto internazionale su strada di merci pericolose, noto come ADR.

L'ADR, insieme agli analoghi accordi per il trasporto per ferrovia (RID) e per le vie interne di navigazione (ADN) è stato trasportato nell'ordinamento europeo per mezzo della direttiva quadro 2008/68/CE, a sua volta recepita a livello nazionale dal d.lgs. n.35/2010. Tali accordi sono soggetti, biennialmente, ad adeguamento al progresso tecnico (APT). Attualmente è in vigore l'ADR 2021 [4], recepita con direttiva 2020/1833/UE, a sua volta recepita con DM 13/01/2021 (VI APT).

L'ADR ha una struttura relativamente semplice e compatta, composta da due allegati tecnici, l'allegato A per le disposizioni generali e quelle relative alle materie e oggetti pericolosi, e l'allegato B (non presente nel RID) contenente le disposizioni relative all'equipaggiamento di trasporto e al trasporto stesso. Si tratta però di due allegati articolati e complessi.

La classificazione di merci ed oggetti pericolosi secondo ADR/ADN e RID è più ampia di quella di sostanze e miscele pericolose previste dal Regolamento CE n.1272/2008 o CLP, pur se entrambe derivano dal sistema mondiale armonizzato di classificazione ed etichettatura delle sostanze chimiche o GHS. L'ADR, infatti, include classi di pericolo non strettamente chimico, nel complesso 13 classi/sottoclassi, già mostrate in figura 2.

La sicurezza delle attrezzature a pressione per il trasporto di gas della classe 2 è disciplinata anche dalla direttiva 2010/35/UE o T-PED, con l'esclusione dei gas con codici di classificazione contenenti le cifre 6 (materie tossiche e materie infettanti) e 7 (materiale radioattivo) e l'estensione al trasporto di cianuro di idrogeno stabilizzato, fluoruro di idrogeno anidro, pentafluoruro di bromo, trifluoruro di bromo, acido fluoridrico e pentafluoruro di iodio con determinate caratteristiche (allegato I alla direttiva). La T-PED definisce le attrezzature a pressione trasportabili proprio riferendosi a recipienti, cisterne, veicoli/vagoni batteria e contenitori gas ad elementi multipli (CGEM) e loro rubinetti ed accessori di cui agli allegati 6.2 e 6.8 della direttiva 2008/68/CE, cioè degli accordi ADR, ADN e RID.

In generale, si può affermare che la normativa sul trasporto delle merci pericolose si è evoluta verso un'armonizzazione crescente, ma resta comunque centrata sui pericoli (non sui rischi) e con un approccio del tipo «command and control» (deterministico) e ad oggi non richiede analisi del rischio, ma consente agli stati membri la possibilità di applicare disposizioni supplementari di sicurezza e per la gestione delle emergenze.

2. Rischi nel trasporto su strada di merci pericolose

2.1 Incidentalità e rischio

Gli incidenti nel trasporto di merci pericolose su strada sono costituiti dal rilascio accidentale di sostanze tossiche o di energia, e le cause iniziatrici possono essere [5, 6]:

- fattore umano
- cause interne:
 - deterioramento o difetti/malfunzionamenti dell'equipaggiamento del veicolo: sistema di contenimento es. corrosione, presenza di cricche, sovrappressione, oppure dei sistemi accessori es. guasto del sistema di refrigerazione con conseguente riscaldamento del materiale trasportato;
 - sovrariempimento;
 - imballaggio inappropriato;
- cause esterne (incidente):
 - impatto del veicolo;
 - infrastruttura stradale.

Con riferimento alle cause interne la tipologia di eventi è analoga a quella che si può verificare in un impianto fisso, mentre per le cause esterne la tipologia di evento è specifica

del rischio legato al trasporto e risulta di maggior rilevanza rispetto al primo in quanto non è possibile disporre nel trasporto delle stesse barriere di sicurezza, sistemi di allertamento della popolazione, sistemi di contenimento e protezione, implementabili presso un impianto fisso [6].

Inoltre, analisi incidentali di settore hanno consentito di evidenziare alcune circostanze che nel trasporto, rispetto a quanto accade negli impianti fissi, possono aggravare le possibili conseguenze [7], quali, ad esempio la non tempestività dell'allarme, l'inesperienza del personale di soccorso, la scarsa accessibilità del pannello arancione sul veicolo, delle etichette e della documentazione che deve accompagnare il materiale trasportato (documento di trasporto, istruzioni scritte), rendendo difficoltoso l'intervento di soccorso, così come la localizzazione dell'incidente in aree difficilmente raggiungibili, critiche per il traffico, la densità di popolazione, la vulnerabilità idrogeologica, la presenza di obiettivi sensibili nelle vicinanze, la possibilità che il mezzo venga rubato da malintenzionati.

Ciò nonostante le frequenze incidentali riportate in letteratura per il trasporto di materie pericolose su strada non sono elevate: 10^{-8} - 10^{-6} km⁻¹ [8]

D'altra parte il fenomeno del trasporto risulta molto difficile da controllare a causa dell'estrema variabilità del contesto e delle modalità con cui quest'attività si realizza, del numero considerevole di trasporti effettuati giornalmente e del carattere trans-nazionale di tali trasporti.

Per quanto riguarda l'incidentalità non è stato possibile reperire statistiche specifiche di settore riferite a periodi recenti.

L'Eurostat censisce i morti per incidente stradale in base al genere, al tipo di utente della strada, all'età, al tipo di strada ed al tipo di veicolo. Considerando che il trasporto di merci pericolose è effettuato prevalentemente con mezzi pesanti, un ordine di grandezza della mortalità in incidenti che coinvolgono merci pericolose può essere ottenuto dai dati relativi a veicoli per trasporto merci di massa totale a terra superiore a 3,5 t, per cui nel 2019 risulta un numero di morti pari a 42. Il dato allarmante è che tale numero ha subito un incremento rilevante negli anni 2016 e 2017, rispettivamente 59 e 60, rispetto agli anni dal 2010 al 2015 in cui non ha mai superato 20 ed in tali anni 2016, 2017 ed anche nel 2019, risulta il valore maggiore di tutti i paesi dell'UE-28. Le statistiche italiane su cui la rilevazione Eurostat si basa per il nostro paese, sono prodotte dall'Istat sulla base di una rilevazione di tutti gli incidenti stradali verificatisi sul territorio nazionale che hanno causato lesioni alle persone (morti entro il trentesimo giorno oppure feriti).

I report nazionali sugli incidenti stradali distinguono in modo differente il tipo di veicolo, riportando genericamente "autocarro", indipendentemente dalla destinazione d'uso e dalla massa. Tali report forniscono anche il rapporto tra feriti gravi e morti che complessivamente, tra il 2016 ed il 2020 ha oscillato tra 5,1 (2017) e 5,9 (2020) e riportano inoltre un dato interessante relativo alle contravvenzioni elevate da polizia stradale, carabinieri e polizie locali dei comuni capoluogo per violazioni sulle norme di comportamento, tra cui quelle all'art.168 del Codice della Strada (Norme sul trasporto delle merci pericolose), 10.083 nel 2019 e 8.364 nel 2020, con un'incidenza rispettivamente dello 0,12% e 0,14% sul totale delle violazioni (è evidente, in generale, l'effetto della pandemia durante la quale l'aumento della velocità è stato registrato in tutti i principali Paesi europei, sintomo di una percezione diffusa, da parte dei conducenti, di maggiore sicurezza e minori pericoli sulle strade prive di traffico) [9, 10].

Con riferimento ai periodi pregressi è di interesse la relazione finale di una ricerca svolta dal Ministero dei Trasporti e dal Politecnico di Milano con riferimento agli anni dal 1997 al 2005. Da tale relazione emerge che [11]:

- con il modello di stima idealizzato la dimensione del singolo incidente appare non trascurabile, in quanto sono coinvolti, in modo diretto ed indiretto, un numero consistente

- di veicoli (in funzione dei tempi di chiusura dell'autostrada e dei tempi di accumulo dei veicoli, il monte delle ore perse, ed il suo conseguente valore, risulta essere rilevante);
- nonostante ciò, all'interno della complessa casistica dell'incidentalità stradale, le situazioni in cui risulti coinvolto il trasporto delle merci pericolose non è di significativo rilievo e può essere considerato una singolarità casuale;
 - nonostante i dati raccolti fossero in qualche misura sottostimati, poiché nel modello ISTAT non è possibile indicare la categoria merceologica trasportata da un mezzo commerciale, tale categoria di incidente può essere considerata statisticamente probabile al pari di molte altre;
 - in particolare il numero di incidenti nel periodo 1997-2005 ha oscillato tra 2 (1997, 2002) e 9 (2004), su un totale compreso tra 16.768 (2005) e 40.359 (2004), con un'incidenza media dello 0,0116%;
 - in termini di costi sociali, invece, l'incidenza nel periodo 1997-2004 ha oscillato tra il 4,2% (2002 e 2003) ed il 5,3% (1998).

Una delle problematiche riscontrate nella rilevazione di questi dati è l'affidabilità dei dati, non sempre sufficiente. Mentre le informazioni relative alla data e al luogo dell'incidente sono di "alta qualità", ossia mostrano una elevata corrispondenza e quelle sulla modalità di accadimento e sul numero di morti di "media qualità", quelle riguardanti il nome e la quantità della sostanza coinvolta sono di "bassa qualità" e quindi troppo spesso non concordanti [12]. Gli accordi internazionali, nel caso di grave incidente o evento imprevisto durante il carico, riempimento, trasporto o scarico di merci pericolose sul territorio di una Parte contraente, prevedono che il caricatore, riempitore, trasportatore o destinatario si assicurino rispettivamente che un rapporto redatto secondo uno specifico modello sia sottoposto all'autorità competente della Parte contraente interessata, entro un mese dall'evento. I criteri che rendono obbligatoria la redazione del rapporto si riferiscono alle conseguenze. Si tratta di incidenti effettivamente o potenzialmente gravi e, sul sito dell'United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) attualmente sono pubblicati soltanto tre report, riferiti a rilasci di sostanze corrosive, rispettivamente in Belgio (2004), Germania (2010) e Islanda (2013) [13].

La tabella 1 riporta i dati relativi agli incidenti ADR 2010-2013, notificati ai sensi dell'art.11 c.7 del d.lgs. n.35/2010 [14] e dunque nazionali. I numeri risultano dello stesso ordine di grandezza di quelli riportati in [11] per il periodo 1997-2005.

Anno	Numero di incidenti ADR
2010	9
2011	9
2012	10
2013	4
2014*	0

*dato parziale considerata la data della fonte (28 giugno 2014)

Tabella 1 Incidenti ADR 2010-2013, ex art.11 c.7 del d.lgs. n.35/2010 [Italia] [14]

2.1 Approcci disponibili alla valutazione del rischio

L'introduzione di un sistema di valutazione dei rischi nel trasporto delle sostanze pericolose tramite un approccio probabilistico nella legislazione nazionale sarebbe tecnicamente possibile, oltre che da tempo auspicato, e la pianificazione della gestione delle emergenze e del territorio dovrebbero disporre di un tale strumento.

Il corpo normativo sul trasporto delle merci pericolose appare infatti in contrasto con altri obblighi che richiedono invece analisi di rischio a vari livelli al fine di definire modelli di intervento o pianificare l'uso del territorio, quali piani di emergenza comunali e provinciali,

piani territoriali di coordinamento, e nell'ambito del Rischio di Incidente Rilevante (direttiva Seveso e d.lgs. 105/2015), elaborati tecnici ERIR di cui al DM 9 maggio 2001 e Piani di Emergenza Esterni secondo il DPCM 25 febbraio 2005.

L'unica fonte normativa che attualmente prevede di effettuare l'analisi dei rischi nel trasporto è la direttiva 2004/54/CE del Parlamento europeo e del Consiglio relativa ai requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della Rete stradale trans-europea, recepita a livello nazionale con D.Lgs. 264/2006. che però non specifica le modalità di conduzione dell'analisi e la riserva esclusivamente come approccio residuale ove non sia fattibile il rispetto di determinati requisiti minimi di sicurezza strutturali. L'analisi richiesta è comunque molto simile a quella richiesta dalla direttiva Seveso e quindi in ambito nazionale dal d.lgs. 105/2015, per gli stabilimenti a rischio di incidente rilevante.

Per definire le sorgenti di rischio dovute al trasporto di sostanze pericolose in linea generale è necessario valutare per ciascuna tratta stradale, ferroviaria o di navigazione dell'area di interesse la quantità di merce pericolosa che vi transita ed il tipo di mezzo impiegato per il trasporto e procedere quindi a [15]:

- Valutare il numero delle sorgenti per ciascun mezzo circolante;
- Valutare la resistenza del contenitore alla rottura;
- Individuare le condizioni fisiche della sostanza trasportata e la massima quantità rilasciabile;

Successivamente si dovrebbe procedere a:

- Individuare gli scenari incidentali;
- stimare le frequenze di rilascio per ogni scenario;
- stimare la vulnerabilità dell'area di interesse.

Un'analisi storica degli incidenti, con il duplice fine di "apprendere dall'esperienza" e di ricavarne dati da impiegare nelle analisi quantificate del rischio risulta quindi particolarmente utile ed è infatti utilizzata a tale fine (es. in [16] ne sono censiti diversi) pur con la consapevolezza dei limiti che questo tipo di analisi presenta sulla relazione tra incidenti e fattori di rischio in quanto i metodi statistici non possono tenere conto delle interazioni tra i singoli fattori [17, 18].

In tale ottica il presente lavoro effettua un breve excursus degli incidenti più significativi occorsi negli ultimi anni durante il trasporto di sostanze pericolose, ed in particolare di gas compressi liquefatti su strada, sul territorio nazionale e internazionale, concentrandosi sulla lezione appresa e traendo spunto per eventuali azioni di miglioramento tecnico e normativo possibili, non trascurando un cenno alle potenzialità che le nuove tecnologie automatiche di sicurezza possono offrire al fine di prevenire il ripetersi di tali eventi o mitigarne le conseguenze.

3. Incidenti occorsi negli ultimi anni

3.1 Fonti, dati e modalità dell'analisi

Numerose sono le analisi incidentali reperibili in letteratura. Una delle più complete è reperibile in [19] e analizza 257 incidenti avvenuti a livello mondiale (principalmente negli USA) durante il trasporto stradale di merci pericolose nell'arco di ca. 50 anni, dal 1943 al 1990 da cui è stato possibile estrapolare le seguenti osservazioni [20]:

- nella maggioranza dei casi (115) l'incidente ha provocato un rilascio a cui non è seguito alcun evento incidentale;
- l'evento incidentale che si è verificato più frequentemente è l'esplosione (50 casi) seguita dall'incendio (40 casi);
- i danni complessivi sono stati ca. 600 morti, 2600 tra feriti e intossicati e ca. 4800 evacuati.

Come evidenziato al par. 1.3 né a livello nazionale, né a livello UE è disponibile un database specifico per gli incidenti nel trasporto di merci pericolose, per cui si è fatto riferimento alle informazioni disponibili a mezzo stampa in riferimento a due incidenti verificatisi recentemente in Italia con mezzi che trasportavano GPL¹². Si è inoltre effettuata una ricerca nei database dell'US National Transportation Safety Board, agenzia investigativa indipendente del Governo degli Stati Uniti che indaga ed emette rapporti in merito agli incidenti che coinvolgono tutte le tipologie di mezzi di trasporto e oleodotti e gasdotti, ed ha una sezione specifica per il trasporto di materie pericolose, di cui rende disponibili i report di incidente³. Si tratta di 41 report, di cui 39 riferiti a specifici incidenti, che coprono un arco temporale dal 1979 a tutto il 2020. Dei 39 incidenti investigati 26 hanno coinvolto un mezzo viaggiante su strada. Di questi ultimi 7 sono avvenuti durante operazione di carico/scarico del materiale trasportato e 4 hanno interessato gas liquefatti e compressi, nello specifico idrogeno, GPL e ammoniaca. Di questi 4, 2 sono piuttosto recenti, uno è avvenuto nel 2018 e uno nel 2019. Purtroppo per quest'ultimo è disponibile solo il report preliminare che non riporta informazioni complete ed esaustive. In calce all'articolo sono riassunti, in schede sintetiche, le circostanze e le cause dei tre incidenti avvenuti nel 2018, i due italiani e uno statunitense, in cui ha giocato un ruolo fondamentale l'errore umano, che sono apparsi particolarmente rappresentativi ed essendo recenti, tenuto conto dell'evoluzione normativa e tecnica di settore, appaiono particolarmente "rappresentativi".

Le schede riportano i dati principali relativi agli eventi:

- Localizzazione evento
- Sequenza eventi (dinamica)
- Descrizione sito
- Sostanza coinvolta: identificazione, classificazione e quantità (ove disponibile)
- Descrizione cause
- Descrizione conseguenze
- Risposta – attivazione emergenza
- Lezione appresa

4. Risultati dell'analisi e discussione (lezione appresa)

Gli incidenti nel trasporto di gas liquefatti e compressi su strada negli ultimi anni non sono molti, ma le loro conseguenze sono piuttosto significative. Si rileva che la maggioranza di tali incidenti potevano essere prevenuta attraverso la corretta applicazione della normativa. Sia il primo che il secondo caso approfonditi (evento n.1, incidente di Rieti del 5/12/2018 ed evento n.2 incidente di Bologna del 6/08/2018), hanno riguardato cisterne che trasportavano GPL ed in entrambe i casi si è sviluppato un incendio che ha condotto ad un BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion), fenomeno ormai ben noto. Il primo è occorso presso la stazione di servizio durante le operazioni di travaso di GPL e le cause dell'incendio sono presumibilmente legate a malfunzionamenti/danneggiamenti all'equipaggiamento del veicolo (manichetta o guarnizione serbatoio-cisterna-manichetta, valvola di eccesso di flusso) abbinati all'errore umano: per l'innescio si ipotizzano infatti la mancata messa a terra del veicolo, il mancato utilizzo di indumenti antistatici ed attrezzature anti-scintilla ed infine il mancato presidio alle operazioni di travaso da parte del personale preposto che avrebbero potuto controllare l'incendio nelle fasi iniziali ed evitare l'evoluzione a BLEVE.

¹<https://www.bolognatoday.it/cronaca/incidente-bologna-esplosione-gpl-regole.html>,
https://www.ansa.it/emiliaromagna/notizie/2018/08/06/incendio-con-esplosioni-a-bologna_825acd04-8c61-4368-bcac-f555ee5b0460.html

²https://roma.repubblica.it/cronaca/2018/12/05/news/rieti_incendio_ed_esplosione_in_un_distributore_di_carburante_15_feriti-213475435/

³<https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Pages/hazardous.aspx>

Nel secondo caso la causa dell'incendio è il tamponamento da parte del veicolo cisterna GPL di un semirimorchio che trasportava colli contenenti materiale infiammabile, che nell'impatto ha preso fuoco coinvolgendo il veicolo tamponante.

Nel primo caso abbiamo quindi un comportamento non corretto da parte del conducente e/o dell'addetto al sito, che hanno certamente ricevuto una formazione specifica e mirata, ma evidentemente non efficace nel tempo. Si consideri che secondo l'ADR i gas infiammabili di classe 2 come il GPL, trasportati in cisterne di almeno 3000 l sono considerati "ad alto rischio" e devono essere oggetto di una costante sorveglianza.

Nel secondo caso si è combinata l'assenza dei sistemi di sicurezza obbligatori ai sensi del Regolamento CE 661/2009 (dispositivo avanzato di frenata d'emergenza, controllo elettronico della stabilità, sistema di avviso di deviazione dalla corsia) ad una probabile scorretta disposizione/fissaggio e riempimento dei colli presenti sul veicolo tamponato.

La probabilità di BLEVE può essere ridotta con sistemi come valvole di sicurezza installate sulla cisterna e mediante isolamento termico. Sia l'ADR che il RID prevedono l'installazione di valvole di sicurezza sulle cisterne ma non obbligatoriamente. Da evidenziare che alcuni stati ne hanno comunque imposto l'obbligatorietà, così come accade per l'IMDG Code che disciplina il trasporto delle merci pericolose per mare.

In entrambi i casi si sono registrati 2 morti, ma il numero dei feriti è stato nettamente superiore nel secondo caso (oltre 150, rispetto a 17), in considerazione del sito in cui è avvenuto l'incidente (autostrada). Mentre nel primo caso però la zona interessata dall'incendio (area di servizio e adiacenze) non è stata messa in sicurezza in maniera adeguata, nel secondo caso gli 8 minuti intercorsi tra il tamponamento ed il BLEVE hanno consentito l'evacuazione dell'area circostante ed il blocco dell'infrastruttura stradale, permettendo di evitare conseguenze più drastiche (si sono comunque registrati 2 morti e oltre 150 feriti). Si rileva che nel primo caso mancava un piano di emergenza specifico.

Con riferimento invece al terzo caso si rileva che anche questo incidente, come il secondo, è occorso in una stazione di rifornimento, ma il fluido coinvolto è stato l'idrogeno. In questo caso l'errore umano è stato determinante, sia per le cause dell'incidente, che per l'efficacia della risposta all'emergenza. Con riferimento alle cause gli errori hanno riguardato l'installazione di 4 dispositivi di scarico inadeguati con responsabilità del produttore, di chi li ha inventariati e di chi li ha collaudati. Con riferimento invece alla risposta all'emergenza si sono sommati un'errata comunicazione relativamente al luogo dell'incidente che ha fuorviato i vigili del fuoco rispetto alla sostanza coinvolta alla mancanza di familiarità con le infrastrutture di rifornimento di idrogeno, la difficoltà nello stimare la gravità delle possibili conseguenze e la scarsa conoscenza degli adeguati interventi di emergenza per mitigare la possibile rottura catastrofica delle bombole [26]. Ci si chiede se un incidente di questo tipo possa accadere anche in Europa, considerata la vigenza della direttiva T-PED, la quale impone una filiera di controlli di tipo sistemico, con la presenza di un organismo di ispezione (ON). Non è da sottovalutare il problema della scarsa familiarità con le stazioni di rifornimento di idrogeno che si stanno diffondendo in questi ultimi anni.

5. Prospettive di miglioramento tecnico e normativo

Dal punto di vista tecnico-normativo il quadro presentato stimola una riflessione sull'opportunità di rendere obbligatori i sistemi già previsti nell'ADR/RID quali la valvola di sicurezza e/o l'isolamento termico. Incrementando lo spessore dello strato isolante si può persino arrivare a rendere non necessaria la valvola di sicurezza, ottenendo un tempo di resistenza del serbatoio elevato, nel caso del GPL fino ad un paio d'ore [21]. D'altro canto occorre considerare che la protezione termica dei serbatoi ritarda l'incremento della temperatura di parete e della pressione interna, ma un eventuale difetto della protezione

può consentire pericolosi riscaldamenti localizzati anche prima che la valvola di sicurezza si attivi [22], ove presente.

Certamente occorrerebbe un'azione di potenziamento dei controlli ed adeguate azioni di sensibilizzazione rispetto alla corretta applicazione della normativa.

Più in generale si può affermare che manca un quadro di riferimento comune con una definizione univoca del rischio ed il suo utilizzo in tutti i progetti di infrastrutture e manca una terminologia comune. Spesso nelle linee guida disponibili c'è una carenza di trasparenza e comunicazione e nessun paese UE ha una linea guida normativa per la valutazione del rischio nel trasporto [23]. La progettazione della rete di trasporti di materie pericolose è una nuova linea di ricerca che offre un approccio per livelli di rischio: la pianificazione dell'itinerario è riservata ai casi più pericolosi lasciando il trasportatore libero di scegliere il percorso che considera più conveniente, evitando soltanto le strade ad alto rischio [7].

L'analisi di rischio aiuterebbe poi a trovare la quantità ottimale di merce da trasportare (non risulta una dipendenza lineare tra quantità trasportata/rilasciata e area d'impatto in caso di incidente), il momento migliore della giornata (di notte è più probabile la nuvolosità che ostacola la dispersione, mentre di giorno è più intenso il traffico con più probabilità di conseguenze severe in caso di incidente) [24].

Per quanto riguarda invece la tecnologia, si è già evidenziato che l'adozione di alcuni sistemi avanzati di sicurezza sui veicoli è obbligatoria dal 2009, ma l'applicazione del Regolamento CE n.661/2009 è stata graduale e rivolta solo ai nuovi veicoli di nuova omologazione. Una delle sfide degli ultimi anni riguarda invece come monitorare in modo sicuro il trasporto delle merci pericolose. Una delle tecnologie applicabili a tale scopo è l'uso di una rete di sensori wireless che acquisiscano dati sia sul materiale trasportato (es. temperatura e pressione) che del mezzo di trasporto (es. assetto, pressione degli pneumatici), li trasmettano al computer di bordo che li elabora e li confronta con i valori "normali", attivando in tempo reale degli allarmi in caso di deviazioni [25]. Se poi si considera la possibilità di implementare tale dati in modelli informativi geografici in grado di integrare informazioni sul traffico e sulle condizioni meteo, in caso di incidente si potrebbe disporre di uno strumento utilissimo alla gestione dell'emergenze, oltre che ad una mappatura del rischio.

Peraltro i benefici legati all'utilizzo di tali tecnologie che contribuiscono a ridurre la frequenza dell'errore umano, tramite l'analisi dei rischi, potrebbero diventare quantificabili.

6. Conclusioni

Il rischio associato al trasporto su strada delle merci pericolose risulta significativo, non in termini di probabilità, bensì in termini di conseguenze. L'analisi del contesto normativo, regolamentare e tecnico-scientifico e l'approfondimento di alcuni incidenti occorsi negli ultimi anni che hanno coinvolto gas liquefatti compressi, hanno evidenziato la necessità di interventi migliorativi. In particolare potrebbe risultare opportuno:

- rendere disponibili linee guida specifiche;
- sensibilizzare tutti gli operatori della filiera del trasporto alla corretta applicazione della normativa, prevenendo anche una specifica formazione sull'esperienza operativa, con particolare riferimento agli incidenti occorsi;
- creare una banca dati specifica a livello italiano ed europeo;
- introdurre nella normativa un approccio basato sul rischio;
- valutare la possibilità di introdurre in particolare nel trasporto di gas liquefatti compressi l'obbligo di installare la valvola di sicurezza e/o un adeguato isolamento termico che consentano di ritardare il fenomeno del BLEVE;
- promuovere l'adozione dei nuovi sistemi avanzati di sicurezza per i veicoli che consentano di ridurre dell'errore umano, valutando anche la possibilità di un graduale

“phasing out” per i veicoli più datati che non consentano di supportare tali sistemi, almeno nel caso delle merci ad “alto rischio”.

7. Bibliografia

- [1] Ministero dei Trasporti, Ministero delle Infrastrutture, Direzione Generale per i Sistemi Informativi e Statistici, Ufficio di Statistica, Sistema Statistico Nazionale, Conto Nazionale dei Trasporti e delle Infrastrutture, Anni 2005, Roma - Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato S.p.A.,
- [2] Eurostat (Statistical Office of the European Union) Energy, transport and environment statistics, 2020 Edition. Statistical Books, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.
- [3] Eurostat (Statistical Office of the European Union), Database disponibile online: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> [consultato il 16/08/2021]
- [4] United Nations Economic Commission for Europe [UNECE] ADR 2021 Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road disponibile on-line: <https://unece.org/transportdangerous-goods/adr-2021-files> [consultato il 28/05/2021]
- [5] Centre for Chemical Process Safety [CCPS]. Guidelines for Chemical Transportation Safety, Security, and Risk Management, 2nd Edition, August 2008, ISBN:9780470924860 |DOI:10.1002/9780470924860, y John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
- [6] Abbasi T., Ramyapriya R., Tauseef S. M., Abbasi S. A., Accidents occurring during transportation of hazardous substances and modeling of their consequences, International Journal of Engineering, Science and Mathematics Vol. 6 Issue 8, December 2017, ISSN: 2320-0294
- [7] Bruglieri M., Maja R., Marchionni G., Rainoldi G., Safety in Hazardous Material Road Transportation: State of the Art and Emerging Problems in Advanced Technologies and Methodologies for Risk Management in the Global Transport of Dangerous Goods, pp.88-129, Chapter: 6 Publisher: IOS Press, Editors: Bersani C., Boulmakoul A., Garbolino E., Sacile R.
- [8] Ma C., Zhou J., Xu X., Pan F., Xu J., Fleet Scheduling Optimization of Hazardous Materials Transportation: A Literature Review, Journal of Advanced Transportation, Volume 2020, Article ID 4079617, <https://doi.org/10.1155/2020/4079617>
- [9] Istat [Istituto Nazionale di Statistica], ACI [Automobile Club d'Italia] Incidenti stradali anno 2019, 23/07/2020, aggiornamento 27/10/2020, disponibile on-line <https://www.istat.it/it/archivio/245757>
- [10] Istat [Istituto Nazionale di Statistica], ACI [Automobile Club d'Italia] Incidenti stradali anno 2020, 22/07/2021, disponibile on-line <https://www.istat.it/it/archivio/259825>
- [11] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Dipartimento per il Coordinamento dello Sviluppo del Territorio, il Personale ed i Servizi Generali, Direzione Generale per i Sistemi Informativi e Statistici, Div. 5 Ufficio di Statistica, Politecnico di Milano, Dip.to di Architettura e Pianificazione, Laboratorio Traspol, Costi economici e sociali della mobilità, incidentalità, inquinamento e trasporto delle merci pericolose, Relazione finale, 23/03/2006, disponibile on-line https://www.mit.gov.it/mit/mop_all.php?p_id=03299
- [12] Tomiato L., Quaggiato R., De Luca G., Armanini L., Rischio da trasporto merci pericolose, Atti del convegno VGR2 (Valutazione e gestione del rischio negli Insediamenti Civili ed Industriali) III Edizione, Pisa, 15-17/10/2002

- [13] United Nations Economic Commission for Europe [UNECE] Accident reports [notifications according to 1.8.5.2], disponibili on-line: <https://unece.org/accident-reports-notifications-according-1852>
- [14] Romano G. L'esperienza in ogni scenario di rischio. Numeri e proposte per l'Osservatorio Nazionale, Giornata di Studio sul tema "Osservatorio sul rischio del trasporto di merci pericolose: idee e proposte per la costituzione di un centro permanente", Viareggio 28/06/2014, disponibile on-line <http://conference.ing.unipi.it/vgr2012/index.html>
- [15] Agnello P., Corrao S., De Cecco F., Fidelibus A., Galatola E, Landoni A., Mazzaro M., Poggiali D., Romano G, Romano G., Considerazioni su un approccio uniforme all'analisi del rischio del trasporto di sostanze pericolose, Atti del convegno VGR2012 [Valutazione e gestione del rischio negli Insediamenti Civili ed Industriali] VII Edizione, Pisa, 3-5/10/2012,
- [16] Yilmaz Z., Erol S., Aplak H.S. Transportation of hazardous materials [hazmat] a literature survey, Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 22[1], 39-53, 2016, doi: 10.5505/pajes.2015.62134
- [17] Uddin M., Huynh N. Factors influencing injury severity of crashes involving HAZMAT trucks. Int. J. Transp. Sci. Technol. 2018;7, 1–9. doi: 10.1016/j.ijtst.2017.06.00
- [18] Xiaoli Ma, Yingying Xing, Jian Lu, "Causation Analysis of Hazardous Material Road Transportation Accidents by Bayesian Network Using Genie", Journal of Advanced Transportation, vol. 2018, Article ID 6248105, 12 pages. <https://doi.org/10.1155/2018/6248105>
- [19] Fanelli R., Carrara R., Guida al trasporto di sostanze pericolose. Come prevenire e gestire le emergenze nel trasporto su strada, Fondazione Lombardia per l'ambiente, Milano, 1999, ISBN 88–8134–092–5
- [20] Lischi E., L'analisi di rischio nel trasporto stradale di merci pericolose: due software a confronto, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Facoltà di Ingegneria, Tesi di Laurea in Gestione integrata degli aspetti di Salute, Sicurezza e Ambiente, Anno Accademico 2006-2007
- [21] Bubbico R., Biggi P., Mazzarotta B., 2019, Protection Systems for Tanks containing Hazardous Materials Exposed to Fire, Chemical Engineering Transactions, 77, 229-234 DOI:10.3303/CET1977039
- [22] Birk A.M., Fire Testing and Computer Modelling of Rail Tank-Cars Engulfed in Fires: Literature Review For Transport Dangerous Goods and Transportation Development Centre Transport Canada, Ontario, Canada March 2006
- [23] Zalbide, M., Garcia Sanchez, D., Aurtenetxe, J., Izkara, J. L., Fuggini, C., Di Gennaro, F., Perez, M. A., Pani, C. RAGTIME Risk based approaches for Asset inteGriTy multimodal Transport, Proceedings of TRA Conference, 16-19 April 2018, Issue Biannual, 2019
- [24] Inanloo B, Tansel B. Explosion impacts during transport of hazardous cargo: GIS-based characterization of overpressure impacts and delineation of flammable zones for ammonia, Journal of Environmental Management 156 (2015) 1-9;
- [25] Li Y., 2018, Remote monitoring of wireless sensor networks in the transportation of dangerous chemicals, Chemical Engineering Transactions, 71, 739-744 DOI:10.3303/CET1871124
- [26] National Transportation Safety Board. 2019. Air Products and Chemicals, Inc. Tube Trailer Module Hydrogen Release and Subsequent Fire, Diamond Bar, California, February 11, 2018. Hazardous Materials Incident Report NTSB/HZM-19/02. Washington, DC: NTSB

EVENTO N.1

1. LOCALIZZAZIONE EVENTO			
Data: 05/12/18		Ora: 14.00	Luogo: RIETI
2. SEQUENZA EVENTI:			
Il giorno 05/12/18 durante le operazioni di travaso effettuate da un autoarticolato con semirimorchio cisterna GPL in una stazione di servizio si è verificata una perdita di combustibile per il fenomeno del BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion – esplosione fisica con flash del GPL), cui è seguito l’innesco immediato - fireball (esplosione chimica)			
			
(A) Incendio		(B) Momenti precedenti all'esplosione	
Fonte delle immagini: <u>Quotidiano Nazionale</u> (https://www.quotidiano.net/cronaca/rieti-incendio-salaria-distributore-1.4329942)			
3. DESCRIZIONE SITO:		4. SOSTANZA	
<input type="checkbox"/> Centro urbano <input checked="" type="checkbox"/> Periferico <input checked="" type="checkbox"/> Infrastruttura primaria principale <input type="checkbox"/> Infrastruttura secondaria <input type="checkbox"/> Zona industriale Descrizione: L'incidente è avvenuto sulla strada statale Salaria SS4, Fara Sabina, Rieti, in una stazione di servizio. La zona è altamente trafficata e a media urbanizzazione		Identificazione: <u>GPL</u> Classificazione UE (CLP): Flam. Gas 1 H220, Press. Gas (Comp.) H280	
		Classe ADR 2F	
(C) Foto Aerea			
5. DESCRIZIONE CAUSE			
Tra le molteplici cause dell'incidente causate dalla perdita di combustibile (probabilmente continua) potrebbero esserci la rottura della manichetta o la perdita della guarnizione serbatoio-cisterna-manichetta. La perdita non è stata bloccata dalla valvola di eccesso di flusso per un probabile malfunzionamento. Per l'innesco possono essere ipotizzati la mancata messa a terra del veicolo e il mancato utilizzo di indumenti antistatici ed attrezzature anti-scintilla da parte del personale preposto alle operazioni di travaso (conducente o addetto al sito) ed infine il mancato presidio alle operazioni di questi ultimi, che avrebbero potuto controllare l'incendio nelle fasi iniziali ed evitare l'esplosione.			
6. DESCRIZIONE CONSEGUENZE			
L'incidente ha causato la morte di due persone, di cui un vigile del fuoco, il ferimento di 17 persone di cui 6 gravi, il completo danneggiamento della stazione di servizio, di alcuni mezzi di soccorso.			
7. RISPOSTA- ATTIVAZIONE EMERGENZA			
La risposta del sistema di emergenza è stata veloce ed ha previsto l'utilizzo di mezzi di terra ed aerei arrivati in sito quando ormai l'incendio era sviluppato. La zona precedentemente all'esplosione non è stata messa in sicurezza in maniera adeguata e questo ha causato il ferimento di numerose persone per l'onda d'urto dovuto all'esplosione			
8. LEZIONE APPRESA			
Operazioni di questo genere, che prevedono il travaso di combustibile liquido altamente infiammabile in stazioni di rifornimento devono essere presidiate in maniera opportuna da personale specializzato. La perdita di combustibile e l'innesco con conseguente incendio ed esplosione potevano essere evitate. Il corretto funzionamento delle attrezzature di travaso e valvola di eccesso di fluido dovevano essere verificati. Considerato il combustibile coinvolto, altamente infiammabile e l'area pericolosa (stazione di servizio), a seguito dell'incendio l'area doveva essere evacuata. Procedure di evacuazione devono essere previste nei piani di emergenza. La riduzione della probabilità di scoppio in modalità BLEVE si attua con sistemi come valvole di sicurezza installate sulla cisterna (previsti dalla norma RID/ADR ma non obbligatori) o isolamento termico.			

EVENTO N.2

1. LOCALIZZAZIONE EVENTO	
Data: 06/08/18	Ora: 13.45
Luogo: BOLOGNA	
2. SEQUENZA EVENTI:	
<p>Il 06/08/18 un autoarticolato con semirimorchio cisterna GPL ha tamponato a Bologna, sulla tangenziale, un semirimorchio centinato sul quale erano caricati colli contenenti materiale infiammabile. Nell'impatto, il carico del veicolo tamponato ha preso fuoco. Il fuoco ha coinvolto anche il veicolo trattore tamponante e il suo semirimorchio cisterna contenente GPL. Dopo circa 8 minuti di avvolgimento nel fuoco, la cisterna è esplosa. Si è trattato di un BLEVE - esplosione fisica con flash del GPL), cui è seguito l' innesco immediato - fireball (esplosione chimica)</p>	
	
(A) Momento della collisione	(B) Esplosione con modalità BLEVE
Fonte delle immagini: Modena Today (https://www.modenatoday.it/video/incidente-esplosione-bologna-6-agosto-2018.html)	
3. DESCRIZIONE SITO:	4. SOSTANZA
<input type="checkbox"/> Centro urbano <input type="checkbox"/> Periferico <input checked="" type="checkbox"/> Infrastruttura primaria <input type="checkbox"/> Infrastruttura secondaria <input type="checkbox"/> Zona industriale Descrizione: <u>L'incidente è avvenuto sul raccordo A1-A14, in prossimità del cavalcavia della SS9, zona altamente trafficata a forte urbanizzazione</u>	 (C) Foto Aerea
Identificazione: GPL Classificazione UE (CLP): Flam. Gas 1 H220, Press. Gas (Comp.) H280 Classe ADR 2F Quantità: 23 t	
5. DESCRIZIONE CAUSE	
<p>L'incidente è schematizzato in: a. Collisione che dipende dall'elemento umano e dal funzionamento dei dispositivi di sicurezza. b. Innesco avvenuto istantaneamente a seguito dell'urto dovuto al tamponamento per la presenza di colli contenenti materiali infiammabili. c. Esplosione. Avvenuta in 8 minuti in modalità BLEVE.</p>	
6. DESCRIZIONE CONSEGUENZE	
<p>L'incidente ha causato la morte di due persone, conducente del veicolo di trasporto del GPL e un passante investito dall'onda d'urto, il ferimento di 140 persone e 12 soccorritori. L'infrastruttura e la rete viaria risultano danneggiato in maniera severa. Si registra il danneggiamento esterno di alcuni edifici ed autovetture.</p>	
7. RISPOSTA- ATTIVAZIONE EMERGENZA	
<p>Data la gravità dell'intervento la risposta del sistema di emergenza è stata veloce considerando il tempo intercorso tra il tamponamento e l'esplosione. In questo tempo i soccorritori sono riusciti ad evacuare le persone che si trovavano nelle autovetture in prossimità dell'incidente, bloccare al traffico l'infrastruttura ed evacuare l'area.</p>	
8. LEZIONE APPRESA	
<p>La collisione è dipesa dall'elemento umano. L'incidente poteva essere evitato o le sue conseguenze potevano essere mitigate con i sistemi di sicurezza obbligatori ai sensi del Regolamento CE 661/2009. Incertezze emergono anche sulla corretta disposizione/fissaggio e riempimento dei colli presenti sul veicolo tamponato. Per quanto riguarda il fenomeno del BLEVE la riduzione della probabilità di scoppio si attua con valvole di sicurezza installate sulla cisterna (previsti dalla norma RID/ADR ma non obbligatori) di cui la stessa non era munita o isolamento termico. Questi sistemi rallentano il fenomeno che conduce al BLEVE, consentendo lo svolgimento delle operazioni di soccorso in un tempo maggiore ed un intervento potenzialmente in grado di prevenire l'esplosione. Fortunatamente il tempo intercorso tra l'innesco e lo scoppio è stato sufficiente a consentire l'allontanamento delle persone presenti nelle vicinanze evitando un maggior numero di vittime e feriti.</p>	

EVENTO N.3

1. LOCALIZZAZIONE EVENTO	
Data: 11/02/2018	Ora: 13.15 Luogo: Diamond Bar, California (USA)
2. SEQUENZA EVENTI	
<p>Il giorno 11/02/18 in un modulo a semirimorchio per il trasporto di idrogeno pressurizzato diretto ad una stazione di rifornimento si è verificato il rilascio della sostanza trasportata (in condizioni di esercizio) e successivo incendio.</p>	 <p><i>Foto successiva all'evento con individuazione del punto di primo rilascio ed i danni causati al modulo di trasporto</i> (Fonte delle immagini: National Transportation Safety Board, [26])</p>
3. DESCRIZIONE SITO:	4. SOSTANZA
<input checked="" type="checkbox"/> Centro urbano <input type="checkbox"/> Periferico <input type="checkbox"/> Infrastruttura primaria principale <input type="checkbox"/> Infrastruttura secondaria <input type="checkbox"/> Zona industriale Descrizione: L'incidente è avvenuto in una stazione di rifornimento di idrogeno, adiacente ad un'area commerciale e ad un'area residenziale in prossimità di un'importante arteria stradale.	 <p><i>Foto Aerea</i></p>
Identificazione: Idrogeno Classificazione UE (CLP): Flam. Gas 1 H220, Press. Gas (Comp.) H280 Quantità trasportata: 240 kg Quantità rilasciata: ca. 120 kg	Classe ADR: 2.1F
5. DESCRIZIONE CAUSE	
<p>Il rilascio di idrogeno è iniziato verosimilmente perché su una delle bombole è stato installato un dispositivo di sfiato di categoria non corretta che si è attivato nelle normali condizioni di lavoro. L'alta pressione dell'idrogeno ha causato l'espulsione del tubo di sfiato progettato per dirigere il gas di scarico in una direzione sicura (verso l'alto e lontano dal modulo) causando l'incendio. Ne è conseguito che l'incendio si propagasse raggiungendo i contenitori adiacenti. Infine, il fuoco ha causato la successiva attivazione dei dispositivi di sfiato installati sulle altre bombole che hanno fatto fuoriuscire altro gas all'interno del modulo.</p>	
6. DESCRIZIONE CONSEGUENZE	
<p>Non ci sono state vittime né feriti. L'incidente ha comportato l'evacuazione di un numero di persone compreso tra 1400 e 2000 dalle zone commerciali e residenziali adiacenti al luogo dell'incidente. Si sono inoltre registrati danni materiali stimati in 175000 \$</p>	
7. RISPOSTA- ATTIVAZIONE EMERGENZA	
<p>I vigili del fuoco hanno ricevuto una comunicazione erronea sull'esplosione di una stazione di rifornimento di benzina e non hanno realizzato finché non sono arrivati sul posto che si trattava di un incendio che coinvolgeva bombole di idrogeno. Inoltre la mancanza di familiarità con le infrastrutture di rifornimento di idrogeno, la difficoltà nello stimare la gravità delle possibili conseguenze e la scarsa conoscenza degli adeguati interventi di emergenza per mitigare la possibile rottura catastrofica delle bombole hanno reso gli interventi meno efficaci e sicuri di quanto sarebbero potuti essere</p>	
8. LEZIONE APPRESA	
<p>Il rimorchio conteneva recipienti in pressione non conformi alle specifiche del dipartimento dei trasporti US. Infatti, le bombole prima dell'incidente nel 2017 erano state ispezionate (test di pressione richiesto ogni 5 anni) ma in questa fase i tecnici addetti alla riqualificazione hanno installato 4 dispositivi di scarico errati (con attivazione a metà della pressione di esercizio richiesta). I dispositivi di sicurezza spediti dal produttore erano errati, quindi nelle fasi successive non sono stati adeguatamente inventariati e passati inosservati al collaudatore. L'incidente poteva essere sicuramente evitato prestando l'attenzione richiesta durante le fasi di controllo documentale dei dispositivi in fase di spedizione, ricezione e verifica della rispondenza del prodotto al progetto ed alle specifiche normative.</p>	

Analisi di rischio dei depositi costieri di gas naturale liquefatto GNL – le principali caratteristiche degli impianti “Small Scale LNG”

G.A. Zuccarello¹, A. Lambertini²

¹ Inail – Uot di Bologna

² ARPAE Emilia Romagna PTR-RIR

Sommario

Il D.Lgs. 257/2016 di recepimento della Direttiva europea 2014/94/UE - AFID (Alternative Fuels Infrastructure Directive) – per la realizzazione di un’infrastruttura per i combustibili alternativi a quelli fossili per ridurre le emissioni del settore trasporti, sta favorendo lo sviluppo di impianti di stoccaggio e distribuzione di gas naturale in forma compressa (GNC) e in forma liquefatta (GNL). Tra questi, di notevole importanza sono i depositi costieri di stoccaggio di gas naturale liquefatto, detti anche “Small Scale LNG”, in via di progettazione e realizzazione in Italia.

Scopo del presente lavoro è approfondire l’analisi di rischio per i depositi costieri di GNL, generalmente classificati come stabilimenti a rischio di incidente rilevante, ai sensi del D.Lgs. 105/2015, individuando le principali criticità per le diverse sezioni dell’impianto: banchina per lo scarico da nave metaniera, linee di trasferimento, serbatoi di stoccaggio, baie di carico autocisterne e sistemi di recupero del Boil Off Gas (BOG).

Partendo dalle principali normative e guide tecniche di riferimento per la progettazione degli stoccaggi di GNL, si confronteranno le soluzioni tecniche adottate per le principali tipologie di impianti.

Dopo aver analizzato le proprietà chimico fisiche della sostanza e i fenomeni specifici quali il Roll-Over e la transizione rapida di fase (Rapid Phase Transition - RPT), si approfondirà la dinamica dei rilasci in fase liquida e in fase gas.

Si giungerà all’individuazione degli scenari incidentali tipici di un deposito di GNL, focalizzando l’attenzione sulle principali soluzioni impiantistiche e misure di prevenzione e protezione specifiche, e sugli elementi essenziali per la pianificazione di emergenza.

1. Introduzione

Il quadro strategico nazionale adottato dall’Italia con il D.Lgs. n. 257 del 16 dicembre 2016, recepimento della Direttiva europea 2014/94/UE comunemente denominata DAFI o AFID (Alternative Fuels Infrastructure Directive) sulla realizzazione di un’infrastruttura per i combustibili alternativi a quelli fossili tradizionali derivati dal petrolio, sta favorendo lo sviluppo di impianti di stoccaggio e distribuzione di gas naturale (compreso biometano) in forma compressa (GNC) e in forma liquefatta (GNL). Il GNL rappresenta infatti un’alternativa all’olio combustibile pesante e al diesel per ridurre le emissioni del settore trasporti, grazie alla riduzione delle emissioni (fino al 25% in meno di CO₂, fino al 90% in meno di NO_x, quantità trascurabili di zolfo e particolato fine). Il GNL sta trovando sempre più ampio utilizzo nei trasporti terrestri e marittimi, nonché nella fornitura di siti industriali off-grid o aree non ancora collegate alla rete nazionale di trasporto del gas.



Figura 1. Estratto della mappa europea “GIE Small Scale LNG Map 2020” [1]

Oltre ai già diffusi impianti di distribuzione GNL ad uso autotrazione per garantire la circolazione dei veicoli pesanti alimentati a GNL sulla rete stradale parte della rete transeuropea dei trasporti (TEN-T), notevole rilevanza stanno acquisendo i depositi costieri di stoccaggio di gas naturale liquefatto, detti anche “Small Scale LNG”. Diversi impianti di stoccaggio di questo tipo elencati in tabella 1 sono in via di progettazione o in corso di realizzazione in Italia.

	Regione	Località	Capacità di stoccaggio (m3)	Stato
1	Veneto	Porto Marghera (VE)	32000	autorizzato alla costruzione
2	Emilia Romagna	Ravenna (RA)	20000	in costruzione
3	Toscana	Livorno (LI)	9000	in progetto
4	Sardegna	Oristano - Santa Giusta (OR)	9000	in esercizio
5	Sardegna	Porto Canale di Cagliari (CA)	22068	in progetto
6	Sardegna	Porto di Oristano (OR)	10000	in progetto
7	Sardegna	Porto di Oristano (OR)	9000	autorizzato alla costruzione
8	Sardegna	Porto Torres (SS)	10000	in progetto
9	Campania	Porto di Napoli (NA)	20000	in progetto
10	Puglia	Porto di Brindisi (BR)	20000	in progetto
11	Sicilia	Priolo - Augusta (SR)	20000	in progetto
12	Sicilia	Gela		in progetto
13	Liguria	Genova (GE)	10000	in progetto

Tabella 1. Elenco depositi costieri LNG aggiornato ad agosto 2021 [1,2]

Anche gli operatori che gestiscono i terminali di rigassificazione in Italia, stanno progettando modifiche tecniche-operative in modo da fornire nuovi servizi di tipo Small Scale LNG (SSLNG), parallelamente all'attività di rigassificazione.

Infatti nei depositi Small Scale LNG, a differenza degli impianti di rigassificazione a terra, *offshore* o su particolari navi denominate "unità galleggianti di stoccaggio e rigassificazione" (o FSRU, dall'inglese *Floating Storage and Regasification Unit*), il gas naturale è mantenuto in forma liquida senza fase di rigassificazione e viene stoccato per poi essere trasferito ad autobotti, ISO-container, bettoline/shuttle, vagoni cisterna ferroviari, impianti di rifornimento di autoveicoli alimentati a GNL o a CNG, o anche metanodotti per l'alimentazione di utenze gas civili e industriali, come descritto nello schema in Figura 2.

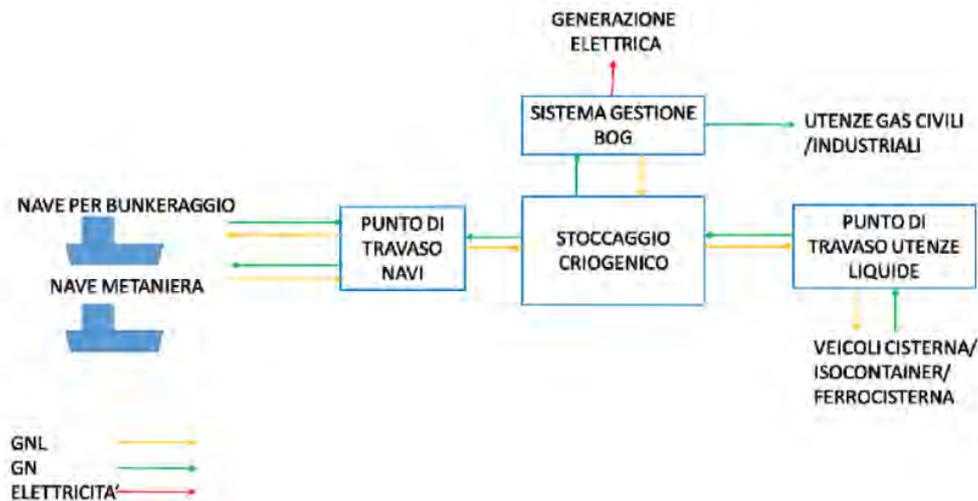


Figura 2. Schema della filiera dei depositi di GNL [3]

In base ai quantitativi massimi potenzialmente presenti di gas naturale - sostanza pericolosa citata nominalmente in Parte 2 dell'Allegato 1 del D.Lgs. 105/2015 alla categoria 18 "Gas liquefatti infiammabili, categoria 1 o 2 (compreso GPL), e gas naturale" - i depositi di GNL si configurano tipicamente come stabilimenti a rischio di incidente rilevante di soglia superiore, come si evince dai limiti indicati in tabella 2.

Sostanza	Allegato 1 Parte 2 D.Lgs. 105/2015	Classificazione ed etichettatura della sostanza in accordo al regolamento 1272/2008 (CLP)	Limiti di soglia inferiore (t)	Limiti di soglia superiore (t)
Gas Naturale Liquefatto (GNL)	18. Gas liquefatti infiammabili, categoria 1 o 2 (compreso GPL), e gas naturale	H220: gas altamente infiammabile H280: contiene gas sotto pressione, può esplodere se riscaldato 	50	200

Tabella 2. Limiti di assoggettabilità al D.Lgs. 105/2015

2. Tipologie costruttive

La norma europea di riferimento per la progettazione di attrezzature e installazioni di terra contenenti GNL è la UNI EN 1473 [4]. Le unità principali che caratterizzano un deposito di GNL sono:

- area banchina con bracci di scarico/carico navi/bettoline
- tubazioni di trasferimento del GNL
- serbatoi di stoccaggio
- baie di carico autocisterne/isocontainer/ferrocisterne
- sistema di gestione del Boil Off Gas (BOG)
- sistema torcia
- utilities e servizi
- edifici e opere accessorie (palazzina uffici, sala controllo...)

2.1 Serbatoi di stoccaggio GNL

I serbatoi di stoccaggio GNL, progettati in accordo alla Norma EN 1473 [4] e alla Norma EN 14620 [5] specifica per i serbatoi criogenici, possono essere:

- a singolo contenimento, con unico serbatoio di materiale adatto all'utilizzo criogenico protetto da uno strato di coibentazione (single containment);
- a doppio contenimento, con contenitore interno primario atto a contenere il GNL e contenitore secondario (double containment);
- a contenimento totale, in cui sia il serbatoio interno che il contenimento esterno sono costruiti in materiale idoneo a contenere eventuali fuoriuscite di GNL in fase liquida dal contenitore interno (full containment). La norma prevede inoltre che il contenitore secondario sia in grado di contenere i vapori generati da una perdita conseguente ad una rottura del contenimento primario.

Per limitare il flusso termico dall'esterno l'isolamento tra i due contenimenti può essere ottenuto mediante la realizzazione del vuoto nell'interspazio tra i due serbatoi o mediante l'utilizzo di perlite espansa criogenica.

I serbatoi possono essere di tipo sferico o cilindrico ad asse verticale o orizzontale, installati fuori terra, parzialmente al di sotto del livello del suolo, interrati o in bacino, e a pressione atmosferica o in pressione. Le differenze dipendono dalla capacità e dal layout dell'impianto e dalle modalità di gestione dello stoccaggio.

Le tipologie più diffuse per i depositi small scale sono i serbatoi cilindrici verticali atmosferici a fondo piatto di tipo full containment, con serbatoio interno in acciaio al 9% di Nichel e serbatoio esterno in cemento armato con materiale isolante nell'intercapedine oppure in alternativa più serbatoi criogenici a doppio contenimento eserciti in pressione. Le pompe criogeniche, al servizio dei serbatoi possono essere posizionate sia all'esterno dei serbatoi che al loro interno (pompe in-tank).

2.2. Tubazioni GNL

Le tubazioni di impianto che contengono GNL e BOG sono coibentate con materiale ignifugo e non propagante la fiamma di spessore definito in funzione del diametro della tubazione e dotate di valvole di sicurezza TSV (Thermal Safety Valve), le quali hanno il compito di proteggere le tubazioni da eventuale espansione termica e vaporizzazione dovuta a rilasci termici dell'ambiente circostante e/o da incendi. Le tubazioni inoltre possono essere protette da sistemi di rilevamento della temperatura distribuita per rilevare le variazioni di temperatura derivanti da eventuali perdite di liquido.



Figura 3. Esempio di layout deposito costiero con serbatoi in pressione

2.3. Sistema di gestione BOG

Il Boil off gas (BOG) è la quantità di GNL che evapora durante le fasi di stoccaggio e trasferimento, per effetto di vari fattori, tra cui dispersioni termiche delle linee, calore rilasciato dall'ambiente alle unità di stoccaggio, energia trasferita al GNL dalle pompe in-tank, differenze di pressione, operazioni di carico autocisterne e bettoline e scarico navi gasiere). Il sistema di gestione dei vapori di GNL (BOG) può essere costituito da:

- Motori a combustione interna adibiti alla produzione di energia elettrica per l'autoconsumo dell'impianto.
- Sistema di re-liquefazione che consente il recupero della quota parte di BOG che non viene bruciato nei motori a combustione interna e viene reinviato, nuovamente liquefatto, alla sezione di stoccaggio.

2.4. Sistema Torcia

Il rilascio di gas attraverso la torcia è atteso esclusivamente durante le condizioni di funzionamento anomale e di emergenza, e/o per la preparazione ad interventi di manutenzione, con combustione del gas rilasciato in atmosfera. La torcia costituisce quindi un sistema di sicurezza il cui dimensionamento viene eseguito secondo lo standard della Norma EN 1473:2016 secondo lo scenario più gravoso, tenendo comunque in considerazione anche lo standard di riferimento per la progettazione delle torce industriali API 521[6]. In fase di progettazione è opportuno verificare l'effetto di irraggiamento dovuto all'esercizio della torcia sulle apparecchiature e sulle tubazioni del deposito e assicurare che in caso di emergenza, in corrispondenza degli scarichi delle PSV, l'irraggiamento generato dalla torcia in funzione non sia tale da portare la temperatura del gas naturale al di sopra della temperatura di autoaccensione dello stesso.

3. L'analisi di rischio per i depositi costieri di GNL

L'analisi degli eventi incidentali viene effettuata dal gestore all'interno del rapporto di sicurezza applicando la procedura tipica per gli stabilimenti a rischio di incidente rilevante articolata nelle seguenti fasi:

- raccolta dati sulle caratteristiche chimico-fisiche e sui rischi specifici associati al gas naturale liquefatto e in fase gas;
- analisi storica degli eventi incidentali accaduti;
- identificazione degli eventi incidentali di rilascio;
- scenari incidentali e relative conseguenze.

3.1. Raccolta dati sulla sostanza

Il gas naturale liquefatto (GNL) è una miscela di idrocarburi alifatici, prevalentemente metano, la cui composizione varia in base al giacimento di provenienza e del processo di liquefazione.

3.1.1. Caratteristiche chimico-fisiche

Le principali caratteristiche chimico-fisiche del GNL sono riassunte nella tabella 3.

Nome commerciale NUMERO CAS NUMERO CE	GNL - Gas Naturale Liquefatto 8006-14-2 232-343-9
Composizione	Composizione variabile: prevalentemente metano (> 80% in volume), azoto, etano, propano, idrocarburi alifatici fino a pentani in quantità decrescente
Stato fisico Colore Odore	Liquido Incolore Inodore
Punto di ebollizione	-161°C a pressione atmosferica
Densità	430 - 480 kg/m ³ (variabile in base alla composizione)
Densità rispetto all'aria	0.6 a 15°C
Potere calorifico superiore Potere calorifico inferiore	40 MJ/Nm ³ 36 MJ/Nm ³
Limiti inferiore e superiore di infiammabilità in aria Temperatura di flash point Temperatura di autoaccensione	5 - 15 % in volume (allo stato gassoso) -188 °C 540 °C - 560°C

Tabella 3. Caratteristiche chimico-fisiche del GNL

Il GNL, rispetto ad altre sostanze ad esempio il GPL, è meno sensibile all'accensione e minore è la temperatura della miscela metano/aria maggiore sarà l'energia necessaria per l'accensione della miscela stessa. La miscela metano/aria è suscettibile di infiammarsi solo qualora la sua concentrazione sia compresa indicativamente tra il 5% e il 15% in volume. Il metano è classificato come gas "a bassa reattività" e la velocità di combustione è minore rispetto ad altri gas come il propano o l'idrogeno.

Essendo movimentato come fluido criogenico, nel caso in cui il GNL venga a contatto con la pelle si possono avere "ustioni da gelo", ma anche gravi danni ai polmoni e all'apparato

respiratorio dovuti all'inalazione dei vapori a bassissime temperature. Inoltre può risultare asfissiante, in particolare in caso di rilasci in spazi chiusi o scarsamente ventilati, poiché contribuisce a diminuire la percentuale di ossigeno nell'aria. Infine, il contatto tra il GNL e altri materiali non idonei all'utilizzo a temperature criogeniche, può condurre a danneggiamento o rottura dei componenti e pertanto si rende necessaria l'adozione di materiali criogenici idonei al funzionamento a basse temperature, quali acciaio inossidabile ed acciaio con il 9% di nichel, nonché sistemi di convogliamento e contenimento di eventuali perdite, quali canalette e pozzetti di raccolta.

3.1.2. Fenomeni caratteristici del GNL: Roll-over e RPT

Il GNL inoltre presenta i seguenti fenomeni fisici tipici:

- Roll-over, fenomeno che consiste nel rimescolamento del liquido contenuto nel serbatoio per fenomeni di stratificazione, che può portare all'evaporazione rapida di notevoli quantità di gas nel serbatoio di stoccaggio con conseguente sovrappressione;
- RPT rapid phase transition, il rapido cambiamento di fase per contatto del GNL quando due liquidi a temperatura molto diversa vengono a contatto diretto, in particolare in caso di rilascio di elevate quantità di GNL in acqua.

3.2 Analisi storica di incidenti accaduti

Un elenco degli incidenti più significativi accaduti nel mondo nei terminali di liquefazione e di rigassificazione e stoccaggio di GNL, tratti da diverse fonti [3,7,8,9] è riportato in Tabella 4. Sono stati esclusi dalla presente analisi gli incidenti accaduti su navi metaniere, automezzi di trasporto o gasdotti sottomarini.

Gran parte degli incidenti accaduti hanno coinvolto impianti che non presentavano sistemi di contenimento e opportuni sistemi di controllo o per i quali erano stati utilizzati materiali non idonei alle temperature criogeniche.

Anno	Luogo	Tipologia di incidente
1944	USA Cleveland, Ohio	Flash fire ed esplosioni conseguenti a cedimento del serbatoio
1965	UK - Canvey Island	Incendio in terminale rigassificazione durante manutenzione
1971	Panigaglia, La Spezia, Italia	Rilascio gas causa Roll over durante riempimento serbatoio in impianto di rigassificazione
1973	USA - Staten Island, New York	Incendio durante riparazione serbatoio
1973	UK - Canvey Island	RPT
1977	Algeria, Arzew	Rilascio di GNL senza innesco per rottura valvola (materiale non idoneo)
1978	Das Island, Emirati Arabi Uniti	Perdita di GNL dal fondo senza innesco
1979	USA - Cove Point, Maryland	Esplosione confinata in condotto cavi sotterraneo conseguente a perdita da guarnizione pompa
1989	UK - Manchester	Fireball
1993	Europa	Roll-over in un serbatoio di GNL
1997	UK - Manchester	Rilascio di gas naturale in impianto di alimentazione e distribuzione

2004	Algeria- Skikda	Effetto domino innescato da un'esplosione conseguente a perdita da tubazione
2014	USA Plymouth	Fuoriuscita di GNL senza innesco da serbatoio singolo contenimento
2016	Francia	Incendio alla base della torcia
2015	USA –Houston, Texas	Rilascio di gas naturale in impianto di liquefazione, durante le operazioni di manutenzione
2016	USA – Chicago, Illinois	Rilascio di gas naturale in impianto di distribuzione di GNL
2018	USA – Houston, Texas	Rilascio di gas naturale in impianto di liquefazione
2019	USA – Houston, Texas	Rilascio di gas naturale in impianto di liquefazione
2019	USA Houston, Texas	Rilascio di gas naturale in impianto di reliquefazione durante l'avvio
2019	USA – Indianapolis, Indiana	Rilascio di gas naturale in impianto di liquefazione

Tabella 4. Elenco incidenti significativi accaduti nel mondo (periodo 1944-2019)

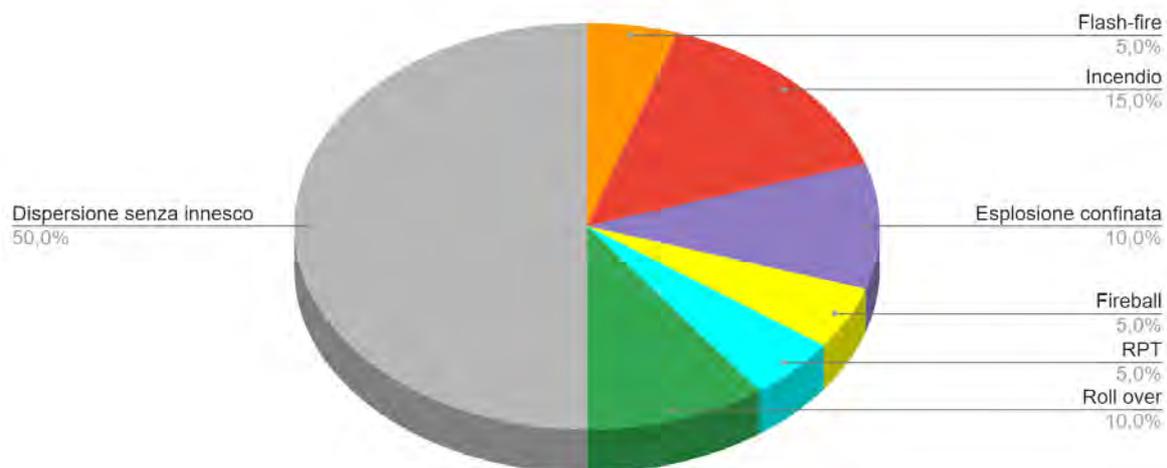


Figura 4. Tipologie di incidenti accaduti negli impianti nel mondo (periodo 1944-2019)

Dall'analisi risulta che nella maggior parte dei casi si ha avuto un rilascio di GNL con successiva evaporazione e dispersione in atmosfera in assenza di innesco, come illustrato in Figura 4.

Dalle statistiche sugli incidenti durante il trasporto di GNL via mare invece, risulta che gli eventi più significativi dipendono da arenamenti o collisioni con altre navi, ma le caratteristiche costruttive delle metaniere e, in particolare, la presenza di doppio scafo, hanno fatto sì che questi incidenti non abbiano mai determinato perdite di contenimento e rilasci di GNL in alto mare o in porto [10].

3.3 Identificazione dei top events

Nel caso di serbatoi a contenimento totale il top event rilascio di GNL dal serbatoio di stoccaggio non è ritenuto credibile, in quanto in caso di cedimento del serbatoio primario, il

contenimento secondario impedirebbe rilasci verso l'esterno, in linea con quanto indicato nella norma UNI EN 1473. In particolare gli scenari da considerare per le diverse tipologie di serbatoi di GNL sono indicati al Paragrafo 4.4.2.3.1 "Hazard Arising from LNG" della citata norma UNI [4] riportata nella seguente tabella 5.

Tipologia di Serbatoio	Tutto in metallo o solamente con il tetto in metallo	Calcestruzzo precompresso (incluso il tetto in calcestruzzo rinforzato)
Singolo Contenimento	A	-
Doppio Contenimento	B	-
Pleno Contenimento	B	C

Scenari da considerare:

A - In caso di collasso del serbatoio interno, la dimensione del pool fire corrisponde all'area di contenimento.
 B - In caso di collasso del tetto del serbatoio, la dimensione del pool fire corrisponde al secondo serbatoio.
 C - Il collasso del tetto non è considerato per questi tipi di serbatoio a meno che non sia specificato nell'analisi di rischio.

Tabella 5. Scenari da considerare in funzione della tipologia di serbatoio [4]

Anche nel report elaborato dall'associazione internazionale dei produttori Oil & Gas IOGP [11], sono riportate frequenze associate a rotture catastrofiche di diverse tipologie costruttive di serbatoi di stoccaggio criogenici con valori compresi tra 10^{-6} e 10^{-8} eventi/anno per serbatoio, mentre il report HSE [12] fornisce un valore di frequenza di accadimento per la rottura catastrofica del contenimento primario e secondario pari a 1×10^{-9} eventi/anno.

Un eventuale rilascio dal contenimento primario del serbatoio di stoccaggio andrebbe ad occupare l'intercapedine e verrebbe rilevato dai sensori a protezione del serbatoio, non determinando quindi una fuoriuscita di GNL in ambiente, ma una maggiore evaporazione di GNL e quindi una sovrapproduzione di BOG rispetto alle condizioni ordinarie, da gestire tramite convogliamento in torcia. In caso di necessità si potrebbe procedere anche al graduale svuotamento del serbatoio interessato dalla perdita attraverso operazioni di caricamento ATB e bettoline, o in caso di spazio disponibile, trasferendo il GNL ad altro serbatoio. Situazioni di questo tipo sono considerate anche nella guida tecnica di prevenzione incendi [3], ove si prevede che, qualora eventi in grado di generare rilasci continuativi e di lunga durata di BOG, in condizioni anomale, il gestore debba individuare e pianificare le azioni da intraprendere. È opportuno quindi che siano definite istruzioni operative di dettaglio per gestire le diverse situazioni a seconda della configurazione del deposito.

Nell'ambito dell'analisi di rischio andranno inoltre indagati i seguenti top events:

1. Rottura bracci di carico di banchina in fase di carico/scarico GNL
2. Rottura tubazioni di collegamento tra la banchina e serbatoi di stoccaggio (fase liquida e ritorno vapori in fase di carico/scarico nave)
3. Rottura tubazione dal serbatoio di stoccaggio alle pensiline di carico ATB (liquido e ritorno vapori)
4. Rottura tubazione in fase di ricircolo GNL
5. Rottura pompe criogeniche
6. Rottura bracci di carico in area pensiline ATB
7. Rottura tubazione del sistema di gestione del BOG
8. Rottura separatori (K.O. Drum)

La perdita di GNL liquefatto da apparecchiature o tubazioni avviene sotto forma di getto che in parte evapora istantaneamente con simultanea espansione nella direzione del rilascio. Parte del GNL è presente nella nube di gas sotto forma di aerosol in continua evaporazione e miscelazione con l'aria, mentre la rimanente parte si depositerà al suolo formando una pozza di liquido, per poi dare origine ad un'intensa evaporazione. Inizialmente il gas prodotto per evaporazione è a temperatura praticamente identica a quella del GNL liquido ed è più

denso dell'aria ambiente e quindi forma uno strato lambente il suolo fino a quando non si riscalda, a contatto con l'aria. Una volta che la temperatura aumenta (circa $-113\text{ }^{\circ}\text{C}$ per il metano puro, oppure circa $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ per il GNL variabile a seconda della composizione) esso è meno denso dell'aria ambiente. In seguito ad una fuoriuscita significativa, per effetto della condensazione del vapore acqueo in atmosfera, si forma una nebbia visibile. La cui estensione fornisce un'indicazione cautelativa della dimensione della nube della miscela infiammabile gas naturale-aria.

3.4 Scenari incidentali

In caso di rilascio di GNL gli scenari incidentali di riferimento considerati sono i seguenti:

- Pool Fire (incendio di una pozza di liquido infiammabile al suolo in caso di rilasci di grandi quantità in funzione della frazione di liquido in grado di accumularsi sul terreno o in presenza di ostacoli che limitino la rapida vaporizzazione del GNL);
- Jet Fire (incendio di un getto a seguito di rilascio bi-fase in presenza di innesco nelle vicinanze del punto di rilascio)
- Flash Fire (incendio della nube di gas/vapore infiammabile con effetto non esplosivo).

La scarsa reattività del metano riduce la possibilità di generazione di un'onda d'urto ai soli casi di nube confinata o di particolari situazioni di congestione dell'impianto.

Scenari incidentali conseguenti al fenomeno RPT si potrebbero verificare in corrispondenza della rottura dei bracci di carico/scarico nave, ma questi bracci sono generalmente dotati di sistemi di controllo tali da prevenire il possibile contatto tra acqua e GNL. Per evitare invece un possibile contatto di GNL con l'acqua presente nei pozzetti di raccolta, è opportuno prevedere un sistema di rilevazione della temperatura all'interno dei pozzetti per rilevare eventuali perdite e un sistema di rilancio delle acque piovane, oltre a sistemi di protezione attiva come versatori di schiuma. Per evitare invece il fenomeno del Roll-over è necessario prevedere idonei dispositivi quali ad esempio sistemi di ricircolazione e strumenti di misura della temperatura e della densità del GNL in più punti distribuiti a diversi livelli del serbatoio.

4. Misure di prevenzione e protezione

Premesso che le misure di prevenzione e protezione vengono definite sulla base delle risultanze dell'analisi di rischio sito-specifica, i depositi sono tipicamente dotati di Distributed Control System (DCS) per il controllo e monitoraggio del processo da sala controllo e di Emergency Shutdown System (ESD) per la messa in sicurezza dell'impianto. Oltre al blocco generale dell'impianto possono essere presenti anche shut down parziali per il blocco della funzione di carico ATB, della funzione di scarico/carico nave, del sistema di gestione del BOG. La fermata totale o parziale dell'impianto può essere iniziata sia da sequenze automatiche per superamento delle condizioni operative stabilite in fase di progetto, sia da attivazione manuale tramite pulsanti di blocco posizionati in campo e/o in sala controllo.

È inoltre presente un sistema di rilevazione fughe di gas o incendi (Fire&gas System) che attiva allarmi o azioni quali blocchi d'impianto tipicamente costituito da: centrale di rilevazione, rilevatori gas, rilevatori di perdite GNL sulle linee di trasferimento, rilevatori incendio (fiamma, calore o fumo) e pulsanti di attivazione manuali.

La rete antincendio deve essere in grado di alimentare gli idranti e gli impianti di protezione attiva. Generalmente barriere ad acqua sono previste a protezione delle aree di travaso e hanno lo scopo di diluire la nube di vapori di GNL al di fuori del campo di infiammabilità, mentre impianti di protezione a schiuma sono previsti a protezione dei bacini di contenimento e di raccolta di GNL. Estintori portatili e carrellati completano le dotazioni antincendio a servizio dei depositi.

Sono presenti sistemi di assistenza all'attracco ed ormeggio delle navi e sistemi di sicurezza per la connessione/disconnessione rapida e sganciamento di emergenza (PERC - Powered Emergency Release Coupling) dei bracci di scarico nave per ridurre al minimo il quantitativo di GNL in caso di perdita.

Un analogo sistema ERC è presente sui bracci di carico autobotte per limitare il quantitativo rilasciato in caso di emergenza durante le operazioni di travaso.



Figura 5. Bracci di carico autobotti (su gentile concessione di Zipfluid srl)

A protezione dei serbatoi di stoccaggio, oltre alle valvole di sicurezza (PSV) convogliate al sistema di torcia, sono presenti sistemi di monitoraggio di livello, temperatura e densità per tutta l'altezza del serbatoio per gestire il riempimento del serbatoio ed evitare il Roll-over. Relativamente agli aspetti di security andrà valutata l'implementazione di sistemi di controllo degli accessi e un impianto antintrusione, nonché un sistema di videosorveglianza per monitorare dalla sala controllo le aree strategiche dello stabilimento e sistemi per gestire le comunicazioni in emergenza (sirene di allarme, telefoni, radio ricetrasmittenti e cellulari antideflagranti per le comunicazioni tra gli operatori del deposito).

5. Aspetti gestionali

Il Gestore è tenuto a predisporre un Documento di Politica e mantenere attivo un Sistema di Gestione per la Sicurezza (SGS-PIR) conforme all'allegato B del D.Lgs.105/2015. Nell'ambito delle attività previste dal Sistema di Gestione della Sicurezza è predisposto il Piano di Emergenza Interno, in cui devono essere definite procedure operative di emergenza in relazione agli scenari incidentali individuati.

Una peculiarità dei depositi di GNL è che, una volta completata la costruzione del deposito, la messa in esercizio effettiva con avvio dell'esercizio commerciale, può avvenire solamente se sono state completate tutte le prove di funzionalità svolte nell'ambito della fase di commissioning, atta a verificare che il deposito sia nelle condizioni di operare secondo le specifiche definite in corso di progettazione. Durante il commissioning quindi devono essere effettuate prove a freddo (cool down e gassificazione impianto) e prove funzionali dei sistemi, necessariamente in presenza di GNL e funzionali al rilascio delle certificazioni e dei

collaudi degli impianti. È importante dunque che siano definite procedure operative specifiche e per la gestione di eventuali emergenze anche per questa fase.

Relativamente alla formazione e all'addestramento del personale devono essere adottate prima dell'avvio dell'impianto specifiche istruzioni operative per la gestione del deposito per le operazioni di carico/scarico e la gestione dello stoccaggio che tengano conto delle condizioni normale, anomale e di emergenza e dei rischi specifici della sostanza in fase liquida (GNL) e in fase gas (BOG). Devono essere predisposte apposite procedure operative di messa in sicurezza e di emergenza in caso di rilascio, incendio, Roll-over, RPT ed è necessario che il personale sia dotato di strumentazione e DPI per la protezione da tutti i rischi connessi alla movimentazione del GNL (ustioni da freddo, asfissia, infiammabilità).

Infine, considerando che tali depositi sono spesso ubicati in aree portuali, si segnala l'importanza dello scambio di informazioni con le aziende limitrofe in fase preventiva e in emergenza e un coordinamento tra i piani di emergenza interni delle altre realtà presenti in prossimità del deposito.

6. Conclusioni

Le normative per la riduzione delle emissioni nel settore dei trasporti marittimi e pesante su strada e la necessità di metanizzazione di aree non ancora collegate alla rete di trasporto nazionale, stanno portando ad una rapida diffusione di progetti di depositi small scale LNG che, per i quantitativi presenti in stoccaggio, si configurano generalmente come stabilimenti a rischio di incidente rilevante di soglia superiore.

Avendo fornito nel presente lavoro una panoramica delle problematiche di sicurezza legate alle proprietà chimico-fisiche della sostanza e ai fenomeni caratteristici del GNL, nonché dei principali requisiti richiesti dalle norme di progettazione specifiche del settore e dei punti salienti dell'analisi di rischio, risulta evidente il livello di complessità delle istruttorie dei rapporti di sicurezza che i valutatori si troveranno ad affrontare.

Tenuto conto dei molteplici aspetti da approfondire in corso di istruttoria, è parere degli autori che potrebbe essere opportuno istituire, nell'ambito del Coordinamento per l'uniforme applicazione sul territorio nazionale di cui all'art.11 del D.Lgs. 105/2015, un Gruppo di Lavoro per la redazione di Linee guida per le istruttorie dei Rapporti di Sicurezza presentati dai gestori di impianti di stoccaggio GNL. Sulla scia dei contenuti della Guida Tecnica di prevenzione incendi [3] e in analogia alle Linee Guida per la valutazione dei Rapporti di Sicurezza degli stoccaggi sotterranei di gas naturale [14], si potrebbero evidenziare gli aspetti comuni e le differenze tra i diversi impianti e le peculiarità dell'analisi di rischio, per fornire un riferimento tecnico di supporto ai valutatori, anche al fine di perseguire una maggiore uniformità di valutazione su tutto il territorio nazionale.

7. Bibliografia

- [1] Gas Infrastructure Europe, GIE Small Scale LNG Map 2020
- [2] Federmetano, mappa degli impianti Small Scale in progetto in Italia, aggiornamento giugno 2020, <https://www.federmetano.it/small-scale-Ing/>
- [3] Circolare del Ministero dell'Interno 12 settembre 2018, prot. DCPREV n. 12112 - "Guida tecnica di prevenzione incendi per l'analisi dei progetti di impianti di stoccaggio di GNL di capacità superiore a 50 tonnellate"
- [4] UNI EN 1473:2016 – "Installazioni ed equipaggiamenti per il gas naturale liquefatto (GNL) - Progettazione delle installazioni di terra"

- [5] UNI EN 14620-1:2006 Progettazione e fabbricazione di serbatoi di acciaio verticali, cilindrici, a fondo piatto, costruiti in sito, per lo stoccaggio di gas liquefatti refrigerati operanti a temperature tra 0°C e – 165 °C
- [6] American Petroleum Institute, API Recommended Practice 521, “Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems, 7th Edition, 2020
- [7] Michot Foss M., LNG Safety and Security, Texas June 2012
- [8] European Commission, JRC, e-MARS accident database, <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/search>, consultato a luglio 2021
- [9] U.S. Department of Transportation, Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA), Liquefied Natural Gas (LNG) Annual Data - 2010 to present, Washington, <https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/gas-distribution-gas-gathering-gas-transmission-hazardous-liquids>
- [10] Pitblado R., Baik J., Hughes G, Ferro C, Shaw S. (2004) Consequences of LNG Marine Incidents
- [11] IOGP, Report 434-01, “Risk assessment data directory – Process release frequencies”, settembre 2019, pag. 43-44
- [12] HSE, “Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments”, 06/11/17, <https://www.hse.gov.uk/landuseplanning/failure-rates.pdf>
- [13] Saffioti S., Smaniotto S., Erriu N., Cancedda R., Monzoni E., Spiga P., Viola A., Pisani C., Porcu G., “Depositi costieri di GNL di limitata capacità: considerazioni in riferimento alle norme di buona tecnica applicabili”
- [14] Gruppo di lavoro interistituzionale istituito nell’ambito del Coordinamento Nazionale di cui all’art. 11 del Decreto Legislativo del 26 giugno 2015 n 105 “Gli stoccaggi sotterranei di gas naturale - Linee guida per la valutazione dei rapporti di sicurezza”, ottobre 2018

CASE HISTORY - Analisi critica della linea guida di valutazione gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso

M. Adamo¹, N. Altamura², G. Batisti¹, E. Di Ponzio³, V. Galasso³, A. Mele³, A. Sibilano³

¹ Raffineria di Taranto Eni S.p.A. GTR&M - Regione Puglia

² Inail - Uot di Bari

³ Inail - Uot di Taranto

Sommario

Il D.lgs. 105/2015 [1], a recepimento della Direttiva 2012/18/UE Seveso III, introduce l'obbligo di adottare, in ambito SGS-PIR, piani di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento di apparecchiature e impianti connesso ai meccanismi di deterioramento. Il Ministero della Transizione Ecologica ha pubblicato una linea guida per la valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento negli stabilimenti Seveso. Tale linea guida (di seguito LG) prevede un modello di monitoraggio sviluppato secondo un metodo a indici, relativi a fattori acceleranti e frenanti. La valutazione generale è data dalla somma algebrica degli indici quantificati di tali fattori.

La LG è stata redatta in due edizioni successive:

- Prima emissione, nell'aprile 2018 [2];
- Seconda edizione, attualmente vigente, del marzo 2021 [3].

La Raffineria di Taranto ha avuto modo di applicare entrambe le edizioni per tutti i propri impianti.

Scopo del presente documento è quello di analizzare la LG vigente, evidenziando le novità introdotte rispetto alla Linea Guida di prima emissione, proprio sulla base dell'esperienza acquisita dall'applicazione del monitoraggio di entrambe le edizioni.

Inoltre, partendo esclusivamente dalle evidenze dell'applicazione sul Sito Eni di Taranto, il presente documento vuole sottoporre alcune proposte di potenziamento della vigente LG.

1. Il metodo di valutazione della linea guida

1.1 Generalità

Ai fini del monitoraggio, la LG prevede l'utilizzo di un metodo ad indici, basato su un'analisi di tipo *fish-bone*. I fattori acceleranti e i fattori frenanti si traducono rispettivamente in penalità e compensazioni e la valutazione generale del sistema è data dalla somma algebrica. Di fatto il modello di monitoraggio ai fini dell'applicazione della LG denomina i fattori secondo numeri crescenti, in particolare:

- fattori acceleranti: moduli da 1 a 6
- fattori frenanti: moduli da 7 a 12.

Lo strumento si traduce, operativamente, nella compilazione di alcuni moduli di tipo tabellare e nel calcolo di un indice compensato ("indice complessivo IC"), sulla base del quale si esprime la valutazione.

Analizzando la LG, si sono verificati i vantaggi riportati nella parte introduttiva della LG stessa, di seguito riassunti:

- Entità di compensazioni proporzionate all'entità delle penalità rilevate;
- Libertà nella scelta delle soluzioni per compensare le penalità. Il gestore può scegliere le soluzioni tecniche e/o gestionali da utilizzare per compensare le penalità. Si

promuove comunque la preferenza verso soluzioni più razionali e adatte alle particolarità di ogni singolo stabilimento;

- Chiarezza di valutazione. Compensazioni e penalità sono quantificate numericamente, in funzione di indicazioni quantitative chiare. Ciò consente alla commissione ispettiva, oltre che a stabilire se le attività eseguite nella gestione dell'invecchiamento sono adeguate o meno, di modulare il proprio parere formulando proposte di raccomandazioni o di prescrizioni sulla base della differenza in termini assoluti tra le compensazioni e le penalità;
- Uniformità e massima oggettività possibile nella valutazione. Il metodo, basato su pochi riscontri, è ripetibile su tutti gli stabilimenti ed evita gli sbilanciamenti soggettivi su questioni di dettaglio;
- Rapidità di monitoraggio. Il gestore può compilare in anticipo le tabelle in modo che con la commissione ispettiva si possano discutere gli eventuali punti dubbi, con relativa speditezza e nel rispetto dei tempi previsti per l'ispezione.

1.2 Le novità introdotte dall'edizione del marzo 2021

Le peculiarità sopra evidenziate sono comuni ad entrambe le edizioni della LG. L'edizione attuale ha però introdotto delle novità che di fatto costituiscono un incremento della validità della LG stessa. In particolare:

- Maggiore oggettivizzazione dei punteggi assegnati; l'attuale LG è stata migliorata in termini di quantificazione oggettiva dei punteggi per i vari moduli, laddove precedentemente la prima edizione comportava possibili margini di soggettività. Casistica questa che concerne:
 - Mod.6: quantificazione di ciascun meccanismo di danneggiamento (nella versione precedente erano quantificati solo una decina di casi circa)
 - Mod.12: gli algoritmi impostati impediscono la possibilità di assegnazione punteggi per interpolazione (es. lineare), la qual cosa poteva essere teoricamente effettuata nella versione precedente.
- Inclusione delle macchine rotanti; non previste nella revisione precedente, esse sono valutate per le parti fisse dell'attrezzatura (cassa). Il campo di applicazione pertanto si amplia investendo tutti gli items critici difficilmente sostituibili nel breve termine e non aventi funzione di barriera (sistemi di regolazione e controllo, valvole di sicurezza, sistemi di blocco).
- Analisi di coerenza del punteggio ottenuto; la revisione vigente introduce il seguente approccio metodologico, procedendo anche a quantificarlo. Ciò in quanto volto a verificare i seguenti aspetti:
 - Il punteggio di un modulo specifico è sostanzialmente la media dei punteggi che in quel modulo hanno i singoli items: per alcuni specifici fattori, è prevista una correzione, funzione della deviazione standard, nel caso che il valore della media non sia adeguatamente rappresentativo
 - Un sistema attua una barriera frenante in funzione di un particolare meccanismo accelerante manifestatosi. Per cui va da sé che i vari fattori frenanti ed acceleranti definiti in LG debbano essere in qualche modo correlati gli uni agli altri. In questo caso, per alcuni specifici fattori acceleranti e frenanti è stato introdotto un opportuno indice di correlazione
- Indicazioni delle eventuali azioni in funzione del valore dell'indice complessivo IC. L'edizione precedente della LG richiedeva semplicemente che IC fosse maggiore di 0. La revisione attuale prevede invece una completa adeguatezza solo nel caso in cui IC sia maggiore di 0,5, congruentemente con quanto già osservato circa la potenziale imprecisione del metodo utilizzato. Inoltre, in funzione del punteggio ottenuto, il paragrafo 3.3 della LG "Utilizzo della valutazione" prevede l'indicazione di azioni da

effettuare in funzione dell'entità del risultato ottenuto, il tutto sintetizzato dalla tabella "Appendice A, azioni suggerite sulla base dell'indice complessivo IC". Ciò consente in modo oggettivo di garantire il processo di feedback e perseguire l'approccio PDCA sopra menzionato.

2. Applicazione sito Eni di Taranto

Passando alla specifica realtà del Sito Eni di Taranto, occorre precisare che esso è gestito mediante implementazione di vari Sistemi di gestione ed in particolare del Sistema di Gestione Asset Integrity (AIMS). In particolare, si è potuto constatare come l'applicazione della LG sia:

1. Congruente all'AIMS ed a suo supporto, in quanto impostata in modo da monitorare la sostenibilità dell'asset. Infatti, il modello con i suoi 12 moduli:
 - è costruito secondo un approccio di tipo Plan-Do-Check-Act (PDCA).
 - riveste tutti gli ambiti dell'asset sensibili ai fini dell'Asset Integrity (Affidabilità, Operatività, Processo, HSE).
2. Agevolmente applicabile, in quanto il Sito di Taranto, in virtù dell'implementazione del proprio AIMS, è dotato di un supporto informativo di tipo CMMS (Computerized Maintenance Management System) che consente l'archiviazione informatica e puntuale di tutti gli eventi inerenti gli items critici di Sito.

In funzione di quanto sopra il Sito di Taranto applica annualmente la LG su tutti propri impianti, concordemente agli obiettivi fissati nella propria Strategia di Asset Integrity.

Congruentemente a quanto ottenuto per gli anni precedenti, il monitoraggio relativo a "progressivo anno 2020" effettuato secondo LG vigente) ha confermato l'assenza di criticità per tutti gli impianti di Sito.

A titolo esemplificativo, riportiamo l'output per gli impianti:

- Unità 200, HDT (Hydrotreating), impianto di desolfurazione nafta
- Unità U2200, Steam Reformer a Nafta

U200, HDT

Fattori acceleranti		pesi	Fattori frenanti		pesi
Età	1,67	1,00	sistema gestione	4	1
fermate	3,00	1,00	audit	1,00	1,00
guasti	1,00	1,00	risultati Verifiche e prove	4,00	1,00
near miss	1	1	adeguatezza controlli	3,50	1,00
rotture	4	1	controllo processo	3	1
meccanismi di danno	2,56	1,00	rivestimenti	3,33	1,00
	2,20			3,14	
	Totale	0,94			

U2200, Steam Reformer a Nafta

Fattori acceleranti		pesi	Fattori frenanti		pesi
Età	4,00	1,00	sistema gestione	4	1
fermate	1,00	1,00	audit	1,00	1,00
guasti	1,00	1,00	risultati Verifiche e prove	4,00	1,00
near miss	1	1	adeguatezza controlli	3,50	1,00
rotture	4	1	controllo processo	3	1
meccanismi di danno	3,00	1,00	rivestimenti	3,50	1,00
	2,33			3,17	
	Totale	0,84			

In un'ottica di continuo miglioramento, in allegato alla presente memoria si espongono alcune considerazioni, derivate dall'applicazione puntuale della vigente LG effettuata sul Sito di Taranto, sulla possibilità di implementare la stessa individuando pesi differenziati tra i vari fattori frenanti e acceleranti.

3. Conclusioni

La Linea Guida per la valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento negli stabilimenti Seveso, pubblicata dal Ministero della Transizione Ecologica, prevede un modello di monitoraggio sviluppato secondo un metodo a indici, relativi a fattori acceleranti e frenanti.

La metodologia indicata dalla LG, oltre a presentare presenta molti vantaggi derivanti dalla natura stessa degli indici, viene di fatto a rappresentare un valido strumento di supporto per un Sito, come quello Eni di Taranto, orientato all'Asset Integrity. Le novità introdotte dalla seconda e vigente revisione della LG di fatto potenziano ulteriormente la validità sopra descritta.

In ottica di continuo miglioramento in tale ambito, l'allegato del presente documento vuole sottoporre una proposta di affinamento, basata sulla determinazione di pesi differenziati tra i vari fattori.

4. Bibliografia

[1] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, N. 105."Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose2.

[2] Valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso, INAIL, ISPRA, ARPA, ARPAV, ARPAL, MATTM, Italia, aprile 2018

[3] Valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso, INAIL, ISPRA, ARPA, ARPAV, ARPAL, MATTM, Italia, marzo 2021

ALLEGATO: Analisi sulla possibile individuazione di pesi differenziati

Come indicato al par.3.1 “Valutazione di adeguatezza” della LG, “per quanto riguarda i pesi di correzione dei punteggi di ciascun fattore, in questa fase di applicazione del modello si assumono tutti uguali. Se per i singoli fattori si volessero fissare pesi differenziati, sarebbe necessario normalizzarli, in modo che le sommatorie separate dei pesi negativi e di quelli positivi risultino unitarie, così da mantenere la possibilità di comparazione dei risultati”.

Le seguenti valutazioni e quantificazioni rappresentano una possibile indicazione da valutare nelle opportune sedi per le future revisioni della LG.

Pesi, individuazione priorità

In particolare, analizzando la natura dei vari moduli previsti, con spirito di collaborazione, si ritiene utile proporre quanto segue:

- mod.6 (mecc.danno) e 12 (rivestimenti): anche per quanto riportato al paragrafo 3.2 “analisi di coerenza” della LG, il modulo 12 è quello che meglio fa da effetto frenante al modulo 6, pertanto detti moduli potrebbero avere lo stesso peso, che chiameremo P66
- mod.1 (età) e 9 (verifiche e prove): anche per quanto sopra commentato in merito al paragrafo 3.2 “analisi di coerenza” della LG, il modulo 9 è quello che meglio fa da effetto frenante al modulo 1; anche in questo caso detti moduli potrebbero avere lo stesso peso, che chiameremo P13
- mod.4 (near miss) e 8 (Visite ispettive e Audit del SGS-PIR): il modulo 4 rappresenta la registrazione di tutti gli eventi significativi, che il D.lgs. 105/2015 (allegato H, punto 1, definizioni, lettera a) definisce come “qualunque incidente, quasi incidente o anomalia di funzionamento o di gestione che metta in evidenza possibili carenze gestionali interessate dal verificarsi dell’evento e che permettano di focalizzare l’attenzione su possibili miglioramenti sia in termini specifici di risposta puntuale all’evento sia in termini generali di adeguamento dello stabilimento nel suo insieme e del suo sistema di gestione della sicurezza (SGS-PIR).” Si ritiene pertanto che i due moduli possano essere pertanto rappresentati dallo stesso peso, che chiameremo P42
- mod.5 (Danneggiamenti) e mod.3 (Frequenze di guasto), mod. 10 (Efficacia dei controlli sulle attrezzature) e mod.7 (Sistema di gestione ispezioni): la LG definisce i danneggiamenti come “rilevati attraverso i controlli programmati o estemporanei. I danneggiamenti sono considerati “gravi” quando compromettono o riducono la funzionalità dell’attrezzatura e devono, conseguentemente, essere riparati al più presto, al fine di ripristinare le condizioni iniziali d’integrità. Sono considerati gravi i difetti che avevano richiesto la messa fuori servizio dell’attrezzatura fino al ripristino della piena funzionalità dell’attrezzatura (e riqualificazione se richiesta). I guasti già riportati al modulo 1.3 non vanno inclusi al modulo 1.5.”

Pertanto, danneggiamenti e guasti rivestono lo stesso ambito di pertinenza, dove per i primi la funzionalità è ridotta, per i secondi è azzerata. Da ciò si deduce che tali moduli dovrebbero avere lo stesso peso.

Analogamente, lato fattori frenanti, i moduli compensativi che meglio rappresentano il contraltare ai moduli 3 e 5 sono senza dubbio il modulo 10 ed il modulo 7. I quattro moduli potrebbero essere rappresentati dallo stesso peso, che chiameremo P3514

- mod.2 (Fermate Impreviste) e 11 (Controllo di processo): il secondo modulo rappresenta di fatto la compensazione del primo, considerando anche quanto riportato in LG (paragrafo 1.2):

“Le fermate impreviste si intendono quelle per cui tempi e procedure di fermata diversi da quelli definiti dai manuali operativi (ad esempio per interventi dei sistemi di blocco e di sicurezza automatici) sono tali da indurre potenziali stress termici e meccanici anormali”.

Inoltre, al paragrafo 2.5 la LG recita:

“Il controllo stretto dei parametri di processo (pressione, temperatura, flussi, livelli, ecc.) è un fattore che contribuisce ad evitare situazioni che possono aumentare più del dovuto lo “stress” cui sono sottoposti i materiali.”

I due moduli, stante la loro natura, potrebbero essere caratterizzati dallo stesso peso, che chiameremo P25.

La modalità sopra indicata di distribuzione pesi garantirebbe a nostro avviso il rispetto del criterio per cui “le sommatorie separate dei pesi negativi e di quelli positivi risultino” uguali. Occorre poi stabilire una priorità tra i pesi individuati. Per come essi sono stati sopra caratterizzati, è sufficiente focalizzarci sui soli fattori acceleranti o frenanti. Considerando quelli acceleranti, riportiamo la seguente tabella:

Fattori acceleranti	punteggio	Pesi
Età		p13
Fermate		p25
Guasti		p3514
near miss		p42
Rotture		p3514
meccanismi di danno		p66

Tabella1. Caratterizzazione pesi

- mod.3, 4, 5: abbiamo accomunato con lo stesso peso i moduli 3 e 5. Ma in effetti il fatto dell'accadimento di un evento significativo (mod.4: incidente, quasi incidente, anomalia ai sensi della sezione 2 “Analisi dell’esperienza operativa” della appendice 2 “Criteri e procedure per la conduzione delle ispezioni” ex art. 27 D.lgs. 105/2015 -vedi Allegato H-), di un guasto (mod.3) o danneggiamento (mod.5), riveste lo stesso ambito di pertinenza ed importanza: l'avvenimento di una di queste tre casistiche non è dettata da logiche di priorità, ma di casualità, fermo restando che la conseguenza potrebbe essere la stessa.

Pertanto, possiamo asserire che

$$p42=p3514 \quad (1)$$

- mod.6, 1: i meccanismi di danneggiamento individuati (mod.6) sono quelli che senza dubbio caratterizzano la potenziale criticità di asset da affrontare e mitigare. Infatti, incidono direttamente sull'integrità nel tempo della singola attrezzatura. L'ispettore deve operare più nel merito di tali meccanismi che sull'età dell'apparecchiatura, effettuando ciò in ambito di risk assessment. Applicazioni come RBI e IOW (finestre operative) rappresentano la conferma di quanto sopra.

La tabella NACE, a riferimento soprattutto per le attrezzature soggetto a meccanismi non ad assottigliamento uniforme (es. tensocorrosione), rappresenta necessariamente un riferimento di base approssimato. Infatti, pur confermandone l'utilità (l'effetto età può andare a sovrapporsi nel tempo ai meccanismi diretti di danneggiamento attraverso fenomeni secondari -o meccanismi secondari non presi a riferimento dai risk assessment- di degrado metallurgico), è anche pur vero che di fatto identifica fasce di età attese per tipologia di item indipendenti dal particolare processo a cui esse sono sottoposte.

Per quanto sopra, possiamo dedurre che

$$p66 > p13 \quad (2)$$

- mod.2: è indubbio che le fermate impreviste giochino un ruolo diretto sull'integrità dell'apparecchiatura considerata, in quanto non sono pienamente controllabili gli sbalzi tenso-termici a cui è sottoposta durante l'evento (es. forni, scambiatori, apparecchiature soggette a fatica termica ecc.). Tale effetto, pur diretto, è difficilmente quantificabile con sufficiente precisione, tant'è che spesso è utilizzata la modalità di registrazione degli eventi, per poi decidere se effettuare gli eventuali controlli previsti anticipatamente rispetto alla schedulazione originaria.

Appare pertanto plausibile affermare come l'evento brusco caratterizzato dalla fenomenologia in questione sia più impattante del fattore età;

$$p25 > p13 \quad (3)$$

Trattasi ad ogni modo di eventi estemporanei, assolutamente discontinui, tra l'altro gestiti da opportune automatizzazioni impiantistiche standard (depressionamenti lenti-rapidi, distacco carichi ecc.); pertanto la valenza di tale fattore dovrebbe plausibilmente essere minore dell'impatto dovuto ai meccanismi di danneggiamento previsti;

$$p25 < p66 \quad (4)$$

- per verificare ulteriore scala di valenza tra i pesi sopra individuati, occorre confrontare l'impatto dei mod.3, 4, 5 (guasti, near miss, danneggiamenti) con i restanti mod.1, 2, 6. In considerazione della natura di tali moduli, possiamo asserire quanto segue:
 - i mod.3, 4, 5 hanno un impatto diretto ed immediato (operativamente ed economicamente) sull'item considerato, con possibilità di coinvolgimento anche in termini reputazionali (es. HSE); il mod.1 (età) non comporta tale impatto diretto. Pertanto, possiamo dedurre che

$$p42 = p3514 > p13 \quad (5)$$

- il mod.2 (fermate impreviste) ha plausibilmente un maggiore impatto reputazionale rispetto ai mod.3, 4, 5. Pertanto, possiamo dedurre che

$$p42 = p3514 < p25 \quad (6)$$

Si può allora individuare la seguente scala di valenza:

$$\text{mod.6} > \text{mod.2} > \text{mod.3} = \text{mod.4} = \text{mod.5} > \text{mod.1}.$$

Quindi:

$$p66 > p25 > p3514 = p42 > p13 \quad (7)$$

Pesi, esempi di quantificazione

In questa fase non si vuole quantificare univocamente e definitivamente il valore dei pesi, quanto verificare concettualmente eventuali variazioni di punteggio mediante applicazione della metodica di cui sopra (pesi differenziati).

Per poter confrontare il risultato secondo pesi differenziati con quello ottenuto secondo la attuale Linea Guida, la somma dei pesi dei fattori acceleranti o frenanti non può essere unitaria, ma uguale a 6.

Sulla base delle priorità individuate al paragrafo 2.1, proponiamo la seguente tabella di prima approssimazione di pesi differenziati e debitamente normalizzati:

p66> p25>p3514=p42>p13		
pesi	valore grezzo	valore normalizzato
p13	1	0,91
p25	1,2	1,09
p3514	1,05	0,95
p42	1,05	0,95
p3514	1,05	0,95
p66	1,25	1,14
totale	6,6	6

Tabella 2. Quantificazione pesi di prima approssimazione

Per quanto sopra, i vari fattori acceleranti e frenanti saranno caratterizzati dai seguenti pesi normalizzati:

Fattori acceleranti			Fattori frenanti		
età	p13	0,91	sistema gestione	p3514	0,95
fermate	p25	1,09	audit	p42	0,95
guasti	p3514	0,95	risultati Verifiche e prove	p13	0,91
near miss	p42	0,95	adeguatezza controlli	p3514	0,95
rotture	p3514	0,95	controllo processo	p25	1,09
meccanismi di danno	p66	1,14	rivestimenti	p66	1,14

Tabella 3. Pesi normalizzati fattori di prima approssimazione

Procediamo pertanto ad applicare la Tabella 3 per verificare come e perché cambia il punteggio, prendendo a riferimento alcuni impianti esemplificativi del Sito di Taranto. Trattandosi di una valutazione sui pesi, non saranno effettuate varianti rispetto a quanto riportato in LG relativamente a:

- penalizzazioni di coerenza e deviazione std
- pesi differenziati per i moduli 2, 9, 12 in caso di unità con macchine rotanti ed attrezzature atm

secondo quanto analizzato al paragrafo 1.2 del presente documento (rif. paragrafi 3.1 e 3.2 della LG). A tal uopo sceglieremo le seguenti unità non interessate da tali fattori:

- Unità 200, HDT (Hydrotreating), impianto di desolfurazione nafta
- Unità U2200, Steam Reformer a Nafta, recentemente andata in conservazione e per la quale il fattore età è rilevante.

Le rispettive seguenti tabelle sintetizzano il confronto tra applicazione Tabella 3 e LG:

U200, HDT

Fattori acceleranti		Pesi ipotizzati	Fattori frenanti		pesi ipotizzati
Età	1,67	0,91	sistema gestione	4	0,95
fermate	3,00	1,09	audit	1,00	0,95
guasti	1,00	0,95	risultati Verifiche e prove	4,00	0,91
near miss	1	0,95	adeguatezza controlli	3,50	0,95
rotture	4	0,95	controllo processo	3	1,09
meccanismi di danno	2,56	1,14	rivestimenti	3,33	1,14
	2,20			3,14	
Totale (pesi differenziati)		0,90			
Totale LG (pesi pari a 1)		0,94			

Tabella 4. Punteggio HDT, rif. pesi differenziati e LG

Applicando i pesi differenziati si ha una riduzione di punteggio, per effetto di:

- Diminuzione incidenza "età" (accelerante, punteggio contenuto), "smorzato" dall'applicazione di un peso basso
- Amplificazione incidenza "meccanismi di danno" (accelerante, punteggio abbastanza elevato)
- Amplificazione incidenza "fermate" (accelerante, punteggio elevato).

U2200, Steam Reformer a Nafta

Fattori acceleranti		Pesi ipotizzati	Fattori frenanti		pesi ipotizzati
Età	4,00	0,91	sistema gestione	4	0,95
fermate	1,00	1,09	audit	1,00	0,95
guasti	1,00	0,95	risultati Verifiche e prove	4,00	0,91
near miss	1	0,95	adeguatezza controlli	3,50	0,95
rotture	4	0,95	controllo processo	3	1,09
meccanismi di danno	3,00	1,14	rivestimenti	3,50	1,14
	2,31			3,17	
Totale (pesi differenziati)		0,86			
Totale LG (pesi pari a 1)		0,84			

Tabella 5. Punteggio SR2200, rif. pesi differenziati e LG

- In questo caso si ha un incremento del punteggio. Infatti, proprio per le motivazioni già espresse per HDT, viene smorzata l'incidenza del punteggio elevato dell'età (accelerante, punteggio massimo) ed amplificata l'incidenza delle fermate (accelerante, punteggio minimo).

La presente analisi ha lo scopo di affinare la metodologia per renderla più aderente al contesto reale, su cui è stata applicata.

In funzione dell'analisi effettuata si è arrivati ad ipotizzare una quantificazione dei pesi (rif. "Tabella 3: pesi normalizzati fattori di prima approssimazione"); tali pesi sono stati applicati su alcuni impianti esemplificativi (HDT e SR2200) della Raffineria Eni di Taranto per valutare le differenze di punteggio rispetto alla metodologia ufficiale.

Il calcolo effettuato evidenzia una riduzione di punteggio rispetto a quanto previsto da LG vigente. Tale riduzione è sostanzialmente concentrata nella media pesata dei fattori acceleranti.

Infatti il Sito, in considerazione di un orizzonte temporale degli ultimi 10 anni, risente dei punteggi mediamente elevati relativi ai moduli 2 (fermate impreviste) e 6 (meccanismi di danno), caratterizzati dai pesi di maggiore entità.

Nonostante il punteggio del modulo 6 non sia significativamente modificabile (dipende essenzialmente dal processo per cui l'unità monitorata è stata progettata), la Raffineria di Taranto si attende un graduale allineamento dei due punteggi globali, per effetto di:

- Implementazione dei Sistemi di Gestione SGS e AIMS (Asset Integrity, all'interno del quale si colloca la Gestione dell'Affidabilità Operativa), il cui utilizzo efficiente porta a vantaggi in termini affidabilistici, con riduzione di fermate e guasti imprevisti. Ciò è osservabile anche dal trend in miglioramento dell'indice di disponibilità OSF (On Stream Factor, indice da 0 a 1 che fornisce un'indicazione della disponibilità globale degli impianti includendo quindi anche i tempi di fermata dovuti a cause esterne, a fermate indotte e ad altre cause programmate);
- Investimenti autorizzati per il Sito Eni di Taranto finalizzati a renderlo autonomo in termini di bilancio elettrico (revamping CTE) e a massimizzare l'affidabilità e la continuità del collegamento alla RTN -in particolare durante i transitori dovuti a guasti sulla rete 150 kV- (modifica della connessione alla RTN con configurazione standard "entra-esce"). Infatti, negli ultimi 10 anni la Raffineria di Taranto ha subito ben 4 blocchi elettrici generali, in assenza dei quali il punteggio del modulo 2 (fermate) migliorerebbe mediamente di un punto. In particolare, in funzione dei due aspetti sopra riportati, a tendere possiamo ipotizzare:
 - o punteggio pari a 1 per il modulo 2 (fermate impreviste)
 - o riduzione di 1 punto del modulo 5 (danneggiamenti).

Per completezza, occorre considerare anche un graduale peggioramento del punteggio età, che possiamo ipotizzare di circa mezzo punto.

Sulla base di tali ipotesi e considerando ancora l'unità HDT, la seguente Tab.6 mostra l'allineamento tra il "punteggio pesato" e quello derivante da attuale LG.

Fattori acceleranti		Pesi ipotizzati	Fattori frenanti		pesi ipotizzati
Età	2,17	0,91	sistema gestione	4	0,95
fermate	1,00	1,09	audit	1,00	0,95
guasti	1,00	0,95	risultati Verifiche e prove	4,00	0,91
near miss	1	0,95	adeguatezza controlli	3,50	0,95
rotture	3	0,95	controllo processo	3	1,09
meccanismi di danno	2,56	1,14	rivestimenti	3,33	1,14
	1,79			3,14	
Totale (pesi differenziati)		1,35			
Totale LG (pesi pari a 1)		1,35			

Tabella 6. Punteggio HDT rif. pesi differenziati e LG in ipotesi

Sistemi strumentati di sicurezza negli impianti di processo: case study relativo ad un insieme marcato CE in accordo alle direttive PED, MD e ATEX

M. Giacobbo¹, F. Centomo²

¹ NECSI s.r.l.

² HA Italia S.p.A.

Sommario

Nell'industria di processo si è in presenza di sistemi di produzione dove il controllo dei parametri di esercizio riveste particolare importanza e criticità. Tali impianti, tipicamente molto costosi in termini di investimento iniziale, esercizio e manutenzione, trattano spesso sostanze pericolose (per es. infiammabili o tossiche). È quindi opportuno valutare i rischi non soltanto dal punto di vista antinfortunistico, ma anche dell'impatto ambientale, o ancora dei danni economici che potrebbero conseguire a causa di un evento incidentale, adottando metodologie adeguate come HazOp e LOPA.

Per controllare il processo e ridurre i rischi a livelli accettabili, sempre più frequentemente si utilizzano sistemi strumentati di sicurezza (SIS), tanto più che, con il progresso tecnologico, tali dispositivi sono oggi in grado di garantire un'elevata affidabilità. Le norme EN 61508 ed EN 61511 riconducono tale affidabilità ad un determinato SIL, che deve essere garantito per l'intera catena di sicurezza (e non limitatamente ai componenti) attraverso un'evidenza oggettiva, mediante calcoli e certificati.

È ricorrente la situazione in cui un impianto di processo costituisca un insieme PED, ed è plausibile che tale insieme sia soggetto anche ad altre direttive, come la 2006/42/CE, relativa alle macchine, e la 2014/34/UE. In questo caso il fabbricante deve soddisfare i requisiti essenziali di sicurezza previsti da ciascuna.

La memoria presenta il *case study* di un impianto per la miscelazione di bitume con solventi, evidenziando come l'impiego di SIS adeguatamente progettati e realizzati consenta di ridurre i rischi derivanti da possibili anomalie di processo, a vantaggio della sicurezza sostanziale e nel rispetto dei requisiti di tutte le direttive applicabili.

1. Introduzione

Un impianto di processo è tipicamente un sistema che manipola, trasporta e/o produce mediante trasformazioni chimico-fisiche quasi sempre irreversibili e secondo un ciclo tecnologico perlopiù a flusso, dove spesso sono trattate sostanze pericolose (infiammabili, tossiche, ecc.) ed in cui i parametri di processo devono essere controllati con dovuta attenzione, poiché una loro deviazione dai valori attesi in condizioni di normale esercizio potrebbe portare a conseguenze incidentali anche gravi.

Possono infatti presentarsi molteplici condizioni ed eventi in grado di compromettere la sicurezza dell'impianto e per identificarle occorre tenere conto di diversi fattori, in special modo degli errori umani e dei guasti tecnici ai sistemi di regolazione.

L'HazOp e la LOPA sono tecniche di analisi del rischio che permettono di identificare metodicamente le conseguenze delle anomalie di funzionamento che derivano da errori operativi o guasti. Esse consentono altresì di individuare le misure di protezione necessarie per ridurre i rischi ai livelli ritenuti tollerabili, le quali possono essere di tipo tecnico (dispositivi di protezione) o di tipo gestionale (istruzioni e procedure). Se sono richiesti più dispositivi di protezione, per concorrere insieme all'obiettivo di riduzione del rischio essi devono essere indipendenti l'uno dall'altro, occorre escludere cioè le cause di guasto comune.

Nell'ambito della direttiva 2014/68/UE i dispositivi di protezione si dividono in accessori di sicurezza e dispositivi di controllo. Gli accessori di sicurezza sono dispositivi destinati a evitare il superamento dei limiti ammissibili. Nella maggior parte delle situazioni è sufficiente l'installazione di dispositivi di limitazione diretta, come valvole di sicurezza o dischi di rottura. Tuttavia, quando occorre garantire che parametri diversi dalla pressione non si scostino dai valori individuati come sicuri, oppure si vuole evitare il rilascio di sostanze pericolose nell'ambiente, o ancora quando il livello di rischio è molto elevato per cui è richiesta una *ridondanza* per abbattere la frequenza di accadimento dell'evento pericoloso, è opportuno ricorrere all'impiego di sistemi "strumentati di sicurezza" (SIS).

In generale un SIS (*Safety Instrumented System*) è un sistema che realizza funzioni di sicurezza SIF (*Safety Instrumented Functions*) in grado di mantenere in condizioni sicure un impianto anche in caso di malfunzionamento del sistema di controllo del processo e di osservazione e gestione allarmi. Quest'ultimo, infatti, non viene di norma equiparato a sistema di sicurezza, principalmente perché gli elementi di cui è composto non sono grado di garantire un'adeguata affidabilità.

Per stabilire quanto affidabile deve essere un dispositivo di sicurezza è indispensabile definire il "livello di integrità della sicurezza" richiesto, o SIL⁽¹⁾ (*Safety Integrity Level*), e ciò può essere fatto esclusivamente attraverso un'analisi del rischio di tipo semiquantitativo. Se ad una o più misure di protezione individuate corrisponde una o più SIF, in rapporto alla riduzione del rischio obiettivo viene determinato il SIL richiesto per ciascuna SIF. E ciascun SIS dovrà quindi essere progettato e realizzato per raggiungere questo obiettivo.

I sistemi strumentati di sicurezza sono considerati anche in ambito direttiva Macchine e direttiva ATEX; si pensi ad esempio ai sistemi per evitare la formazione di atmosfere esplosive o il rilascio di sostanze pericolose in ambiente, o ancora ai classici dispositivi di interblocco. È chiaro quindi che un sistema di sicurezza integrato, progettato a fronte di diversi fattori di rischio, risulta l'approccio ideale per gestire la sicurezza di un impianto di processo, in quanto realizzato nel rispetto di tutti i requisiti di sicurezza applicabili.

2. Caso di studio

2.1 Descrizione dell'impianto e del processo

L'impianto in oggetto viene utilizzato per la miscelazione e diluizione, senza reazione, di bitume con solventi aromatici compatibili, per l'ottenimento di un prodotto destinato al mercato dell'edilizia. È costituito essenzialmente da un serbatoio a pressione dotato di agitatori interni, gestito da un sistema di sensoristica di processo e valvole ad azionamento automatico equipaggiato di un PLC per il controllo delle varie fasi produttive, il monitoraggio e la regolazione dei vari parametri.

Il processo di un prodotto tipico si svolge genericamente attraverso le seguenti fasi:

- 1) scarico autobotte bitume
- 2) prima diluizione con solvente altobollente
- 3) seconda diluizione con solventi bassobollenti

¹ La norma IEC EN 61508 definisce tre modi operativi dei sistemi di sicurezza:

- *Low Demand Mode*, in cui la funzione di sicurezza interviene molto raramente (o quasi mai)
- *High Demand Mode*, nel quale vi è un frequente intervento della funzione di sicurezza
- *Continuous Mode*, nel quale vi è un costante intervento della funzione di sicurezza

L'affidabilità dei sistemi di sicurezza si valuta mediante il SIL o il PL (*Performance Level*). In *Low Demand Mode* il SIL si determina dalla probabilità di guasto PFD (*Probability of Failure on Demand*), che è un numero puro, mentre negli altri due si ricava dalla frequenza di guasto PFH (*Probability of Failure per Hour*). Negli impianti di processo le SIF operano tipicamente in *Low Demand Mode*, per cui il riferimento è il SIL. Il PL considera esclusivamente funzioni di sicurezza operanti in *High Demand Mode* o *Continuous Mode* ed è trattato nella norma EN ISO 13849-1.

- 4) smezramento
- 5) completamento della produzione



Figura 1. Impianto di miscelazione bitume (su autorizzazione di HA Italia S.p.A.)

Scarico autobotte bitume

Il bitume puro arriva mediante autocisterna ad una temperatura di circa 230-250°C e viene scaricato nel serbatoio, che è vuoto e mantenuto in leggera sovrappressione di azoto (circa 0,1 bar). Al termine dello scarico la valvola di ingresso bitume viene chiusa ed il serbatoio pressurizzato a circa 3,5 bar, sempre mediante azoto.

Prima diluizione con solvente altobollente

Per iniziare la diluizione con il bitume a 230°C è necessario che la pressione interna sia superiore alla tensione di vapore del solvente altobollente a tale temperatura. Si evita così che il solvente introdotto entri in ebollizione, scongiurando fenomeni di sovrariempimento dovuti al rigonfiamento ed aumento di volume del bitume, oltre che un'evaporazione indesiderata del solvente stesso.

Poiché eventuali difformità di composizione del solvente potrebbero dar luogo ad una tensione di vapore maggiore della pressione in serbatoio, col conseguente rischio sopra descritto, un sistema di controllo automatico provvede al dosaggio del solvente per step controllando la stabilità del livello e la pressione nel serbatoio dopo ogni aggiunta.

A mano a mano che si aggiunge solvente, la miscela tende a raffreddarsi fino a 175°-180°C.

Seconda diluizione con solventi bassobollenti

Per iniziare la fase di diluizione con solventi bassobollenti è necessario attendere che la temperatura scenda almeno a 150°C, soglia sotto la quale tali solventi hanno una tensione di vapore minore della pressione presente nel serbatoio (3,5 bar). Il raffreddamento può essere ottenuto in modo naturale o per via forzata, facendo circolare acqua nel semitubo del serbatoio. Anche in questo caso il processo è automatizzato attraverso dosaggi per step con controlli di stabilità del livello e di pressione.

Al termine di questa fase si ottiene una quantità di miscela pari al 90% del livello con una temperatura della miscela circa 120°-125°C.

Smezzamento

Con questa operazione, si preleva mediante pompa metà del volume di liquido presente nel serbatoio, caricandolo in un apposito serbatoio di stoccaggio.

Prima di cominciare, la pressione viene ridotta inviando gli sfiati ad un combustore. Durante il prelievo viene immesso azoto per compensare la caduta di pressione che tende ad originarsi per effetto dello svuotamento del serbatoio.

Completamento della produzione

Al termine dello smezamento, una volta ristabilite le condizioni operative ottimali viene introdotto ancora solvente, lavorando sempre a pressione costante.

Al termine del dosaggio finale la temperatura finale della miscela è di circa 75 °C ed il serbatoio può essere completamente scaricato in appositi serbatoi di stoccaggio; al termine dello scarico la pressione è di circa 0,5 bar.

L'operazione viene ripetuta per il semilavorato che nell'operazione di smezamento era stato trasferito allo stoccaggio intermedio, immettendolo nuovamente nel serbatoio di miscelazione per un'ulteriore operazione analoga a quella appena descritta.

Terminata la produzione, il serbatoio viene riportato alle condizioni di pressione di 0,1 bar.

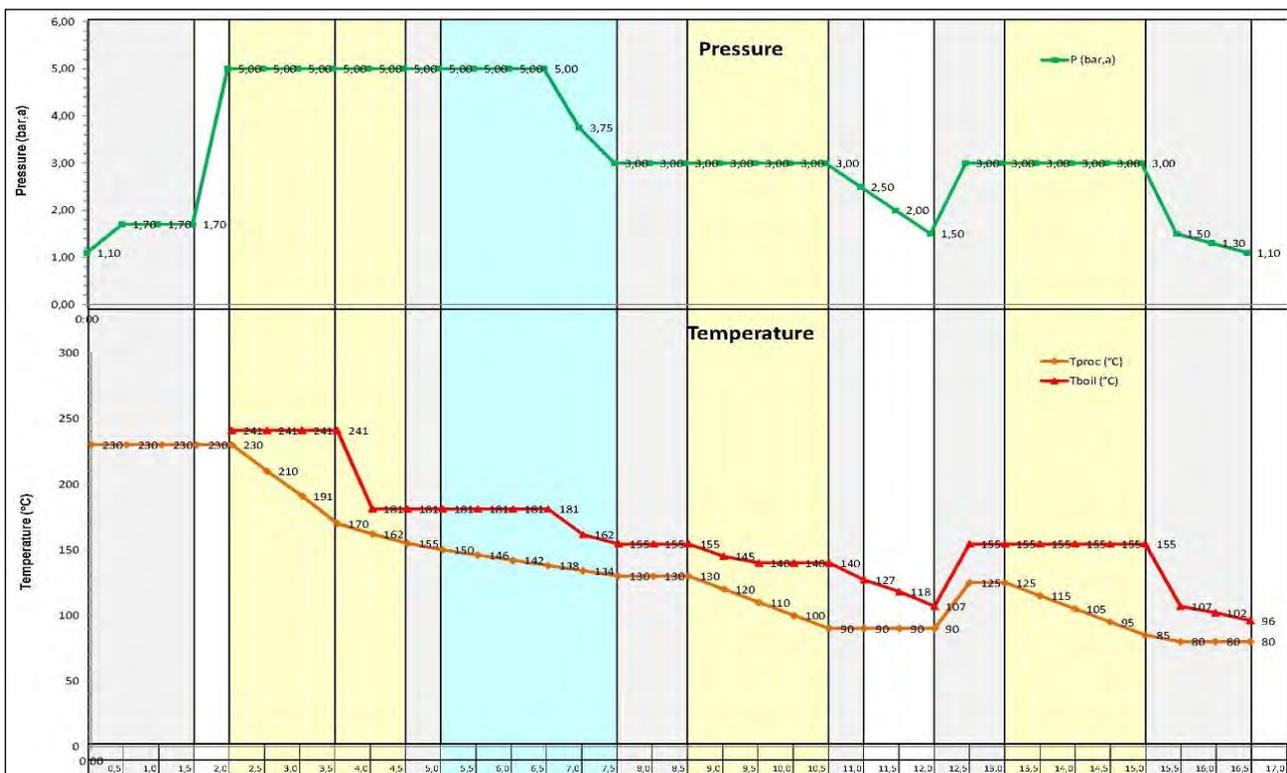


Figura 2. Andamento temporale di P e T (su autorizzazione di HA Italia S.p.A.)

2.2 Caratterizzazione dell'insieme

Secondo le disposizioni legislative vigenti, l'impianto costituisce un insieme rientrante nel campo di applicazione delle direttive MD 2006/42/CE e PED 2014/68/UE. Esso è inoltre soggetto a certificazione ATEX secondo la 2014/34/UE in quanto il luogo di installazione è classificato come zona a rischio esplosione.

Dal punto di vista della MD sono individuabili le seguenti macchine e/o quasi-macchine:

- 1) agitatori M101, M102, M103
- 2) pompa linea 2 carico solvente PB07

In base alla direttiva PED l'insieme risulta classificato in IV categoria di rischio.

ATTREZZATURA	FLUIDO	DIMENS. V [litri] - DN	PS [bar]	TS [°C]	CAT. PED	NOTE
SERBATOIO DI MISCELAZIONE	BITUME + SOLVENTE + N2 ACQUA	L 48200 L 400	6 12	0/+300 0/+300	IV	
TUBAZIONI SFIATI DI PROCESSO	SOLVENTE	DN 250	6	0/+300	II	
TUBAZIONI CARICO SOLVENTE	SOLVENTE	DN 80	6	0/+300	I	Attrezzature escluse dalla PED per art. 1 comma 2-f
TUBAZIONI TRASF. INTERMEDIO	BITUME + SOLVENTE	DN 100	6	0/+300	I	
TUBAZIONE SCARICO AUTOBOTTE	BITUME	DN 100	6	0/+300	I	
TUBAZIONI AZOTO	N2	DN 50	6	-10/+50	Art. 4.3	

Tabella 1. Categorizzazione PED delle attrezzature componenti l'insieme

3. Valutazione dei rischi

3.1 Generalità

Una valutazione dei rischi si basa sui seguenti concetti fondamentali:

- eliminazione dei pericoli mediante misure di protezione integrate nella progettazione;
- adeguate misure di protezione complementari, atte alla riduzione dei pericoli qualora non sia possibile la loro eliminazione;
- informazioni per l'uso sui rischi residui e indicazione di misure speciali adatte al caso.

La valutazione può essere condotta sulla base di numerose tecniche di diverso approccio. Svariate norme (per es. EN ISO 12100, EN 764-7, IEC 61511-3, EN 1127-1) forniscono elementi utili alla identificazione dei pericoli, alla stima dei rischi ed alla loro riduzione.

Nel caso di studio, considerando l'impianto di processo come una macchina, la valutazione è stata condotta partendo dalla norma EN ISO 12100, quindi affrontando tutti i pericoli presenti, per poi analizzare in modo più specifico i rischi di processo, esplosione e pressione seguendo metodologie più appropriate.

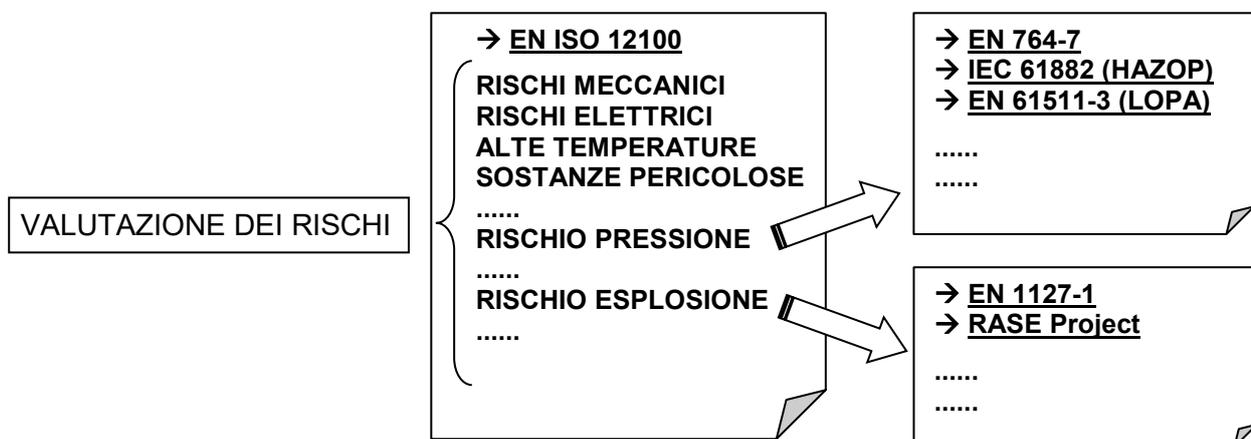


Figura 3. Approccio all'analisi dei rischi di un impianto di processo

La metodologia adottata per la valutazione dei rischi per la parte di processo si basa su un'analisi HazOp (*HAZard and OPerability*) integrata da una LOPA (*Layer Of Protection Analysis*) con matrice di rischio. L'attività è stata condotta all'interno di un team formato da personale in possesso delle necessarie competenze tecniche ed operative sull'impianto e rappresentativo dei vari ambiti da esso interessati, quali progettazione, processo, HSE, manutenzione, ecc. [5]

Il livello di danno è stato valutato considerando l'eventuale impatto sulla salute delle persone, sull'ambiente e sugli impianti (o danno economico). Le classi di frequenza sono determinate sulla base di intervalli in occasioni/anno, mentre la frequenza di ciascun evento pericoloso è definita sulla base di dati affidabilistici oggettivi, oppure stimata consultando

banche dati incidentali riconosciute, come OREDA, Rijnmond, LEES, ecc.

L'analisi si raffigura quindi di tipo semiquantitativo, in quanto il livello di rischio viene determinato sulla base di una matrice di rischio che incrocia 5 livelli di danno con 7 classi di frequenza di accadimento, al fine di ottenere 3 livelli di rischio:

- **B** rischio BASSO, tollerabile
- **M** rischio MEDIO, da ridurre se praticabile (ALARP)
- **A** rischio ALTO, non tollerabile

MATRICE DEI RISCHI			CF [occ/y] →	< 10 ⁸	10 ⁸ - 10 ⁶	10 ⁵ - 10 ⁴	10 ⁴ - 10 ³	10 ³ - 10 ²	10 ² - 10 ¹	10 ¹ - 1
P: impatto sulle PERSONE ↓	A: impatto sull'AMBIENTE ↓	E: impatto ECONOMICO ↓		CF1	CF2	CF3	CF4	CF5	CF6	CF7
BASSO: ferite lievi, reversibili, che necessitano cure lievi (infermeria)	BASSO: effetti negativi limitati (breve durata) e circoscritti (locali al reparto)	BASSO: impianti / apparecchiature poco danneggiati, funzionamento non compromesso	D1	B	B	B	B	B	B	M
MODERATO: numero limitato di ferite gravi	MODERATO: possibile superamento temporaneo di limiti alle emissioni, ma senza inquinamento permanente	MODERATO: impianti / apparecchiature molto danneggiati, funzionamento compromesso	D2	B	B	B	B	M	M	A
GRAVE: un morto nel sito produttivo; numerose ferite gravi o invalidanti	GRAVE: superamento prolungato o significativo dei limiti alle emissioni; possibili effetti irreversibili ma all'interno del sito	GRAVE: impianto fuori servizio, necessari interventi di medio periodo (settimane)	D3	B	B	M	M	M	A	A
MOLTO GRAVE: più di un morto all'interno del sito	MOLTO GRAVE: inquinamento significativo anche all'esterno del sito	MOLTO GRAVE: impianto distrutto o lunga perdita di produzione (mesi)	D4	B	M	M	M	A	A	A
CATASTROFICO: più di un morto all'interno del sito; effetti letali all'esterno del sito	CATASTROFICO: danni ambientali irreversibili con conseguenze immediate e esterne al sito	CATASTROFICO: impianto distrutto e danni a altri impianti / all'esterno del sito	D5	M	M	A	A	A	A	A

Figura 4. Matrice di rischio adottata

In prima battuta si determina il “rischio grezzo”, cioè senza considerare le barriere di protezione presenti, quali allarmi, procedure o sistemi di sicurezza. Viene quindi stimata la riduzione di rischio attraverso i vari strati di protezione indipendenti (IPL - *Independent Protection Layers*), come il sistema di controllo di processo base (BPCS), i dispositivi di sicurezza, le procedure, ecc., che ne riducono la frequenza.

La ponderazione del rischio mira quindi a stabilire se gli obiettivi di riduzione del rischio siano stati raggiunti, cioè se il livello di rischio raggiunto sia tollerabile o meno. Con riferimento alla matrice sopra esposta, l'obiettivo è chiaramente quello di raggiungere sempre un livello basso. Potrebbe ritenersi tuttavia accettabile un rischio medio, o ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*), quando un ulteriore sforzo per ridurlo comporterebbe interventi dai costi ragionevolmente inadeguati.

Quando la frequenza di accadimento viene ridotta mediante un sistema strumentato di sicurezza, al SIL della SIF corrisponde una riduzione della classe di frequenza. Viceversa, nel caso si individui la necessità di implementare una funzione strumentata di sicurezza, la corrispondente riduzione di rischio obiettivo che consente di raggiungere il livello ritenuto accettabile determina il SIL richiesto. [1] [3] [5]

Safety Integrity Level (CEI EN 61511 -1, § 9.2)		
SIL	Esercizio in modo SU DOMANDA	
	Probabilità media di guasto su domanda obiettivo	Riduzione di rischio obiettivo
nessuna prescrizione	≤ 10 ⁻¹	≤ 10
1	[10 ⁻² - 10 ⁻¹]	10 - 100
2	[10 ⁻³ - 10 ⁻²]	100 - 1.000
3	[10 ⁻⁴ - 10 ⁻³]	1.000 - 10.000
4	[10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁴]	10.000 - 100.000

Tabella 2. Relazione tra SIL, probabilità di guasto e riduzione di rischio (da EN 61511-1)

3.2 Misure di protezione e funzioni di sicurezza

Il foglio di lavoro HazOp-LOPA dell'impianto in studio racchiude le misure di protezione ed i sistemi strumentati di sicurezza adottati. Alcuni tra questi ultimi richiedono un livello di integrità della sicurezza pari a minimo SIL1 (obiettivo di riduzione rischio pari a 100).

NODO: 2 - SERBATOIO - FASE DILUIZIONE CON SOLVENTE

DEVIAZIONE	CAUSA	Freq. [occ/y]	CONSEGUENZE	TIPO DI IMPATTO (P/A/E)	RISCHIO GREZZO			MISURE DI PROTEZIONE E FUNZIONI DI SICUREZZA [prob]	RISCHIO INTERMEDIO			RACCOMANDAZIONI	RISCHIO RESIDUO			NOTE
					CF	D	R		CF	D	R		CF	D	R	
8 ALTO LIVELLO	Guasto al sistema di dosaggio solvente (pompa centrifuga PB06 + flussimetro FT50) su BPCS	6,8E-2	Riempimento del serbatoio, allato totale dell'azoto e invio di liquido al combustore (con intervento intercettando la mandata). Successivamente si ha sovrappressione nel serbatoio - ved. dev. 3	P				Livellostato di altissimo livello LSHH400 su logica safety con intercettazione solvente VAS200 [IE-1]				Aumentare affidabilità del loop livellostato LSHH400 a SIL1				
				A	6	2	M		5	2	M		4	2	B	
				E	6	2	M		5	2	M		4	2	B	
9 ALTO LIVELLO	Errore operatore che trasferisce semilavorato da silo X4 a serbatoio prima che questo venga svoltato (4 op/v - 200 op/y)	6,0E-1	Riempimento del serbatoio, allato totale dell'azoto e invio di liquido al combustore (con intervento intercettando la mandata). Successivamente si ha sovrappressione nel serbatoio - ved. dev. 3	P				Sensore di livello LT300 su BPCS con allarme di alto livello e blocco pompa PB02 (trasferimento semilavorato) [IE-1] Livellostato di altissimo livello LSHH400 su logica safety con interstato mandata semilavorato VAS210 e arresto pompa PB02 [IE-1]				Aumentare affidabilità del loop livellostato LSHH400 a SIL1				
				A	7	2	M		5	2	M		4	2	B	
				E	7	2	M		5	2	M		4	2	B	
10 BASSO LIVELLO	Carico inferiore alle stanzari		Nessuna conseguenza significativa	P												
11 NO / BASSO FLUSSO Solvente	Esaurimento scorte solvente		Disno economico, perdita di produzione - ved. dev 5	P												L'evento viene prevenuto e gestito mediante procedure aziendali di controllo produzione, gestione scorte solvente, ecc.
				A												
				E												
12 NO AGITAZIONE	Guasto contemporaneo di 2 agitatori su 3	5,7E-4	Disno economico, perdita di produzione	P												
				A												
				E	4	2	IE									
13 CONTAMINAZIONE Solvente	Contaminazione del solvente basebollente (Aronix) con prodotti molto volatili	5,0E-1	Emissione solvente e aumento di pressione oltre PS, rottura serbatoio Fuoriuscita di prodotto a alta temperatura Fattori gravi agli operatori	P	7	3	A	Controllo di pressione su BPCS (con interstato l'immissione di solvente su alta pressione) [IE-1] Sensore di allarme di altissima pressione PT103 su logica safety con intercettazione solvente VAS200/VAS220 [IE-1] Disco di rottura RD100 [IE-3]	2	3	B	Aumentare l'affidabilità del loop PT103 a SIL1	1	3	B	
				A	7	3	IE		2	3	IE		1	3	B	
				E	7	4	M		2	4	M		1	4	B	
14 NO / BASSO FLUSSO Azoto	Guasto alla valvola linea azoto VA16, in particolare durante la fase di smezamento	3,7E-2	Emissione solvente, rigonfiamento e aumento di volume del bitume, risalita fino alla tormentazione, efflu, tenuta agitatori, spaccamento apparecchi e sensori	P				Controllo di pressione su BPCS con allarme di bassa pressione [IE-1] Sensore di bassa pressione PT103 su logica safety che arresta la pompa di trasferimento semilavorato PB02 [IE-1]								
				A	6	1	IE		4	1	B					
				E	6	2	M		4	2	B					

Figura 5. Estratto del foglio di lavoro HazOp-LOPA (su autorizzazione di HA Italia S.p.A.)

Oltre ai dispositivi di limitazione diretta (disco di rottura e valvole di sicurezza), l'insieme è stato pertanto dotato di un sistema integrato di controllo comprendente i seguenti dispositivi di protezione:

- PT103 Trasduttore di pressione su Safety-PLC per intercettazione solvente per altissima pressione
- PT104 Trasduttore di pressione per controllo su Safety-PLC della pressione min/max del ciclo di inertizzazione
- LSHH400 Livellostato di altissimo livello su Safety-PLC per intercettazione solvente e semilavorato (ridondato)
- ZSC100, ZSC110, ZSC120 Microinteruttori di sicurezza su Safety-PLC per arresto degli agitatori in caso di apertura dei boccaporti
- LT300 Trasduttore di alto livello su BPCS per chiusura valvola di scarico in serbatoio, allarme e arresto pompa trasferimento semilavorato su BPCS
- TT200, TT201, TT202 Trasduttori di temperatura su BPCS che non permettono l'immissione di solventi sopra a una certa soglia di temperatura

Sono inoltre presenti due pulsanti di arresto di emergenza, posizionati sul quadro elettrico principale e sulla consolle in sala controllo, in grado di arrestare tutti gli azionamenti. Le valvole automatiche sono tutte "fail-safe", cioè in condizioni di emergenza o mancanza di energia si pongono in posizione sicura.

L'impianto tratta solventi infiammabili, per cui tra i rischi rilevanti vi è anche l'esplosione interna. Per prevenire la formazione di atmosfere esplosive è necessario che il serbatoio venga inertizzato, cioè fare in modo che la concentrazione di ossigeno sia mantenuta al di sotto del LOC (*Limiting Oxydant Concentration*). Questa misura deve essere attuata fin dall'inizio del processo, quando viene immesso il bitume, e mantenuta per tutto il ciclo di produzione. La fase critica è chiaramente quella iniziale, in quanto è probabile la presenza

di aria all'interno del serbatoio. A regime, poiché il processo avviene in pressione di azoto, le condizioni rimangono garantite salvo guasti o anomalie, che sono comunque rilevabili. Il rapporto tecnico CEN/TR 15281 [4] fornisce le linee guida ed i criteri per l'inertizzazione di un ambiente al fine di prevenire le esplosioni e, con riferimento al punto 6 di tale guida, al caso in studio è stato applicato il metodo "pressure swing inerting". Esso consiste in una serie di cicli di pressurizzazione con gas inerte e sfiato fino al raggiungimento del valore di concentrazione di ossigeno desiderato. Per ulteriori dettagli si rimanda all'appendice B del rapporto tecnico citato, da cui è ricavata la seguente procedura di calcolo. La concentrazione di ossigeno dopo un dato numero di cicli di lavaggio (pressurizzazione e depressurizzazione) può essere ricavata dalla formula (1):

$$C_n = C_i + (C_0 - C_i) (P_1 / P_2)^{n/k} \quad (1)$$

dove:

C_n	concentrazione di ossigeno dopo n cicli di lavaggio [% v/v]
C_i	concentrazione di ossigeno nel gas inerte [% v/v]
C_0	concentrazione iniziale di ossigeno nel serbatoio [% v/v]
P_1	pressione minima nel serbatoio durante il ciclo [bar a]
P_2	pressione massima nel serbatoio durante il ciclo [bar a]
n	numero di cicli di lavaggio
k	coefficiente isoentropico

Poiché la compressione e l'espansione sono relativamente lente, si ipotizza che avvengano in condizioni isoterme e quindi si può assumere $k = 1$.

Considerando le seguenti condizioni:

- serbatoio inizialmente pieno di aria, cioè $C_0 = 20,8\%$
- utilizzo di azoto puro al 99,98%, cioè $C_i = 0,02\%$
- $n = 2$ cicli di pressione tra $P_1 = 1,1$ bar(a) e $P_2 = 3$ bar(a)

si ottiene una concentrazione finale di ossigeno $C_n = 2,8\%$ circa. Tale valore è molto minore del LOC del toluene (9,5-10%), considerato come solvente rappresentativo di quelli usati.

Il controllo del ciclo di inertizzazione, in particolare dei parametri P_1 , P_2 e del numero n di cicli, avviene su logica safety utilizzando componentistica di sicurezza certificata.

4. Gestione della sicurezza funzionale

4.1 Allocazione delle SIF

La valutazione dei rischi ha evidenziato l'esigenza di implementare le funzioni strumentate di sicurezza (SIF) indicate nella *Safety Matrix* rappresentata in Figura 6. Tale matrice indica chiaramente le correlazioni tra gli ingressi e le uscite di ciascuna SIF, evidenziandone il SIL richiesto determinato in sede di analisi dei rischi.

Il SIL deve essere garantito e verificato per l'intera catena di sicurezza, non solamente per i singoli componenti, e si deve dedurre oggettivamente mediante calcoli e certificati.

Con riferimento particolare alla parte di processo, è richiesto un livello di affidabilità SIL1 per i seguenti SIS realizzati su logica di sicurezza.

Loop PT103

La funzione è quella di intercettare l'ingresso di solvente nell'ipotesi di altissima pressione (principalmente causata da contaminazione dei solventi bassobollenti con prodotti molto volatili), al fine di evitare l'ebollizione del solvente e l'intervento del disco di rottura.

Loop PT104

La funzione è quella di intercettare l'ingresso di solvente impedendo l'avvio delle operazioni di miscelazione nell'ipotesi in cui, dopo un fermo impianto (bassissima pressione), non viene

avviato il ciclo di inertizzazione (con controllo Pmax, Pmin, n° lavaggi), al fine di evitare la formazione di atmosfera esplosiva all'interno del serbatoio.

Loop LSHH400

La funzione è quella di intercettare l'ingresso di solvente o di semilavorato nell'ipotesi di altissimo livello in caso di guasto al sistema di dosaggio o per errore umano, al fine di evitare il sovrariempimento del serbatoio, con conseguente sovrappressione e intervento del disco di rottura.

INGRESSI			USCITE														
Logica	Descrizione	ID Sensore	ID Attuatore	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SIS	Trasduttore di pressione	PT103	1	C	C	C											
SIS	Trasduttore di pressione	PT104	2	C	C	C			C								
SIS	Livello stato di livello	LSHH400	3	C	C	C											
SIS	Livello stato di livello	LSHH401	4	C	C	C											
BPCS	Trasduttore di livello	LT300	5	C	C	C			C								
BPCS	Trasduttore di temperatura	TT200	6	C		C											
BPCS	Trasduttore di temperatura	TT201	7	C		C											
BPCS	Trasduttore di temperatura	TT202	8	C		C											
SIS	Micointerruttore su boccaporto	ZSC100	9											OFF	OFF	OFF	
SIS	Micointerruttore su boccaporto	ZSC110	10											OFF	OFF	OFF	
SIS	Micointerruttore su boccaporto	ZSC120	11											OFF	OFF	OFF	
BPCS	Sensore valvola	ZSO16	12	C	C	C			C								
SIS	Fungo emergenza 1	EM1	13	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	OFF	OFF	OFF	OFF
SIS	Fungo emergenza 2	EM2	14	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	OFF	OFF	OFF	OFF

LEGENDA :
 A = Apre
 C = Chiude
 ON = Avvio
 OFF = Arresto

< SIL1
 SIL1
 SIL2
 SIL3

Figura 6. Matrice di sicurezza con correlazione In-Out delle SIF e SIL richiesto

4.2 Verifica del SIL

I SIS sono stati costituiti tipicamente secondo l'architettura 1oo1 rappresentata in Figura 7. Tutti i componenti utilizzati sono idonei per minimo SIL1 secondo i vincoli architettureali previsti dalla EN 61508-2. Ciò si evince sia dalla certificazione fornita dal fabbricante, sia verificando il livello di integrità sulla base del tipo di sottosistema (Type A o Type B), della SFF (*Safe Failure Fraction*) certificata e della tolleranza minima ai guasti. [2] [5]

Per il calcolo della PFD (*Probability of Failure on Demand*) è necessario conoscere il tasso di guasto (λ) di ciascun componente che fa parte del loop di sicurezza.

Affinché si possa calcolare l'affidabilità di ciascun componente di sicurezza, noti i tassi di guasto occorre definire ogni quanto tempo il componente è oggetto di verifica completa del suo funzionamento, cioè l'intervallo di Full Proof Test (τ).

Nel caso in cui non venga fatta alcuna diagnostica per rilevare i tassi di guasto pericolosi rilevabili, la PFD di un sistema a singolo canale (1oo1) si calcola con la seguente formula:

$$PFD = \lambda_D * \tau / 2 \quad (2)$$

Nel caso specifico è stato definito un intervallo di Full Proof Test pari a 1 anno.

I sistemi strumentati di sicurezza realizzati soddisfano il requisito in ingresso in quanto raggiungono una PFD corrispondente ad un livello di integrità della sicurezza SIL2.

A titolo di esempio, si riporta in Figura 7 il report di verifica per il loop LSHH400.

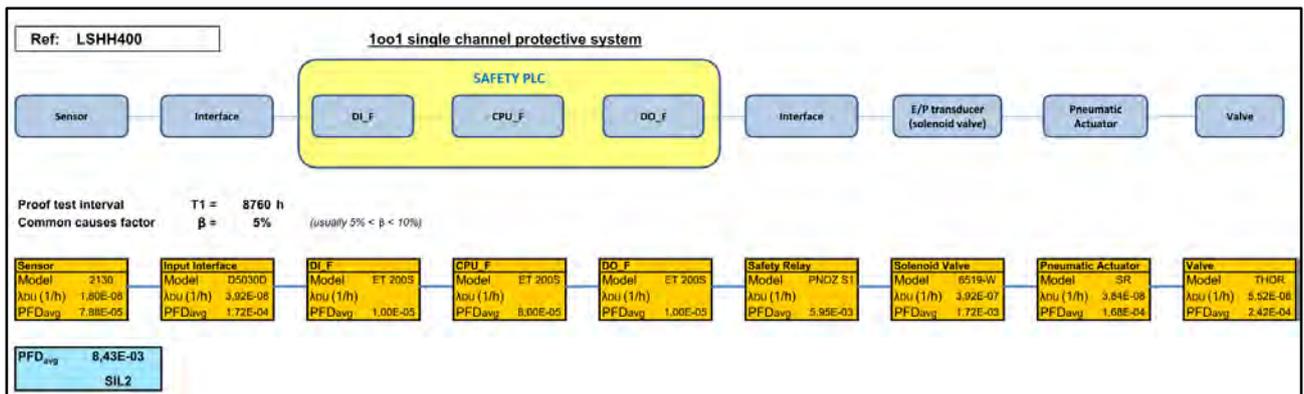


Figura 7. Verifica del SIL del Loop LSHH400

5. Marcatura CE e dichiarazione di conformità

Oltre a quanto precedentemente esposto, alla conclusione delle procedure di valutazione di conformità previste da ciascuna direttiva applicabile, il fabbricante ha potuto apporre la marcatura CE all'impianto ed emettere la relativa dichiarazione di conformità UE di insieme. Per quanto riguarda la PED in particolare, un Organismo Notificato è intervenuto rilasciando il certificato di conformità basata sulla verifica dell'unità (Modulo G).



Figura 8. Targhette d'insieme PED, MD e ATEX (su autorizzazione di HA Italia S.p.A.)

6. Conclusioni

Nella presente memoria si è voluto presentare il *case study* relativo ad un impianto di miscelazione bitume come esempio in cui un approccio integrato all'analisi dei rischi secondo più metodologie che affrontano in modo congiunto i vari fronti di coerenza legislativa (riferendosi in particolare alle principali direttive di prodotto PED, MD e ATEX) sia il criterio più appropriato per garantire la sicurezza di un impianto di processo, nel rispetto dei requisiti formalmente richiesti.

L'utilizzo dei sistemi strumentati di sicurezza nell'industria di processo è una prassi indispensabile per l'attuazione di misure di protezione efficaci ed affidabili, a patto che essi siano correttamente progettati, realizzati e verificati. La scelta e la definizione dei requisiti di ciascun SIS deve rispecchiare quanto emerso dalla valutazione dei rischi, in modo da ottenere le funzioni di sicurezza previste e il livello di integrità SIL richiesto, per conseguire gli obiettivi di riduzione del rischio prefissati.

Bibliografia

- [1] CEI EN 61511 - Sicurezza funzionale - Sistemi strumentali di sicurezza per il settore dell'industria di processo - Parte 1: Struttura, definizioni, sistema, prescrizioni per l'hardware e il software - Parte 3: Guida per la determinazione dei livelli di integrità di sicurezza richiesti
- [2] CEI EN 61508 - Sicurezza funzionale dei sistemi elettrici, elettronici e programmabili per applicazioni di sicurezza - Parte 1: Requisiti generali - Parte 2: Requisiti per i sistemi elettrici, elettronici ed elettronici programmabili per applicazioni di sicurezza - Parte 6: Linee guida per l'applicazione della EN 61508-2 e EN 61508-3
- [3] CEI 65-186:2010 - Linea guida per l'applicazione della Norma serie CEI EN 61511
- [4] CEN/TR 15281:2016 - Guidance on Inerting for the Prevention of Explosions
- [5] M. Giacobbo - Implementazione di un sistema strumentato di limitazione della temperatura SIL2 in IV categoria PED in un impianto di cogenerazione a vapore - Atti del convegno SAFAP 2018 - Bologna, 28-29 novembre 2018
- [6] M. Giacobbo, M. Pettenuzzo, D. Morandin, M. Capitozzo - Applicazione congiunta delle direttive 97/23/CE (PED), 2006/42/CE (MD) e 94/9/CE (ATEX) agli impianti di processo - Atti del convegno SAFAP 2012 - Napoli, 14-15 giugno 2012

Utilizzo di un sistema strumentale contro il pericolo di sovrappressione di un serbatoio di abbattimento di effluenti gassosi

F.P. Nigri, D. Sallustio

Inail – Uot di Bari

Sommario

Il lavoro intende illustrare il calcolo della probabilità di accadimento di uno scenario incidentale derivante dal malfunzionamento di un impianto di scarico in torcia. L'impianto è destinato all'abbattimento di effluenti gassosi in un'industria di processo, nella quale sono in deposito idrocarburi suscettibili di sviluppare gas infiammabili durante le lavorazioni. Una volta identificato il TOP event, l'analisi dell'albero dei guasti procederà gradualmente dalle root causes verso la sommità, attraverso porte di tipo AND e OR.

1. Introduzione

L'analisi quantitativa del rischio (QRA) è una tecnica di analisi sovente adottata per stimare le probabilità di accadimento di eventi indesiderati. Occorre subito chiarire che la QRA basata sull'albero dei guasti (Fault Tree Analysis, FTA) introduce un paio di approssimazioni. La prima approssimazione è correlata ai valori delle probabilità di accadimento dei c.d. eventi base (root causes), affetti da errori di stima imputabili soprattutto a scarsa conoscenza e imperfette determinazioni dei tassi di guasto λ . La seconda approssimazione riguarda l'ipotesi di completa indipendenza degli eventi base, che spesso si rivela alquanto inverosimile.

Un albero dei guasti viene costruito facendo ricorso alla logica dei fallimenti. Le radici dell'albero sono gli eventi base, affetti dalle probabilità di fallimento dei componenti elementari dell'impianto in esame. Il percorso logico dell'albero ripropone le modalità con le quali i guasti dei singoli componenti si combinano per sfociare nella condizione di avaria dell'intero impianto in esame. In quest'ottica, l'albero dei guasti si rivela utile per quantificare la probabilità di fallimento dell'intero impianto a partire dalle probabilità di guasto dei suoi singoli componenti.

Guasti potenziali dovuti a errori umani saranno esclusi dalla nostra indagine solo per mancanza di spazio. Ciò non toglie che tali guasti possano essere successivamente esaminati, introducendo in tal modo ulteriori eventi base, utili per una più precisa strutturazione dell'albero dei guasti. Si intuisce che l'indagine preliminare ha termine quando gli eventi base identificati sono considerati sufficientemente esaustivi per lo scopo che ci si prefigge: una stima quanto più accurata possibile della probabilità di accadimento del TOP event. Tale probabilità sarà infine confrontata con una probabilità di accadimento di riferimento, definita da un criterio oggettivo di accettabilità del rischio.

2. Fault Tree Analysis (FTA)

Per le finalità del lavoro, non esamineremo l'albero dei guasti con il rigore matematico che merita. Al riguardo, riteniamo che si abbiano a disposizione alcuni standard, come la CEI EN 61025, in grado di descrivere compiutamente le relazioni necessarie per tracciare correttamente un albero dei guasti.

La struttura ad albero della FTA è la rappresentazione grafica della catena di fallimenti che ha in esito l'evento indesiderato finale, e cioè il TOP event. Tipicamente ogni TOP event è il risultato di una processione di fallimenti, intesi come guasti dei componenti elementari. In

quest'ottica, i componenti elementari si possono riguardare come barriere di prevenzione che si rivelano inefficaci per interrompere la sequenza incidentale.

Un albero dei guasti non può tenere conto di tutti i possibili TOP event ipotizzabili per l'impianto in esame. Ogni albero dei guasti è strutturato per un particolare TOP event. In altre parole, ogni albero dei guasti affonda le sue radici in quelle root causes che possono avere in esito il top event che intendiamo prendere in considerazione. Nel prosieguo, concentreremo l'attenzione su un serbatoio contenente gas infiammabili in pressione e procederemo al calcolo della probabilità di accadimento dell'evento TOP che si identifica con lo scenario incidentale dalle conseguenze potenziali maggiormente dannose: il cedimento del serbatoio per sovrappressione.

Per costruire l'albero dei guasti riguardante il caso in esame, è necessario comprenderne i principali simboli logici. La figura 1 mostra le porte logiche che utilizzeremo nel seguito. Il guasto di ogni singolo componente sarà posto in combinazione con quello degli altri componenti elementari tramite porte logiche di tipo AND oppure OR. Altri operatori Booleani possono essere utilizzati, ma ciò non è richiesto dall'esempio che ci accingiamo a presentare. Una volta comprese le porte logiche AND e OR, procederemo alla costruzione dell'albero dei guasti rappresentativo dei sistemi di controllo, allarme e sicurezza di cui, nel complesso, dispone l'impianto in esame.

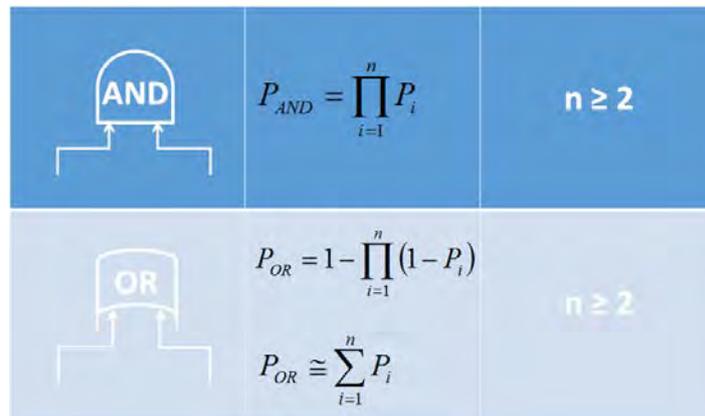


Figura 1. Porte logiche AND e OR

3. Caso studio: impianto di abbattimento di effluenti gassosi

Introduciamo il caso studio concentrando l'attenzione su un serbatoio di abbattimento di effluenti gassosi. Il serbatoio in osservazione, comunemente definito "knock-out drum" nella pratica tecnica, funge anche da separatore che ha compito di raccolta dell'eventuale frazione liquida presente negli effluenti.

L'impianto, oltre che dal serbatoio di abbattimento, è composto da:

- un collettore di raccolta degli effluenti;
- una torcia.

Gli effluenti sono costituiti da scarichi provenienti da linee di sfiato, tubazioni di drenaggio, condutture di spurgo e valvole di sicurezza installate a corredo delle singole attrezzature in pressione presenti nello stabilimento. Gli scarichi vengono dapprima raccolti nel collettore e successivamente inviati nel serbatoio di abbattimento. All'interno del serbatoio, la fase gassosa viene separata da quella liquida, eventualmente presente, per decantazione. La frazione liquida si raccoglie sul fondo del serbatoio e viene successivamente vaporizzata, mediante apporto di calore, per essere reinserita nel ciclo produttivo (Figura 2).

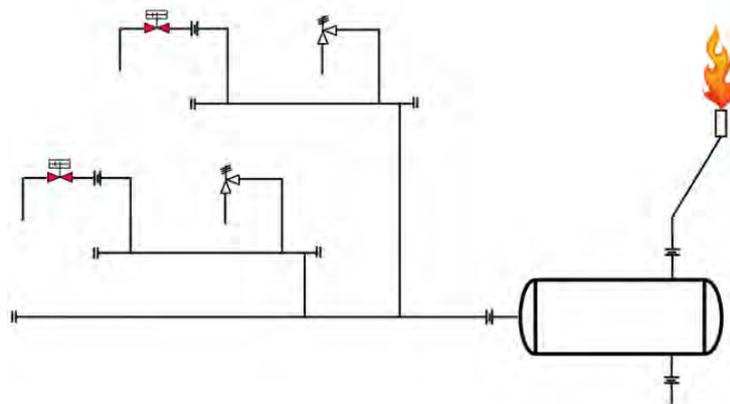


Figura 2. Impianto di abbattimento di effluenti gassosi

L'impianto è strutturato per rendere minima la quantità di gas convogliata verso la torcia per la combustione e favorire il reintegro degli effluenti gassosi nel processo. La torcia consente lo smaltimento in sicurezza degli effluenti gassosi che non è possibile riutilizzare. Il serbatoio di abbattimento è dimensionato per raccogliere e smaltire scarichi di emergenza e scarichi controllati, questi ultimi collegati a operazioni di manutenzione eseguite su apparecchiature e linee di impianto. Pertanto, il rilascio in torcia è previsto unicamente durante condizioni di funzionamento di emergenza oppure in caso di interventi di manutenzione.

Il serbatoio di abbattimento è collegato alla torcia attraverso una valvola di regolazione, del tipo a farfalla (valvola A). La valvola è chiusa in condizioni di normale operatività dell'impianto e si apre in caso di incremento eccessivo della pressione della fase gas nel serbatoio, permettendo il convogliamento degli effluenti gassosi verso la torcia per la combustione. Per non appesantire l'elaborato grafico, la Figura 3 non evidenzia il trasduttore di pressione collegato all'allarme in sala controllo.

Al fine di limitare le emissioni in atmosfera di gas combustibili, la fiamma pilota della torcia è normalmente tenuta spenta. Nel caso in cui si manifesti un convogliamento di effluenti gassosi verso la torcia, la presenza di gas infiammabili viene prontamente rilevata e si provvede all'accensione della fiamma pilota. Il gas di alimentazione della fiamma pilota è fornito da un pacco bombole di GPL. In caso di mancato funzionamento del sistema di accensione automatica della fiamma pilota, la torcia funge da condotto che disperde gli effluenti gassosi in atmosfera sotto forma di gas incombusti.

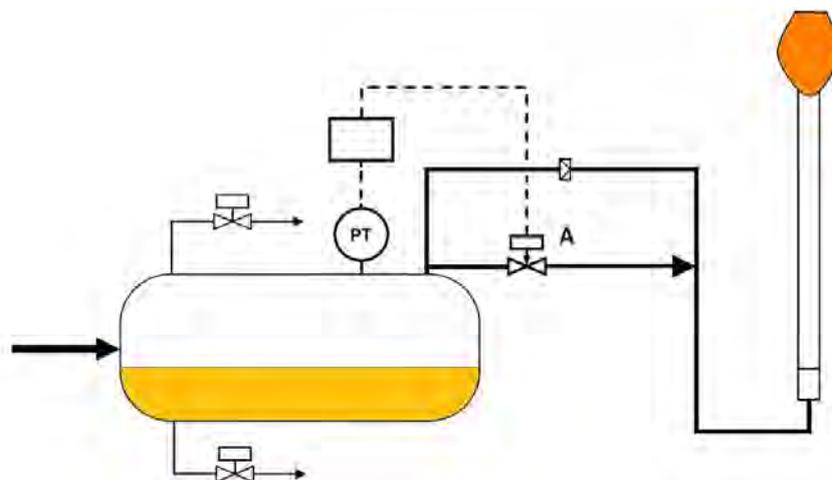


Figura 3. Collegamento del serbatoio di abbattimento con la torcia

Normalmente, il flusso di idrocarburi gassosi, che proviene dalle varie sezioni dello stabilimento e confluisce nel serbatoio di abbattimento, viene smaltito da un compressore che preleva il gas dalla parte alta del serbatoio. Tuttavia, la portata di effluenti che viene convogliata nel serbatoio di abbattimento può superare la portata di gas infiammabili complessivamente smaltita dal compressore. In questa eventualità, qualora il sistema di controllo del processo non sia in grado di mantenere la pressione nell'intervallo di ordinaria operatività del serbatoio a causa, per esempio, della mancata apertura della valvola A, un disco di rottura cede sotto l'effetto della pressione e permette agli effluenti gassosi di fluire rapidamente verso la torcia per la combustione. Il disco è sollecitato a rottura anche nel caso in cui si verifichi un incendio esterno che interessa il serbatoio di abbattimento, consentendo in tal modo la sua rapida depressurizzazione.

In definitiva, il deflusso continuo di effluenti gassosi verso la torcia si verifica solo nei seguenti casi:

incendio esterno che coinvolge direttamente il serbatoio di abbattimento;

avaria simultanea dei sistemi di allarme e di controllo della pressione all'interno del serbatoio di abbattimento.

Con queste premesse, prescindendo per semplicità dall'incendio esterno, possiamo costruire l'albero dei guasti dell'impianto in esame.

componente	λ (guasti/anno)	riferimento
sonda di pressione	0,10437	[1]
trasduttore di pressione	0,27155	[1]
unità logica di controllo	0,19770	[1]
valvola a solenoide	0,42048	[2]
valvola a farfalla	0,09386	[1]
allarme di alta pressione	0,00034	[1]
disco di rottura	0,20000	[3]

Tabella 1. Tassi di guasto (λ) dei componenti elementari

Noti i tassi di guasto dei componenti elementari, è possibile risalire alla loro Affidabilità su base annua utilizzando la seguente relazione funzionale, valida nell'ipotesi secondo la quale λ si mantiene costante nel tempo:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (1)$$

Calcolato il valore dell'Affidabilità, il c.d. Approccio Complementare permette dalla (1) di risalire facilmente alla Probabilità di fallimento dei componenti elementari. È sufficiente, infatti, ricordare che la Probabilità di fallimento è il complemento a uno dell'Affidabilità:

$$P = 1 - R \quad (2)$$

I risultati dell'analisi di Affidabilità dei componenti elementari sono stati riportati nel sinottico di tabella 2.

sistema di controllo della pressione				
componente	λ (guasti/anno)			
sonda di pressione + trasduttore	0,37592	0,69	0,31	P1
unità logica di controllo	0,19770	0,82	0,18	P2
valvola a solenoide + valvola a farfalla	0,51434	0,60	0,40	P3
sistema di allarme				
componente	λ (guasti/anno)			
sonda di pressione + trasduttore	0,37592	0,69	0,31	P4
allarme di alta pressione	0,00034	0,9997	0,0003	P5
disco di rottura				
componente	λ (guasti/anno)			
disco di rottura	0,20000	0,82	0,18	P9

Tabella 2. Probabilità di fallimento dei componenti elementari

Note le probabilità di fallimento dei componenti elementari evidenziate in tabella 2, non resta che tracciare l'albero dei guasti che consente di risalire alla probabilità dell'evento TOP con l'utilizzo delle relazioni funzionali riportate nel sinottico di figura 1.

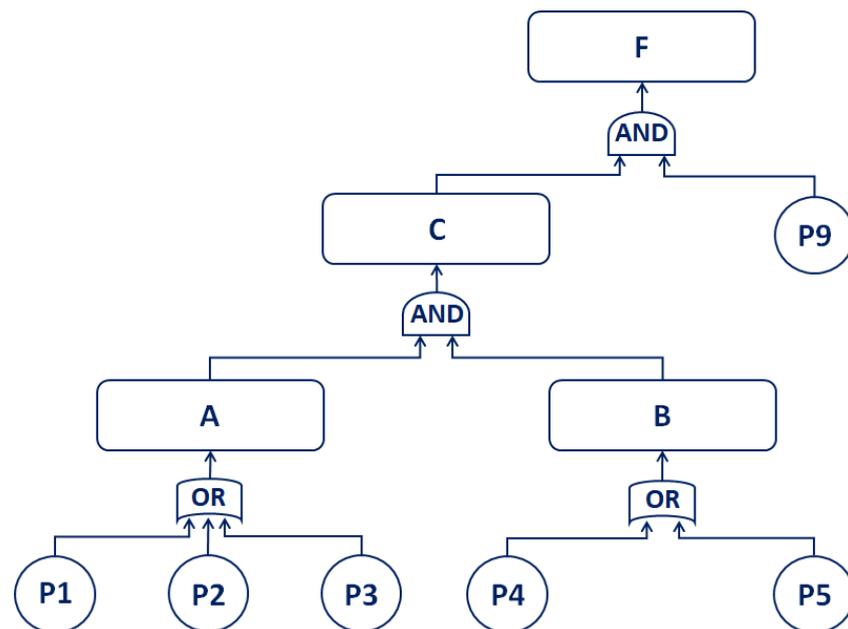


Figura 4. Albero dei guasti

Completiamo l'albero dei guasti con l'introduzione della tabella 3.

#	evento indesiderato	P (accadimenti/anno)
A	fallimento del sistema di controllo	0,89
B	fallimento del sistema di allarme	0,31
C	fallimento dei sistemi di controllo e allarme	0,28
F	sovrappressione del serbatoio di abbattimento	0,051

Tabella 3. Probabilità di accadimento della sovrappressione nel serbatoio di abbattimento

Alla luce del contenuto del D.M. 9 maggio 2001, che detta i requisiti minimi in tema di pianificazione territoriale per le zone interessate dalla presenza di stabilimenti a rischio di incidente rilevante, il risultato conseguito ($5,1 \times 10^{-2}$ eventi/anno) non è soddisfacente. È evidente che la dotazione impiantistica del serbatoio di abbattimento deve essere implementata in modo da ridurre sensibilmente la probabilità annua di accadimento dell'evento TOP rappresentato dal cedimento del serbatoio per sovrappressione.

4. Contributo del sistema strumentale di sicurezza

I sistemi strumentali di sicurezza sono sempre più presenti negli impianti di processo. Questi sistemi sono strutturati per impedire l'accadimento di scenari incidentali dalle conseguenze potenzialmente catastrofiche. Per questa ragione, ai sistemi strumentali di sicurezza si richiede sempre un certo livello di affidabilità. Peraltro, se questi sistemi non sono adeguatamente mantenuti nel tempo, possono essere affetti da guasti che si traducono in rischi significativi per la sicurezza delle persone e per l'ambiente.

Qualora un sistema strumentale di sicurezza (SIS) sia destinato a essere inserito in un impianto di processo, esso opera in modo da riportare il processo in uno stato sicuro, in caso di malfunzionamento dell'attrezzatura sotto controllo. Nella sua forma più semplice, rappresentata dall'architettura monocanale (logica voting 1oo1), il SIS è costituito da tre elementi in serie: un sensore, un risolutore logico, un elemento finale. Il sensore rileva la variazione indesiderata del parametro di processo sotto controllo. Il risolutore logico interpreta l'input proveniente dal sensore. L'elemento finale, sollecitato dall'unità logica, esplica l'azione mirata a riportare il processo in uno stato sicuro.

Consideriamo un SIS monocanale per semplicità di trattazione. Lo schema impiantistico di figura 3 viene modificato per tenere conto dell'inserimento del SIS fra misure di prevenzione del serbatoio di abbattimento, barriere introdotte allo scopo di interrompere la sequenza incidentale e impedire l'accadimento dell'evento indesiderato maggiormente dannoso: il cedimento del serbatoio per sovrappressione.

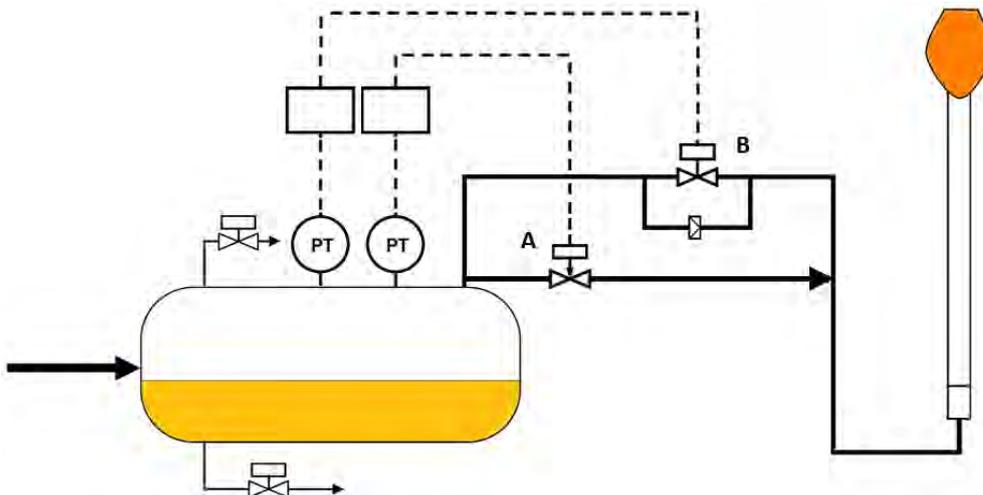


Figura 5. Inserimento del SIS nel collegamento del serbatoio di abbattimento con la torcia

La funzione strumentale di sicurezza (SIF) esplicita dal SIS mira a prevenire la sovrappressione del serbatoio di abbattimento. L'azione di rilevamento dell'alta pressione è affidata a un sensore che ha il compito di attivare la funzione di sicurezza. Scopo della funzione di sicurezza è l'apertura su richiesta della valvola a farfalla B che consente ai gas in pressione di defluire rapidamente verso la torcia per la combustione. Tuttavia, l'apertura della valvola a farfalla B potrebbe non avvenire. Questa circostanza è espressa in termini analitici dalla probabilità di fallimento su richiesta del SIS e cioè dalla sua PFD, la cui stima

rappresenta l'obiettivo prioritario della norma tecnica IEC 61508. Nell'eventualità di avaria del sistema strumentale di sicurezza, l'ultima barriera idonea a prevenire la sovrappressione del serbatoio di abbattimento è rappresentata dal disco di rottura, inserito in parallelo alla valvola a farfalla B del sistema strumentale. Fatte queste ulteriori precisazioni, possiamo costruire l'albero dei guasti dell'impianto di abbattimento, che risulta più complesso rispetto a quello precedentemente esaminato a causa dell'inserimento del sistema strumentale di sicurezza fra le misure di prevenzione. Supponiamo che siano noti i ratei di guasto dei singoli componenti del SIS. I tassi di guasto dei componenti del SIS, diversamente da quelli riportati in tabella 1, sono espressi in FIT (Failures In Time), misura equivalente al numero di guasti atteso in un miliardo di ore di funzionamento.

componente	λ (FIT)	riferimento
sensore di pressione + trasduttore	7700	[4]
risolutore logico	3300	[4]
elemento finale	9900	[4]

Tabella 4. Tassi di guasto (λ) dei componenti del SIS

La norma tecnica IEC 61508 fornisce le relazioni funzionali che permettono di risalire alla Probabilità di Fallimento su Richiesta (PFD) dei singoli componenti del SIS. Per gli scopi dell'articolo, abbiamo preferito fare uso di un programma reso disponibile in rete dalla "Pepperl & Fucks". I risultati del calcolo sono evidenziati in tabella 5.

componente	λ (FIT)	DC (%)	PTC (%)	T1 (h)	PFD
sensore di pressione + trasduttore	7700	60	100	8760	0,00678
risolutore logico	3300	90	100	8760	0,00074
DCV + valvola ESD (elemento finale)	9900	60	100	8760	0,00871

Tabella 5. Probabilità di Fallimento su Richiesta (PFD) dei componenti del SIS

In tabella 5:

- DCV indica una valvola di controllo direzionale abbinata a una valvola a solenoide;
- ESD indica una valvola di Emergency Shutdown;
- DC rappresenta la Copertura Diagnostica (Diagnostic Coverage, DC) del singolo componente.
- Il calcolo della PFD è stato eseguito su base annua ($T1 = 8760$ ore), nell'ipotesi di test di prova perfetti (Proof Test Coverage, PTC = 100%).

Il risultato conseguito può essere così espresso.

componente	P (accadimenti/anno)	
sensore di pressione + trasduttore	0,00678	P6
risolutore logico	0,00074	P7
DCV + valvola ESD (elemento finale)	0,00871	P8

Tabella 6. Probabilità di fallimento dei componenti del SIS

Poiché il SIS è costituito da tre componenti in serie e il guasto di uno qualsiasi di questi tre componenti porta in avaria l'intero SIS, l'albero dei guasti rappresentativo del SIS avrà le PFD dei tre componenti alla base e una porta OR in sommità.

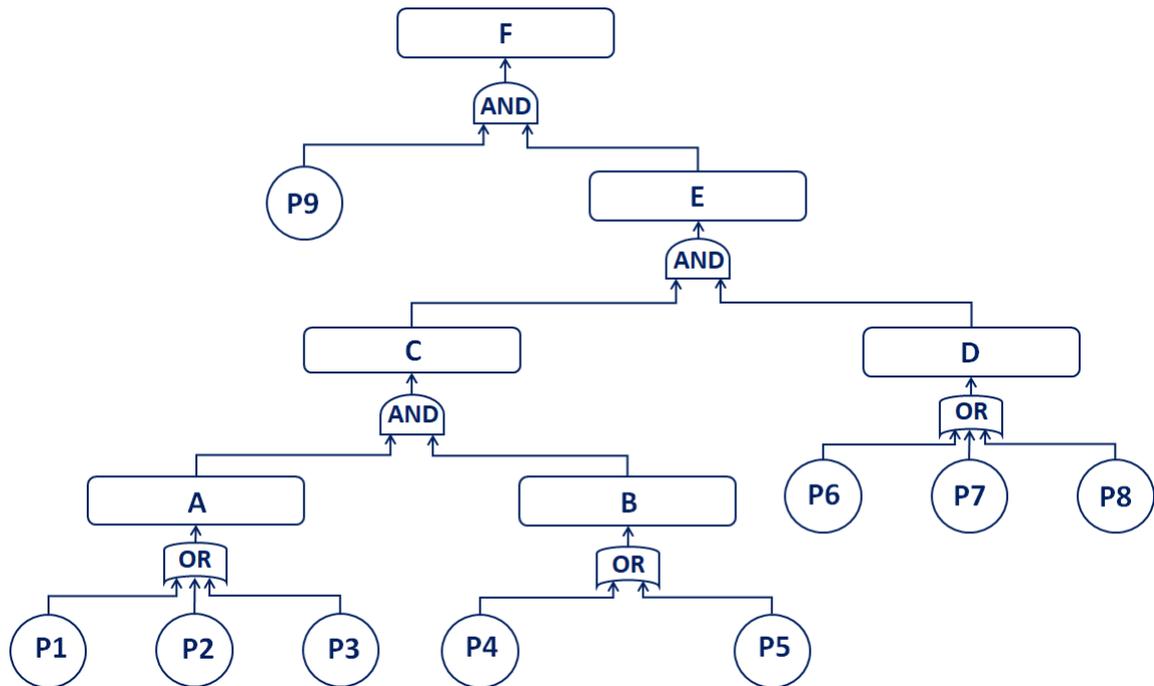


Figura 6. Albero dei guasti dopo l'inserimento del SIS fra le misure di prevenzione

L'albero dei guasti di figura 6 è reso completo dal contenuto di tabella 7.

#	evento indesiderato	P (accadimenti/anno)
A	fallimento del sistema di controllo	0,89
B	fallimento del sistema di allarme	0,31
C	fallimento dei sistemi di controllo e allarme	0,28
D	fallimento del sistema strumentale di sicurezza	0,016
E	fallimento dei sistemi di controllo, allarme e sicurezza	0,0046
F	sovrappressione del serbatoio di abbattimento	0,00083

Tabella 7. Probabilità di accadimento della sovrappressione dopo l'inserimento del SIS

La netta riduzione della probabilità di accadimento dell'evento indesiderato maggiormente dannoso per la salute umana e per l'ambiente (cedimento del serbatoio per sovrappressione) prova inequivocabilmente la validità della soluzione impiantistica che ha portato all'inserimento del SIS fra le barriere di prevenzione del processo.

5. Conclusioni

Sebbene l'eliminazione completa del rischio di processo sia del tutto irrealistica, è sempre necessario ridurre il rischio a un livello accettabile. In quest'ottica, comprendere correttamente la portata dei pericoli del processo è essenziale per determinare la riduzione del rischio richiesta. Nella fase di riduzione del rischio gioca ormai un ruolo importante la sicurezza funzionale, disciplina ingegneristica il cui scopo precipuo è la stima della probabilità con la quale un sistema strumentale porta a compimento la funzione di sicurezza alla quale è deputato. Ancora oggi molti tecnici del settore ritengono che la sicurezza funzionale implichi semplicemente l'utilizzo di componenti certificati secondo determinati standard. Le cose non stanno proprio così. Riteniamo pertanto importante chiarire alcuni aspetti riguardanti la sicurezza funzionale per non ingenerare un "falso senso di sicurezza".

Gli standard alla base della sicurezza funzionale, l'IEC 61508 e l'IEC 61511 in particolare, si applicano a tutto il ciclo di vita dei componenti di un sistema strumentale di sicurezza, dalla progettazione alla dismissione. In altre parole, la sicurezza funzionale non trascura alcun aspetto della vita di un componente di sicurezza, dalla progettazione alla sua implementazione fino all'eventuale modifica o disattivazione di un processo. In questo senso, gli standard citati interessano progettisti, fabbricanti, tecnici del settore e utenti finali. Ciascuno ha responsabilità diverse nell'attuazione della sicurezza funzionale e deve essere pronto a dimostrare competenza nella conduzione delle attività che ricadono direttamente sotto la sua responsabilità. Per esempio, è responsabilità dell'utente finale, che in genere si identifica con il gestore di uno stabilimento a rischio di incidente rilevante, garantire opportuna manutenzione a un sistema strumentale in modo che esso possa conservare nel tempo quel livello di integrità della sicurezza (Safety Integrity Level, SIL) con il quale è stato immesso sul mercato dal fabbricante.

La sicurezza funzionale si concentra tipicamente sui sistemi strumentati di sicurezza (SIS). La scelta di tali sistemi implica affrontare una serie di domande:

Qual è l'architettura del sistema?

Qual è l'ampiezza dell'intervallo di tempo che intercorre fra due test di prova consecutivi?

I moderni sistemi di gestione della sicurezza funzionale (Functional Safety Management Systems, FSMS) aiutano, tra l'altro, a documentare i requisiti dei componenti dei sistemi strumentali di sicurezza, effettuare i test di prova con la cadenza richiesta e, infine, dimostrare che la riduzione del rischio prevista è stata conseguita. L'adozione di tali sistemi di gestione richiede il coinvolgimento di tutti coloro che, a vario titolo, sono impegnati nel raggiungimento dell'obiettivo di riduzione del rischio di processo.

Come abbiamo inteso sottolineare, i sistemi strumentali di sicurezza rappresentano solo una delle molteplici barriere di prevenzione che includono anche i sistemi di controllo del processo e i sistemi di allarme. Sebbene queste diverse barriere di prevenzione debbano rimanere funzionalmente indipendenti le une dalle altre, è importante impegnarsi per una gestione più efficiente della sicurezza del processo al fine di evitare pericolose derive delle variabili di processo dai valori ordinari. L'articolo proposto prova, senza ombra di dubbio, che i sistemi strumentali di sicurezza possono fungere in futuro da tecnologia abilitante per migliorare notevolmente le condizioni di sicurezza di un impianto tecnologico.

6. Riferimenti

I riferimenti citati nel seguito sono stati utilizzati unicamente per la stima dei tassi di guasto dei componenti elementari dei sistemi di controllo, allarme e sicurezza:

[1] Cukup Mulyana, Fajar Muhammad, Aswad H. Saad, Mariah, Nowo Riveli, "Failure analysis of storage tank component in LNG regasification unit using fault tree analysis method (FTA)", AIP Conference Proceedings 2017;

[2] Cinalli Enrico "Appunti di Tecnologie e Tecniche di Installazione e Manutenzione", Parte 3 di 3 (disponibile in rete);

[3] Lees Frank P., "Loss Prevention in the Process Industries", second edition;

[4] Nigri F. P., "Sistemi Strumentali di Sicurezza. Riferimenti e metodi per verificare il livello di affidabilità", Ambiente e Sicurezza sul Lavoro, EPC Periodici, Roma, ottobre 2019.

Difficoltà di accesso nelle attrezzature a pressione e modifica degli standard progettuali

G. A. Zuccarello¹, C. Console², E. D'Alessandri², R. Melloni³, A.P. Bacchetta⁴

¹ Inail - Uot di Bologna

² Inail - Dit

³ Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia / Centro di Ricerca Interdipartimentale sulla Sicurezza e Prevenzione dei Rischi (C.R.I.S.)

⁴ European Interdisciplinary Applied Research Center for Safety (EURSAFE)

Sommario

Nel presente articolo, gli autori intendono affrontare il problema dell'accesso dei tecnici addetti alle ispezioni / verifiche d'integrità all'interno delle attrezzature a pressione posto che, al momento, non sono ancora disponibili sistemi robotici affidabili, in grado di sostituire integralmente le attività umane. Infatti, considerato che le ricerche in atto per lo sviluppo di tali sistemi non sono ancora riuscite a proporre soluzioni applicabili, l'unica strada attualmente percorribile è dare risposte tecnico/procedurali/organizzative che consentano di gestire in sicurezza, ove non sia possibile evitare, o almeno ridurre al minimo, la necessità di accesso nelle attrezzature a pressione, considerato che le dimensioni dei passi d'uomo presenti sono normalmente aperture ellittiche delle dimensioni di 300×400 mm. Per questo, in attesa di soluzioni alternative all'accesso, è quindi necessario eseguire una puntuale identificazione dei pericoli, reali o potenziali, e un'approfondita valutazione dei rischi per identificare le misure di prevenzione e protezione più idonee per eliminare o, quanto meno, ridurre al minimo i rischi per gli operatori addetti. Questo coerentemente con le previsioni di cui al D.Lgs. 81/08 e al D.P.R. 177/2011. Nel contempo, è auspicabile che gli Enti regolatori, a livello nazionale ed europeo, valutino una possibile modifica degli standard progettuali, affinché prevedano dimensioni maggiori per i passi d'uomo.

Tematiche di riferimento:

Monitoraggio attrezzature e impianti, Progettazione e costruzione, Safety and security, Verifiche e controlli

1. Introduzione

Come noto, la normativa cogente dispone che il datore di lavoro deve mettere a disposizione dei lavoratori attrezzature di lavoro conformi alle specifiche disposizioni legislative e regolamentari di recepimento delle direttive comunitarie di prodotto e idonee al lavoro da svolgere (D.Lgs. 81/08 Titolo III art. 70 e 71). Attività che comprendono sia un'idonea manutenzione, in grado di garantire nel tempo la permanenza dei requisiti di sicurezza, sia l'effettuazione delle verifiche di riqualificazione periodica per le attrezzature di lavoro riportate in allegato VII (tra cui le attrezzature a pressione/insiemi per i quali è prevista una frequenza indicata nel medesimo allegato), volte a valutarne l'effettivo stato di conservazione e di efficienza ai fini della sicurezza. A queste si devono aggiungere le attività di costruzione ed anche eventuali attività di riparazione necessarie per ripristinare la funzionalità dell'attrezzatura a pressione. Tutti interventi che, fatte salve alcune eccezioni, comportano la necessità di accedere all'interno dell'attrezzatura passando attraverso i passi d'uomo posti sul mantello cilindrico che sono usualmente di forma ellittica con dimensioni di 300×400 mm o di forma circolare con diametro 500 mm. Se per le attività di costruzione / manutenzione / riparazione l'accesso è, ovviamente, necessario, per quanto riguarda le verifiche periodiche, in occasione di un precedente lavoro presentato al SAFAP 2014, si

rilevava come l'esame visivo rivesta carattere di assoluta importanza nel campo della sicurezza delle attrezzature a pressione: infatti, esso consente di rilevare, con semplicità e rapidità, la maggior parte dei difetti superficiali (verificando la presenza di evidenti segni di difettosità quali cricche, corrosioni, erosioni, alterazioni di forma, bugne-blister, piccole cavità superficiali - pitting), ecc.. e di formulare un giudizio generale sulla permanenza o meno in esercizio dell'attrezzatura basandosi sul tipo di difettosità identificata per tipologia (interpretazione) e valutata (classificazione) in relazione alla sua severità (livello di rischio connesso) e/o agli specifici criteri di accettabilità o di valutazione.

2. La progettazione delle aperture nelle attrezzature a pressione

Le attrezzature a pressione, con una pressione massima superiore a 0,5 bar, devono soddisfare i RES (Requisiti Essenziali di Sicurezza) della Direttiva Europea sulle attrezzature a pressione 2014/68/UE PED (atto di rifusione che revisiona la direttiva 97/23/CE). Tale Direttiva, all'allegato I, 2.4 *Mezzi di controllo*, richiede che le attrezzature a pressione devono essere progettate e costruite in modo tale che sia possibile effettuare tutte le ispezioni necessarie per garantirne la sicurezza e, inoltre, si precisa che "b) *Devono essere disponibili mezzi per determinare lo stato interno dell'attrezzatura, qualora sia necessario per garantire la sicurezza continua dell'attrezzatura, come aperture di accesso che consentano l'accesso fisico all'interno dell'attrezzatura a pressione in modo che possano essere eseguiti esami appropriati in modo sicuro ed ergonomico*". I requisiti essenziali stabiliti nella Direttiva Europea sulle attrezzature a pressione sono vincolanti per il fabbricante. Sono tuttavia formulati in termini generali e sono supportati da norme europee armonizzate la cui applicazione è su base volontaria. Tuttavia, quando la norma in questione è elencata nella Gazzetta ufficiale dell'UE, ciò dà luogo a una presunzione di conformità ai requisiti essenziali della direttiva europea coperti dalla norma (capo 3 art. 12). Alcune norme e specifiche di calcolo internazionali, permettono dimensioni per aperture di accesso di 320 mm × 420 mm e, in alcuni casi, solo 300 mm × 400 mm. Dimensioni che rendono molto difficile un salvataggio rapido e senza stress in caso di emergenza¹. A livello europeo, alcune organizzazioni come la KAN², hanno presentato all'ente di normazione di riferimento DIN domande di revisione delle norme europee EN 13445-5, recipienti a pressione non riscaldati, e EN 12953-3, caldaie a tubi da fumo. Una richiesta è stata presentata anche al VdTÜV³ per la revisione del corpo di norme AD 2000⁴. A livello nazionale, sino al 29 maggio 2002, le raccolte ISPESL VSR, VSG, M ed S sono state le specifiche tecniche cogenti ai fini dell'omologazione degli apparecchi a pressione da parte dell'ISPESL. Le raccolte (la cui ultima revisione è del 1995) hanno pertanto costituito il riferimento obbligatorio in Italia, ai fini dell'immissione sul mercato di attrezzature a pressione, sino all'introduzione della direttiva 97/23/CE (PED - Pressure Equipment Directive), recepita con il D.Lgs. 93/2000. Tenuto conto che, a partire dal 2002, le raccolte sono state utilizzate come riferimento nei casi di riqualificazione PED ("valutazione della conformità" secondo la PED) di attrezzature immesse sul mercato prima del 29 maggio 2002 (e quindi omologate dall'ISPESL), in quanto originariamente progettate e costruite sulla base di tali codici, recentemente un gruppo di lavoro costituito dal CTI Comitato Termotecnico Italiano e INAIL, in ambito UNI, ha

¹ Da considerare che lo spessore delle pareti dei recipienti a pressione normalmente impedisce la realizzazione rapida di un'apertura nella parete del recipiente.

² KAN - Kommission Arbeitsschutz und Normung - La Commissione per la Salute e Sicurezza sul Lavoro (OH&S) e di normalizzazione, ha lo scopo di osservare il processo di normalizzazione e di garantire che le norme dei produttori dedichino sufficiente attenzione alle esigenze di OH&S. È stata fondata nel 1994

³ Association of Technical Inspection Agencies

⁴ Il codice di norme AD2000 Code of practice for pressure vessels è predisposto dal German Pressure Vessel Association e può essere applicato per soddisfare i requisiti essenziali di sicurezza contenuti nella direttiva 97/23/CE (Pressure Equipment Directive)

predisposto delle linee guida che riprendono i contenuti del documento R-02 aggiornandoli in base ai RES definiti dalla nuova Direttiva 2014/68/UE PED e tenendo conto dei cambiamenti normativi intervenuti (aggiornamenti delle norme UNI EN 13445, UNI EN 12952, UNI EN 12953). Le linee guida, costituiscono il documento UNI/PdR 55:2019 Linee guida per l'applicazione delle raccolte ISPEL VSR-VSG-M-S nell'ambito della Direttiva 2014/68/UE. La rilevanza del lavoro svolto, deriva dal fatto che le raccolte hanno continuato ad essere applicate come codici di progettazione e costruzione di nuove attrezzature marcate CE, in quanto, in base alla PED, i fabbricanti hanno la facoltà di far riferimento, oltre che alle norme armonizzate, anche a specifiche tecniche diverse (genericamente definite nella PED "altre specifiche tecniche"), a condizione che siano rispettati i RES previsti nell'Allegato I della Direttiva. Riguardo al tema in esame, però, bisogna notare che nelle raccolte ISPEL oggetto di revisione non vi sono specifici riferimenti relativi alle dimensioni minime dei passi d'uomo. Queste, infatti, sono riscontrabili solo nella Raccolta E, contenente le disposizioni tecniche applicative del D.M. 21 maggio 1974 relativo all'esercizio degli apparecchi a pressione ed all'esonero da alcune verifiche e prove stabilite per gli apparecchi medesimi. Al punto E.1.B.6. Art. 10 1. Aperture di ispezione degli apparecchi a pressione 1.1. definizioni 1.1.1. Passo d'uomo, infatti si legge che *Per passo d'uomo si intende una apertura ellittica o circolare praticata su una parete resistente di un apparecchio a pressione tale da consentire il facile ingresso di una persona all'interno dell'apparecchio stesso ed avente dimensioni non inferiori a 400 mm se a profilo ellittico ovvero a 400 mm di diametro se circolare. Le dimensioni sopra indicate possono essere ridotte a 280 X 380 mm se per aperture a profilo ellittico o 380 mm se circolari solo nel caso di particolari esigenze costruttive.*

In generale, l'accessibilità e l'ispezionabilità di un'attrezzatura a pressione sono definite dal fabbricante in sede di progettazione, in relazione all'uso previsto della stessa ed agli eventuali fenomeni indesiderati ragionevolmente prevedibili che possono derivare dall'esercizio (le attrezzature a pressione devono presentare aperture di dimensioni e in quantità adeguate a consentire l'accesso in fase di fabbricazione, di pulizia e d'ispezione periodica interna). Nella norma UNI EN 13445-5:2021 Recipienti a pressione non esposti a fiamma - Parte 5: Controlli e prove Annex C (normative) punto C.2.4, si definisce passo d'uomo (Manhole) un'apertura attraverso la quale una persona, senza portare con sé equipaggiamenti ausiliari, può entrare e uscire da un'attrezzatura a pressione. Le dimensioni del passo d'uomo non devono essere inferiori a 320 mm x 420 mm o avere un diametro interno di 420 mm. L'altezza del collare o dell'anello non dev'essere superiore a 150 mm, a meno che il diametro minimo sia superiore a 460 mm o almeno 460 mm x 410 mm ovale. Per quanto riguarda il numero di passi d'uomo, questi sono indicati nella tabella C.3-1 dove, in particolare, per apparecchiature con diametro interno maggiore di 1.200 mm è previsto un passo d'uomo o una apertura di soccorso (Rescue Hole⁵). Interessante notare che la richiesta del posizionamento di una apertura di soccorso è lasciata all'acquirente mentre, dove sono previste altre alternative, la scelta resta a discrezione del fabbricante.

Nel caso dei generatori di vapore a tubi da fumo, la norma EN 12953-3:2016 paragrafo 14 Access and Inspection Opening prevede che per le apparecchiature con diametro interno superiore a 1.400 mm sono da prevedersi un passo d'uomo e un passo di mano, mentre per diametri inferiori non è previsto il passo d'uomo. Per quanto riguarda le dimensioni, queste sono specificate al punto 14.2, Types and minimum dimension of access and inspection opening.

⁵ Si tratta di aperture che consentono l'ingresso e l'uscita di una persona equipaggiata con dispositivi di protezione e di salvataggio. La dimensione dev'essere di 600 mm di diametro. Se non è possibile, per ragioni progettuali, realizzare un'apertura da 600 mm, la dimensione dell'apertura di soccorso può essere ridotta a non meno di 500 mm prevedendo un'altezza del collare non superiore a 250 mm. In questo caso, gli equipaggiamenti speciali devono consentire un accesso sicuro all'interno dell'apparecchiatura.

UNI EN 12953-3:2016			
Diametro interno fasciame apparecchiatura		D ≥1400	800 ≤ Di < 1400
Passo d'uomo	I passi d'uomo devono essere di almeno 320 mm × 420 mm o avere un diametro interno di 420 mm. L'altezza del collare o dell'anello non deve essere maggiore di 300 mm. Se, in casi particolari, si utilizzano passi d'uomo di dimensioni 300 mm × 400 mm, devono essere soddisfatti i requisiti specificati nel prospetto della figura 3.	X	
Passo di testa	Le aperture che consentono l'introduzione della testa devono essere di almeno 220 mm × 320 mm o avere un diametro interno di 320 mm. L'altezza del collare o dell'anello non deve essere maggiore di 100 mm, o 120 mm se il collare o l'anello è conico	X	X
Passo di mano	Un'apertura che consenta l'introduzione di una mano per la pulizia deve essere di almeno 80 mm × 100 mm o avere un diametro interno di 100 mm. Un'apertura che consenta l'introduzione di una mano per l'ispezione deve essere di almeno 100 mm × 150 mm o avere un diametro interno di 120 mm. L'altezza del collare o dell'anello non deve essere maggiore di 65 mm, o 100 mm se il collare o l'anello è conico	X	X

Tabella 1

Come già detto, nella costruzione degli apparecchi in pressione, per ovvie esigenze di servizio, si rende necessario praticare aperture corrispondenti a bocchelli, passi d'uomo o di mano, attacchi per la strumentazione di sicurezza e controllo, etc. i quali determinano un indebolimento strutturale della membratura nella zona dove viene praticata l'apertura stessa. Tale indebolimento richiede spesso l'apporto di materiale di rinforzo attorno ai bocchelli (piastre saldate, tronchetti di spessore maggiorato, etc.); la quantità e la disposizione dei rinforzi, devono essere pensati con particolare attenzione, per evitare di disporli inutilmente o addirittura avere effetti contrari che possano indurre un innalzamento dei valori di sollecitazione locale. Introducendo un'apertura, s'interrompe la continuità del materiale e si determina un conseguente indebolimento del mantello con interruzione del flusso delle tensioni. Per questo è necessario compensare tale interruzione di continuità con altro materiale, sufficientemente vicino all'apertura da poter essere interessato dal flusso delle tensioni. Il materiale sostitutivo può essere fornito da un surplus di spessore del corpo cilindrico, rispetto al minimo richiesto, oppure da appositi rinforzi collocati nella zona dell'apertura che, peraltro, devono rispettare precisi vincoli:

- Limiti geometrici entro cui deve essere contenuto il materiale che può sostenere le tensioni;
- Area necessaria per la trasmissione delle tensioni nella zona dell'apertura;
- Area derivante dal materiale già disponibile, nello spessore del vessel e del rinforzo;
- Eventuali disposizioni di rinforzi aggiuntivi.

Aumentando le dimensioni dell'apertura, è necessario adottare delle adeguate soluzioni tecniche.

Esistono diversi modi per raggiungere i requisiti di compensazione:

- Aumentare spessore dell'anello del passo d'uomo;
- Aumentare lo spessore del fasciame cilindrico;
- Utilizzare piastre di rinforzo;
- Anello di rinforzo;
- Una combinazione dei metodi precedenti;

ognuno dei quali presenta vantaggi/svantaggi da un punto di vista tecnologico e, certamente, un incremento di costo dell'attrezzatura a pressione che dev'essere accettato dal mercato - nel suo complesso - e dai singoli committenti.

3. Il progetto PETROBOT

Al fine di realizzare delle ispezioni mediante modalità No-Man Entry, nel 2013 è stato avviato il progetto Europeo Petrobot, che puntava a sviluppare robot capaci di sostituire l'uomo nelle ispezioni degli apparecchi a pressione e delle cisterne di stoccaggio, mediante lo sviluppo di strumenti che sono già ampiamente utilizzati nell'industria petrolifera, gasiera e

petrolchimica⁶. In particolare, obiettivo dichiarato, era sviluppare tecniche di ispezione robotica sviluppando due nuove soluzioni: per l'ispezione interna off-line di Pressure Vessels (PVs) e ispezione in-line di Aboveground (or Atmospheric) Storage Tanks (ASTs), ovvero silos a pressione e cisterne di stoccaggio ampiamente utilizzati nell'industria petrolifera, gasiera e petrolchimica. I principali vantaggi previsti mediante l'utilizzo degli strumenti di ispezione robotica PETROBOT, includevano:

- Evitare o ridurre al minimo la necessità di ingresso umano e quindi aumentare la sicurezza;
- Ridurre al minimo e accorciare le interruzioni operative risultanti dalle ispezioni che a loro volta potrebbero ridurre il numero degli accessi e i tempi di indisponibilità delle attrezzature;
- Evitare o ridurre al minimo i rischi ambientali;
- Eliminare o ridurre dei costi associati all'apertura e pulizia;
- Raccogliere dati di ispezione adeguati che possano supportare importanti processi decisionali, come l'estensione degli intervalli di ispezione interna (Risk-Based Inspection).

Nel corso del progetto, avviato nel 2013 e conclusosi nel 2016, l'attenzione è stata rivolta verso due tipi principali di robot: il tipo Crawler e lo Snake-Arm. Per i robot d'ispezione nei PVs, sono stati sviluppati due diversi sistemi: uno con una piattaforma mobile di supporto in grado di supportare un carico utile maggiore (FAST) e uno più manovrabile con assi indipendenti BIKE. Tutti i robot realizzati nell'ambito del progetto PETROBOT sono stati testati fino al Technology Readiness Level (TRL) 6 e 7⁷. Tuttavia, per quanto ci risulta, ad oggi nessuno dei sistemi robotici sviluppati è stato ufficialmente adottato per le operazioni di verifica routinarie. Pertanto, si può dire che il percorso per lo sviluppo di sistemi robotici affidabili in grado di sostituire integralmente le attività umane nelle ispezioni all'interno è ancora lungo. In attesa che i robot diventino normali partner operativi in questo tipo di attività, tenuto anche conto degli accessi legati alle attività di manutenzione/riparazione, l'unica strada attualmente percorribile è dare una risposta tecnica che consenta di evitare, o almeno ridurre al minimo, la necessità di accesso all'interno delle attrezzature a pressione e, in ogni caso, di gestire correttamente gli accessi secondo modalità adeguate che eliminino o, quanto meno, riducano al minimo i rischi per gli operatori addetti.

4. La normativa nazionale per l'accesso nelle attrezzature a pressione

Nell'ambito della normativa nazionale, di là dell'ovvio riferimento alle attività regolamentate dal D.P.R. 177/2011, bisogna inoltre notare che il D.lgs. 81/08 all'art. 66 - Lavori in ambienti sospetti di inquinamento – prevede che: *È vietato consentire l'accesso dei lavoratori in pozzi neri, fogne, camini, fosse, gallerie e in generale in ambienti e recipienti, condutture, caldaie e simili, ove sia possibile il rilascio di gas deleteri, senza che sia stata previamente accertata l'assenza di pericolo per la vita e l'integrità fisica dei lavoratori medesimi, ovvero senza previo risanamento dell'atmosfera mediante ventilazione o altri mezzi idonei. Quando possa esservi dubbio sulla pericolosità dell'atmosfera, i lavoratori devono essere legati con cintura di sicurezza, vigilati per tutta la durata del lavoro e, ove occorra, forniti di apparecchi di*

⁶ L'obiettivo dichiarato del progetto era individuare strumenti d'ispezione specializzati in grado di consentire l'individuazione di eventuali danni semplificando le operazioni e consentendo anche una minore esposizione del personale a condizioni potenzialmente pericolose

⁷ Il termine Technology Readiness Level (acronimo TRL traducibile con Livello di Maturità Tecnologica, indica una metodologia per la valutazione del grado di maturità di una tecnologia). La scala di misura TRL, sviluppata originariamente dalla NASA nel 1974 e successivamente modificata, viene attualmente utilizzata da vari enti americani ed europei, ed è basata su una scala di valori da 1 a 9, dove 1 è il più basso (definizione dei principi base) e 9 il più alto (sistema già utilizzato in ambiente operativo). Basato sul Scala UE: TRL 6 - tecnologia dimostrata in un ambiente rilevante (ambiente industrialmente rilevante nel caso di tecnologie abilitanti chiave; TRL 7 - dimostrazione del prototipo di sistema in ambiente operativo

protezione. L'apertura di accesso a detti luoghi deve avere dimensioni tali da poter consentire l'agevole recupero di un lavoratore privo di sensi. Ovviamente quest'ultima prescrizione è, di fatto, di difficile applicazione considerato che fino all'entrata in vigore del D.lgs. 81/08, l'art. 235 del D.P.R. 547/55 prevedeva che i passi d'uomo dovevano avere dimensioni non inferiori a 30 cm per 40 cm o un diametro non inferiore a 40 cm e che, la maggior parte delle attrezzature a pressione e delle cisterne in uso, sono ancora oggi dotati di passo d'uomo avente le dimensioni indicate nella citata Raccolta E. Ma se questo è ovvio per le attrezzature già in esercizio perché, non si può prevedere una modifica per quelle in progettazione futura attraverso un aumento delle dimensioni minime previste dalle norme di progettazione? Infatti, a tale riguardo, rivestono fondamentale importanza le misure antropometriche degli addetti. Dimensioni che devono risultare compatibili con gli ambienti operativi (ad esempio le dimensioni passaggio accesso e il volume complessivo dell'ambiente operativo). Recenti studi indicano che, in Italia, la prevalenza di persone in sovrappeso e con obesità cresce al crescere dell'età raggiungendo il 46,1 per cento tra le persone di 18 anni e oltre, ovvero in piena fascia di occupabilità. Per questo considerato che, come già detto, non è possibile allargare le aperture di accesso, la selezione del personale destinato ad operare all'interno delle attrezzature a pressione è di particolare importanza ai fini del rispetto di quanto previsto dall'art. 66 del D.lgs. 81/08. Il datore di lavoro che prevede un ingresso all'interno di una attrezzatura a pressione, sia operando con propri dipendenti, sia affidando i lavori a terzi, deve garantire prima dell'accesso tutte le condizioni di sicurezza per gli operatori. Questo garantendo l'abitabilità (misurazione delle concentrazioni di eventuali inquinanti, verifica del livello di ossigeno ed esplosività, ventilazione adeguata, ecc.) e la corretta gestione delle attività, inclusa la gestione di un eventuale intervento di soccorso. Ma, ovviamente, non potrà fare nulla riguardo alle caratteristiche geometriche dell'apertura di accesso che resta quella progettuale, realizzata in sede di costruzione dell'apparecchio. Nel caso delle verifiche di primo impianto / riqualificazione periodica, ai sensi del Decreto Ministeriale n° 329 del 01/12/2004, dovrà mettere a disposizione del verificatore (di INAIL o ASL/ARPA o del Soggetto Abilitato) il *personale occorrente* sotto la vigilanza di un preposto e i *mezzi necessari per l'esecuzione delle operazioni stesse* (esclusi gli apparecchi di misurazione) e provvedere anche a *definire le procedure di salvataggio e di gestione di un'eventuale emergenza* che, il proprio personale, dovrà porre in atto in caso di necessità. Ovviamente tali procedure devono comprendere anche le modalità di estrazione dall'apparecchio dell'eventuale infortunato privo di sensi. Riepilogando, considerato che al momento, per poter svolgere attività di costruzione / manutenzione / riparazione o le verifiche periodiche, non è possibile evitare l'accesso di personale all'interno delle attrezzature a pressione, resta da definire quali siano le necessarie precauzioni a carico del datore di lavoro / utilizzatore dell'attrezzatura a pressione. Cominciamo ricordando che il D.P.R. 177/2011 precisa che qualsiasi attività lavorativa nel settore degli ambienti sospetti di inquinamento o confinati, può essere svolta unicamente da imprese o lavoratori autonomi qualificati in ragione del possesso dei requisiti elencati all'art. 2 c1 lettere dalla a) alla h) e che, inoltre, il mancato rispetto delle previsioni di cui al regolamento determina il venir meno della qualificazione necessaria per operare, direttamente o indirettamente, nel settore degli ambienti sospetti di inquinamento o confinati. Al di là delle previsioni sulla informazione/formazione e addestramento di cui alle lettere d, e, f dell'art. 2 c1, un aspetto di particolare interesse e solitamente poco evidenziato, riguarda il ruolo del Medico Competente (MC), sia in fase di verifica dell'idoneità alla mansione, sia nella definizione del protocollo di sorveglianza sanitaria per i lavoratori addetti tenendo conto di alcuni parametri specifici tra cui l'età anagrafica, l'assenza di patologie che possano avere conseguenze sulla capacità di tollerare lo sforzo fisico, e altro. Una proposta in tal senso è stata pubblicata nel 2015 sul Giornale Italiano di Medicina del Lavoro GIMLE. Non va inoltre dimenticato il suo importante ruolo consulenziale: egli deve, infatti, collaborare col datore di

lavoro e il servizio di prevenzione e protezione alla valutazione dei rischi (art. 25 D.lgs. 81/08 e s.m.i.), a cui segue la redazione di adeguate procedure operative (che devono anche includere la definizione dei cicli lavorativi – periodi lavoro / pausa ammissibili, ovvero definire i tempi massimi per la rotazione nel turno fra i lavoratori esposti, la cui frequenza e durata dev'essere valutata in rapporto alla temperatura ambiente, alla gravosità del lavoro che si sta svolgendo e all'utilizzo del vestiario) e per la gestione di una eventuale situazione di emergenza. Tra le fasi previste nell'operatività in ambienti sospetti d'inquinamento o confinati, per l'analisi della corretta procedura di salvataggio, l'apporto del Medico Competente è fondamentale, a cominciare dalla definizione del livello di preparazione che devono acquisire, per il primo soccorso, gli addetti all'emergenza. Il D.M. 388/2003, che prevede il coinvolgimento prioritario del MC, ha introdotto le modalità di somministrazione dei corsi di formazione per i lavoratori incaricati delle attività di primo soccorso in situazioni di emergenza e, pertanto, è importante il coinvolgimento prioritario del medico nella definizione del programma formativo per le aziende che operano in ambienti classificati ai sensi del D.P.R. 177/2011. Infatti, il personale della squadra di soccorso, che si trova nella necessità di portare assistenza all'interno di una attrezzatura a pressione, deve tenere conto sia delle limitate dimensioni del passo d'uomo, sia delle vie di accesso non ordinarie (accesso da scale alla marinara e ballatoi, ecc.) e limitate, dovendo inoltre utilizzare attrezzature specifiche, per il cui corretto utilizzo il personale dev'essere adeguatamente formato. La collaborazione tra datore di lavoro, servizio di prevenzione e protezione e Medico Competente, quindi, deve portare alla definizione della sequenza delle operazioni di soccorso e nella modalità di impiego di tali attrezzature, che devono essere utilizzate in conformità a quanto previsto dal fabbricante nel manuale di uso e manutenzione. Questo approccio, è evidente soprattutto nel caso delle operazioni di "non-entry rescue". Questo sistema di salvataggio, che non prevede l'esposizione a rischio di altri lavoratori componenti la squadra di salvataggio, è molto utile nel caso in cui l'infortunato è collaborante giacché agevola notevolmente le operazioni di uscita autonoma e/o assistita. Ha però delle specifiche limitazioni e/o controindicazioni: ad esempio nel caso in cui sia previsto l'impiego di un sistema di protezione delle vie respiratorie tipo air-line (per il quale non si può trascurare di considerare la possibilità che il cavo di sollevamento s'intrecci con la linea dell'aria respirabile) o nel caso in cui vi sia presenza di traumi importanti (trauma cranico o a carico della colonna vertebrale) che prevedono la stabilizzazione delle condizioni dell'infortunato nel luogo in cui si trova, prima di predisporre una qualsiasi manovra di spostamento. La procedura di soccorso, pertanto, non può essere generica poiché deve tenere conto, in base alle specifiche caratteristiche del luogo in cui si sta svolgendo l'attività e alle relative condizioni al contorno, dell'insieme delle operazioni che il personale addetto al primo soccorso – quindi non sanitario - può mettere in atto in attesa dell'arrivo di personale più qualificato. La decisione se sia più opportuna l'estricazione immediata dell'infortunato (metodica Scoop and Run) oppure l'assistenza sul posto in attesa dei soccorsi (metodica Stay and Play), dev'essere oggetto di attenta valutazione previo l'indispensabile confronto con il Medico Competente. In generale, le operazioni di soccorso devono prevedere un'adeguata formazione degli addetti della squadra di primo soccorso sulla base delle specifiche indicazioni operative elaborate dal Datore di lavoro con la collaborazione del RSPP aziendale e del Medico Competente e, in caso di cantiere temporaneo, con il coinvolgimento del Coordinatore per la sicurezza.

5. Conclusioni

Il tema del rischio connesso all'accesso all'interno di apparecchi a pressione per eseguire attività di costruzione, manutenzione e/o di verifica periodica, alla luce dell'applicazione di quanto previsto dal D.P.R. 177/2011, richiede un'adeguata valutazione e tutti i soggetti previsti nell'ambito del D.Lgs. 81/08 e s.m.i., devono collaborare al fine di identificare le

modalità operative più idonee a garantire la tutela della salute e sicurezza degli operatori addetti. Per le attività di costruzione / riparazione / manutenzione delle attrezzature a pressione, al momento, non sono disponibili modalità operative che possano garantire attività No-Man-Entry. Per le attività di riqualificazione periodica, le apparecchiature a pressione installate in Italia sono periodicamente soggette a verifica ispettiva e visita interna da parte di ispettori di INAIL, ASL, ARPA o Soggetti abilitati. Questo significa che sia gli Ispettori, sia il personale dell'utilizzatore presso il quale l'apparecchiatura è installata (bisogna ricordare che ai sensi dell'art. 5.3.1 del D.M. 10/04/2011 per le operazioni di verifica il datore di lavoro deve mettere a disposizione del verificatore il personale occorrente e i mezzi necessari per l'esecuzione delle operazioni stesse disponendo inoltre la vigilanza di un preposto), sono esposti a rischio durante l'attività dovendo necessariamente operare in ambienti sospetti di inquinamento o confinati. Considerato che anche i progetti di elevata automazione non hanno consentito di sviluppare sistemi in grado di sostituire integralmente le attività umane nelle ispezioni all'interno e che, in ogni caso, sono sempre da considerare le altre attività di cui sopra, resta la necessità di gestire – per le attrezzature installate – le modalità di accesso. Per quelle di futura costruzione - considerato che la scelta della dimensione degli accessi è presa durante la progettazione / realizzazione dell'apparecchiatura – è necessario operare una forte azione di sensibilizzazione presso gli Enti normatori, a livello europeo/internazionale, affinché procedano a una revisione dei codici di progettazione incrementando le misure minime dei passi d'uomo.

6. Bibliografia

- [1] Decreto del Presidente della Repubblica 14 settembre 2011, n. 177 Regolamento recante norme per la qualificazione delle imprese e dei lavoratori autonomi operanti in ambienti sospetti di inquinamento o confinanti, a norma dell'articolo 6, comma 8, lettera g), del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81 (G.U. n. 260 dell'8 novembre 2011)
- [2] Decreto 11 aprile 2011 Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo.
- [3] Direttiva 2014/68/UE PED del Parlamento Europeo e del Consiglio del 15 maggio 2014 concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione. (GU L 189 del 27.6.2014)
- [4] Decreto Ministeriale n° 329 del 01/12/2004 Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93
- [5] Decreto del Ministro per il lavoro e la previdenza sociale 21 novembre 1972 - Raccolte ISPESL VSR, VSG, M, S specifiche tecniche applicative del D.M. 21 Novembre 1972 "Norme per la costruzione degli apparecchi a pressione"
- [6] UNI 11325-12:2018 Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 12: Verifiche periodiche delle attrezzature e degli insiemi a pressione
- [7] ISPESL Dipartimento Omologazione e Certificazione – Dipartimento Tecnologie di Sicurezza "L'esame visivo su attrezzature a pressione ai fini delle verifiche di costruzione e di esercizio" 2006
- [8] INAIL Esame visivo e spessimetria procedura sperimentale di verifica delle attrezzature a pressione Disegno di linee guida e strumenti operativi 2012

- [9] L. Incerti Università degli studi di Modena e Reggio Emilia Facoltà di ingegneria “Enzo Ferrari” - Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica 270/04 “Tesi di Laurea “Applicazione del D.P.R. 177/2011 a un caso particolare: l’accesso negli apparecchi a pressione (generatore di vapore a tubi di fumo) - Relatore: Prof. R. Melloni - Correlatori: A. P. Bacchetta, G. A. Zuccarello
- [10] I. Belianin – Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria della Sicurezza nell’Industria di Processo Politecnico di Milano – Tesi di Laurea “La sicurezza delle attività in Spazi Confinati: costruzione, manutenzione e verifica dei Generatori di vapore a tubi da fumo” – Relatore Prof. G. Nano Correlatore: Prof.^{ac.} A.P. Bacchetta
- [11] I. Dangaj – Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria della Sicurezza nell’Industria di Processo Politecnico di Milano – Tesi di Laurea “La gestione delle situazioni di emergenza negli spazi confinati: il caso della manutenzione e verifica all’interno di Generatori di vapore a tubi d’acqua” – Relatore Prof. G. Nano Correlatore: Prof.^{ac.} A. P. Bacchetta
- [12] R. Schubert "Rescue from vessels and confined spaces: an underestimated problem", KANBrief 2013. P.13
- [13] Dipl. -Ing. Werner Sterk “Rescue from vessels begins with safe design - Part I” Industrial Rescue Journal 2020 n. 3, 23-27
- [14] Dipl. -Ing. Werner Sterk Rescue from vessels begins with safe design - Part II Industrial Rescue Journal 2020 n. 4, 08-11
- [15] Consorzio PETROBOT “Use cases for inspection robots opening up the oil-, gas- and petrochemical markets” - PROJECT FINAL REPORT 2016
- [16] A.P. Bacchetta “Applicazione del D.P.R. 177/2011 a un caso particolare: l’accesso negli apparecchi a pressione (generatore di vapore a tubi di fumo) Parte I”
Il Notiziario sulla Sicurezza n. 5 2013, 12-15
- [17] A.P. Bacchetta “Applicazione del D.P.R. 177/2011 a un caso particolare: l’accesso negli apparecchi a pressione (generatore di vapore a tubi di fumo) Parte II”,
Il Notiziario sulla Sicurezza n. 6 2013, 10-15
- [18] A.P. Bacchetta “Applicazione del D.P.R. 177/2011 a un caso particolare: l’accesso negli apparecchi a pressione (generatore di vapore a tubi di fumo) Parte III”,
Il Notiziario sulla Sicurezza n. 1 2014, 12-15
- [19] A.P. Bacchetta “Il MEDICO COMPETENTE e il DPR 177/2011” Il Notiziario sulla Sicurezza n. 6 2018, 29-43
- [20] G.A. Zuccarello, L. Di Donato, R. Melloni, A.P. Bacchetta La verifica d'integrità mediante ispezione visiva delle membrature interne di un generatore di vapore a tubi di fumo e applicazione del D.P.R. 177/2011
- [21] A.P. Bacchetta, R. Melloni, F. Collino, A. Berri, G. Taino, E. Oddone, Marcello Imbriani - “La sorveglianza sanitaria per i lavoratori addetti ad attività in “ambienti sospetti di inquinamento” o confinati - G Ital Med Lav Erg 2015; 37:2, 90-100
- [22] Studio Istat realizzato per il secondo Italian Obesity Barometer Report presentato il 6 ottobre 2020 in occasione del 2nd Italian Obesity summit – Changing Obesity™ meeting. Organizzato dall’Italian Barometer Diabetes Observatory (IBDO) con l’Intergruppo parlamentare “Obesità e Diabete” e OPEN Italia – Obesity Policy Engagement Network.

Progetto di sviluppo di tool aggiuntivi per il miglioramento e la centralizzazione dell'Asset Integrity

A. Mura¹, A. Rubinato¹, F. Gambato¹, M. De Martin¹, C. Vianello²

¹ Antea S.r.l.

² Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Padova

Sommario

Obiettivo del progetto è la realizzazione di alcuni tool di calcolo utili a fare analisi specifiche di corrosione (Corrosion Module), Fitness For Service (FFS) e RCM.

Tali moduli verranno integrati nella piattaforma Antea, software di gestione dati ispettivi (IDMS) già esistente, nella quale esiste già un modulo per effettuare analisi di Risk Based Inspection (sia qualitative, sia semi-quantitative e sia quantitative secondo norme API 580/581).

I vari tool si ispireranno a standard internazionali (API 510, API 570, API 579, ISO 14224). Il fine è quello di supportare gli analisti fornendo una base da cui attingere dati costruttivi, operativi e ispettivi informatizzati (modello 3D, laser scanning, P&ID) e un ambiente per la registrazione delle analisi fatte in modo integrato e coordinato.

Avere validi supporti di analisi collegati ad un database unico per la gestione dell'Asset Integrity permette di ridurre al minimo la ricerca dei dati (dati di progetto, dati ispettivi, documentazione, risultati di analisi di rischio storiche) e concentrare gli sforzi degli analisti sulle questioni di carattere prettamente tecniche, condividendo anche i risultati utili tra un modulo e un altro.

Ulteriore vantaggio consiste nel rendere i risultati di queste analisi immediatamente disponibili, organizzate e gestibili nella piattaforma principale per avere sempre più fattori a supporto delle fasi decisionali durante il ciclo di vita delle attrezzature di impianto.

1. La piattaforma attuale

L'attuale piattaforma, denominata "Antea" o "Antea Platform", è un software che ha come obiettivo la gestione dell'integrità di tutte le attrezzature presenti in un impianto.

Sviluppata su tecnologia web è in grado di integrare la gestione delle attività ispettive e manutentive secondo valutazioni basate sul rischio (RBI) con grafiche interattive di navigazione 2D per la documentazione d'impianto e 3D per la consultazione del digital twin dell'impianto attraverso modelli 3D e acquisizioni da laser scanning.

La struttura del software, come rappresentato nello schema di Fig. 1, è composta da una sezione centrale di Asset Management e da moduli di dettaglio che permettono la gestione specifica di determinate tipologie di attrezzatura (Apparecchiature a pressione, tubazioni, attrezzature elettriche e strumentali, pipeline, strutture e altro).

Tale struttura assicura una gestione centralizzata ed integrata dei dati provenienti da fonti diverse, ma anche una gestione dettagliata di funzionalità peculiari a certe categorie di attrezzature.

A tale scopo sono stati inseriti moduli di calcolo specifici che aiutano gli analisti ad effettuare valutazioni tecniche sulla base di dati reali ed aggiornati.

Per quanto riguarda le attrezzature a pressione, i moduli di calcolo, valutazione e monitoraggio attualmente presenti e all'avanguardia sono il modulo "Antea RBI" e "Antea IOW" descritti di seguito.

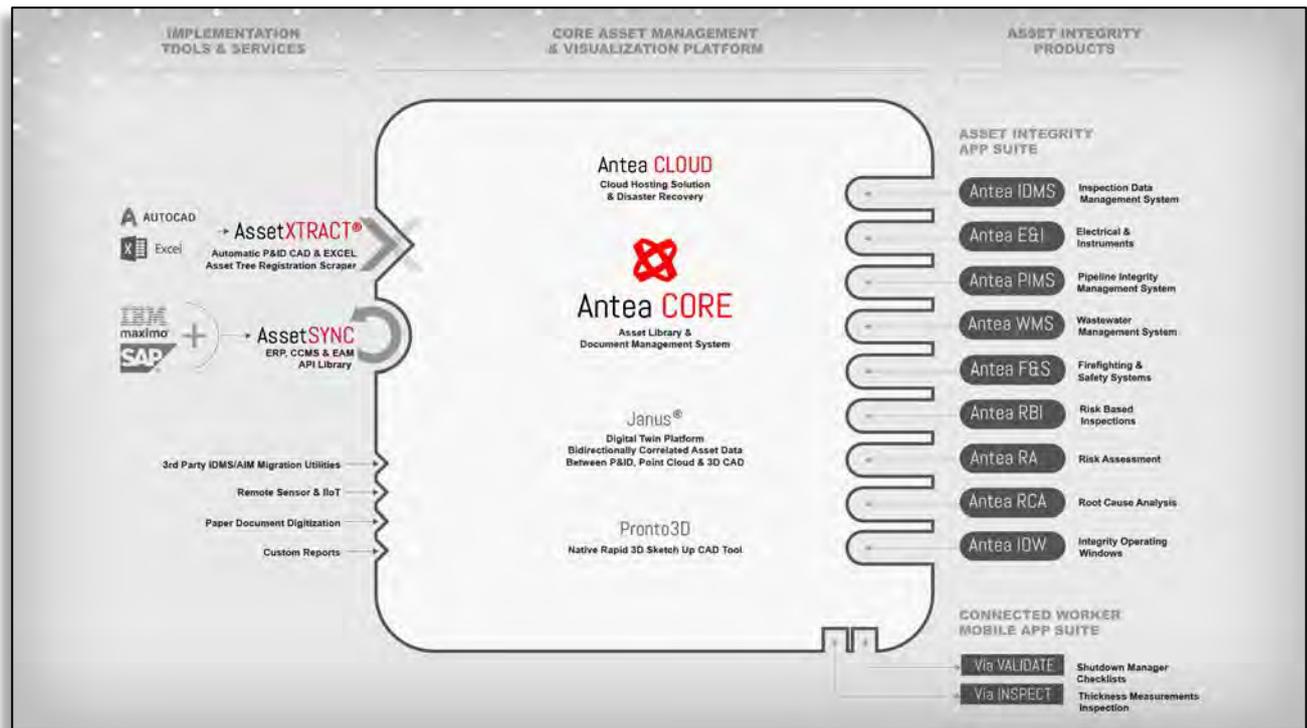


Figura 1. Struttura della Piattaforma Antea

2.1 Antea RBI

Il modulo RBI (Risk Based Inspection) permette l'esecuzione di analisi di rischio qualitative, semiquantitative e quantitative per valutare la probabilità e la conseguenza dei guasti d'impianto. Fornisce come output matrici di rischio interattive e piani ispettivi dettagliati per gestire al meglio le attrezzature.

Gli algoritmi sono stati implementati seguendo gli standard più attuali nel settore (API 580/API 581, CEN/TC 319/WG 12, DNV-RP-G101)

2.2 Antea IOW

Sulla base dei range di azione dei meccanismi di danno individuati dal modulo RBI per ciascuna attrezzatura, il modulo IOW (Integrity Operating Windows) consente di configurare dei parametri di monitoraggio con limiti superiori e inferiori.

Tali parametri possono ricevere input da dati da sensori utilizzando il plug-in dei dati real time.

Se il comportamento supera i limiti, viene registrato lo stato di anomalia e viene creata una notifica automatica.

I sensori possono essere posizionati su Mappe 2D, Modelli 3D o Nuvole di punti e lo stato della misurazione essere evidenziato da differenze cromatiche.

2. Il Corrosion Module

Uno dei principali meccanismi di danno, nonché uno dei fenomeni maggiormente monitorati nell'industria di processo è la corrosione.

La misura di spessore con l'utilizzo di ultrasuoni è di sicuro il controllo non distruttivo storicamente maggiormente utilizzato per rilevare tale fenomeno. Tuttavia, nella pratica, non sempre si riescono ad ottenere dati affidabili per i seguenti motivi:

- Difficoltà a ripetere la misura nello stesso punto e nelle stesse condizioni (temperatura, accoppiante, altro);

- Imperfetta taratura degli strumenti;
- Bassa sensibilità della strumentazione;
- Inadeguata copertura statistica per quanto riguarda il numero di punti rilevati;
- Imprecisioni nella rilevazione (dovute a vari fattori tra cui la necessità di effettuare controlli in tempi brevi);

Alcune azioni per risolvere queste problematiche sono l'installazione di sonde a ultrasuoni fisse, l'utilizzo di sonde a scansione, il confronto con i dati di monitoraggio della corrosione (corrosion coupon o sonde a resistenza elettrica), il confronto con modelli di corrosione e l'utilizzo di procedure adeguate nella rilevazione dei dati.

2.1 Il modulo attuale

Nella piattaforma Antea è già possibile gestire i dati di ispezione in maniera puntuale. Come già detto, nel software esiste un modellatore 3D che permette di posizionare e visualizzare le finestre di ispezione o CML (corrosion monitoring location) in modo preciso.

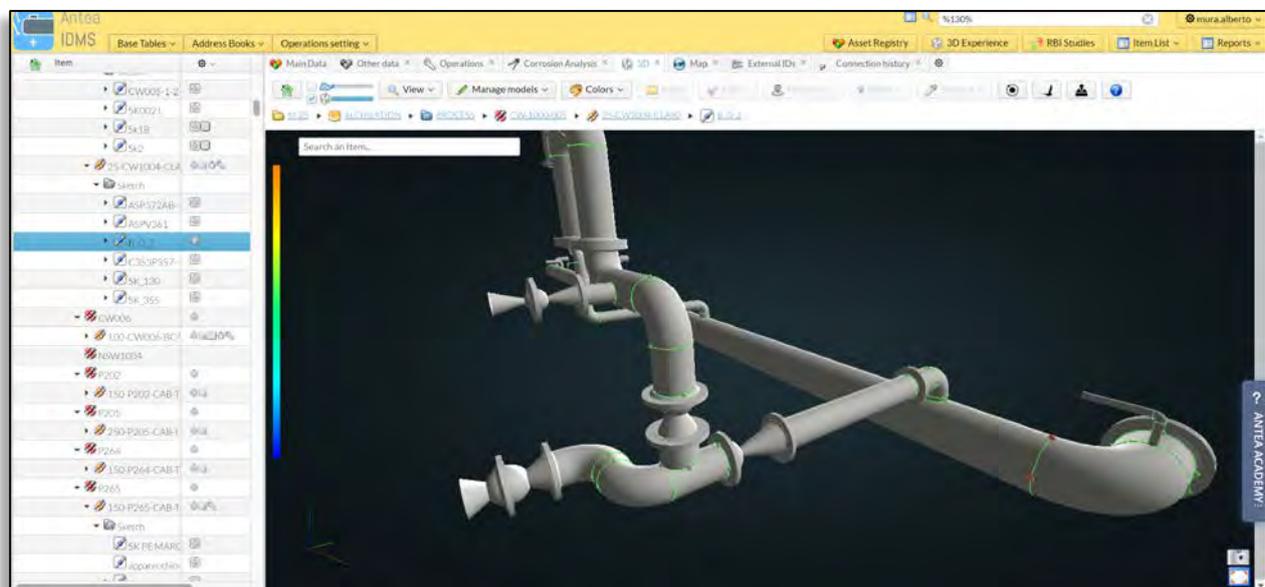


Figura 2. Rappresentazione di una tubazione con relative CML in Antea

In queste finestre, che possono essere di diverse forme (puntuali, circolari o rettangolari), vengono caricati i valori di spessore ricavati in campo, in maniera discontinua cioè caricando i dati direttamente su software dopo ispezione o con template excel, oppure grazie ad un'interfaccia diretta con un'applicazione mobile che permette l'inserimento dei dati direttamente dal campo.

Il tool effettua analisi statistiche andando a leggere i valori delle passate ispezioni, sia a livello di singola CML e sia a livello di ciascun elemento costruttivo (mantello, tubo, bocchello, fondo e così via).

Sarà disponibile il calcolo di indici importanti come il corrosion rate (CR), l'expiry date (ED) e la vita residua (RL) comparando i valori rilevati con i dati tecnici dell'elemento su cui sono posizionate. Questi dati tecnici sono: lo spessore nominale (N.Thk), il Corrosion Allowance (CA), il valore della tolleranza negativa (Toll.) e lo spessore minimo (L.Thk.), calcolato come segue:

$$L.Thk = N.Thk - CA - Toll \quad (1)$$

In alternativa è possibile forzare lo spessore minimo se proveniente da un ricalcolo o riclassificazione.

Un esempio di elaborazione dei dati spessimetrici è visualizzabile in fig. 3.

Come accennato precedentemente, selezionando lo sheet “Flash Report by TMLs” è possibile valutare i valori spessimetrici per finestra d’ispezione, mentre lo sheet “Flash Report by Component” permette di valutare i dati per elemento (tubo, curva, tee o altro).

Risulta possibile considerare il calcolo degli indici secondo i valori medi, secondo i minimi oppure secondo un metodo ibrido che valuta il corrosion rate secondo valori medi e la residual life partendo dal valore di minimo (min./med.).

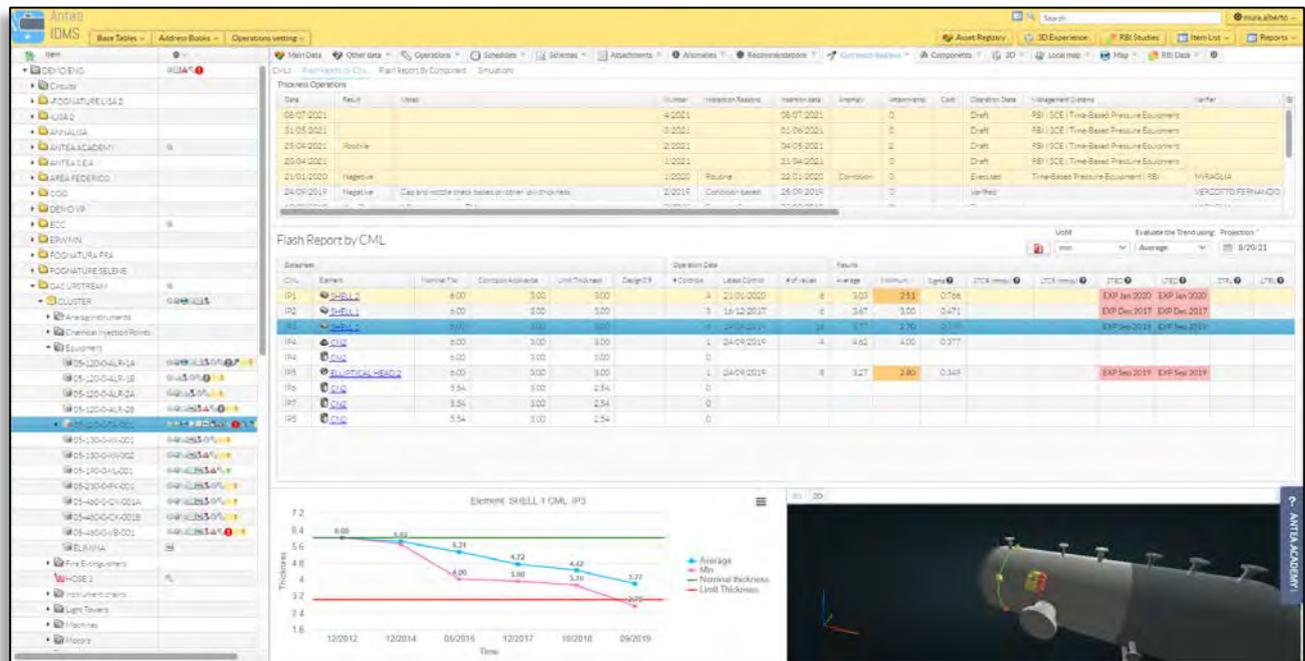


Figura 3. Analisi di corrosione nella piattaforma attuale

Le ultime colonne a destra rappresentano:

- STCR (short term corrosion rate), calcolato secondo norma API 570.
- LTCR (long term corrosion rate), calcolato secondo norma API 570.
- STED (short term expiry date).
- LTED (long term expiry date).
- STRL (short term residual life).
- LTRL (long term residual life).

È disponibile anche il grafico del trend di corrosione sui valori medi e minimi con evidenziato lo spessore nominale e il valore limite.

Il grafico riporta il tempo in ascissa e lo spessore in ordinata.

Il trend di corrosione medio è rappresentato in blu, quello minimo in rosa, mentre la linea verde rappresenta lo spessore nominale e quella rossa il limite.

2.1 Le nuove implementazioni

L’obiettivo delle implementazioni proposte è quello di fornire all’utente un simulatore che gli permetta di destreggiarsi con i vari dati a disposizione per ottenere valori rappresentativi. Infatti, spesso vengono richiesti dati a livello di singolo componente o addirittura a livello di attrezzatura. Un esempio è il corrosion rate nelle analisi RBI, ma anche le varie stime di vita residua richieste da stakeholders di diverso tipo. Non sempre scegliere

i valori massimi o minimi rilevati come valori rappresentativi è la scelta corretta ed avere un quadro complessivo della corrosione sull'attrezzatura interessata aiuta a fare le assunzioni migliori e a prevenire scelte errate nelle situazioni con molti dati.

Da considerare anche che non è banale la scelta di valori massimi e minimi in quanto, nel caso di corrosione localizzata, una maggior corrosione in un componente a maggior spessore può essere meno critica di minor corrosione in un componente a spessore minore. Per questo si è pensato anche alla possibilità di valutare la corrosione considerando uno spessore minimo di tipo calcolato, attingendo dal modulo per il Fitness For Service descritto nel capitolo seguente.

Infine, si è deciso di fornire supporto anche per quelle attrezzature sprovviste di dati ispettivi, o perché non ancora oggetto di analisi o perché non è tecnicamente possibile effettuare ispezioni. Per questi casi l'unica soluzione è l'utilizzo di stime di progetto o modelli di corrosione teorici su dati di progetto.

Di seguito i dettagli di implementazione per ciascun parametro:

- Limit Thickness (L.Thk). Lo spessore limite da utilizzare per ciascun componente potrà essere calcolato da valori di progetto secondo la formula (1). In alternativa si potrà inserire un valore manuale definito dall'utente che ha eseguito eventuali stime. In tal caso verrà registrata una procedura di "riclassificazione" nel software per tracciare chi la ha eseguita, quando e gli eventuali dettagli in forma di note. Ultima possibilità sarà il calcolo dello spessore minimo da modulo Fitness For Service al quale ci si potrà collegare direttamente.
- Reference Date ($Date_{ref}$). Si tratta di una data di riferimento a cui associare il valore di spessore rilevato ("Thickness at Reference Date" che verrà definito dopo). Potrà essere inserita manualmente dall'utente, oppure sarà possibile scegliere la data dell'ultima ispezione spessimetrica sul componente, oppure potrà essere scelta la data installazione del componente. Tale scelta dipenderà dai dati a disposizione e dal tipo di simulazione che si vuole fare.
- Thickness at Reference Date (Thk_{ref}). Si tratta dello spessore considerato per i calcoli alla data di riferimento appena identificata. Potrà essere inserito manualmente, scelto in base agli ultimi valori rilevati secondo valori medi o minimi, oppure potrà corrispondere allo spessore nominale (N.Thk). Ovviamente la scelta è legata alla scelta della Reference Date.
- Corrosion Rate (CR). Il corrosion rate della simulazione può essere scelto tra i valori di Short Term Corrosion rate (STCR) o Long Term Corrosion Rate (LTCR) calcolati dai controlli. In alternativa potrà essere utilizzato quello stimato dai dati di progetto secondo la seguente formula:

$$LTRL = \frac{CA}{Design\ Life} \quad (2)$$

Essendo il CA il sovraspessore di corrosione definito precedentemente e *Design Life* gli anni di vita dell'attrezzatura stimati in fase di progetto.

Ulteriore possibilità è la stima del corrosion rate secondo modelli teorici di corrosione. In questo caso, in base al tipo di corrosione identificato (ad esempio corrosione da ammine, H₂S corrosion o altro), verranno richiesti dati di processo specifici per l'individuazione di un corrosion rate ipotetico.

I valori calcolati saranno:

- Expiry Date Stimata (data di fine vita stimata), ottenuta secondo la formula seguente:

$$ED = \frac{Date_{ref} + (Thk_{ref} - L.Thk)}{CR} \quad (3)$$

- Residual Life Stimata (stima della vita residua), ottenuta secondo la formula seguente:

$$RL = ED - CD \quad (4)$$

Essendo CD la data corrente (data attualizzata).

Le singole simulazioni saranno registrate assieme ai dati di autore e data. I dati provenienti dall'ultima analisi potranno essere utilizzati negli altri moduli (RBI, FFS ed eventuali altri).

3. Il modulo per il Fitness For Service

Il Fitness For Service (FFS) è un insieme di attività atte a dimostrare l'integrità strutturale di un componente (o di una parte dell'impianto) anche se in presenza di evidenti difetti.

Il FFS di un'apparecchiatura avviene attraverso specifiche campagne di valutazione che possono variare per tipologia: tubazione, pressure vessel, valvola, sistema di sicurezza, ecc. Da un punto di vista pratico, il vantaggio economico derivante dal mantenere in esercizio componenti che hanno raggiunto, e/o superato, la vita utile ipotizzata in origine è notevole. Tuttavia, occorre stabilire, con un buon grado di attendibilità, quanto sarà il nuovo tempo limite per non correre il rischio di incorrere in guasti imprevedibili ben più gravi da compromettere il risparmio conseguito oppure da causare la perdita di vite umane nei casi più estremi.

Anche in caso di evidenti difetti (cricche, corrosione, ecc.) non significa necessariamente che questi pregiudichino l'idoneità al servizio del componente. Per questa ragione si conducono accurate campagne al fine di verificarne idoneità all'impiego. Infatti, la maggior parte delle apparecchiature può essere idonea e mantenuta in servizio, nonostante piccoli difetti e/o danneggiamenti, evitando quindi costi di manutenzione o sostituzione. Nei costi, oltre al nuovo componente, occorre considerare anche il fermo-impianto con la mancata produzione che spesso superano di gran lunga il valore del componente stesso.

3.1 Dettagli Tecnici

Per ciascuna attrezzatura dovrà essere possibile creare dei componenti standard (previsti dalla norma) ed eventualmente collegarli ad alcuni componenti del modello 3D. Questi componenti saranno l'oggetto degli studi di tipo FFS.

La norma di riferimento sarà la API 579-1/ASME FFS-1.

I moduli da prevedere saranno dodici secondo quanto previsto, indicati nella figura 4. Tuttavia, è richiesta la predisposizione per poter aggiungere moduli di valutazione derivanti da altri standard o da know-how di clienti e partner.

Una volta che l'utente avrà individuato un danno su una apparecchiatura (una cricca, un assottigliamento di spessore o altro), potrà creare (o associare in caso di presenza di modello 3D o analisi RBI) un nuovo componente su cui creare una nuova sessione di analisi Fitness For Service.

Ciascuna sessione di analisi, al contrario di quanto avviene per le analisi RBI, potrà contemplare un singolo danneggiamento (o difetto) che verrà definito dall'utente e di conseguenza non è richiesto che i moduli di calcolo di FFS interagiscano tra loro, ad eccezione per alcuni dati di input comuni.

Per questo l'implementazione può avvenire per step successivi.

Tuttavia, è bene prevedere che i dati comuni riguardanti l'attrezzatura (ad esempio condizioni di esercizio o di progetto) o riguardanti il suo stato (dati da ispezione) vengano prelevati direttamente dai datasheet e dallo storico ispettivo del software.

Flaw or Damage Mechanism	Part	Overview
Brittle Fracture	Part 3	Assessment procedures are provided for evaluating the resistance to brittle fracture of existing carbon and low alloy steel pressure vessels, piping, and storage tanks. Criteria are provided to evaluate normal operating, start-up, upset, and shut-down conditions.
General Metal Loss	Part 4	Assessment procedures are provided to evaluate general corrosion. Thickness data used for the assessment can be either point thickness readings or detailed thickness profiles. A methodology is provided to utilize the assessment procedures of Part 5 when the thickness data indicates that the metal loss can be treated as localized.
Local Metal Loss	Part 5	Assessment techniques are provided to evaluate single and networks of Local Thin Areas and groove-like flaws in pressurized components. Detailed thickness profiles are required for the assessment. The assessment procedures can also be utilized to evaluate individual pits or blisters as provided for in Part 6 and Part 7 , respectively.
Pitting Corrosion	Part 6	Assessment procedures are provided to evaluate widely scattered pitting, localized pitting, pitting which occurs within a region of local metal loss, and a region of localized metal loss located within a region of widely scattered pitting. The assessment procedures can also be utilized to evaluate a network of closely spaced blisters as provided for in Part 7 .
Blisters and HIC/SOHIC Damage	Part 7	Assessment procedures are provided to evaluate isolated and networks of blisters and HIC/SOHIC Damage. The assessment guidelines include provisions for blisters and HIC/SOHIC damage located at weld joints and structural discontinuities such as shell transitions, stiffening rings, and nozzles.
Weld Misalignment and Shell Distortions	Part 8	Assessment procedures are provided to evaluate stresses resulting from geometric discontinuities in shell type structures including weld misalignment and shell distortions (e.g. out-of-roundness and bulges).
Crack-Like Flaws	Part 9	Assessment procedures are provided to evaluate crack-like flaws. Solutions for stress intensity factors and reference stress (limit load) are included in Annex 9B and Annex 9C , respectively. Methods to evaluate residual stress as required by the assessment procedure are described in Annex 9D . Material properties required for the assessment are provided in Annex 9E . Recommendations for evaluating crack growth including environmental concerns are also covered.
High Temperature Operation and Creep	Part 10	Assessment procedures are provided to determine the remaining life of a component operating in the creep regime. Material properties required for the assessment are provided in Annex 10B . Analysis methods for evaluating crack growth including environmental concerns are also covered.
Fire Damage	Part 11	Assessment procedures are provided to evaluate equipment subject to fire damage. A methodology is provided to rank and screen components for evaluation based on the heat exposure experienced during the fire. The assessment procedures of the other Parts of this publication are utilized to evaluate component damage.
Dent, Gouge, and Dent Gouge Combinations	Part 12	Assessment techniques are provided to evaluate dent, gouge, and dent gouge combinations in components.
Laminations	Part 13	Assessment procedures are provided to evaluate laminations. The assessment guidelines include provisions for laminations located at weld joints and structural discontinuities such as shell transitions, stiffening rings, and nozzles.
Fatigue	Part 14	Assessment procedures are provided to evaluate pressurized components subject to cyclic loading. The assessment procedures include specific requirements for welded joints.

Figura 4. Moduli previsti dalla norma API 579-1/ASME FFS-1

La norma API 579 prevede tre livelli di indagine, ma il progetto, per i moduli in cui è tecnicamente possibile, contemplerà solamente i primi due livelli, dato che il terzo richiede tecniche più avanzate come il calcolo ad elementi finiti.

Il risultato di ciascuna analisi FFS potrà essere uno tra i seguenti:

- Accettabilità dell'attrezzatura per l'esercizio;
- Inaccettabilità per l'esercizio secondo Livello 1, conseguente suggerimento ad effettuare l'analisi di livello 2;
- Inaccettabilità per l'esercizio secondo Livello 2, conseguente suggerimento ad effettuare l'analisi di livello 3;

In genere i dati richiesti dalle analisi di livello 1 sono un sottoinsieme di quelli richieste da quelle di Livello 2, quindi bisognerà prevedere che il calcolo agisca in cascata, attingendo da un gruppo di dati comuni.

4. Il modulo RCM

RCM (Reliability Centered Maintenance) è una strategia di manutenzione che permette di ottimizzare i piani manutentivi applicativi a specifici asset. Il piano manutentivo è ottimizzato al fine di concentrare gli sforzi sugli asset più critici, ed evitare rotture o diminuzione di performance degli asset principali.

L'analisi RCM deve essere condotta da un gruppo di lavoro multiruolo che copra la conoscenza dello specifico asset in analisi, i meccanismi di degradazione a cui è sottoposto,

le conseguenze che una rottura possono causare (sicurezza, danni economici, danni ambientali, danno di immagine della società, ecc.).

Per sua natura l'RCM richiede che siano raccolte un gran numero di informazioni, dati e documentazione da persone e ambiti differenti. Tutte le informazioni devono essere dettagliatamente salvate e raccolte in un unico ambiente centralizzato in modo che siano accessibili a tutto il gruppo di lavoro in qualunque momento. Modifiche e revisioni devono essere possibili a qualunque livello sempre tenendo traccia degli aggiornamenti.

Tenendo conto dell'elevato quantitativo di informazioni che devono essere raccolte, un ambiente completamente centralizzato dove queste possono essere consultate fornisce uno strumento efficace ad evitare il più possibile perdite di dati e può costituire un notevole risparmio di tempo.

Gli obiettivi del tool RCM che Antea si propone di creare sono essenzialmente due:

- Creare un ambiente totalmente adibito all'asset Integrity che unisca diverse funzionalità e informazioni in modo che possano essere messe al servizio dell'analisi RCM. Dati ispettivi, documentazione tecnica, analisi RBI (Risk Based Inspection), analisi FFS (Fitness for service) ma anche modelli 3D degli asset, laser scanning, dati in tempo reale di sonde e sensoristica saranno immediatamente disponibili e visualizzabili dal gruppo di lavoro.

- Il tool RCM guiderà e sarà al servizio del gruppo di lavoro per salvare tutte le informazioni principali e renderle disponibili in qualunque momento. Il tool sarà adattabile tramite personalizzazioni che potranno essere condotte per ogni analisi RCM.

4.1 Le fasi dell'analisi RCM

Un'analisi RCM normalmente si compone di sette fasi, il tool andrà a gestire e supporterà il gruppo di lavoro in tutte queste fasi:

1. Selezione del sistema e dei limiti operativi. È la prima fase in cui si deve valutare quali parti di impianto e quali asset devono essere analizzati. Questa prima fase è importante per definire quali siano gli asset più critici valutando, ad esempio, la storia ispettiva passata o le passate analisi RBI.
2. Definizione delle funzioni
3. Identificazione dei functional failure (FF). Comprendere e considerare quali tipi di avaria possano avvenire nell'asset considerato.
4. Identificazione dei failure mode (FM). Comprendere e considerare in che modo il guasto possa avvenire.
5. Identificazione delle conseguenze in caso di failure. Per ogni failure va determinato il tipo di conseguenza e quanto critica possa essere.
6. Stesura dei piani manutentivi. Per ogni failure va determinato quale attività manutentive e con che frequenza queste possano evitare o sopperire ad una eventuale failure.
7. Documentazione finale, report ed eventuale revisione dei dati, degli asset considerati e dei FF e FM identificati.

4.2 Integrazione Asset Integrity – RCM

Le prime fasi dell'analisi RCM richiedono di selezionare quale sistema debba essere studiato identificandone tutte le proprietà: condizioni di processo, storia ispettiva, fenomeni corrosivi, posizione geografica nell'impianto e altro ancora.

L'integrazione in un unico sistema e in un unico database permetterà velocemente di avere accesso a tutte queste informazioni e permette la selezione degli item da studiare attraverso l'utilizzo di disegni di processo (P&ID, PFD, ecc.)

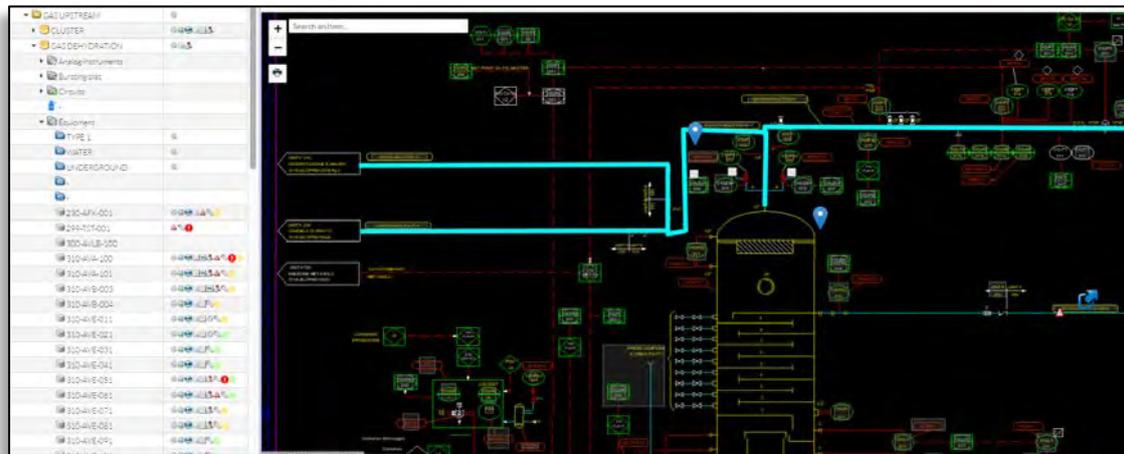


Figura 5. Navigazione e selezione asset attraverso P&ID digitalizzato

E permetterà di visualizzare il modello 3D evidenziando, ad esempio, quali sono gli item critici secondo l'ultima analisi RBI condotta. Questo permette di facilitare l'identificazione del sistema e degli asset da considerare ma può anche fornire indicazioni sulla criticità di conseguenze in caso da failure (danni alle apparecchiature vicine, fermo di impianto).

4.3 Identificazione dei functional failure e dei failure mode

Una lista standard di functional failure e di failure mode ricavate dalla UNI EN ISO 14224 sarà disponibile per essere utilizzata in qualsiasi analisi RCM. La lista potrà ovviamente essere ampliata e modificata per adattarsi al meglio all'impianto oggetto dell'analisi RCM. Alcune funzionalità potranno aiutare nel capire le interconnessioni tra gli item principali, connessione che potranno essere visualizzate graficamente. Alcuni tipi di connessione che potranno essere visualizzate e definite sono: causa-effetto, protezione, flusso di fluido, connessione elettrica, ecc.

4.4 Piano di manutenzione

Una volta che tutti i functional failures e i failure mode sono classificati il piano manutentivo potrà essere elaborato tenendo conto della natura degli asset e della criticità dei Failures identificati.

Il piano manutentivo potrà essere elaborato in maniera personalizzata creando nuove tipologie di attività o utilizzando quelle già esistenti nel sistema. Le attività potranno essere impostate con una frequenza di qualsiasi tipo o senza frequenza se trattasi di azione correttiva. I piani manutentivi potranno essere aggiornati e rielaborati in qualsiasi momento. Il piano manutentivo potrà essere confrontato con i piani già esistenti in modo da verificarne le differenze e valutare costi ed efficienza.

FF Code	Failure mode			CURRENT MAINTENANCE		MAINTENANCE STRATEGY PROPOSAL				
	Code	Description	Sever.	Frequency	Current Plan	Freq.	Strategy	Proposed Action	Comments	
CONJUNTO BRAZO OESTE EXTRACTOR SUR RUEDA MOLDEO 1										
EQUIPO 06. ARMAZON EXTRACTOR TINA S. (2)										
06B	06b	Worn counterweights	H	Dayly	Check condition of nails and counterweights in tub N and S arms	New	Inspection CBM	Reliability analysis of element (Weibull)	Analyse reliability vs maintenance execution (Responsible xxxxx , expected date)	
				Weekly	Check condition of nails and counterweights in tub N and S arms	New	Inspection CBM	Reliability analysis of element (Weibull)	Analyse reliability vs maintenance execution (Responsible xxxxx , expected date)	
				Biennial	Change for new	New	Inspection CBM	Reliability analysis of element (Weibull)	Analyse reliability vs maintenance execution (Responsible xxxxx , expected date)	
EQUIPO 07. PLACA BASE ACCIONAMIENTO BRAZO OESTE										
07B	07b	Proportional valve stuck	H	Dayly	Check encoders (alignment, coupling, etc.)	Dayly	Inspection	Include task in current plan	Include the task specifically in the preventive plan	
	07c	Defective electrical connectors of proportional valve	M	Dayly	Check encoders (alignment, coupling, etc.)	Dayly	Inspection	Include task in current plan	Include the task specifically in the preventive plan	
07C	07d	Defective electrical connectors of solenoid valve	M	Dayly	Check encoders (alignment, coupling, etc.)	Dayly	Inspection	Include task in current plan	Include the task specifically in the preventive plan	
	07e	Defective solenoid valve	M	Dayly	Check encoders (alignment, coupling, etc.)	Dayly	Inspection	Include task in current plan	Include the task specifically in the preventive plan	
EQUIPO 08. CTO MOTORREDUCTOR ACC BRAZO SUROESTE										

Figura 6. Confronto tra piano manutentivo attuale e proposto

Bibliografia

- [1] American Petroleum Institute, API 510, Pressure Vessel Inspection Code, Edizione 3, Maggio 2014
- [2] American Petroleum Institute, API 570, Piping Inspection Code, Edizione 4, Febbraio 2016
- [3] American Petroleum Institute, API 579-1/ASME FFS-1, Fitness-For-Service, Edizione 3, Giugno 2016
- [4] International Organization for Standardization, ISO 14224 Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment, Edizione 3, Ottobre 2016
- [5] American Petroleum Institute, API Recommended Practice 580, Risk-based Inspection, Edizione 3, Febbraio 2016
- [6] American Petroleum Institute, API Recommended Practice 581, Risk-based Inspection Methodology, Edizione 3, Aprile 2016
- [7] Det Norske Veritas, Recommended Practice DNV-RP-G101, Risk Based Inspection of offshore topsides static mechanical equipment, Ottobre 2010
- [8] CEN/TC 319/WG 12 - Risk based inspection framework (RBIF) - Documento in inchiesta pubblica

Radiografia digitale applicata al controllo degli spessori di tubazioni

F. Taurasi¹, C. Monserrato²

¹ Inail - Uot di Campobasso

² ENI Viggiano

Sommario

Con l'espressione radiografia digitale si indica la tecnica di acquisizione dell'immagine radiografica che, in sostituzione della pellicola radiografica, utilizza hardware e software in grado anche di archiviare e modificarne le stesse immagini. L'obiettivo del presente lavoro è finalizzato a verificare la corretta acquisizione dei rilievi spessimetrici su tubazioni di processo coibentate o protette da tubazioni di diametro maggiore, in acciaio al carbonio di diametro 6" e 8". Il fluido d'esercizio delle tubazioni non costituisce, nel caso in esame, ulteriore fattore di attenuazione della radiazione ionizzante. Ai punti 1, 2, 3 e 4 viene rappresentata la tecnica di esecuzione e valutazione dei risultati ottenuti in laboratorio.

1. Metodo

Per la qualifica della procedura sono stati utilizzati blocchi campione ricavati da tronchetti di tubo con le caratteristiche impiantistiche, geometriche da verificare:

- DN 6" x spessore nominale 3,4 mm;
- DN 8" x spessore nominale 6,35 mm.

Il materiale costituente tali "tronchetti di tubo" è acciaio austenitico tipo 316L, lo stesso delle tubazioni sulle quali sono state effettuate le misure. Sui suddetti sono state eseguite lavorazioni meccaniche mediante tornitura, sia sulle superfici esterne che interne, tali da ottenere una serie opportuna di riduzioni di spessore. Le riduzioni di spessore ottenute sono state rilevate mediante misurazioni con strumento ad ultrasuoni digitale e confermate con calibro cinquantalesimale a nonio. Per verificare l'esito del controllo nelle condizioni di applicazione reale, le esposizioni radiografiche sono state effettuate dopo avere posto i tubi campione all'interno di tubi camicia costituiti da acciaio austenitico:

- DN 8" x spessore nominale 6,35 mm;
- DN 10" x spessore nominale 6,35 mm.

L'esito del controllo è considerato affidabile se la definizione dell'immagine radiografica ottenuta è tale da permettere di distinguere chiaramente i due profili delle superfici interna ed esterna della sezione del tubo.

Come sorgente di radiazione ionizzante è stato utilizzato un apparecchio con Iridio 192 (Ir-192), sorgente (raggi γ) sigillata in un involucro inattivo che presenta una resistenza sufficiente per evitare, in condizioni normali di impiego, dispersione di materie radioattive superiore ai valori stabiliti dalle norme di buona tecnica applicabili.

Le esposizioni radiografiche sono state effettuate da operatori in possesso di certificato di 2° livello secondo UNI EN ISO 9712:2012. Con la radiografia digitale l'immagine viene immagazzinata su schermi sensibili ai fosfori, su un pannello cosparso di grani di fosforo sensibili alle radiazioni (Plate), e il trasferimento delle esposizioni radiografiche dal supporto sensibile ai fosfori al sistema computerizzato è stato ottenuto tramite scanner laser dedicato, e successivamente, trasformata in immagine digitale; lo scanner procede infine alla cancellazione dell'informazione contenuta sul pannello e questo risulta così utilizzabile per numerose esposizioni e non per una sola come accade per la pellicola convenzionale. La coppia plate – scanner rappresenta quanto nella tradizionale radiografia a film viene identificato con l'espressione "sistema pellicola". Come indicatore della qualità di immagine è stato utilizzato un indicatore a doppio filo (IQI) costituito da una serie di 13

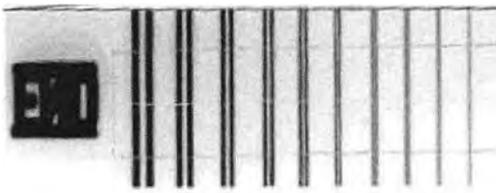


Fig.1

coppie di fili (da 1D a 13D) poste all'interno di un supporto trasparente di plastica rigida (fig.1), rispondente alla ISO 19232-5 e EN 462-5. Per la valutazione di perdita di definizione dell'immagine, la "non nitidezza totale" dell'immagine, in base al numero del primo elemento non risolto, ovvero in base alla prima coppia di fili non percepibili in modo

distinto, questo ha avuto anche la funzione di blocchetto di paragone per la conferma delle misure delle parti in esame.

Gli spessori dei tubi campione in corrispondenza delle varie riduzioni artificiali create, mediante lavorazione meccanica, sono stati misurati tramite l'apposita funzione di analisi basata sul gradiente dell'intensità dell'energia di esposizione acquisita dallo schermo ai fosfori, e completata con l'hardware e il pacchetto software necessari per supportare, elaborare e gestire le immagini secondo le modalità indicate dal costruttore della strumentazione.

2. Tecnica esecutiva

Per le riprese rivolte alla misura degli spessori, è stata effettuata un'esposizione in ogni tratto d'interesse utilizzando la tecnica tangenziale (Tangential improved TB). Nel caso di esposizione di un'intera circonferenza, sono state eseguite come minimo n. 4 esposizioni a 90°. La distanza dalla sorgente allo schermo ai fosfori (SDD), secondo quanto definito dalla figura 2 (in funzione dei diametri in esame) riferite a tubazioni coibentate o protette da "tubo camicia" risulta essere come dalla formula seguente:

$$SDD > d \cdot PDD / 0,3 \quad (\text{valori in mm})$$

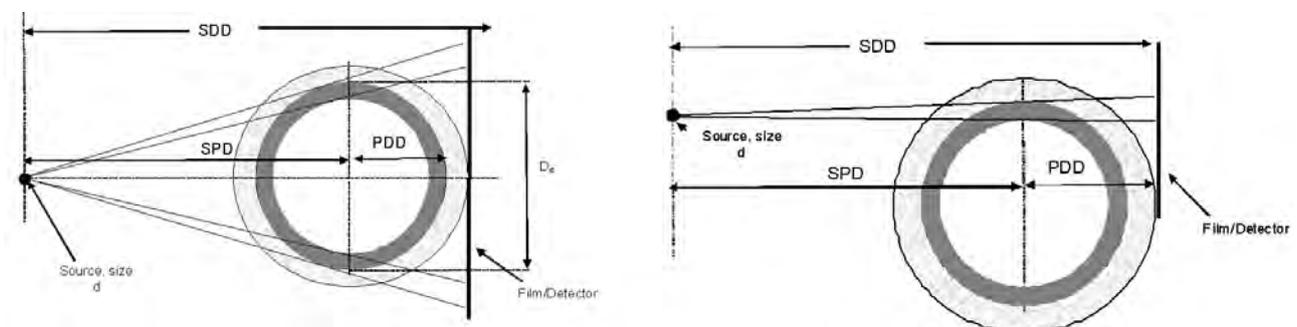


Fig. 2

In caso di difficoltà di posizionamento della sorgente radioattiva alla distanza calcolata come sopra, per cause dovute alla geometria del componente in esame o alla mancanza di spazio libero intorno alla tubazione, la distanza SDD potrà essere adeguatamente ridotta purché l'immagine radiografica computerizzata consenta di ottenere la definizione necessaria per eseguire la misura dello spessore di parete. Per la produzione dell'immagine digitale è stata utilizzata (al posto della tradizionale pellicola) schermi ai fosfori rispondenti alla classificazione riportata nella Norma UNI EN 14784-1. Il tipo di schermo ai fosfori utilizzato, ha caratteristiche tali da consentire di raggiungere i livelli di qualità prescritti dalla Norma di riferimento (par. 7.1 della UNI EN 16407-1 per le misure di spessore). Effettuata l'esposizione radiografica, lo schermo ai fosfori è utilizzato per cedere l'immagine, attraverso un lettore digitale, al sistema operativo della radiografia computerizzata che consente la visualizzazione sullo schermo del computer dell'immagine ripresa e quindi della sua lettura e registrazione permanente. L'immagine dei componenti

radiografati oltre ad essere presentata sullo schermo del computer può essere registrata ed essere copiata e conservata su supporti digitali (DVD, CD, penne USB).

Come in (fig. 3), gli schermi ai fosfori presentati nella fase 1 e i componenti della fase 2



Fig. 3

(scanner) e schermo ad alta definizione (3), compreso il sistema operativo con programmi informatici dedicati, possono essere anche di marca e tipo diversi, purché l'immagine finale prodotta rispetti i requisiti di qualità descritti nella presente procedura.

Gli schermi ai fosfori utilizzati devono essere privi di difetti che possano mascherare l'immagine (durante la fase di elaborazione al computer) della discontinuità nell'area utile del pezzo controllato.

Valutazione della qualità d'immagine nel caso di tecnica per la misura di spessore.

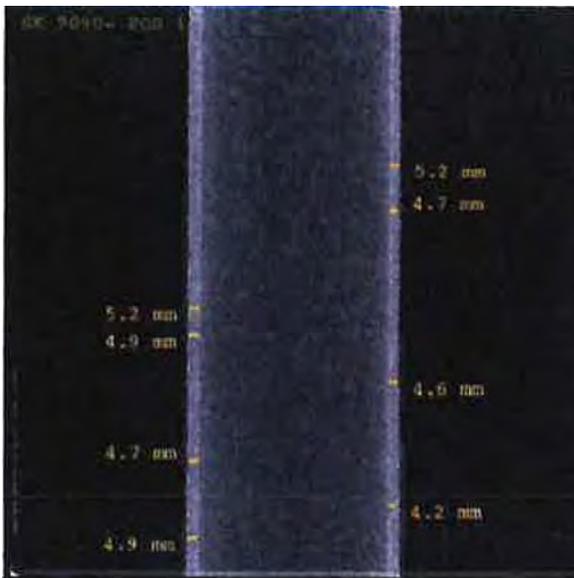


Fig. 4

Con una risoluzione d'immagine ottimale abbiamo oltre al controllo delle saldature anche la valutazione e misura dello spessore delle tubazioni coibentate o incamiciate *attraverso sistemi di analisi e comparazione della densità radiografica dell'immagine*. La valutazione dei campi di densità è stata eseguita attraverso un sistema diretto e facilmente applicabile di taratura su spessori noti ed effettuata con scalimetri aventi spessori vicini a quelli in esame. Tramite l'opzione di taratura con densità, possiamo misurare la densità della radiografia effettuata e lo spessore del materiale. Con questa opzione il programma valuta una scala di grigi con la quale è in grado di riconoscere, quindi, anche lo spessore dell'oggetto ove non è possibile misurarlo manualmente.

Altro sistema di taratura consigliato dal produttore del sistema digitale è quello di utilizzare direttamente il penetrametro a doppio filo con riferimento allo spessore del filo più piccolo visibile che verrà collocato adiacente al profilo del tubo, posizione che costituisce la peggiore condizione di risoluzione. In caso di difficoltà di posizionamento per motivi d'impianto, il penetrametro può essere collocato a diretto contatto del contenitore del pannello ai fosfori.

Inoltre è stato utilizzato anche un comparatore dimensionale posto tangenzialmente alla tubazione come da par. 6.8 della Norma UNI EN 16407-1.

Con il sistema del penetrametro a doppio filo si ottiene una calibrazione sensibile ed accurata in quanto il software specialistico utilizzato analizza e confronta lo spessore noto del filo del penetrametro con la differenza di densità tra i due fili vicini passando ad un livello superiore di sensibilità di taratura.

Eseguita la taratura, quando si sposta il puntatore del mouse sull'immagine, la barra di stato si aggiorna con lo spessore di calibrazione (o densità). La calibrazione viene memorizzata nei metadati dell'immagine e può essere richiamata anche successivamente per altre applicazioni.

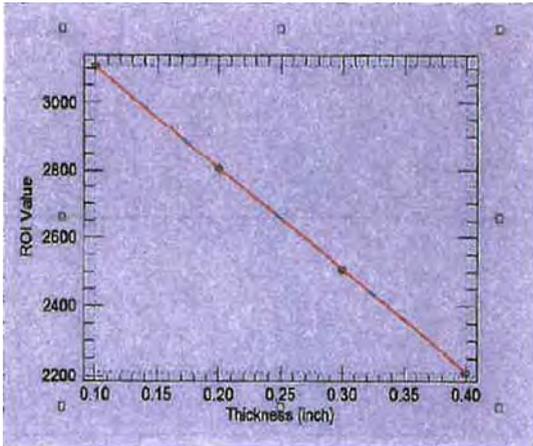


Fig. 5

Il sistema consente la verifica grafica della taratura eseguita: come rappresentato nella figura 5, con calibrazioni accurate, i punti di riferimento sono allineati e costituiscono la linea dritta (regolare) visualizzata in rosso.

Con calibrazioni accurate, la linea sarà dritta e i punti di calibrazione cadranno sulla linea.

Gli strumenti per la visualizzazione d'immagine permettono di migliorare digitalmente le immagini visualizzate, contribuendo all'interpretazione senza alterare i dati originali d'immagine.

L'identificazione delle immagini radiografiche può essere costituita da numero e/o lettere in sequenza, di materiale ad alto numero atomico (es. piombo), con spessore sufficiente per un buon

contrasto radiografico. Salvo diverse prescrizioni, sulle immagini radiografiche dovranno comparire almeno:

- numero della commessa;
- numero di matricola e/o di disegno del pezzo radiografato;
- numero di identificazione della zona radiografata e data di esecuzione delle riprese.

3. Caratteristiche dell'esame radiografico

La qualità di un'immagine digitale rappresenta uno dei fattori più importanti dei controlli non distruttivi nel settore industriale, ed è stata stabilita in accordo a quanto previsto dalla Norma UNI EN 16407-1, par.7.1. La visibilità di importanti dettagli dipende da diversi parametri sia soggettivi che oggettivi che non differiscono di molto da quelli per le immagini analogiche, anche se nelle immagini digitali i suddetti assumono maggiore importanza proprio perché gli algoritmi di elaborazione ed i sistemi elettronici risultano molto più sensibili al degrado delle immagini rispetto all'occhio umano. Inoltre, esistono una serie di fattori che intervengono provocando un peggioramento della qualità dell'immagine che agiscono in maniera del tutto casuale e possono essere solo parzialmente controllati per ridurre i loro effetti, ma mai eliminati completamente. Essi intervengono producendo rumore, cioè inducendo un degrado o una perdita di una parte delle informazioni contenute nel segnale. Il rumore è una componente intrinseca, anche se indesiderata, dei processi di acquisizione e trattamento delle immagini analogiche e digitali, ma in ogni caso, riveste sicuramente una maggiore importanza nei sistemi digitali, dove i processi elettronici di formazione delle immagini sono particolarmente gravati da diversi effetti di "rumore". Gli aspetti più importanti della qualità di immagine sono:

- il contrasto
- il rumore (e quindi il rapporto segnale/rumore)
- la risoluzione spaziale (nitidezza).

Il penetrametro a doppio filo (secondo ISO 19232-5) è stato posizionato adiacente al tubo in esame e posto sullo schermo ai fosfori. Sull'immagine ottenuta è stata misurata la risoluzione spaziale (SRb) definita come la capacità del sistema di distinguere due linee fra loro vicine, utilizzando le apposite funzioni del software.

Per le tecniche migliorate di classe TB secondo la UNI EN 16407-1 si ottiene un valore SNRn di almeno 100 in una zona non saturata dell'immagine al di fuori del tubo, oppure, se disponibile nell'immagine la zona di mezzera del tubo, si ottiene un valore SNRn di almeno 80 in tale zona dell'immagine.

Il monitor utilizzato per la visualizzazione delle immagini radiografiche rispetta i requisiti stabiliti al par. 8.7 della UNI EN 16407-1.

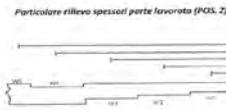
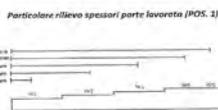
4. Criteri di valutazione

L'interpretazione e la lettura delle immagini, della grandezza reale della parte radiografata, è stata fatta esclusivamente a schermo tramite monitor dedicato ad alta definizione. Gli spessori dei tubi campione, in corrispondenza delle varie riduzioni artificiali create mediante lavorazione meccanica, sono stati misurati tramite l'apposita funzione di analisi basata sul gradiente dell'intensità dell'energia di esposizione acquisita dallo schermo ai fosfori. Eventuali ingrandimenti o riduzioni dell'immagine radiografica non sono ammessi in quanto non consentono una visione diretta. Non è consentita nessuna manipolazione o alterazione dell'immagine radiografica così come acquisita direttamente dal lettore digitale. I risultati di prova ottenuti con metodo radiografico, secondo la tecnica digitale oggetto del presente lavoro, sono stati poi confrontati con le misure ottenute con il metodo ultrasonoro convenzionale degli spessori di parete dei tubi campione, in corrispondenza delle singole riduzioni di spessore ottenute mediante lavorazione alla macchina utensile. Questo metodo può essere applicato anche per altre configurazioni diverse da quelle riportate nel presente lavoro.

Esempio applicativo dell'output della procedura operativa finalizzata al controllo di spessori di tubi mediante radiografia digitale

OGGETTO IN ESAME: Prova su tubo campione 6" processo - 8" camicia					
Disegno:		Specifiche di Controllo:		Materiale: S.S. 316L	
Personale:			Temperatura:		
Condizioni oggetto in esame			Spessori in mm		
Condizioni Superficiali	Tratt. Termico	Temp. Sup.	Condizioni esercitate	Nom./val.	Sovrappessore
Spazzolate	//			3.40	3.00
Apparecchio US:			Sonde focalizzate:		
Tipo	Nr. Matricola	Scad. Calibr.	Tipo	Matricola	Dimensioni
					Accoppiam.

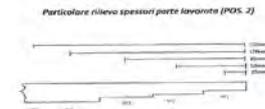
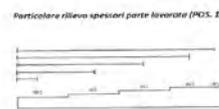
POS.	ID	Nom.	SPESORE								Misure di Spessore (mm)									
			CA	ADP	W1	W2	W3	W4	W5											
1	TUBO	6"	3.40	0.0	1.60	1.6	2.2	2.7	3.2	3.5										
2	TUBO	6"	3.40	0.0	0.90	2.5	3.0	3.3	2.7	3.4										



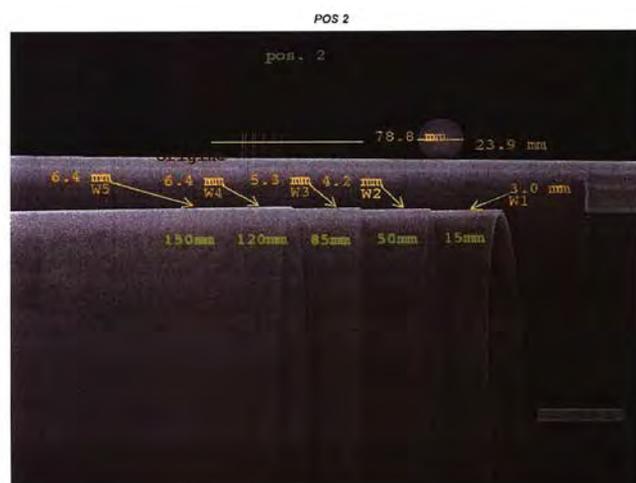
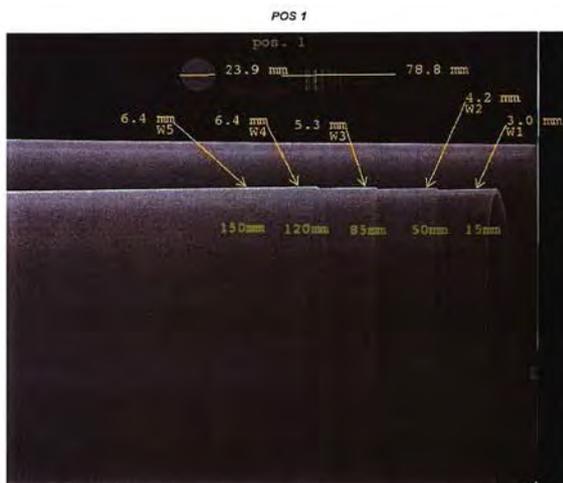
Prova su tubo campione 6" processo - 8" camicia

OGGETTO IN ESAME: Prova su tubo campione 8" processo - 10" camicia					
Disegno:		Specifiche di Controllo:		Materiale: S.S. 316L	
Personale:			Temperatura:		
Condizioni oggetto in esame			Spessori in mm		
Condizioni Superficiali	Tratt. Termico	Temp. Sup.	Condizioni esercitate	Nom./val.	Sovrappessore
Spazzolate	//			6.35	0.20
Apparecchio US:			Sonde focalizzate:		
Tipo	Nr. Matricola	Scad. Calibr.	Tipo	Matricola	Dimensioni
					Accoppiam.

POS.	ID	Nom.	SPESORE								Misure di Spessore (mm)									
			CA	ADP	W1	W2	W3	W4	W5											
1	TUBO	8"	6.35	0.0	3.25	3.0	4.2	5.3	6.4	6.4										
2	TUBO	8"	6.35	0.0	3.25	3.0	4.1	5.2	6.5	8.4										



Prova su tubo campione 8" processo - 10" camicia



5. Risultati e conclusioni

Le prove sono state finalizzate alla verifica della possibilità di rilevare la presenza di riduzioni di spessore su tubi di diametro DN 6" e 8" che nel contesto del presente lavoro sono stati denominati "campione" in quanto su di essi sono state praticate graduali variazioni di spessore (mediante tornitura sulle superfici interne ed esterne) e valutate mediante radiografia computerizzata. Per simulare l'impiego finale in campo della tecnica radiografica, i suddetti tubi campione sono stati inseriti all'interno di un tubo camicia di diametro DN 8"-10", rispettivamente. A seguito delle prove condotte, si rileva che la tecnica provata sulle configurazioni tubo-camicia di cui alla tabella 1 seguente, può essere ritenuta efficace rispetto a quanto prefissato.

Tubo campione	Tubo camicia	Valutazione finale
DN 6" x 3,40 mm, nominale	DN 8" x 6,35 mm nominale	La tecnica applicata ha consentito di valutare le condizioni delle superfici interne ed esterne della tubazione di processo e di misurarne lo spessore con errore accettabile entro un margine di 0,1 mm
DN 8" x 6,35 mm nominale	DN 10" x 6,35 mm nominale	La tecnica applicata ha consentito di valutare le condizioni delle superfici interne ed esterne della tubazione di processo e di misurarne lo spessore con errore accettabile entro un margine di 0,1 mm

Tabella 1

Le immagini radiografiche registrate possono essere ritenute adeguate allo scopo previsto del controllo in quanto consentono di risolvere il profilo delle superfici interne ed esterne del tubo campione in corrispondenza di ciascuna riduzione praticata mediante tornitura. Il confronto tra i valori degli spessori misurati tramite radiografia digitale e quelli misurati nelle stesse sezioni radiografiche mediante ultrasuoni e/o calibro cinquantalesimale a nonio mostrano differenze inferiori a 0,1 mm. Le suddette differenze trovate sono senz'altro da ritenersi accettabili nel contesto in cui è previsto l'impiego della tecnica d'esame considerata.

6. Bibliografia

- [1] UNI EN ISO 17636-1
- [2] UNI EN 14784-1
- [3] EN 16407-1
- [4] UNI EN ISO 9712
- [5] UNI EN ISO 19232-5

Procedura per il controllo di serbatoi per GPL di capacità maggiore di 13 m³ con tecnica basata sul metodo di Emissione Acustica ai fini della verifica di integrità

G. Augugliaro¹, F. Brini¹, P. Lenzuni², C. Mennuti¹, P. Quaresima¹, A. Tonti¹

¹ Inail - Dit

² Inail – Uot di Firenze

Abstract

L'art. 64-bis della Legge 11 settembre 2020 n. 120, ha stabilito che le disposizioni di cui al D.M. 23 settembre 2004 e al D.D. del 17 gennaio 2005 si applicano anche ai recipienti a pressione fissi interrati, tumulati e fuori terra con capacità complessiva superiore a 13 m³ (cd. "grandi serbatoi"), e ha demandato all'Inail la definizione della procedura operativa nonché dei requisiti dei soggetti abilitati per l'effettuazione delle verifiche di integrità di questi serbatoi con il sistema di controllo basato sulla tecnica dell'emissione acustica (EA) ai fini della verifica di integrità.

Vale la pena ricordare che Il D.M. 23 settembre 2004 stabilisce che le verifiche decennali sui serbatoi di GPL di capacità non superiore a 13 m³ (cd. "piccoli serbatoi") possono essere effettuate, in alternativa ai metodi tradizionali, con il metodo di controllo basato sull'Emissione Acustica di cui allo standard europeo EN 12818 (oggi UNI EN 12817) e secondo la procedura elaborata dall' ex Ispesl che costituisce, sia pure con le successive revisioni, l'allegato 2 del DD 17 gennaio 2005. Peraltro, al 30 giugno 2021, la procedura per i "piccoli serbatoi" è stata praticata su oltre 270.000 installazioni ed è oggetto di relazione trimestrale sistematicamente trasmessa alla competente Direzione generale del Ministero dello Sviluppo Economico.

Il documento presentato in questo lavoro, al quale ci riferiremo nel seguito per semplicità come "procedura", estende pertanto l'applicazione metodo di controllo basato sull'EA alla verifica di tutte le tipologie di grandi serbatoi per GPL, non solo per quelli interrati.

1. Introduzione

È opportuno evidenziare che, in analogia a quanto già disciplinato per i piccoli serbatoi, l'applicazione di una specifica tecnica basata sul metodo EA per la verifica d'integrità dei grandi serbatoi per GPL è uno strumento reso disponibile tra quelli già regolamentati, e la cui utilizzazione è pertanto esclusivamente rimessa alla discrezione del soggetto proprietario del serbatoio committente del procedimento di verifica.

La procedura è stata elaborata sulla base della pluriennale esperienza dell'Istituto nello sviluppo e applicazione delle tecniche basate sul metodo EA ed è finalizzata all'accertamento dell'integrità strutturale dei grandi serbatoi per GPL interrati, tumulati (o ricoperti) e fuori terra con capacità maggiore di 13 m³ con le membrature metalliche protette da un idoneo sistema (es: protezione catodica, coibentazione, cassa di contenimento).

Le due procedure (piccoli e grandi serbatoi), a seconda che la capacità sia fino a, oppure oltre 13 m³, hanno molteplici elementi comuni di approccio metodologico, mentre altri sono significativamente diversi sia sotto il profilo tecnico, sia operativo-gestionale.

A titolo di esempio si riportano di seguito alcuni degli elementi sostanziali che contraddistinguono la procedura per la verifica con metodo EA dei grandi serbatoi:

- essa prescinde da qualsiasi approccio di valutazione statistica basata su aggregazione in lotti omogenei di costruzione, pertanto la verifica è praticata sul singolo serbatoio;
- è prevista la presentazione del progetto preliminare di fattibilità della prova EA elaborato a cura dell'OCA-GS indicato dal Proprietario al Centro Banca Dati EA e del parere positivo espresso da apposita Commissione Tecnica dell'Inail;
- la disposizione dei sensori EA dipende dalle caratteristiche del serbatoio (diametro, rivestimento, tipologia di installazione, ecc.) ed è prevista la localizzazione degli eventi EA;
- è previsto un follow up on site della prova EA e un'analisi complessiva dei dati di prova da parte di un livello 3 AT prima dell'emissione del rapporto di prova.

La procedura è conforme alle disposizioni di legge vigenti ed alle indicazioni fornite dalle norme europee di riferimento.

Più nel dettaglio la procedura definisce:

- i requisiti tecnici degli Organismi Competenti Abilitati – Grandi Serbatoi (OCA-GS);
- le modalità di esecuzione delle prove integrative preliminari alla prova EA;
- le modalità organizzative necessarie alla conduzione della prova EA;
- le caratteristiche tecniche della strumentazione necessaria allo svolgimento della prova EA;
- il protocollo di prova con tecnica basata sul metodo EA;
- il procedimento interpretativo dei dati di prova in accordo al modello analitico messo a punto da Inail;
- i criteri di classificazione della prova EA;
- le modalità di redazione del rapporto di prova e della sua trasmissione al Centro Banca Dati EA dell'Inail;
- le modalità di redazione del verbale della verifica d'integrità.

La procedura è costituita inoltre da una serie di appendici a carattere normativo che definiscono i requisiti tecnici degli Organismi Competenti Abilitati ad effettuare le verifiche, i criteri di posizionamento dei sensori sulle diverse tipologie di serbatoi, nonché le modalità di trasmissione dei dati al Centro Banca Dati EA dell'Inail e di sorveglianza degli Organismi Competenti Abilitati.

2. La procedura

La procedura è articolata nelle sezioni ed appendici di seguito indicate.

Sezioni

1. Scopo e campo di applicazione
2. Riferimenti di legge e normativi
3. Terminologia e simbologia
4. Presentazione della tecnica e delle attività di prova EA
5. Personale
6. Procedure interne, misure di sicurezza e condizioni ambientali
7. Documentazione preliminare e progetto di fattibilità della prova EA
8. Accertamenti ed operazioni preliminari
9. Sistema EA
10. Sensori EA

11. Configurazione del sistema EA
12. Sequenza operativa della prova EA
13. Verifica di funzionalità iniziale del sistema EA
14. Pressurizzazione
15. Registrazione del rumore di fondo iniziale
16. Analisi on line della prova EA
17. Registrazione dell'attività di fondo finale
18. Verifica di funzionalità finale del sistema EA
19. Analisi di follow up della prova EA
20. Processamento off line (post test analysis) e classificazione del serbatoio
21. Rapporto di prova EA
22. Verifica d'integrità del serbatoio

Appendici

- A (Normativa) Requisiti Tecnici degli Organismi Competenti Abilitati – Grandi Serbatoi (OCA-GS)
- B1 (Normativa) Serbatoi cilindrici interrati, ricoperti o parzialmente ricoperti
- B2 (Normativa) Serbatoi cilindrici fuori terra
- B3 (Normativa) Serbatoi sferici
- C (Normativa) Trasmissione dati al Centro Banca Dati EA Inail
- D (Normativa) Sorveglianza degli soggetti abilitati alle verifiche

L'argomento è complesso e articolato ed è descritto esaustivamente nella procedura. In questo lavoro sono presentati i concetti di base più significativi e utili alla comprensione delle scelte effettuate.

3. Presentazione della tecnica

La tecnica utilizzata per l'applicazione della procedura EA GS, schematicamente illustrata in fig. 1, è finalizzata al rilevamento dell'attività acustica prodotta durante la pressurizzazione delle membrane del serbatoio. Il metodo di EA permette di individuare la posizione dell'origine dell'onda acustica nel materiale analizzato, e questa localizzazione permette poi di individuare addensamenti di eventi EA (cluster) in zone planari; dopo aver individuato i cluster più attivi è possibile valutare i segnali ai fini della classificazione del serbatoio. Nel caso in cui l'approccio planare si dimostrasse non esaustivo ai fini della localizzazione, esso potrà essere integrato da quello lineare, sempre finalizzato alla definizione di zone di addensamento di eventi EA per un confronto con quello planare ai fini della congruenza dei dati.

Tali addensamenti, classificati secondo una scala crescente di attenzione, una volta individuata la loro collocazione sulla membratura, saranno oggetto di ulteriori indagini diagnostiche con altri metodi e/o tecniche di prove non distruttive (PND) per valutare nel dettaglio le indicazioni rilevate e stabilire quindi l'entità del danneggiamento ad esse correlato.

Il rapporto di prova della verifica di integrità del serbatoio viene rilasciato solo a valle dell'esito delle prove integrative preliminari a quella EA, della stessa prova EA e delle eventuali ulteriori PND di dettaglio che si rendessero necessarie a valle dell'analisi di follow up.

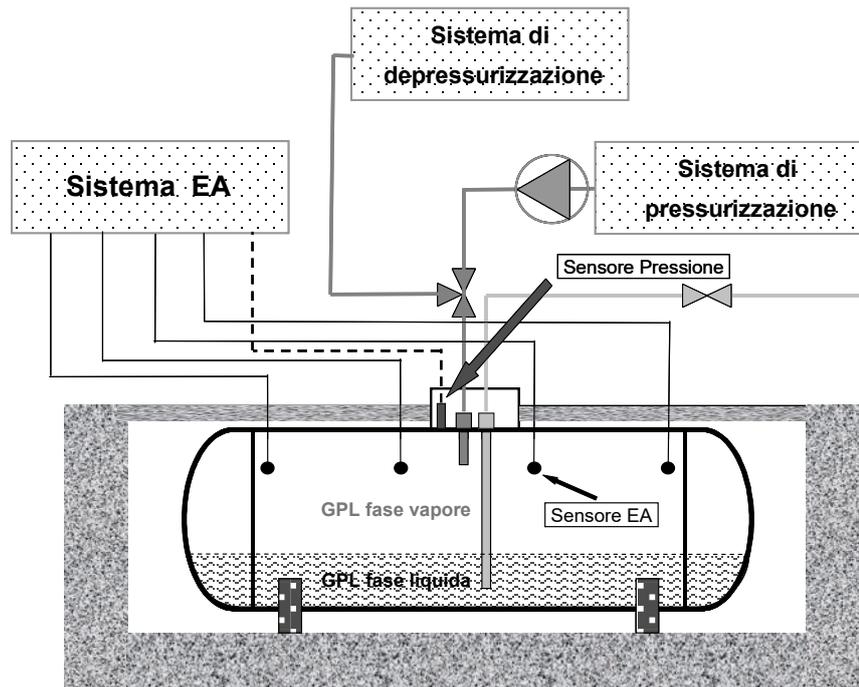


Figura 1. Schema semplificato dell'allestimento della prova EA

4. Personale

L'applicazione della procedura deve essere affidata a personale qualificato. La sezione 5 della procedura, sotto questo profilo, prevede che il personale impegnato nella prova deve garantire competenza, esperienza, idoneità fisica ed estrema professionalità. La procedura di fatto richiede che il numero degli operatori venga determinato da una specifica procedura interna elaborata dall'OCA-GS in relazione alla capacità del serbatoio, in cui deve essere designato un Responsabile di Prova EA (RPEA) in possesso di certificazione almeno di livello AT2, che coordina le attività e sovrintende tutte le operazioni ordinarie e straordinarie.

Più nello specifico la qualificazione richiesta per il personale varia a seconda delle diverse attività di prova EA a cui è preposto:

- livello AT3 (laurea in ingegneria e livello 3 nel metodo EA in accordo alla norma UNI EN ISO 9712 da almeno un anno) per il controllo della conformità della strumentazione EA, per il processamento *off line* dei dati di prova EA e per la gestione e l'archiviazione della documentazione inerente tutte le attività;
- livello AT2 (diploma in discipline tecniche e livello 3 nel metodo EA in accordo alla norma UNI EN ISO 9712 da almeno un anno) per l'allestimento e la verifica in campo della strumentazione EA, per il coordinamento e l'analisi *on line* della prova EA in campo, per la redazione del rapporto di prova EA;
- Addetto alla gestione in sicurezza dell'impianto di pressurizzazione (cisternista) in possesso di diploma in discipline tecniche, di un attestato di proficua frequenza conseguito a valle di un percorso formativo svolto in conformità al comma 1 dell'art. 17 Titolo VI dell'Allegato alle disposizioni di cui al D.M. 14 maggio 2004, con una esperienza di almeno un anno nel settore della manutenzione e/o riempimento dei serbatoi per GPL.

Il personale AT3 e AT2 deve aver conseguito una ulteriore qualificazione e certificazione rilasciata dall'Inail a conclusione di uno specifico percorso formativo ed addestrativo orientato alla corretta applicazione della procedura EA GS.

5. Procedure interne e documentazione

La verifica di integrità dei grandi serbatoi è una pratica piuttosto complessa e delicata, per cui è necessario che gli OCA-GS redigano le necessarie procedure interne propedeutiche alla effettuazione della prova EA, delle verifiche preliminari e delle eventuali PND di dettaglio con la dovuta affidabilità e sicurezza.

Per questo motivo, all'OCA-GS è fatto obbligo trasmettere all'Inail tutte le procedure interne di seguito elencate nelle loro revisioni più recenti:

- a) Procedura di attribuzione delle funzioni e dei ruoli del personale a vario titolo impegnato nelle attività di prova EA;
- b) Procedura per l'analisi dei rischi connessi all'esecuzione della prova EA e l'individuazione delle misure da adottare per la eliminazione o mitigazione degli stessi;
- c) Procedura di gestione in sicurezza dell'impianto di pressurizzazione;
- d) Procedura per l'esecuzione delle prove integrative preliminari;
- e) Procedura delle PND di dettaglio a fronte delle indicazioni emerse nell'analisi di *follow up*.

Il Proprietario del serbatoio che intende avvalersi della procedura EA-GS per la verifica di integrità deve presentare all'INAIL, all'atto della richiesta, la seguente documentazione preliminare:

- libretto o dichiarazione di messa in servizio del serbatoio (compreso fogli illustrativi, schemi o disegni costruttivi);
- progetto di fattibilità della prova EA elaborato a cura dell'OCA-GS individuato dallo stesso Proprietario;
- dichiarazione attestante l'esecuzione, con esito positivo, di tutte le verifiche e controlli periodici prescritti dalla legislazione inerente la verifica di integrità;
- dichiarazione attestante la pressione massima raggiunta nel corso dell'ultimo anno di esercizio.

Il progetto di fattibilità deve essere trasmesso al Centro Banca Dati EA dell'Inail che, a valle dell'esame della documentazione, esprime il parere formulato da apposita Commissione Tecnica dell'Inail sull'esperibilità o meno della prova EA.

L'approccio all'esecuzione delle prove EA deve essere progressivo e commisurato alle esperienze maturate dall'OCA-GS in relazione alla capacità e alla tipologia del serbatoio.

6. Accertamenti ed operazioni preliminari

Preliminarmente all'esecuzione della prova EA devono essere obbligatoriamente condotti, dal personale addetto ed in relazione alle specifiche competenze, i seguenti accertamenti:

- Verifica dell'accessibilità delle membrature;
- Riconcontro dei dati di targa per l'identificazione del serbatoio;
- Prove integrative preliminari alla prova EA (ES.: esame visivo delle membrature direttamente accessibili, verifica della corretta gestione del sistema di protezione catodica, ulteriori PND che si rendano necessarie a fronte di indicazioni prodotte dall'esame visivo preliminare);
- Rivelazione di fughe.

Qualora anche uno solo degli accertamenti sopra specificati non sia svolto o dia esito negativo, la prova EA non deve essere eseguita.

Il serbatoio, prima di essere collegato con l'impianto di pressurizzazione, deve essere necessariamente escluso dalla rete di distribuzione e/o utilizzazione del GPL mediante la chiusura di tutte le valvole d'intercettazione allo scopo individuate e deve essere verificato il corretto grado di riempimento iniziale.

7. Configurazione del sistema EA

Il sistema EA deve essere configurato con alcuni parametri di acquisizione la cui importanza è fortemente condizionante ai fini del successo della prova EA. Essi riguardano, nello specifico, la configurazione di acquisizione dei canali EA, dei transienti, dei parametri di riferimento, del pulsatore elettronico e dei filtri.

In una verifica complessa come quella descritta, è fondamentale scegliere la tipologia corretta dei sensori e il loro posizionamento sulla membratura, per poter essere sensibili alle discontinuità che potrebbero emettere segnali di EA. Infatti la rilevabilità degli eventi EA è fortemente condizionata dalla distanza della sorgente dai sensori EA e dalla tipologia del rivestimento superficiale per ovvie ragioni di attenuazione e dispersione dell'onda elastica. Per questi motivi occorre posizionare i sensori EA solo a valle di una approfondita valutazione di tutte le condizioni al contorno. Per i serbatoi interrati, tumulati o ricoperti, causa di un profilo di attenuazione fortemente condizionante o un diametro superiore a 4,5 metri è necessario posizionare i sensori EA ricorrendo a sistemi che ne consentano, mediante l'escavazione del terreno, l'installazione nelle posizioni individuate nel progetto di fattibilità (cfr. figura 2).

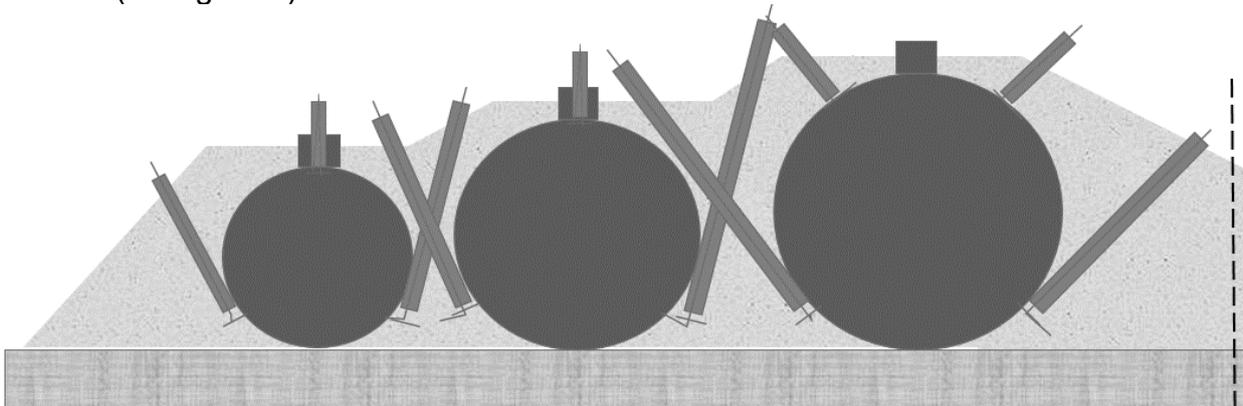


Figura 2. possibili configurazioni adottabili per serbatoi con profilo di attenuazione fortemente condizionante o con diametro maggiore di 4,5 metri

La configurazione dell'array dei sensori EA è funzione della geometria del serbatoio (cilindrico o sferico) e della tipologia di installazione (interrato, ricoperto, fuori terra).

Il numero minimo di sensori da posizionare sul serbatoio soggetto a prova è funzione dell'attenuazione dell'onda elastica nel materiale e deve corrispondere ai requisiti del punto C.5 dell'appendice C della norma UNI EN 12819:2019 e 7.1 della norma UNI EN 14584:2013.

Il materiale con il quale accoppiare i sensori EA alla membratura del serbatoio deve garantire, durante l'intero svolgimento della prova EA, una adeguata efficienza di trasmissione acustica tra la membratura del serbatoio e la superficie sensibile del sensore EA alle temperature che la membratura raggiunge durante la prova EA.

Più nel dettaglio, le soglie necessarie ad una corretta acquisizione ed interpretazione dei segnali EA sono un parametro importante e delicato, in quanto condizionano il risultato

stesso della prova, e devono essere determinate in conformità al punto 7.1.2 della norma UNI EN 14584:2011; le soglie sono quelle di seguito indicate:

- ampiezza di picco del rumore di fondo (Peak Background Noise), indicata con A_n ;
- soglia di rilevazione (Detection Threshold), indicata con A_d ;
- soglia di valutazione (Evaluation Threshold), indicata con A_e .

A_n è l'ampiezza minima alla quale il sistema EA non registra mai più di un hit per secondo su alcun canale.

A_d deve essere fissata X dB al di sopra di A_n in modo tale che non vengano introdotti in fase di acquisizione segnali spuri dovuti al rumore di fondo generato dalla pressurizzazione del serbatoio. Generalmente il valore di X è compreso tra 6 e 18 dB. Ai soli fini del calcolo del profilo di attenuazione si raccomanda di fissare $A_d = 46$ dB_{AE}.

A_e deve essere fissata K dB al di sopra di A_d . A fine semplificativo, ed a meno di particolari complicazioni, si raccomanda di fissare un valore di K pari ad almeno 6 dB.

Si determina sperimentalmente la curva di attenuazione eseguendo sequenze di almeno quattro eventi EA prodotti con sorgente artificiale Hsu-Nielsen per distanze crescenti fissate dal sensore EA di riferimento lungo la congiungente fra i due sensori, fino al raggiungimento di $d_{max,d}$.

La massima spaziatura d_{max} consentita tra i sensori EA (*maximum allowed sensor spacing*) viene ricavata, in conformità al punto 7.1.2 della norma UNI EN 14584:2013 come ascissa del punto d'intersezione della curva di attenuazione ricavata e la retta rappresentativa della soglia di valutazione A_e . (cfr. Figura 3).

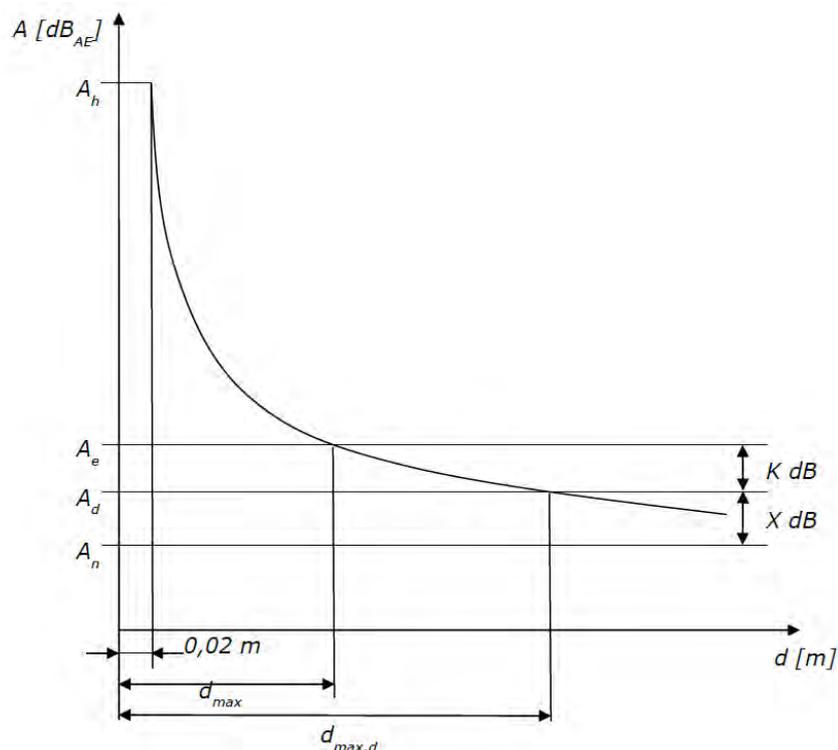


Figura 3. Curva tipo dell'attenuazione dell'onda elastica

La localizzazione di un evento EA deve essere realizzata in conformità al punto 5.4 della norma UNI EN 14584:2013 e l'approccio al procedimento di localizzazione deve essere di tipo planare rilevato da un array di almeno tre sensori EA.

Gli eventi EA vengono assegnati a unità spaziali dette cluster, che sono di forma quadrata per i serbatoi cilindrici o circolare per i serbatoi sferici, e possiedono la stessa dimensione in funzione della d_{max} . Di norma la dimensione del cluster si assume pari a $0,1 \cdot d_{max}$.

La procedura raccomanda di utilizzare una codifica a colori che identifichi cluster di diversa consistenza numerica.

8. Valutazione del serbatoio

La valutazione del serbatoio viene eseguita mediante un indicatore sintetico, focalizzato sulla propagazione di discontinuità strutturali (γ_{CR}), calcolato per ogni cluster ed aggiornato per ogni nuova localizzazione di un evento EA durante le fasi di pressurizzazione e di registrazione dell'attività di fondo finale.

Il potenziale di rischio di una sequenza di eventi registrati durante la prova EA è associato alle seguenti grandezze rilevate per ciascun evento localizzato all'interno del cluster di riferimento:

- ampiezza corretta (localizzazione planare), AC_{LE}^i o ampiezza (localizzazione lineare), A_{LE}^i
- durata, D_{LE}^i
- energia, E_{LE}^i

e alle seguenti grandezze cumulate relative a tutti gli eventi localizzati all'interno del cluster di riferimento:

- numero degli eventi EA, N_{LE}^i
- rateo degli eventi EA, dN_{LE}^i/dt
- numero degli eventi EA, $N3_{LE}^i$ (*big bangs*).

In forma sintetica l'indice di severità del fenomeno evolutivo di discontinuità strutturali viene rappresentato come:

$$\gamma_{CR}^i = f(A_{LE}^i, D_{LE}^i, E_{LE}^i, N_{LE}^i, dN_{LE}^i/dt, N3_{LE}^i)$$

Ai fini della valutazione del serbatoio l'indicatore sintetico γ_{CR} assume il valore massimo fra quelli relativi ai diversi *cluster* identificati, ovvero:

$$[\gamma_{CR}]_S = \max (\gamma_{CR}^i) \quad i = 1 \dots I$$

9. Sequenza operativa della prova EA

La sequenza delle fasi operative per l'applicazione della procedura EA GS è quella di seguito indicata:

1. verifica di funzionalità iniziale;
2. connessione del serbatoio all'impianto di pressurizzazione,
3. registrazione del rumore di fondo iniziale;
4. pressurizzazione,
5. registrazione dell'attività di fondo finale (*hold period*);
6. verifica di funzionalità finale;
7. depressurizzazione e sconnessione del serbatoio dall'impianto di pressurizzazione.

In fig. 4 sono schematizzate le varie fasi della prova EA.

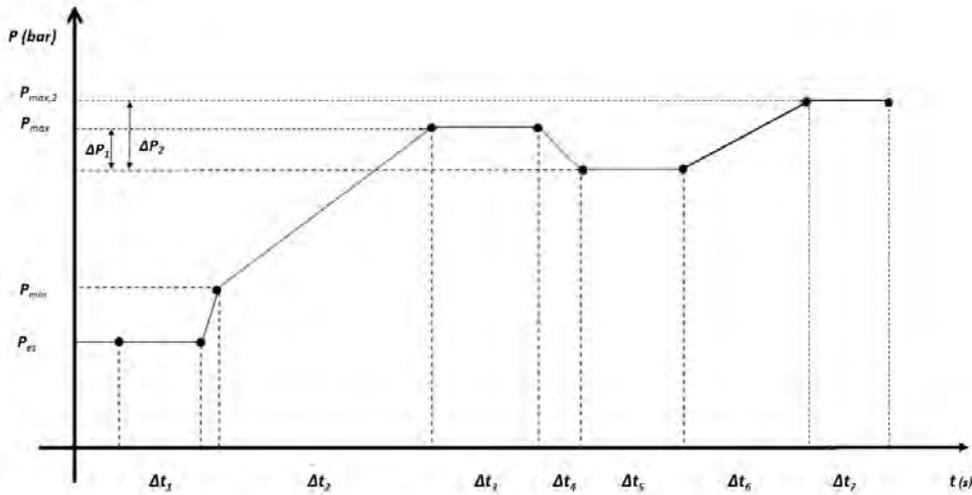


Figura 4. Sequenza delle fasi di prova EA

Ogni fase è descritta in una sezione dedicata della procedura e per brevità non sono riportate in questo lavoro, mentre la fase di pressurizzazione è sintetizzata nel seguente flow chart.

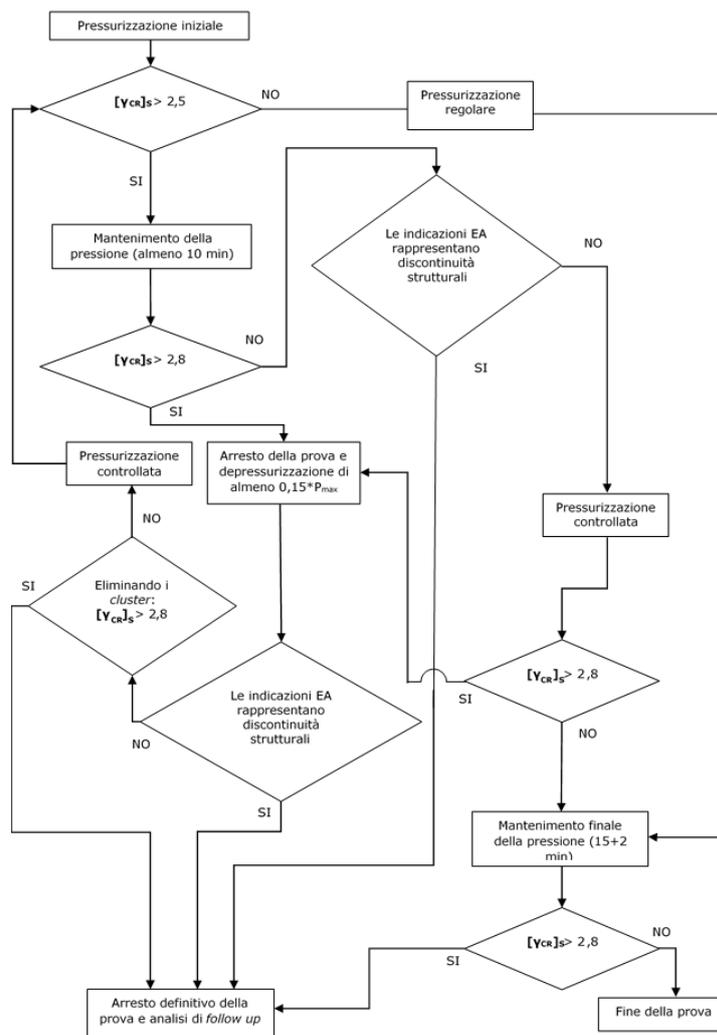


Figura 5. Flow chart della fase di pressurizzazione

10. Analisi on line della prova EA

Nel calcolo *on line* dell'indicatore sintetico di crescita delle discontinuità strutturali $[Y_{CR}]_S$ della prova EA sono ricomprese per ogni cluster le seguenti grandezze:

- Raddoppio di energia cumulata per ciascuno dei canali riferita a due intervalli consecutivi di pressione pari al 5% della massima di prova EA
- Numero di eventi localizzati (N1) la cui ampiezza di picco corretta sia maggiore della Soglia dell'ampiezza corretta per il conteggio di eventi EA localizzati (A1)
- Numero di eventi EA localizzati contenuti all'interno di uno stesso *cluster* "alto" (NC1) che abbiano ampiezza corretta maggiore rispetto ad una soglia per *cluster* "alto" (AC1)
- Numero di eventi localizzati contenuti all'interno di uno stesso *cluster* "basso" (NC2) che abbiano ampiezza corretta maggiore rispetto ad una soglia per *cluster* "basso" (AC2)
- Numero di eventi EA localizzati la cui ampiezza corretta sia maggiore di AC2 durante la fase di mantenimento della pressione (*hold period*) e/o di Registrazione dell'attività di fondo finale.

Le grandezze rilevate, acquisite e registrate devono essere attualizzate.

L'analisi on line della prova EA implica la creazione di una tabella identificativa dei cluster secondo un parametro di crescente severità.

11. Analisi di follow up, processamento off line (post test analysis) e classificazione della prova EA

Per analisi di follow up si intende una prima attività di verifica ed accertamento delle indicazioni EA da condurre on-site a conclusione della depressurizzazione e sconnessione dell'impianto di pressurizzazione dal serbatoio.

L'analisi di follow up deve essere condotta solo nel caso in cui, a conclusione della prova EA, sia riscontrata la condizione $[Y_{CR}]_S \geq 2,5$.

Nello specifico, l'analisi di follow up implica lo svolgimento delle fasi di seguito brevemente descritte secondo un approccio di crescente attenzione:

- creare una tabella identificativa dei cluster secondo un parametro di crescente severità;
- chiarire l'origine delle indicazioni EA attraverso una analisi di corrispondenza geometrica della posizione dei cluster con zone caratterizzate dalla presenza di elementi costruttivi del serbatoio deducibili dall'esame dei disegni (es. passi d'uomo, bocchelli, valvole, selle d'appoggio, tiranti, ancoraggi, ecc.);
- verificare con esame visivo delle zone corrispondenti alle indicazioni rilevate qualora le condizioni di accessibilità lo consentano. In tal caso, ad ulteriore riscontro della corrispondenza fisica, procedere ad una verifica con sorgente Hsu-Nielsen per confermare la correttezza del processo di localizzazione degli eventi EA svolta dal sistema; qualora tale corrispondenza fosse dimostrata, è necessario documentarne l'evidenza mediante fotografie d'insieme e di dettaglio (macro) ed seguire, se applicabili, le PND di dettaglio.

Nel caso in cui, al termine della prova EA, in uno o più cluster si verificano le seguenti condizioni:

ID cluster	Eventi EA localizzati	>40
	$[Y_{CR}]$	>2,5
	AC_{LE}^i	≥ 70 dB

Tabella 1

è raccomandato eseguire ulteriori approfondimenti al fine di escludere la presenza di eventuali discontinuità non evidenziate dalle precedenti analisi e verifiche.

A conclusione della prova EA e prima della elaborazione finale del rapporto di prova EA deve essere condotta, a cura di personale in possesso di certificazione di livello AT3, un'attenta analisi complessiva delle indicazioni rilevate nel corso della prova EA e dell'analisi di follow up per dirimere pienamente ed esaustivamente qualsiasi incongruenza di carattere logico, fisico ed interpretativo possa emergere dall'esame dei dati di prova EA.

La classificazione della prova EA è determinata dall'OCA-GS in coerenza ai valori raggiunti durante la prova da $[Y_{CR}]_s$. (cfr. Tabella 2).

Classe	Condizione	Esito Prova EA
0		Non accettabile
1	$[Y_{CR}]_s < 2,5$	Positivo Il serbatoio manifesta un'attività acustica di basso livello emersa con modalità di pressurizzazione regolare, che si configura come condizione di accettabilità.
2 - 1	$2,5 \leq [Y_{CR}]_s < 2,8$	Positivo Il serbatoio manifesta un'attività acustica di medio livello emersa con modalità di pressurizzazione controllata che evolve ad una condizione di accettabilità.
2 - 3		Negativo Il serbatoio manifesta un'attività acustica di medio livello emersa con modalità di pressurizzazione controllata che evolve ad una condizione di non accettabilità.
3	$[Y_{CR}]_s \geq 2,8$	Negativo Il serbatoio manifesta un'attività acustica di alto livello emersa con modalità di pressurizzazione controllata, che si configura come condizione di non accettabilità.

Tabella 2. Classificazione della prova EA

A valle delle operazioni di prova e di analisi, deve essere redatto un Rapporto di Prova EA in accordo a quanto previsto dalla norma UNI EN 12819:2019.

12. Sorveglianza

L'Inail, per garantire che l'OCA-GS ed il suo personale adempiano correttamente agli obblighi derivanti dall'applicazione della procedura EA GS, effettua la sorveglianza che si esplicita, citando solo alcune delle peculiarità, nella facoltà di eseguire audit con periodicità biennale per verificare il mantenimento dei requisiti tecnico-scientifici necessari al corretto svolgimento di tutte le attività di prova EA in capo all'OCA-GS, di verificare l'idoneità dei mezzi e delle attrezzature dedicati e del personale addetto alle attività di prova EA, di assistere alla esecuzione in situ alle attività di prova EA.

Al fine di assicurare oggettività ed efficacia all'attività di sorveglianza, i laboratori mobili impiegati per l'attività di prova EA devono essere dotati di un sistema in grado monitorare in remoto i relativi spostamenti e la posizione attuale. Una caratteristica importante del sistema è la garanzia della conservazione dei dati e la loro consultazione via web.

In caso di gravi inadempienze, negligenze o violazioni della procedura, l'Inail può disporre sospensione o revoca del certificato di abilitazione all'applicazione della procedura rilasciato alla persona, revoca del certificato di verifica integrità del serbatoio, o addirittura può richiedere ai Ministeri Competenti la sospensione o la revoca dell'abilitazione dell'OCA-GS.

13. Conclusioni

La procedura costituisce uno strumento messo a disposizione dei proprietari e/o gestori per estendere la possibilità di condurre, anche sui grandi serbatoi, approcci di verifica d'integrità strutturale già ampiamente praticati negli ultimi 15 anni sui serbatoi per GPL interrati con capacità inferiore ai 13 m³ in piena conformità con la normativa europea per l'applicazione specifica del metodo EA per queste tipologie di attrezzature a pressione.

14. Bibliografia

- [1] D.M. 13 ottobre 1994, "Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la costruzione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di GPL in serbatoi fissi di capacità complessiva superiore a 5 m³ e/o in recipienti mobili di capacità complessiva superiore a 5.000 kg".
- [2] D. Lgs. 4 agosto 1999 n. 359 "Attuazione della direttiva 95/63/CE che modifica la direttiva 89/655/CEE relativa ai requisiti minimi di sicurezza e salute per l'uso di attrezzature di lavoro da parte dei lavoratori".
- [3] D.M. 16 ottobre 2002 "Depositati di GPL in serbatoi fissi, di capacità complessiva superiore a 5 m³ e/o in recipienti mobili di capacità complessiva superiore a 5.000 kg. Adeguamento alla regola tecnica di prevenzione incendi di cui al decreto del Ministro dell'interno di concerto con quello dell'industria, del commercio e dell'artigianato 13 ottobre 1994.
- [4] D.M. 14 maggio 2004 "Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 13 m³".
- [5] D.M. 1 dicembre 2004, n. 329 "Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93".
- [6] D. Lgs. 9 aprile 2008 n. 81 "Legge 7 luglio 2009 n° 88 attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007 n.123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro".
- [7] D.M. 11 aprile 2011 "Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo".
- [8] D.P.R. 1 agosto 2011, n. 151 "Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione degli incendi, a norma dell'articolo 49, comma 4 - quater, del decreto-legge 31 maggio 2010, n. 78, convertito, con modificazioni, dalla legge 30 luglio 2010, n. 122".
- [9] Legge 11 settembre 2020 n. 120 "Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 16 luglio 2020, n. 76, recante misure urgenti per la semplificazione e l'innovazione digitale".
- [10] UNI EN ISO 9712:2012, Prove non distruttive - Qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive.
- [11] UNI EN 12819:2019 "Ispezione e riqualifica dei serbatoi interrati per gas di petrolio liquefatti (GPL) di capacità geometrica maggiore di 13 m³".
- [12] UNI EN 14584:2013, Prove non distruttive - Prova di emissione acustica - Ispezione di attrezzature a pressione metalliche durante la prova di accettazione - Localizzazione planare delle sorgenti di EA.

Gestione integrata di safety e security: le sfide della dimensione cyber e gli insegnamenti tratti dal progetto SafeRa 4STER

G. Oliva¹, G. Assenza¹, L. Faramondi¹, E. Del Prete², F. Pera², R. Setola¹

¹ Università Campus Bio-Medico di Roma

² Inail - Dit

Sommario

Il settore della chimica e dell'industria di processo è vitale per l'economia e il benessere dei cittadini, ma pone diversi problemi di safety e security. In particolare, al fine di mitigare i rischi legati alla safety, la Comunità Europea ha creato e implementato politiche e standard come le direttive Seveso. Tuttavia, le versioni precedenti di tali direttive non trattano gli aspetti della sicurezza, che sono stati gestiti solo parzialmente nella direttiva Seveso III. Occorre precisare che la sicurezza dei siti Seveso è di fondamentale importanza, a causa dei rischi legati al terrorismo, alla malevolenza interna e al cyberspazio. La gestione integrata di safety e security rappresenta dunque una carta vincente per l'attuazione di efficaci strategie di prevenzione e reazione. In questo contesto, il progetto SafeRa 4STER, dopo un'analisi degli insight riguardanti incidenti passati, ha identificato gli scenari di sicurezza più rilevanti per la safety dei lavoratori. In particolare, anche se ad oggi non è stato registrato alcun evento di rilievo che si sia verificato a seguito di un attacco informatico, tali eventi rappresentano una seria minaccia e richiedono politiche adeguate. Questo perché la diffusione capillare delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione sta esponendo i sistemi a minacce informatiche senza precedenti che non sono facilmente gestibili ricorrendo ad approcci tradizionali come il paradigma security by obscurity. Lo scopo di questo intervento è duplice: nella prima parte, il discorso fornirà una panoramica delle principali sfide poste dalla dimensione cyber; quindi, il discorso si concluderà con una breve panoramica delle intuizioni acquisite e della lezione appresa durante il progetto SafeRa 4STER.

1. Introduzione

L'industria chimica e di processo (CPI), per l'uso di materiali pericolosi e per il ruolo che svolge nell'economia, è ampiamente considerata un settore vitale e quindi considerata un'infrastruttura critica. Al fine di ridurre il rischio di guasti e minimizzare le conseguenze di possibili eventi, la Comunità Europea ha creato e implementato politiche e standard di sicurezza come le Direttive Seveso [1]. Tuttavia, le misure di sicurezza esulano dal campo di applicazione della precedente versione di tali norme e solo nella Direttiva Seveso III sono state parzialmente incluse. Il problema della sicurezza è diventato ancora più critico con l'emergere del fattore cyber. I siti Seveso, così come molte altre infrastrutture critiche, dipendono fortemente da Operation Technology (OT) come ICS (Industrial Control Systems), SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) e PLC (Programmable Logic Controller) la cui esigenza primaria di disponibilità e operatività lascia poco spazio alle classiche misure di sicurezza. Inoltre, le recenti tendenze business-driven come la standardizzazione dei protocolli, l'impiego di soluzioni standard e la crescente connettività hanno notevolmente aumentato la superficie vulnerabile dei processi industriali rendendoli suscettibili di essere compromessi tramite il cyber-spazio. La preoccupazione principale riguarda questi attacchi informatici che, manipolando il processo di controllo, inducono il sistema a fallire con l'obiettivo di creare eventi catastrofici. Episodi come Stuxnet, Irongate, Blackenergy 3, CRASHOVERRIDE, Trisis

ed il recente COLONIAL PIPELINE [2,3] hanno dimostrato che attacchi di questo tipo sono possibili ma richiedono il lavoro di hacker altamente qualificati e pieni di risorse. Ad oggi, l'impatto degli attacchi informatici contro OT è rimasto molto al di sotto della soglia degli eventi catastrofici, ma la minaccia informatica rimane un fattore cruciale che mette a rischio la sicurezza dell'Industria dei Processi Chimici (CPI).

I siti Seveso di oggi dipendono sempre più da OT.

2. Cybersecurity ed Operational Technology

A causa della loro natura in tempo reale, i sistemi basati su computer che controllano i processi industriali sono progettati per concentrarsi principalmente sulla disponibilità per soddisfare l'esigenza di avere costantemente il controllo dei dati e delle operazioni industriali [4]. Ciò ha portato OT ad essere ottimizzato per prestazioni, efficacia e sicurezza, il che rende estremamente complessa e controversa l'introduzione degli strumenti classici della sicurezza informatica [5,6].

Gli OT sono caratterizzati dallo scambio di enormi quantità di piccole informazioni (pacchetti di dimensioni limitate provenienti da una pleora di fonti diverse) e da alti livelli di determinismo. Quindi, includere elementi come crittografie, antivirus e firewall significa incorporare routine di controllo che potrebbero influire sul regolare svolgimento delle attività generando ritardi che, nonostante quantitativamente irrilevanti, rendono il sistema di controllo meno pronto, impedendogli di soddisfare i requisiti di "hard real-time" per cui è stato progettato.

Un altro fattore che pregiudica l'attuazione delle misure di sicurezza è che OT deve operare ininterrottamente 24x365, il che rende gli interventi di manutenzione estremamente costosi e problematici. Il mantenimento di un sistema mediante l'introduzione di patch e aggiornamenti richiede tempi di inattività dell'infrastruttura [6], il che implica che l'aggiornamento deve essere pianificato con grande anticipo e non può seguire immediatamente le innovazioni industriali. Inoltre, l'applicazione di patch è considerata un'attività rischiosa poiché qualsiasi modifica potrebbe produrre effetti imprevisti. Prevenirli significherebbe effettuare test specifici e mirati, il cui costo è spesso proibitivo [7].

Quindi, una volta installato e certificato per la sicurezza, OT rimane in funzione fino a vent'anni con modifiche limitate, il che porta a operare CI con software obsoleto e risorse inadeguate con instabilità intrinseca, punti critici di guasto e falle di sicurezza.

In questo contesto, per lungo tempo l'unica barriera protettiva è stata la cosiddetta "sicurezza attraverso l'oscurità". In precedenza, i sistemi di controllo erano basati su sistemi legacy che utilizzano reti proprietarie, fisicamente isolate dall'ambiente esterno senza connettività esterna [8,9]. Inoltre, OT utilizzava protocolli proprietari, unici per l'ambiente industriale e adattati al processo industriale supervisionato. La sicurezza attraverso l'oscurità significava che minare l'integrità di un sistema richiedeva non solo l'accesso fisico alla rete, ma anche una vasta conoscenza sia del software in uso che del processo industriale. Di conseguenza, i sistemi industriali sono stati considerati ragionevolmente immuni da attacchi informatici esterni e la principale minaccia è stata percepita come interna [10], come un "lavoratore scontento" in cerca di vendetta [8]. Infatti, fino al 2010, l'unico sistema di controllo mirato agli attacchi informatici si è verificato a Maroochy Shire (Australia) [11] dove un aggressore ha violato con successo il sistema di controllo dell'acqua della città e ha causato la fuoriuscita di 800.000 litri di acqua grezza dalle fognature, con notevoli danni ambientali ed economici. Alla fine, l'autore dell'azione è stato arrestato dalla polizia e si è rivelato essere uno degli sviluppatori del sistema che cercava di mettere in piedi un'estorsione [12].

Al giorno d'oggi, i siti basati su OT non possono più fare affidamento sulla sicurezza attraverso l'oscurità. In effetti, i processi moderni si basano su software standard e sono sempre più connessi ad altri sistemi. Molti componenti ~~delle apparecchiature~~ sono stati integrati nel cosiddetto "Internet of Things industriale (IIoT)". I Cyber-Physical Systems (CPS), dispositivi informativi che controllano i processi fisici, che prima comunicavano attraverso reti isolate, sono ora connessi non solo alla rete aziendale ma anche a Internet [13]. Questi cambiamenti sono determinati dalle esigenze di business e mirano a soddisfare le crescenti esigenze di operatività della CI. Sebbene abbiano drasticamente ridotto i costi di acquisto, installazione e manutenzione di OT, nonché prestazioni ottimizzate e disponibilità del sistema massimizzata, hanno aperto nuove vulnerabilità e ampliato lo spettro di potenziali minacce, con implicazioni significative per la sicurezza informatica [14]. Mentre la tendenza generale di "connettere ciò che non è connesso" [13,15] ha creato nuovi vettori di attacco contro OT perché ha aumentato esponenzialmente la superficie vulnerabile [16], l'uso di software standard è più controverso, così come i suoi effetti sulla sicurezza. Certamente, la sicurezza attraverso l'oscurità ha fornito uno scudo efficace contro aggressori non sofisticati o non motivati, ma fare affidamento su software e protocolli proprietari ha portato a una mancanza di verifica e convalida, aumentando drasticamente il potenziale di vulnerabilità non rilevate che potrebbero essere sfruttate da attori abili e ben finanziati. Al contrario, l'adozione di standard aperti e protocolli di rete IT generali consente una verifica della sicurezza più approfondita, poiché l'applicazione di patch e la protezione di OT beneficiano dell'esame, dell'esperienza e dei test di una comunità più ampia [17].

Tuttavia, non c'è dubbio che la sicurezza attraverso l'oscurità costituisca anche una solida barriera alla ricognizione. La ricognizione è un passaggio preparatorio essenziale in cui gli aggressori raccolgono informazioni per scoprire le debolezze che possono sfruttare per prendere di mira un sistema [18]. Oggi, i malintenzionati possono soddisfare in parte le loro esigenze di raccolta delle informazioni utilizzando l'open source intelligence (OSINT). Shodan ne è un esempio. Shodan è un motore di ricerca liberamente utilizzabile ed economico in grado di tracciare tutte le porte di comunicazione connesse, inclusi i dispositivi OT. Gli utenti possono identificare uno specifico sistema di controllo industriale e, una volta identificato, possono mappare il sistema per trovare vulnerabilità o punti di ingresso sfruttabili [19].

3. Il Progetto Saf€ra 4STER

Il progetto SAF€RA 4STER, finanziato dal consorzio SAF€RA e nello specifico, da INAIL, dall'Agenzia finlandese per la sicurezza e le sostanze chimiche (Tukes) e dal Fondo finlandese per l'ambiente di lavoro (FEWF) è iniziato nel 2019 e si è concluso nel 2021. I partner di ricerca sono stati l'Università Campus Biomedico e l'Università di Bologna in Italia, l'Organizzazione olandese per la ricerca scientifica applicata (TNO) e il Technical Research Centre of Finland, VTT, come coordinatore del progetto.

Gli obiettivi del progetto di ricerca erano l'approfondimento dei punti di forza delle criticità. In particolare, lo scopo era quello di comprendere le differenze e le somiglianze tra i concetti, le culture e la gestione della sicurezza e della protezione, le richieste di gestione integrata della sicurezza e della protezione, nonché lo stato attuale della gestione integrata nei siti. Inoltre, si è proceduto ad una disamina degli incidenti passati indotti da interventi umani di natura dolosa, sia sotto forma di attacco fisico, che dal punto di vista cyber. Inoltre, il progetto ha avuto l'obiettivo di indagare circa la consapevolezza delle problematiche di sicurezza informatica e fisica nelle aziende.

In particolare, nell'ambito del progetto SAfera 4STER sono state individuate tre serie di possibili interventi per mitigare l'effetto delle problematiche di cyber-security. I set coprono tre dimensioni complementari:

- Dipendenti, ovvero interventi di sicurezza informatica mirati al modo in cui i dipendenti lavorano con i sistemi.
- Politica organizzativa, ovvero interventi di cyber security focalizzati sulla dimensione organizzativa.
- IT-Systems, ovvero interventi di cyber security rivolti ai sistemi IT.

La Figura 1 mostra a colpo d'occhio gli interventi considerati. Si rimanda il lettore interessato a [20] per maggiori dettagli. Si noti che, all'interno dell'indagine presentata in [20], agli intervistati è stato chiesto di chiarire se una particolare contromisura fosse stata effettivamente attuata o meno all'interno della loro organizzazione; di conseguenza ogni intervento è caratterizzato da un valore numerico che può essere considerato come la frequenza con cui gli interventi vengono realizzati.

Le tabelle 1-3 confrontano tali frequenze con la rilevanza di questi interventi, come stimato da ulteriori interviste sottoposte a 4 security manager. Nello specifico, sono stati intervistati quattro security manager, e sono state raccolte le loro valutazioni sull'importanza relativa di un intervento rispetto ad un altro, elaborando una rilevanza in percentuale per ogni intervento tramite la tecnica Sparse Analytic Hierarchy Process [21,22]. In particolare, ogni tabella considera un diverso insieme di interventi e, per ciascuno di essi, mostra la frequenza ottenuta nell'indagine, insieme alla rilevanza in percentuale stimata tramite la metodologia Sparse Analytic Hierarchy Process. In ogni tabella, infine, è riportato il coefficiente di correlazione di Kendall τ [23] ottenuto confrontando le graduatorie in base al sondaggio e all'approccio adottato in questo documento.

4. Discussione e conclusioni

In base ai risultati dell'analisi, si può notare che la situazione per quanto riguarda le misure organizzative e le altre tipologie di interventi è radicalmente diversa.

Infatti, come mostrato nella Tabella 1, si può notare che le stime numeriche della frequenza e della rilevanza di questo tipo di interventi sono conformi ($\tau = 0.7379$, quindi i ranking non appaiono in contraddizione). La differenza più rilevante è relativa alla contromisura "Segnalazione periodica della funzione di cyber-security agli Organismi di Vigilanza" che è stata suggerita da uno degli intervistati (e quindi ha poca frequenza) ma risulta essere particolarmente importante in termini di preferenze. Al contrario, le altre classi di intervento mostrano solo una debole correlazione tra frequenza e rilevanza, e le voci specifiche presentano differenze notevoli. In particolare, per quanto riguarda gli interventi sui sistemi informatici, si può notare che misure più tradizionali come password sicure, sostituzione hardware e aggiornamenti software sono effettivamente attuate abbastanza frequentemente, ma hanno una rilevanza ridotta nelle preferenze; infatti, un monitoraggio costante della cyber-security e il ricorso a audit di terze parti sono considerati altamente auspicabili, anche se meno frequentemente attuati.

Una situazione simile si può osservare per le contromisure relative ai dipendenti. Infatti, l'importanza dell'utilizzo di una VPN è notevolmente ridotta rispetto alla frequenza valutata nell'indagine; inoltre, la rilevanza dell'autenticazione a più fattori è più che raddoppiata passando dalla frequenza effettiva alla rilevanza percepita, mentre le misure di protezione degli end point sono quasi triplicate.

Nel complesso, tale analisi fornisce evidenza che, mentre gli aspetti organizzativi attualmente implementati per il contrasto delle problematiche di cyber security sono

abbastanza solidi e la situazione attuale coincide sostanzialmente con quella percepita come auspicabile, vi è ancora una lacuna da colmare per quanto riguarda gli aspetti tecnici, le misure e il modo in cui i dipendenti interagiscono con i sistemi.

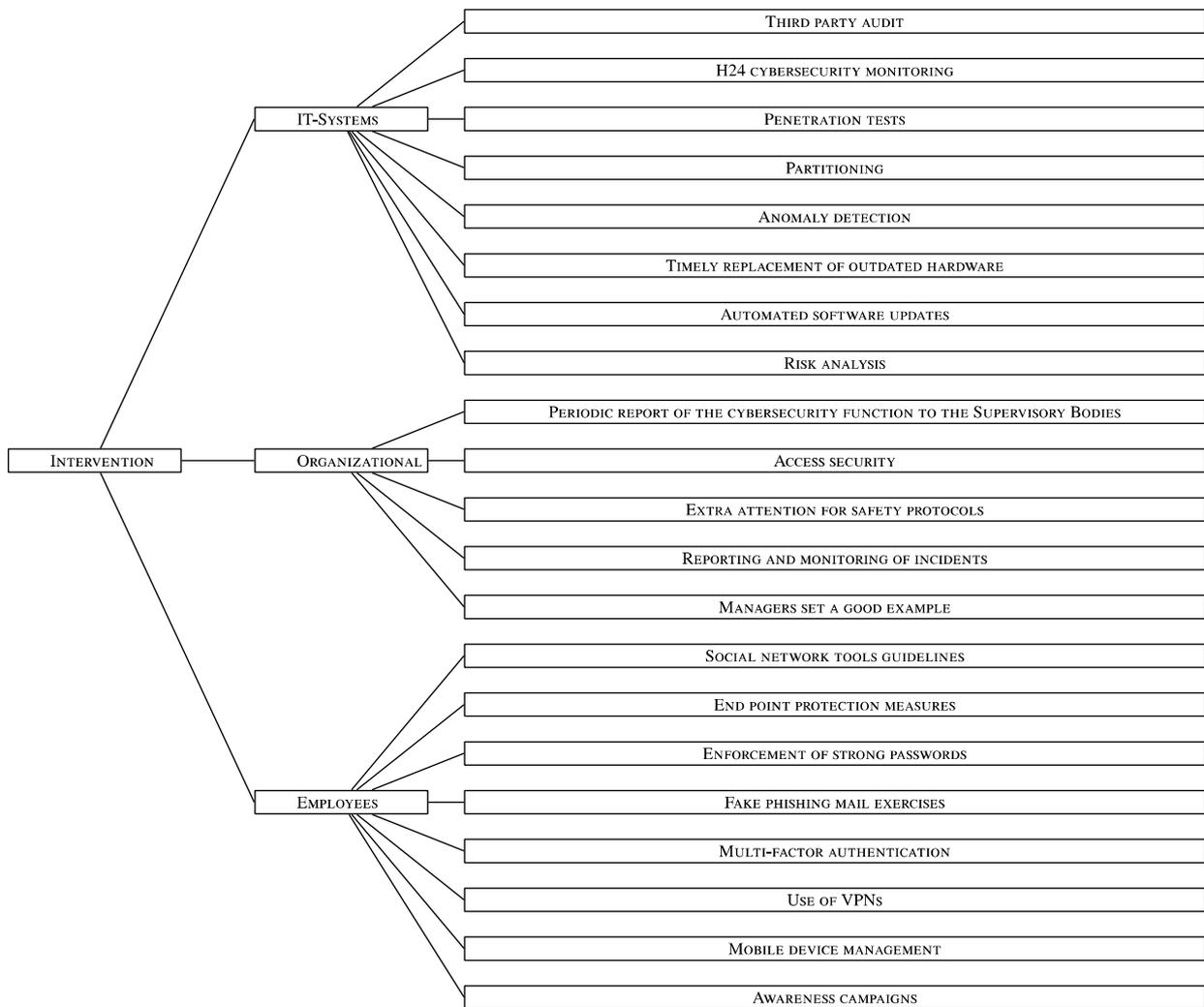


Figura 1. Interventi di cyber-security considerati.

Intervention	Survey %	Estimated Relevance %
Managers set a good example	19.05%	13.53%
Extra attention for safety protocols	23.81%	19.31%
Access security (physical & digital)	23.81%	20.30%
Periodic report of the cybersecurity function to the Supervisory Bodies	4.76%	19.10%
Reporting and monitoring of incidents	28.57%	27.77%
Kendall's correlation coefficient	0.7379	

Tabella 1. Interventi di cyber-security a livello di organizational policy.

Intervention	Survey %	Estimated Relevance %
Penetration tests	12.50%	14.98%
Anomaly detection	20.83%	17.15%
Timely replacement of outdated hardware	16.67%	8.48%
Partitioning	8.33%	11.82%
Risk Analysis	16.67%	18.87%
Automated software updates	16.67%	9.05%
Third party audit	4.17%	9.16%
H24 cybersecurity monitoring	4.17%	10.49%
Kendall's correlation coefficient	0.2315	

Tabella 2. Interventi di cyber-security a livello dei sistemi IT.

Intervention	Survey %	Estimated Relevance %
Social network tools guidelines	3.57%	8.79%
Use of VPNs	21.43%	11.73%
Mobile device management	10.71%	7.71%
Multi-factor authentication	10.71%	19.19%
Awareness campaigns	17.86%	12.52%
Enforcement of strong passwords	21.43%	17.27%
Fake phishing mail exercises	10.71%	13.74%
End point protection measures	3.57%	9.06%
Kendall's correlation coefficient	0.2758	

Tabella 3. Interventi di cyber-security relative a come gli impiegati interagiscono coi sistemi.

Bibliografia

- [1] European Parliament and Council (2012). Seveso III, Directive 2012/18/UE. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0018>
- [2] Lee, R. (2017 b). TRISIS Malware: Analysis of Safety System Targeted Malware. Dragos Inc. available at: <https://dragos.com/blog/trisis/>
- [3] Reeder, Joe R., and Cadet Tommy Hall. "Cybersecurity's Pearl Harbor Moment: Lessons Learned from the Colonial Pipeline Ransomware Attack." (2021).
- [4] Maglaras, L. A., Kim, K. H., Janicke, H., Ferrag, M. A., Rallis, S., Fragkou, P. & Cruz, T. J. (2018). Cyber security of critical infrastructures. *Ict Express*, 4(1), 42-45.
- [5] Setola, R., Faramondi, L., Salzano, E., & Cozzani, V. (2019). An overview of Cyber Attack to Industrial Control System. *Chemical Engineering Transactions*, 77, 907-912.
- [6] Cook, A., Janicke, H., Smith, R., & Maglaras, L. (2017). The industrial control system cyber defence triage process. *Computers & Security*, 70, 467-481
- [7] McLaughlin, S., Konstantinou, C., Wang, X., Davi, L., Sadeghi, A. R., Maniatakos, M., & Karri, R. (2016). The cybersecurity landscape in industrial control systems. *Proceedings of the IEEE*, 104(5), 1039-1057
- [8] Galloway, B., & Hancke, G. P. (2013). Introduction to industrial control networks. *IEEE Communications surveys & tutorials*, 15(2), 860-880.
- [9] Mansfield-Devine, S. (2019). The state of operational technology security. *Network Security*, 2019(10), 9-13.

- [10] Byres, E., & Lowe, J. (2004, October). The myths and facts behind cyber security risks for industrial control systems. In Proceedings of the VDE Kongress (Vol. 116, pp. 213-218)
- [11] Hemsley, K., & Fisher, R. (2018, March). A History of Cyber Incidents and Threats Involving Industrial Control Systems. In International Conference on Critical Infrastructure Protection (pp. 215-242). Springer, Cham.
- [12] Slay, J., & Miller, M. (2007, March). Lessons learned from the maroochy water breach. In International Conference on Critical Infrastructure Protection (pp. 73-82). Springer, Boston, MA.
- [13] Sadeghi, A. R., Wachsmann, C., & Waidner, M. (2015, June). Security and privacy challenges in industrial internet of things. In Design Automation Conference (DAC), 2015 52nd ACM/EDAC/IEEE (pp. 1-6). IEEE
- [14] Ani, U. P. D., He, H., & Tiwari, A. (2017). Review of cybersecurity issues in industrial critical infrastructure: manufacturing in perspective. *Journal of Cyber Security Technology*, 1(1), 32-74.
- [15] Knowles, W., Prince, D., Hutchison, D., Disso, J. F. P., & Jones, K. (2015). A survey of cyber security management in industrial control systems. *International journal of critical infrastructure protection*, 9, 52-80.
- [16] Drias, Z., Serhrouchni, A., & Vogel, O. (2015). Analysis of cyber security for industrial control systems. In *Cyber Security of Smart Cities, Industrial Control System and Communications (SSIC)*, 2015 International Conference on (pp. 1-8). IEEE.
- [17] Nicholson, A., Webber, S., Dyer, S., Patel, T., & Janicke, H. (2012). SCADA security in the light of Cyber-Warfare. *Computers & Security*, 31(4), 418-436
- [18] Assante, M. J., & Lee, R. M. (2015). The industrial control system cyber kill chain. SANS Institute InfoSec Reading Room, 1
- [19] Bodenheimer, R., Butts, J., Dunlap, S., & Mullins, B. (2014). Evaluation of the ability of the Shodan search engine to identify Internet-facing industrial control devices. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 7(2), 114-123
- [20] Marja Ylönen, Minna Nissilä, Jouko Heikkilä, Nadezhda Gotcheva, Alessandro Tugnoli, Matteo Iaiani, Valerio Cozzani, Gabriele Oliva, Roberto Setola, Giacomo Assenza, et al. Integrated management of safety and security synergies in seveso plants (Safe ra 4ster). 2021.
- [21] Gabriele Oliva, Roberto Setola, and Antonio Scala. Sparse and distributed analytic hierarchy process. *Automatica*, 85:211 – 220, 2017.
- [22] Gabriele Oliva, Antonio Scala, Roberto Setola, and Paolo Dell’Olmo. Opinion- based optimal group formation. *Omega*, 2018.
- [23] Maurice G Kendall. A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 30(1/2):81–93, 1938.

Analisi di un sistema complesso post disruption: la valutazione della resilienza di un servizio essenziale agli impianti

P. Addonizio¹, R. Bizzarro², M. Di Nardo², M. Madonna¹, T. Murino²

¹ Inail – Uot di Napoli

² Università degli Studi di Napoli Federico II – Dipartimento di Ingegneria Chimica dei Materiali e della Produzione Industriale

Sommario

L'attuale situazione pandemica sta ponendo molti ostacoli al mondo industriale, obbligando le imprese a possedere elevata resilienza, in modo da riuscire ad affrontare le attuali sfide e pressioni. La resilienza è uno dei modi per combattere le interruzioni di tutte le risorse in input all'interno di un sistema, quali interruzioni potrebbero essere causate anche da eventi catastrofici. Un sistema resiliente è in grado di modificare totalmente la sua capacità di funzionamento, in quanto riesce a garantire parametri di affidabilità tali da conservare il sistema stesso nello stato nominale di funzionamento, anche in caso di failure e/o disruption.

Gli impianti risultano attrezzati con strumenti atti al monitoraggio e al controllo dello stato del sistema con possibilità di shut down e/o di intervento.

Uno stato di allarme si instaura per quegli eventi che, pur sotto controllo, per la propria natura o per particolari condizioni ambientali, possano far temere un aggravamento e quindi necessità di attivazione delle procedure di sicurezza. Quindi la resilienza dell'impianto viene valutata come capacità di ripristino delle condizioni iniziali: si considera una distribuzione energetica per un impianto, che sarà definita resiliente dal momento che, in caso di allarme, le operazioni di ripristino avvengano in un intervallo di tempo definito, non comportando ritardi alla produzione, e minimizzando l'impatto ambientale. La rapidità di esecuzione permetterà di mettere l'impianto in sicurezza non ponendo pericoli a uomini/cose. A tal fine, si definirà l'indicatore di resilienza.

Keywords: Resilienza, KPI, Sicurezza, System Dynamics

1. Introduzione

Gli eventi catastrofici degli ultimi anni come l'uragano Katrina, nonché l'attuale COVID-19 e le guerre in Medio Oriente hanno mostrato come il business globale sia vulnerabile a eventi imprevedibili e catastrofici e hanno cambiato il concetto di preparazione per i disastri. Purtroppo, non c'è modo di evitare questi rischi, si nota però che alcune organizzazioni superano questi imprevedibili meglio di altre. Nel settore aziendale la resilienza si riferisce alla capacità di un'azienda di resistere a un evento gravemente dannoso. La capacità di un'organizzazione di tornare al lavoro dopo un evento catastrofico dipende più dalle decisioni prese prima dell'evento che da quelle prese durante o dopo. In questo lavoro il concetto di resilienza sarà affrontato a livello di reti di asservimento. Questo lavoro descrive innanzitutto la gestione del rischio delle reti, analizza le cause di vulnerabilità, concentrandosi sulla differenza tra analisi dei rischi e analisi delle vulnerabilità e trovando soluzioni per ridurre i rischi. Il caso studio analizzato si focalizza sulla distribuzione di energia a più impianti clienti.

Il lavoro è così organizzato: nella sezione seguente è presente una panoramica del concetto di resilienza con riferimento alla letteratura pertinente. In particolare, vengono studiate le aree sensibili di intervento e gli approcci per costruire una rete di asservimento resiliente, secondo i pareri degli esperti del settore. Le sezioni seguenti descrivono il

modello, implementato utilizzando l'approccio System Dynamics (Sterman 2000), e i parametri dell'efficienza raggiunta. I risultati delle simulazioni vengono quindi utilizzati per fornire una funzione di resilienza con l'aiuto di un progetto di esperimenti (DOE) e, infine, viene presentata la definizione di una rete di asservimento resiliente

2. Gestione dei rischi di una rete resiliente

La Supply Chain Risk Management (Juttner 2005) è una disciplina del Risk Management (RM) che tenta di identificare potenziali interruzioni alla produzione continua e quindi l'esposizione finanziaria commerciale (Tang e Tomlin 2008, Tang 2006). La gestione dei rischi, ovvero il Risk Management è diventata sempre più importante basti pensare agli episodi terroristici della memoria recente che hanno portato alcuni governi ad investire pesantemente su questo fronte, incoraggiando la ricerca su tecnologie e strumenti di gestione per la sicurezza dei materiali, delle persone e dei flussi informativi. Sebbene i metodi di ingegneria delle reti di asservimento siano avanzati rapidamente negli ultimi due decenni, l'applicazione di modelli e metodi per considerare e gestire esplicitamente incertezze e rischi nelle attività di resilienza impiantistica è necessaria affinché le aziende convergano al successo. La capacità di identificare, valutare, gestire, mitigare e controllare l'impatto di eventi dirompenti all'interno degli impianti è al centro della gestione del rischio degli impianti stessi. Nel corso degli anni '90, molte aziende si sono adoperate per migliorare la propria performance finanziaria implementando varie iniziative di resilienza. Queste iniziative avevano lo scopo di aumentare le entrate, ridurre i costi e le risorse. Dal 2005 in poi *la resilienza* è stata applicata sia alla progettazione inerente che alla gestione sicura degli impianti. Queste iniziative possono essere efficaci in un ambiente stabile; tuttavia, con l'aumentare del numero di eventi dirompenti, diventa sempre più difficile gestire le varie reti, di conseguenza le aziende sono generalmente lente a rispondere ai cambiamenti e, quindi, sono più vulnerabili alle interruzioni dell'attività. Secondo uno studio condotto da Computer Sciences Corporation nel 2004, il 60% delle aziende sono vulnerabili alle interruzioni. Negli attuali mercati incerti e turbolenti, la vulnerabilità degli impianti è diventata una questione importante per molte aziende (Oke et al. 2009). Un'analisi delle vulnerabilità non è equivalente a un'analisi dei rischi. Quest'ultima si concentra sulle risorse umane, sugli impatti ambientali e patrimoniali di un evento accidentale, mentre un'analisi di vulnerabilità è focalizzata sulla sopravvivenza delle reti. L'analisi della vulnerabilità ha una gamma più ampia rispetto all'analisi del rischio. In particolare, il primo riguarda il modo per indebolire le minacce rilevate e riavviare il sistema dopo un evento accidentale. Asbjørnslett e Rausand (1997) descrivono i passaggi per eseguire un'analisi di vulnerabilità. Innanzitutto, viene sviluppato uno scenario di valutazione con l'elenco delle minacce e la probabilità dello scenario di rischio potenziale. In secondo luogo, viene effettuata un'analisi quantitativa dei fattori precedentemente rilevati, classificando minacce e scenari in base alle criticità in termini di impatti su risorse umane, ambiente, commercio e immobili. Nel suo lavoro, "The Resilient Enterprise", Yossi Sheffi (2005a) analizza le interruzioni ad alto impatto / bassa probabilità. Sheffi afferma che nel processo di creazione di un'organizzazione resiliente, le aziende devono prima individuare e creare una priorità delle tipologie e dei livelli di rischio che devono affrontare. Christopher (1992) fornisce la seguente definizione di vulnerabilità di una rete di asservimento: "un'esposizione a gravi perturbazioni". Tra i rischi interni vi sono quelli relativi ai processi, il rischio di processo si riferisce alle interruzioni del processo. I controlli sono l'impegno, gli standard, i sistemi e le procedure utilizzate da un'organizzazione per esercitare il proprio controllo sui processi. Il rischio di controllo è quindi rilevante per il rischio derivante dall'errata applicazione di questi standard. D'altra parte, il rischio esterno

dell'azienda si riferisce a fattori rilevanti per danno potenziale o reale rispetto alla domanda di prodotti, alle informazioni e al flusso di denaro tra l'azienda e il mercato.

Hans et al (2016) sostengono che l'approccio della resilienza mira a esaminare sia le cause di fondo che quelle sistemiche degli incidenti che sono influenzati da fattori umani e organizzativi.

Pera et al (2020) evidenziano come nella società moderna il concetto di resilienza sta diventando ampiamente applicato in vari campi di studio, in particolare nella sicurezza, la resilienza è diventata un concetto importante.

Pishnamazzadeh et al (2020) Il primo passo verso la costruzione o la progettazione di un'organizzazione resiliente è la valutazione e sulla base di essa è possibile definire una serie di strategie o azioni per aumentare il livello di resilienza.

Tang J. et al (2021) sostengono come i guasti degli impianti portano inevitabilmente a una significativa perdita di resilienza a causa del deterioramento della connettività di rete.

3. Resilienza delle reti di asservimento

Nelle scienze dei materiali la resilienza rappresenta la capacità di un materiale di riacquistare la sua forma originaria dopo una deformazione, mentre nel settore delle imprese la resilienza si riferisce alla capacità di un'azienda di resistere a un evento dannoso. L'ambiente turbolento in cui operano le imprese è una delle principali fonti di rischio. La vulnerabilità di un'impresa aumenta con la volatilità della domanda. I fattori di rischio, oltre ad agire individualmente sulle vulnerabilità, si combinano e si influenzano a vicenda (l'incertezza di un tale mercato può essere dovuta ad eventi catastrofici o terroristici). Fondamentalmente è necessario includere nei modelli decisionali, non solo i rischi associati ai processi, ai controlli, alle forniture e alla domanda tradizionali, ma anche quelle relative agli ambienti esterni. Per questo motivo l'attenzione si è spostata da impianti orientati alla robustezza a impianti orientati alla resilienza. La robustezza è la capacità di rimanere stabili a seguito di cambiamenti. Il termine "resilienza" indica la capacità di tornare allo stato desiderato dopo un disturbo grave (Revetria et al. 2000). In un tale contesto, un'azienda deve essere in grado di rispondere ai rischi e alle vulnerabilità e tornare rapidamente a livelli di performance pre-evento o anche superiori. Allo stesso modo, l'azienda deve essere in grado di gestire l'incertezza dei fattori di input tenendo sotto controllo la variabilità dell'output (livelli di performance). Risulta quindi evidente la necessità di stabilire linee di ricerca specifiche per lo studio e l'analisi di modelli decisionali per aziende innovative che assicurino risposte adeguate al mutare dei contesti moderni. Questi modelli dovrebbero integrare le seguenti aree di ricerca:

- Gestione degli impianti in un'ottica di resilienza, robustezza e sicurezza
- Analisi dei rischi, vulnerabilità e incertezze nell'impianto
- Previsione e analisi della domanda di mercato
- Costo del ciclo di vita
- Modellazione e simulazione.

Le aree di ricerca sopra elencate sono altamente complementari e la loro integrazione è infatti il fattore trainante nello sviluppo dei modelli decisionali. Il *Modeling & Simulation* è una tecnica che consente l'analisi di scenari alternativi e il test di politiche e modelli implementati. Il concetto di vulnerabilità applicato ai sistemi di produzione è definito da Asbjørnslett e Rausand (1997) che spiegano come un sistema forte e resiliente è in grado di supportare senza perturbare o assorbire un fallimento catastrofico. Forte significa che è in grado di resistere a un imprevisto e di tornare nella stessa situazione stabile precedente. Resiliente significa, invece, capace di tornare in una situazione nuova (spesso "inferiore") rispetto a quella sussistente prima dell'evento. Lo schema in Figura 1 rappresenta la reazione di un'impresa a un evento catastrofico proposto da Sheffi (2005b).

L'evento distruttivo è preceduto da un "tempo di preavviso" in cui l'azienda può (in alcuni casi) prevedere cosa accadrà e agire per ridurre le conseguenze. Se non è possibile evitare in tempo l'interruzione, essa si manifesterà in tutta la sua forza dopo un breve intervallo di tempo a causa di un "impatto ritardato". A questo punto la rete deve prepararsi a riprendersi. La ripresa si materializza gradualmente dopo un "tempo di recupero" e porta la rete a un livello di prestazioni spesso inferiore a quello precedente all'impatto.

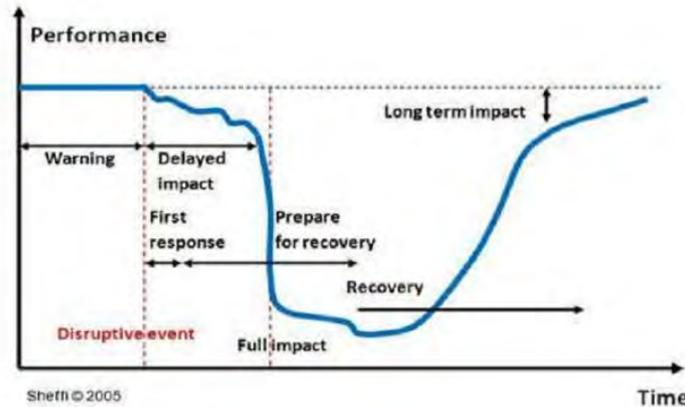


Figura 1. Un profilo di eventi dannosi secondo Sheffi (2005b)

3.1 Costruire una rete resiliente

Il rischio è inevitabile ma può essere gestito (Briano et al. 2010a). Esistono fondamentalmente due strategie generali per gestire il rischio: un tentativo di ridurre il rischio riducendo le conseguenze o l'impatto dell'aumento della reattività della rete (in altre parole riducendo la vulnerabilità), mentre le altre strategie cercano di ridurre le possibilità di accadimento, che ne aumenta la sicurezza. Studi recenti hanno dimostrato come la resilienza sia il modo migliore per affrontare le interruzioni. Secondo Christopher (2004), i rischi degli impianti possono essere mitigati attraverso un approccio sistematico alla gestione dei rischi delle reti. Esistono 5 principi di base che consentono la creazione di una rete di asservimento maggiormente resiliente:

1. Comprensione della rete: per comprendere la rete possono essere utili gli strumenti di mappatura.
2. Strategia della base di approvvigionamento: molte aziende hanno ridotto il numero di fornitori per ridurre i costi di produzione. Può fornire una reale riduzione dei costi, ma questo tipo di strategia è pericolosa in termini di resilienza.
3. Collaborazione nella rete: un alto livello di collaborazione può aiutare a mitigare i rischi.
4. Agilità: uno dei modi più potenti per raggiungere la resilienza è l'agilità.

È dimostrato che le organizzazioni che hanno focalizzato l'attenzione sull'eliminazione di passaggi non a valore aggiunto (NVA) risultano maggiormente pronte a rispondere a eventi imprevisti. L'agilità si basa su due principi chiave, velocità e visibilità. La velocità richiede pipeline end-to-end più brevi che dipendono dalle decisioni di approvvigionamento e dal miglioramento dei processi interni. La visibilità influisce sull'agilità in molti modi. In primo luogo, riduce l'incertezza e consente di raggiungere l'obiettivo di una rete di asservimento guidata dalla domanda. In secondo luogo, riduce il rischio della rete attraverso la condivisione di informazioni, sia a monte che a valle delle operazioni aziendali.

5. Creazione di una gestione del rischio della rete (Revetria et al. 2000). Sheffi (2005b) sottolinea che la gestione dei rischi aziendali si manifesta in 3 forme: ci sono i responsabili che si occupano del piano di continuità aziendale redatto; c'è il personale addetto alla sicurezza (badge per l'accesso, codici di sicurezza, ecc.); ed infine le informazioni di

sicurezza tecnologica (ad esempio, backup dei dati). Queste 3 funzioni sono spesso autonome e non possono essere integrate nelle strategie aziendali.

Le definizioni tradizionali di sicurezza e continuità aziendale sono solo una piccola parte della reale resilienza. In particolare, le aziende possono sviluppare la resilienza principalmente in tre modi: aumentare la ridondanza, costruire la flessibilità e cambiare la cultura aziendale. Il primo ha un'utilità limitata; gli altri due invece sono essenziali.

4. Modello

È stato sviluppato un modello di rete di asservimento resiliente utilizzando il software SD commerciale "Powersim" (Briano et al. 2010b). Il modello parte da un input esogeno che simula la domanda di energia fatta all'impianto attraverso una funzione grafica. È stato impostato un profilo della domanda, vedere la Figura 2 successiva; questi potrebbero essere dati storici di periodi precedenti. Questi dati sono stati utilizzati per prevedere le richieste da parte degli impianti che sfruttano la funzione "previsione" che restituisce il valore previsto dell'input nel futuro. La differenza tra richiesta di pianificazione e vendite ritardate forma un Gap, la cui media è stata calcolata dalla variabile ausiliaria "Previsione della media degli errori", che verrà aggiunta a "Richiesta di pianificazione" per formare la "Previsione".

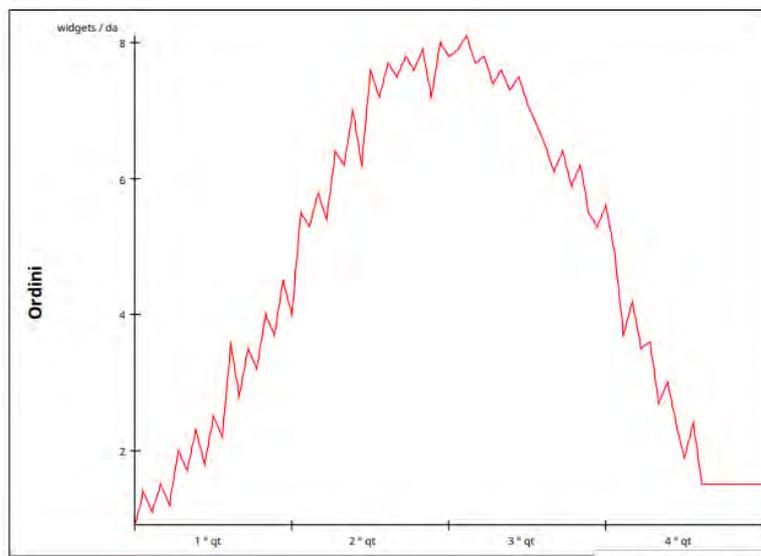


Figura 2. Ipotesi del percorso degli ordini da parte dei clienti

Si è calcolata la differenza tra ciò che ci aspettavamo dalle richieste e ciò che gli impianti richiedono; questa differenza lungo l'orizzonte temporale si aggiunge alla nostra previsione e sarà molto utile per creare e riempire un stock di energia con un livello di stock adeguato. Si crea così un "magazzino" di energia aggiungendo una costante rappresentativa della "Scorta di sicurezza" per Previsioni future. Il Magazzino Ausiliario desiderato rappresenta il livello di scorta di energia. Se il livello della scorta è inferiore al magazzino desiderato, si aumenta l'approvvigionamento dalla rete di distribuzione. Non appena il livello delle scorte di prodotto finito è uguale a zero, parte il primo flusso di produzione seguito dal secondo con un piccolo ritardo dato in input. Questi flussi si interrompono quando il livello del magazzino del prodotto finito supera il livello di WIP desiderato. La Figura 3 mostra le richieste di energia elettrica gli arretrati e le tendenze di costi, dei ricavi e dei profitti. In questo documento il comportamento del modello della rete

resiliente viene analizzato con la simulazione. Pertanto si cercherà di ottimizzare il flusso di energia, ottimizzando costi e profitto variando i parametri:

- a) numero di clienti,
- b) quantità di stock in magazzino,
- c) variazione dovuta a interruzioni o picchi di domanda imprevisti.

I parametri citati sono considerati importanti per aumentare la resilienza della rete di asservimento. Al fine di analizzare come le prestazioni di una rete cambiano a causa di un'interruzione dei fornitori, sono state analizzate diverse reti caratterizzate da 3, 2 e 1 cliente. Dopo un'interruzione, verrà analizzato il comportamento dell'intero sistema. Il secondo scenario prevede la reazione del sistema a un inaspettato picco di domanda in tre differenti situazioni caratterizzate da un livello di scorte a magazzino alto, medio e nullo. Il primo scenario riguarda una situazione in cui tre diversi fornitori condividono lo stesso tasso di offerta. Il comportamento della perdita di un cliente è mostrato nella Figura successiva.

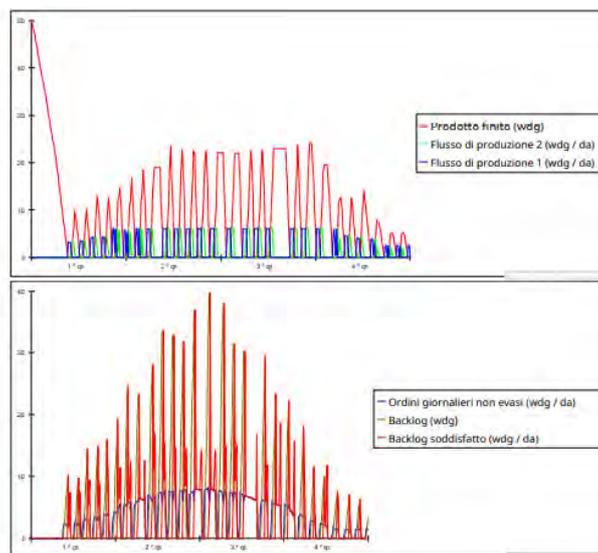


Figura 3. Flussi di produzione e tendenze del portafoglio ordini

Quello che segue è un modello di catena di fornitura e di distribuzione. Dopo un evento imprevisto la catena di fornitura perde un cliente con le conseguenti prestazioni mostrate in Figura 4. L'ultimo scenario, quello più catastrofico, è mostrato in figura successiva, ed è la perdita dell'unico cliente. Le tabelle nelle figure seguenti mostrano che i profitti scendono lentamente dal primo al secondo scenario perché la catena di approvvigionamento sembra essere resiliente. La situazione cambia drasticamente nell'ultimo scenario in cui i profitti crollano a causa di penalità verso i clienti. Aumentare la resilienza in una catena di fornitura permette di affrontare una variazione imprevista della domanda. Successivamente, analizziamo la reazione della catena di approvvigionamento a un picco della domanda (vedi figura seguente.) in diversi scenari caratterizzati da diversi livelli di scorte.

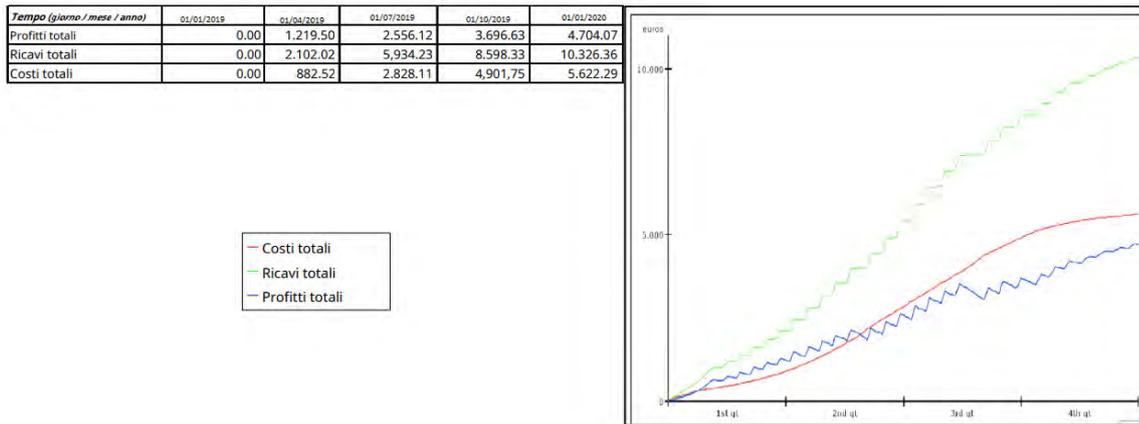


Figura 4. Perdita di un canale di fornitura a due clienti

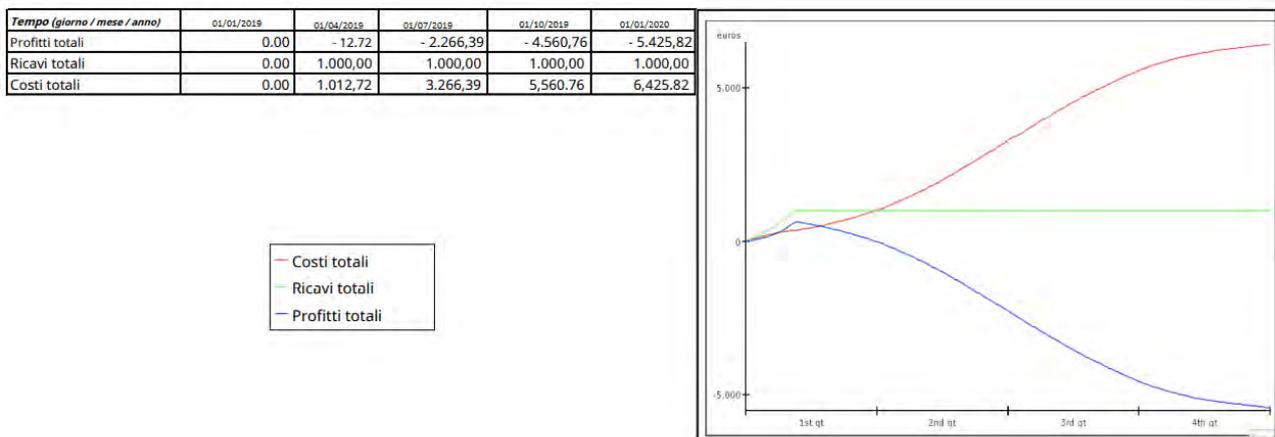


Figura 5. Perdita di un canale di fornitura ad un cliente

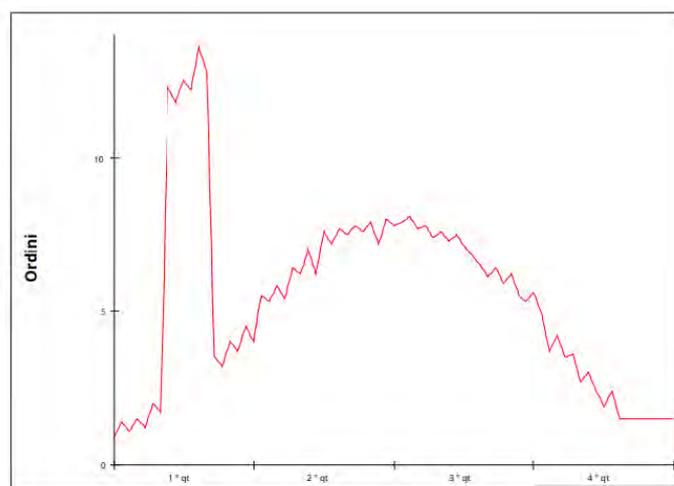


Figura 6. Profilo della domanda con variazione inaspettata

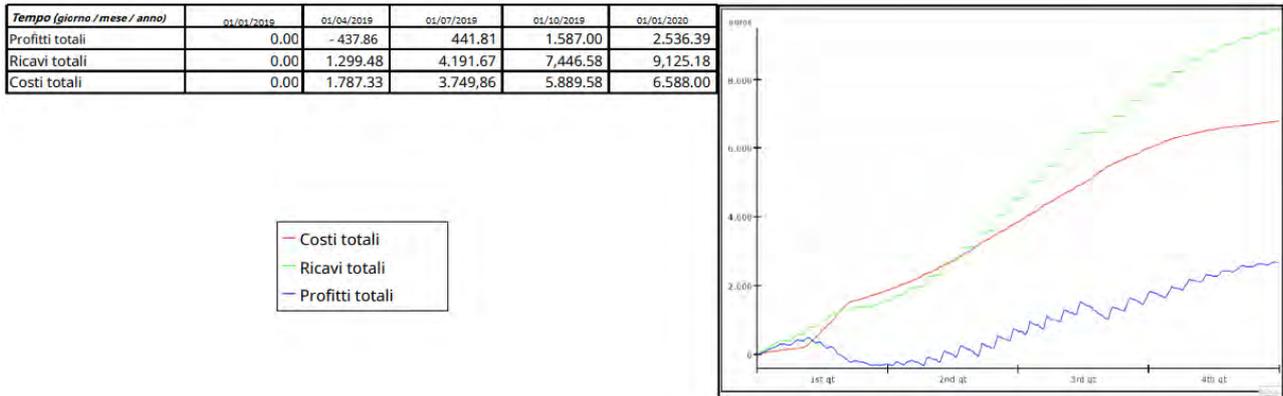


Figura 7. Situazione del livello di scorte nulle

A differenza del caso precedente in cui la situazione sembrava migliorare con l'aumentare del numero di clienti, qui la situazione migliore è quella intermedia. Una migliore copertura dalle fluttuazioni impreviste della domanda.

5. Analisi di performance

Lo scopo di questa sezione è studiare le risposte del modello analizzato nei paragrafi precedenti al fine di determinare quale sia la manopola che dobbiamo muovere per regolare la resilienza. Viene inoltre sviluppata una funzione di resilienza come risultato dell'analisi eseguita con un disegno di esperimenti (DOE). La perturbazione dell'equilibrio del sistema è una variazione inaspettata della domanda rispetto a quella precedentemente prevista: la domanda in osservazione è mostrata in Figura (successiva). Per determinare le variabili che maggiormente influenzano la variazione di resilienza nella rete resiliente, è stata analizzata la risposta del sistema in particolari condizioni operative. I fattori da considerare sono:

- Livello delle scorte
- Numero di clienti
- Tempi di produzione (velocità)

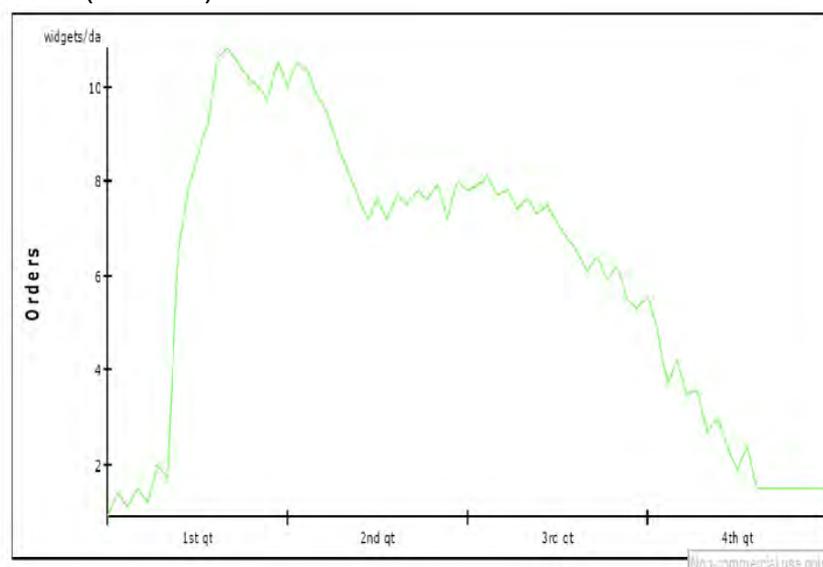


Figura 8. Profilo della domanda

La tabella 1 mostra i benchmark utilizzati per esemplificare situazioni normali, prestazioni basse e alte. Tabella 1: parametri di simulazione

	Normal			High			Low		
<i>Stock level</i>	0	0	50	30	30	100	0	0	0
<i>no. of Plants</i>	1			3			1		
<i>Speed</i>	0.5 da		2 hr	0.25 da		1 hr	1.5 da		4 hr

Tabella 1. Parametri di simulazione

I risultati ottenuti a livello di prestazioni sono mostrati in Tabella 2 (l'output è l'utile dell'impresa misurato in euro): Tabella 2: output del modello

Variables	+	-
<i>Stock level</i>	690.88	1,258.85
<i>no. of Plants</i>	2,316.76	1,198.49
<i>Speed</i>	2,142.90	-652.22

Tabella 2. Misura delle variabili

Sono state analizzate le interazioni tra le variabili del modello, valutando la risposta dei sistemi attraverso simulazioni con tutte le possibili combinazioni di livelli di prestazione alti e bassi (vedi tabella 3). I dati ottenuti dalla simulazione sono stati poi utilizzati, con l'aiuto di un DOE (design of experiment), per valutare le interazioni nelle variabili del modello e la loro importanza al fine di variare la resilienza della supply chain.

<i>Stock level</i>	<i>no. of Plants</i>	<i>Speed</i>	<i>OUTPUT</i>
+	+	+	1,711.14
+	-	+	1,567.92
+	+	-	873.83
-	+	+	2,014.45
-	-	+	1,283.36
-	-	-	-1,030.32
+	-	-	-999.93
-	+	-	1,049.84

Tabella 3. Output del modello con tutte le possibili combinazioni di variabili

La Figura seguente mostra il livello di correlazione tra le variabili del modello. Come possiamo notare, solo la variabile C (velocità), ha un forte effetto sul risultato di output. In misura minore, la variabile B (numero di fornitori) e l'interazione AC rappresentano importanti variabili del modello. Le variabili con effetti di interazione bassi includono la variabile A (livello di scorta) e la variazione combinata di AC. La Figura seguente presenta i grafici di interazione.

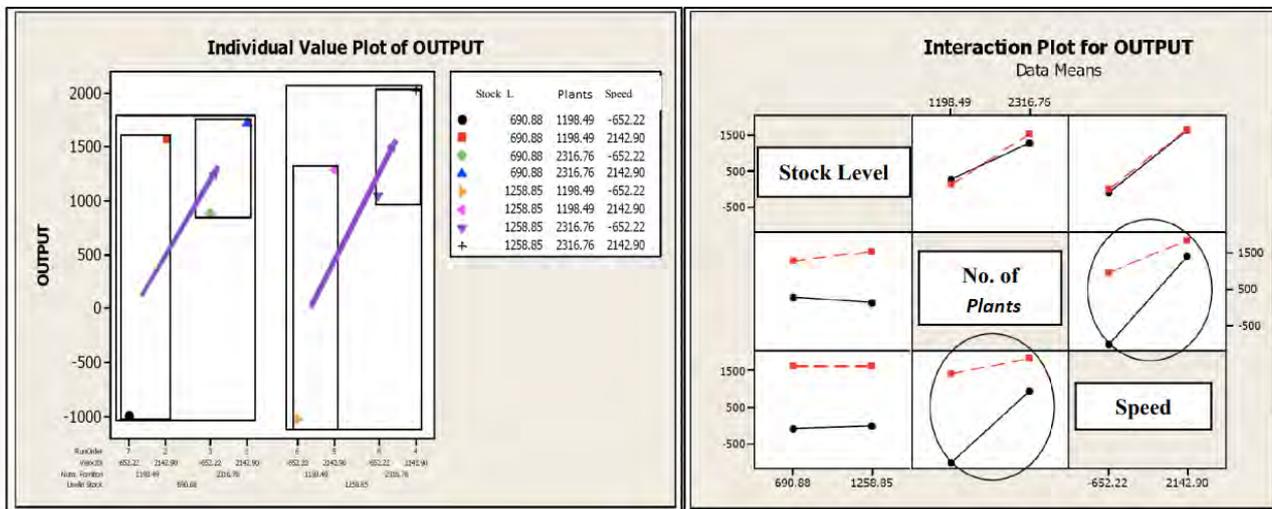
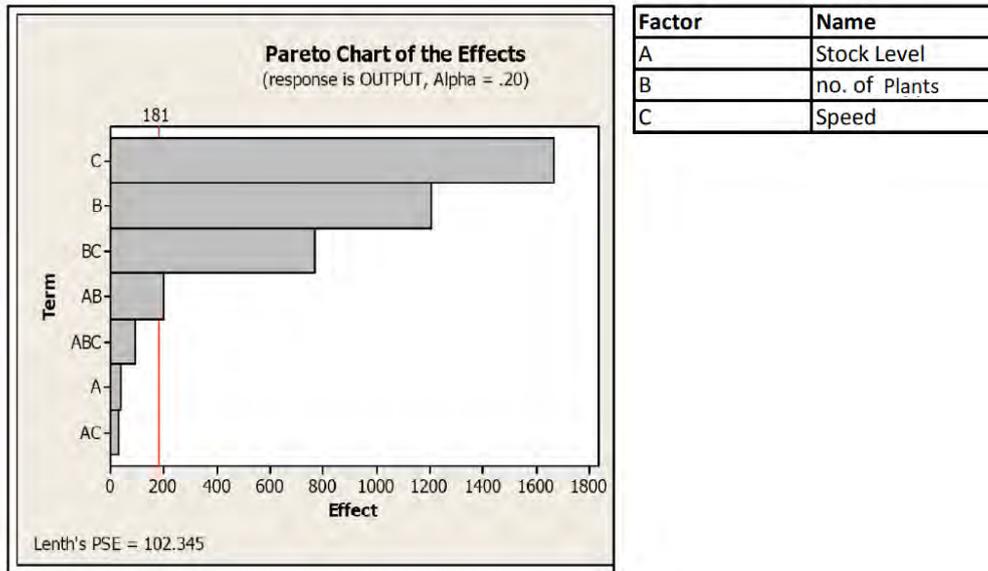


Figure 9 e 10. Correlazione tra variabili

Dal grafico a sinistra nella figura precedente, si può vedere che l'output è quasi lo stesso al variare dei livelli di scorta, confermando ciò che abbiamo notato nei grafici precedenti che la variabile del livello delle scorte è quasi irrilevante. Per un livello di stock elevato (cluster di sinistra), da un numero basso a un numero elevato di clienti, possiamo notare che la variabile di velocità influisce meno; in entrambi i gruppi, il primo rettangolo è più grande di quello di destra, dando una prova grafica di ciò che abbiamo appena detto. Per un livello di stock basso (cluster destro), il comportamento è sostanzialmente simile con la differenza che, con un numero basso di fornitori, variando la velocità, la variazione dell'output è inferiore al caso precedente mentre la variazione dell'output è maggiore rispetto al caso precedente con un numero elevato di fornitori. Le interazioni a due vie tra le variabili di sistema sono mostrate nel grafico a destra nella Figura precedente. Come evidenziato dai cerchi segnati, le variazioni di output più importanti si ottengono variando velocità e numero di fornitori. Nel primo caso, variando la velocità, l'output cambia sostanzialmente con i due livelli di numero di fornitori e, nel secondo caso, variando il numero di fornitori, l'output cambia con i due livelli di velocità. I due livelli di numero di fornitori e velocità sono quasi inalterati con diversi livelli di stock. Il risultato di questo lavoro è la costruzione di una funzione di resilienza. Secondo l'analisi dei risultati della progettazione degli esperimenti, solo il numero di fornitori, la velocità e la

loro interazione influenzano fortemente la variazione della resilienza. La funzione di resilienza può essere definita considerando:

- X_1 variabile che rappresenta la velocità,
- X_2 numero di clienti da asservire
- X_3 il livello delle scorte.

In questa funzione solo due variabili e la loro interazione giocano un ruolo importante.

$$R = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{13} X_1 X_3 \quad (1)$$

La variabile Stock level e la sua interazione con altre variabili è irrilevante nella variazione della resilienza. Nella funzione di resilienza, quindi, i termini $\beta_3 X_3$, $\beta_{23} X_2 X_3$ e $\beta_{13} X_1 X_3$ possono essere considerati trascurabili. È anche importante notare come la variazione di queste due variabili includa costi e comportamenti diversi. L'aumento o la diminuzione del numero di clienti dipende solo dagli accordi commerciali, eliminare un canale di vendita (ovvero un cliente) può essere più costoso. Per aumentare la velocità nella rete resiliente è necessario riprogettare i sistemi. Questa variabile è importante per migliorare la resilienza ma ad alti costi di reengineering quindi si deve decidere se affrontare questa spesa ed essere più sicuri in caso di possibili future interruzioni, o se spendere meno.

6. Conclusione

In questo lavoro è stata presentata una procedura metodologica per determinare l'insieme di variabili decisionali che influenzano la resilienza. L'obiettivo è dimostrare come costruire uno strumento di supporto decisionale in grado di produrre rapidamente e con ragionevole affidabilità risultati efficaci per quanto riguarda l'adattabilità del CS a disturbi interni ed esterni improvvisi e imprevisti attraverso questi passaggi metodologici:

- identificare il problema
- collegamenti logici e definizione funzionale
- rappresentazione del flusso di processo
- definizione del modello matematico
- simulazione del modello
- determinazione delle variabili decisionali da parte del DOE
- progetto di modulo analitico di resilienza

Questo strumento potrebbe essere utilizzato sia nella fase di pianificazione che in quella operativa. In fase di progettazione può identificare l'entità di variazione delle variabili predominanti che influiscono sulla resilienza del CS al fine di garantire la stabilizzazione dello stesso in caso di disturbi. Durante il funzionamento, può essere utilizzato per identificare tempestivamente variabili come agire, produrre risultati efficaci per il CS al verificarsi di perturbazioni ambientali e / o interne. Il più importante sviluppo futuro di questo lavoro è la calibrazione dei parametri di funzione utilizzando il modello con benchmark reali. Il modello può anche essere aggiornato e adattato a varie catene di approvvigionamento con diversi set di elementi. Può essere utilizzato per pianificare la manutenzione o per analizzare la risposta del sistema a guasti o scioperi imprevisti.

7. Bibliografia

- [1] Asbjørnslett, B. E., and M. Rausand. 1997. "Assess the Vulnerability of Your Production System." *Production Planning and Control* 10:219-229.
- [2] Christopher, M. 1992. *Logistics and Supply Chain Management*. London: Pitman Publishing.

- [3] Briano, E., C. Caballini, P. Giribone, and R. Revetria. 2010a. "Objectives and perspectives for improving resiliency in Supply Chains." WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS 9(2):136-145.
- [4] Murino, Romano, and Santillo Briano, E., C. Caballini, P. Giribone, and R. Revetria. 2010b. "Resiliency and Vulnerability in Short Life Cycle Products' Supply Chains: a System Dynamics Model." WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS 9(4):327-337.
- [5] Juttner, U. 2005. "Supply Chain Risk Management: Understanding the Business Requirements from a Practitioner Perspective." The International Journal of Logistics Management 16(1):120-141.
- [6] Oke, A., and M. Gopalakrishnan. 2009. "Managing Disruptions in Supply Chains: A Case Study of a Retail Supply Chain." International Journal of Production Economics 118(1):1 - 6.
- [7] Revetria, R., A. G. Bruzzone, R. Mosca, and S. Rapallo. 2000. "Risk Analysis in Harbour Environments Using Simulation." International Journal of Safety Science 35: 243 – 248.
- [8] Revetria R., Bruzzone A.G. 2002. "Reliability Analysis by Using Simulation for Complex Automated Plants" International Journal of Simulation series ISSN 0735-9276, Volume 34 Part 4 pp. 115-119.
- [9] Sheffi, Y. 2005a. "Building a Resilient Supply Chain." Harvard Business Review Supply Chain Strategy 1(8):1-4. Sheffi, Y. 2005b. The Resilient Enterprise - Overcoming Vulnerability for Competitive Advantage. Boston, MA: MIT Press.
- [10] Sterman, J. D. 2000. Business Dynamics, System Thinking and Modeling for a Complex World. McGrawHill.
- [11] Tang, C. S. 2006. "Perspectives in Supply Chain Risk Management." International Journal of Production Economics 103(2): 451 - 488.
- [12] Tang, C. S., and B. Tomlin. 2008. "The Power of Flexibility for Mitigating Supply Chain Risks." International Journal Production Economics 116:12 – 27.
- [13] Pera F, Madonna M., Del Prete E., 2020 Enhancing the organizational resilience through the safety management system., Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference doi: 10.3850/978-981-14-8593-0_4600-cd
- [14] Pishnamazzadeh M.m Spephri M., Ostadi B., 2020 An Assessment Model for Hospital Resilience according to the Simultaneous Consideration of Key Performance Indicators: A System Dynamics Approach. Perioperative Care and Operating Room Management 20 (2020) 100118. <https://doi.org/10.1016/j.pcorn.2020.100118>.
- [15] PrernaJainHans J.PasmanSimon P.WaldramWilliam J.RogersM. SamMannan
- [16] Hans P.J, Waldram S.P,Rogers W. Mannan M.,2016 Did we learn about risk control since Seveso? Yes, we surely did, but is it enough? An historical brief and problem analysis. Journal of Loss Prevention in the Process Industries xxx (2016) 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.09.023>
- [17] Tang, J,Xu, L., Luo, C.,Ng, T. S. A. Multi-disruption resilience assessment of rail transit systems with optimized commuter flows. Reliability Engineering and System Safety <https://doi.org/10.17863/CAM.69325>

Il processo di pressatura isostatica a caldo. Un caso studio

C. Piccolo¹, N. Altamura², A. De Palma³, P. De Luca⁴, L. Nastro⁴

¹ Inail – Uot Avellino

² Inail – Uot Bari

³ Inail – Uot Venezia

⁴ Rete PoEma

Sommario

Il processo di pressatura isostatica a caldo o, in inglese **Hot Isostatic Pressing** da cui l'acronimo HIP, è un processo industriale che grazie alla versatilità dei materiali trova ampio spazio in diverse applicazioni industriali legate alla produzione di componenti per turbine, parti strutturali e del motore per l'industria aerospaziale, componenti di motori per l'industria automobilistica, protesi, corpi valvole per il settore Oil & Gas nonché anche in alcune applicazioni per il settore orafa di alta gamma. Nel presente lavoro si analizzano le condizioni di installazione e dei relativi rischi connessi al processo di pressatura in considerazione degli elevati valori di pressione dei cicli di lavorazione che raggiungono in determinate condizioni i 2000 bar. L'impianto, oggetto del caso studio, è utilizzato nell'ambito produttivo di un'azienda inserita in un consorzio di imprese operanti nel settore delle microfusioni aeronautiche per la produzione di componenti per motori aerospaziali ed in particolare per lavorare alcuni specifici componenti realizzati in speciali superleghe utilizzati nella costruzione di turbine per motori aeronautici.

Sono riportate infine le osservazioni all'esito della messa a regime ed in produzione dell'attrezzatura anche in considerazione dei risultati qualitativi richiesti dal processo produttivo.

1. La rete di imprese nel settore aeronautico

L'azienda presso la quale è installata l'attrezzatura oggetto del caso studio opera all'interno di una rete di imprese nata nell'ultimo decennio nel cuore dell'Alta Irpinia aggregando aziende di varie dimensioni ognuna con una propria specifica capacità produttiva e tecnologica, con lo scopo di dar vita ad un Centro di eccellenza nel campo della produzione di componenti per turbine aeronautiche e turbogas.

Nell'ambito dell'operatività del settore aeronautico, l'azienda oggetto del presente caso studio, ha avviato una propria unità produttiva presso il complesso industriale all'interno del cui contesto contribuisce fornendo i processi di trattamenti termici, alluminizzazione e, a partire dall'anno 2021, di *hippatura* con l'installazione dell'impianto oggetto del presente lavoro. L'impianto è in fase di avvio.

2. Il processo di “hippatura”

Nell'ambito dei trattamenti a cui sono sottoposti i manufatti e semilavorati metallici, vi è un particolare trattamento che opera simultaneamente in **alta temperatura** e ad **alta pressione**, esso è denominato *Pressatura Isostatica a Caldo*, o più generalmente HIP (*Hot Isostatic Pressing*).

L'applicazione di tale tipologia di tecnologia è stata storicamente associata ai componenti realizzati tramite fusione; oggi però, a seguito dello sviluppo delle tecnologie di manifattura additiva, prima di sottoporre tali componenti alle fasi di lavorazione meccanica, il processo di “hippatura” sta trovando anche largo impiego come processo di compattazione dei componenti realizzati tramite additive manufacturing (Stampa 3D).

La contemporanea applicazione di alti valori di temperatura e pressione permette di ottenere una riduzione della porosità sottosuperficiale dei manufatti realizzati, migliorandone le proprietà meccaniche. Il processo in effetti, rimuove quelle che potrebbero essere le origini delle cricche (fessurazioni) dovute alle sollecitazioni operative durante l'impiego del pezzo e pertanto riesce a garantire un significativo aumento della resistenza alla fatica del componente trattato.

La pressione viene applicata da un gas inerte estremamente puro, di solito Argon, ciò consente che non intervenga nessuna influenza negativa circa la composizione chimica dei pezzi trattati.

Di seguito una tabella indicativa di quelli che possono essere i valori di temperatura e pressione, differenti a seconda della tipologia di materiale del componente trattato, tipici di un ciclo di *hippatura* nell'abito della specificità di utilizzo dell'impianto analizzato.

Linee guida relative ai parametri consigliati per la pressatura isostatica a caldo di microfusi di diverse leghe					
Guidelines relevant to the recommended parameters for hot isostatic pressing of investment casting in different alloys					
Tipo di lega / Alloy type	Range di temperatura applicabile		Pressione consigliata / Recommended pressure		Permanenza/ Soaking time Ore
	°C	°F	MPa	Kpsi	
Leghe di Mg/ Mg Alloy	370÷400	698÷752	103	15	2÷4
Leghe di Al / Al Alloys	480÷530	896÷986	103	15	2÷4
Leghe di rame/ Copper Alloys	705÷980	1301÷1796	103	15	2÷4
Acciai inox / Stainless steels	1010÷1175	1850÷2147	103	15	2÷4
Acciai poco legati / Steels	1065÷1220	1949÷2228	103	15	2÷4
Leghe di titanio/ Titanium Alloys	845÷970	1553÷1778	103	15	2÷4
Leghe base Ni / Ni base alloys	1120÷1315	2048÷2399	103÷172	15÷25	2÷4
Leghe base Co / Co base Alloys	1190÷1230	2174÷2246	103	15	2÷4

Tabella 1. Valori di temperatura e pressione in relazione alla tipologia di materiali

L'*hippatura* può essere utilizzata anche nella metallurgia delle polveri, per ottenere prodotti solidi a partire da bagni di polveri.

Sono riportati nella figura 1 esempi dei settori di applicazione del processo di *hippatura*.

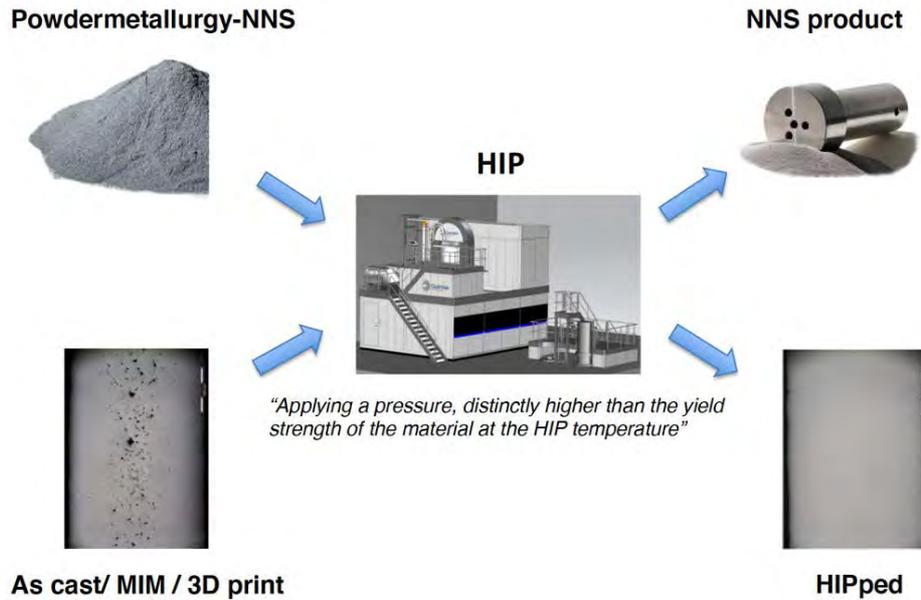


Figura 1. Applicazioni del processo di hippatura

Oggi, oltre ai numerosi particolari realizzati con la tecnica della microfusione per cui si rende necessario il ciclo di hippatura, l'alto grado di maturazione raggiunto nella ricerca e nello sviluppo di tecniche di manifattura additiva, ha fatto sì che i primi componenti realizzati con questa tecnologia produttiva, successivamente ad un adeguato ciclo di hippatura, ove necessario, possano essere utilizzati in motori aeronautici e altre parti di aeromobili ed elicotteri come indicato nelle figure 2 e 3.

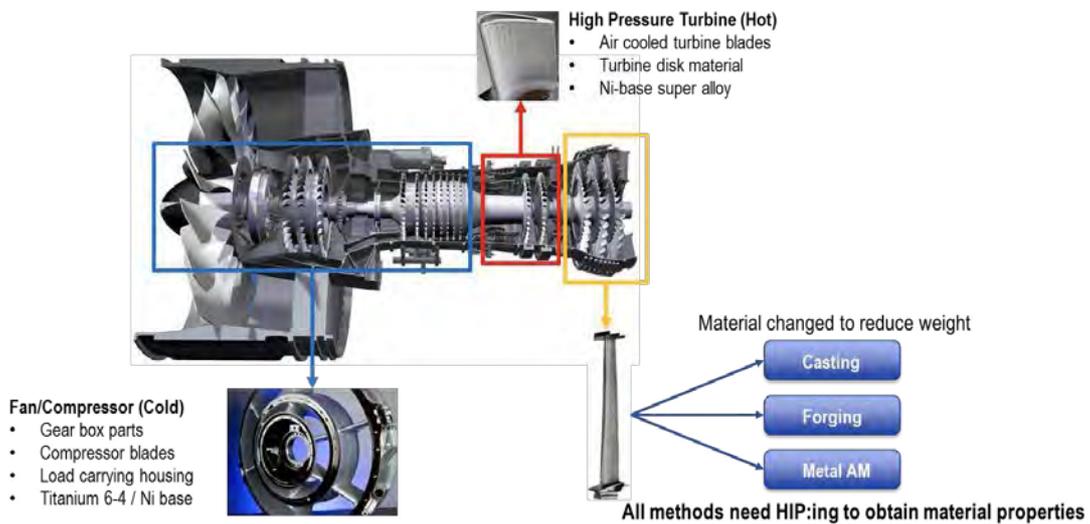


Figura 2. Potenziali applicazioni del processo di hippatura in un motore aeronautico

Pertanto risulta facile prevedere che il processo di *hippatura* avrà in futuro una alta domanda, favorita dall'incremento dell'utilizzo dell'additive manufacturing.

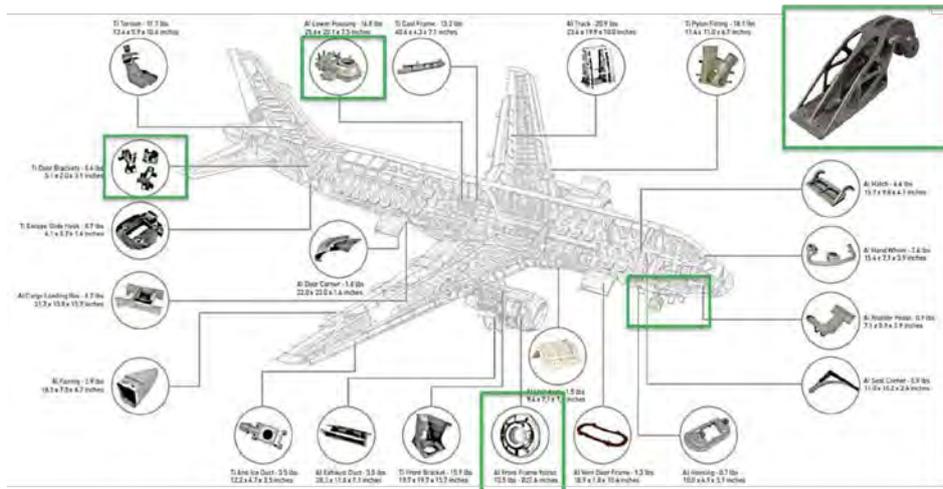


Figura 3. Potenziali applicazioni del processo di hippatura su un aeromobile

3. Descrizione dell'impianto

L'impianto installato presso il sito produttivo, oltre che da una camera cilindrica all'interno della quale vengono posizionati, tramite speciali attrezzature, i componenti da trattare, è costituito da una stazione di controllo e monitoraggio, una pompa per la compressione del gas, un sistema di stoccaggio del gas, e da sistemi di raffreddamento e ventilazione.

Una volta posizionati i componenti, la camera viene ermeticamente chiusa e si immette gas Argon al suo interno.

La purezza del gas viene costantemente monitorata prima, durante e dopo il processo tramite un gas cromatografo.

All'avvio del processo la temperatura e la pressione all'interno della camera vengono progressivamente aumentate fino a raggiungere i valori target del ciclo e mantenuti costanti per tutto il tempo necessario.

Terminato il mantenimento a temperatura e pressione costanti, viene avviato il raffreddamento e il gas all'interno della camera, qualora rispetti ancora i requisiti di purezza, viene re-immesso nel sistema esterno di collezione in modo da poterlo riciclare per i successivi cicli, diversamente viene espulso.

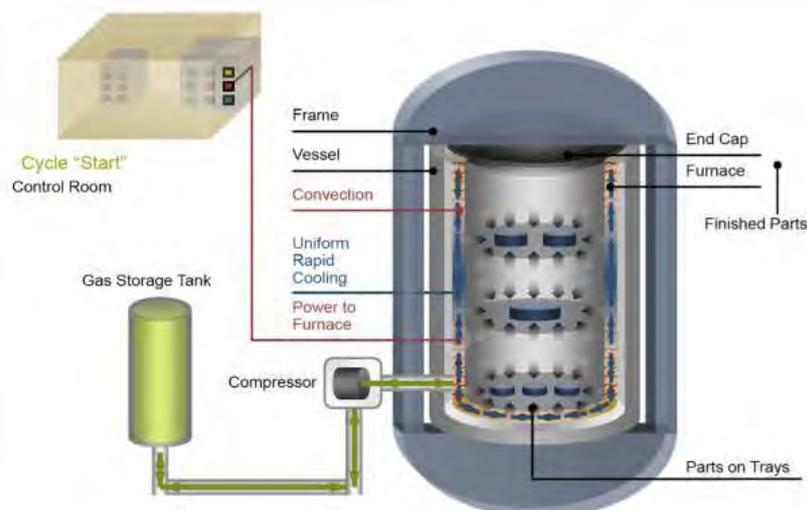


Figura 4. Schema di impianto di hippatura

Durante il ciclo sopradescritto, i componenti metallici all'interno della camera, figura 4, subiscono una pressione isostatica, omogenea nelle tre direzioni, che ha come obiettivo la compattazione del materiale, e l'aumento della densità della lega metallica.

Ciascun componente, al termine del ciclo, avrà un volume leggermente inferiore a parità di peso essendosi ridotta la porosità interna del materiale (figura 5).

L'impianto, inoltre, è dotato di un sistema URC (Uniform Rapid Cooling), che permette di controllare e gestire anche la velocità del raffreddamento.

Questo fa sì che si possano combinare al ciclo di *hippatura* anche i cicli di trattamento termico che di solito vengono richiesti a valle del trattamento di *hippatura* stesso (tipicamente cicli di solubilizzazione e invecchiamento) e normalmente fatti su altri impianti. Un ciclo di trattamento termico, tipicamente prevede una stasi ad un determinato livello di temperatura seguita da un repentino ma controllato raffreddamento; la tecnologia URC di cui dispone l'impianto in questione, permette tale tipologia di controllo e consente pertanto l'esecuzione del ciclo di Trattamento Termico sullo stesso impianto evitando operazioni di scarico e carico dei componenti. Ciò si traduce in una notevole ottimizzazione dei tempi ciclo, dimezzando al tempo stesso i rischi legati alla fase di scarico e carico dei componenti.

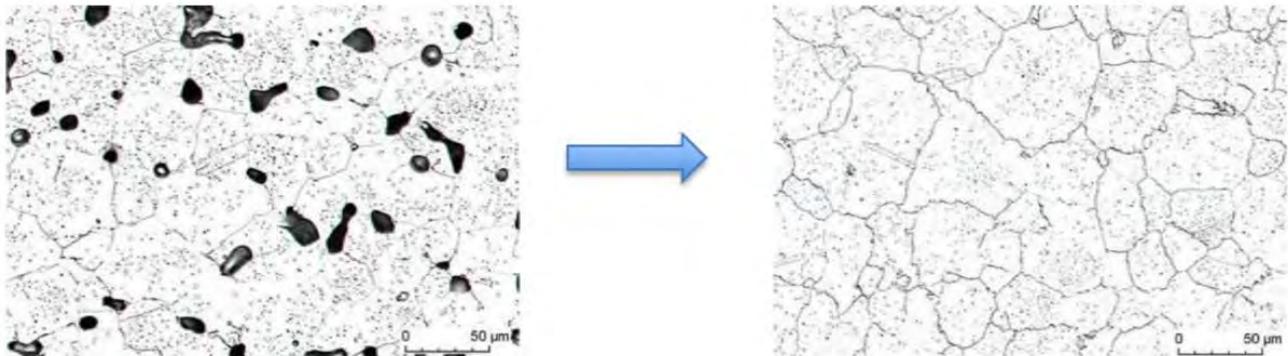


Figura 5. Compattazione del materiale e diminuzione della porosità del processo di *hippatura*

4. Caratteristiche tecniche, componenti e condizioni operative

Si riportano di seguito le caratteristiche dell'impianto di *hippatura*, come già detto, in fase di avvio nell'anno 2021. L'impianto di *hippatura* installato, figura 6, permette di raggiungere temperature di 1.400°C e pressioni di oltre 200MPa.



Figura 6. L'impianto di hippatura installato presso il sito produttivo

4.1 Componenti principali dell'impianto

I componenti principali dell'impianto di pressatura isostatica a caldo (HIP) sono i seguenti:

4.1.1. Forno di Hipping e gas di processo

Il recipiente HIP è costituito da un cilindro e da telai con filo avvolto, da chiusure non filettate che si spostano assialmente nonché dalle strutture e dai dispositivi e sistemi di sostegno necessari per la chiusura e l'apertura motorizzate della pressa. Il forno HIP, in funzione all'interno del del recipiente in pressione, rappresenta la camera principale nella quale avviene il processo di *hippatura* ed è costituito da un mantello con una barriera isolante termica ed una base su cui si appoggia il carico di lavoro.

La camera ha un diametro di base di 660mm e un'altezza di 1.750mm.

Pressure vessel

Max. operating pressure:	207 MPa
Max. design pressure:	228 MPa
Pressure vessel volume:	2.1 m ³
H ₁ = Height, approximately:	6.7 m
H ₂ = Height to upper end of cylinder, approximately:	5.2 m

Molybdenum furnace 1400M URC®*

Maximum operating temperature:	1 400 °C
Maximum height of workload, H _{HZ} :	1 750 mm
Maximum diameter of workload, D _{HZ} :	660 mm

Tabella 2. Specifiche tecniche dei valori di pressione e temperatura

Per impianti di dimensioni maggiori rispetto a quello oggetto del presente studio, al fine di garantire un ulteriore grado di sicurezza, è comune installare il recipiente a pressione in

una fossa di alloggiamento con il numero massimo possibile di sottosistemi periferici a livello del pavimento. In tabella 2 sono indicate le specifiche tecniche dell' impianto

4.1.2. Ceste di carica

Le ceste di carica sono recipienti all'interno dei quali vengono caricati i componenti da sottoporre a pressatura isostatica a caldo.

Esse sono generalmente composte da un disco forato e da una parete cilindrica.

Il carico del forno si configura attraverso l'impilaggio di più ceste, il cui numero dipende dalla tipologia utilizzata (Figura 7).

Per la loro realizzazione sono richiesti materiali resistenti alle alte temperature, come acciai per alte temperature, inconel e molibdeno.

4.1.3 Gas Cromatografo

La macchina è provvista di un gas cromatografo che permette di sondare la qualità dell'argon utilizzato per la pressa isostatica.

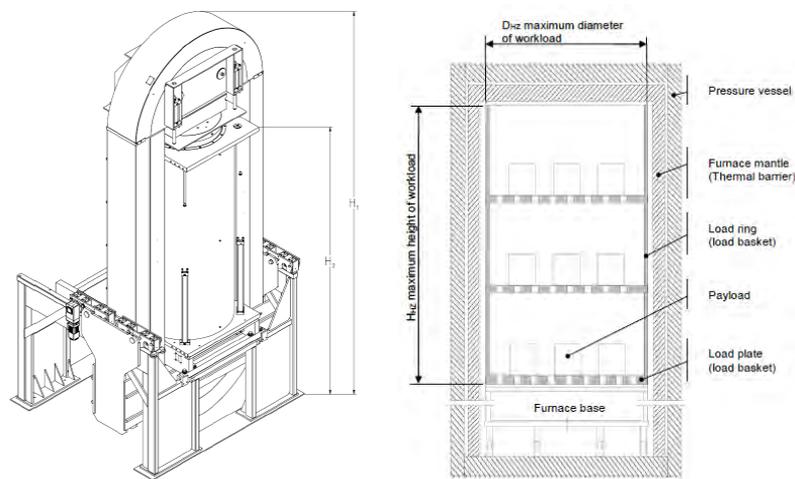


Figura 7. Particolari della camera interna ed esterna

4.2 Procedimenti operativi

Si descrivono di seguito le procedure di lavorazione nell' utilizzo dell'attrezzatura con riferimento alle principali indicazioni di sicurezza riportate nel manuale di uso e manutenzione.

4.2.1 Apertura del recipiente in pressione

L'apertura del recipiente può essere eseguita solo in assenza di pressione. Evacuare qualsiasi pressione residua prima di operare l'apertura della chiusura superiore del recipiente. (Il recipiente rimane saturo di argon, essendo quest'ultimo più pesante dell'aria. Non avvicinarsi troppo all'apertura onde evitare di inalare gas argon.) Sono presenti sistemi di interbloccaggio dei portelli che impediscono l'avvio del ciclo automatico. (il sistema di interblocco è composto da pulsanti di pre-reset e reset)

4.2.2. Controllo dello stato superficiale dei componenti

I componenti devono essere completamente asciutti ed esenti da contaminazioni superficiali quali olio, grasso o materiale estranei.

4.2.3 Preparazione del carico

Il carico deve essere assemblato in corrispondenza della stazione di carico/scarico dell'impianto. La movimentazione delle ceste (Figura 8) viene eseguita tramite carro ponte, utilizzando le apposite attrezzature di sollevamento



Figura 8. Particolari ceste in molibdeno

4.2.4. Installazione delle termocoppie

Eventuali termocoppie di registrazione da inserire all'interno delle ceste vanno installate in fase di preparazione del carico, facendole passare attraverso i punti di ingresso situati sul fondo della base di carico e collegandole alle apposite morsettiere.

4.2.5 Inserimento del carico all'interno del recipiente della pressa

Completata la fase di preparazione del carico, è possibile movimentare quest'ultimo verso il recipiente della pressa. Per far ciò è necessario utilizzare la maschera di sollevamento del carico, che deve essere calata tramite carro ponte attorno all'assieme delle ceste, facendo attenzione a rispettare il corretto orientamento della maschera rispetto all'assieme di carico.

Sollevarlo tramite carro ponte e posizionarlo all'interno del recipiente della pressa usando il perno guida sulla maschera per posizionare correttamente l'assieme.



Figura 9. Particolari della fase di carico della cesta

4.2.6 Inserimento della camera termica all'interno del recipiente della pressa

Posizionato il carico all'interno del recipiente della pressa, procedere a installare la camera termica (Figura 9).

Utilizzare l'apposita maschera per agganciare la camera termica e portarla in posizione.

Prestare attenzione al corretto orientamento della camera termica utilizzando il perno guida della maschera come riferimento. Calare la camera a velocità ridotta prestando estrema attenzione a non urtare la parete interna del recipiente. L'appoggio della camera termica sul fondo del recipiente deve avvenire molto gradualmente per evitare di danneggiare i contatti elettrici alla base. A posizionamento ultimato, rimuovere la maschera e procedere alla chiusura del recipiente.

4.2.7 Chiusura del recipiente

In corrispondenza della stazione superiore del forno è possibile procedere alla chiusura del recipiente della pressa e al riscaldamento della pompa da vuoto. Il tutto è eseguibile tramite pannello di comando della stazione superiore. Premendo il tasto "chiusura" il coperchio ruoterà in posizione e si inserirà all'interno del recipiente fino a completa chiusura. Infine, l'anello di tenuta traslerà fino alla posizione di messa in sicurezza del recipiente.

La pressa è attrezzata con diversi dispositivi luminosi, interruttori di fine corsa e interblocchi meccanici in modo da prevenire la pressurizzazione se l'allineamento del telaio, del recipiente a pressione, delle chiusure e delle piastre della pressa non risulta essere corretto. Il sistema è inoltre dotato di una serie di manometri, sensori ed interruttori collegati al sistema di controllo, le funzioni logiche di quest'ultimo sono progettate per prevenire modalità di funzionamento non sicure o indesiderate. In questa fase sono previsti ulteriori controlli propedeutici in relazione alla tipologia di lubrificanti utilizzati e al test di messa a terra che permette di verificare che tutti i contatti elettrici si siano chiusi correttamente.

4.2.8 Avvio e preparazione del ciclo

Tramite pannello di controllo si procede ai cicli di lavorazione impostando i parametri da utilizzare (parametri pressa, peso del carico inserito nel forno, temperatura, ecc,)



Figura 10. Particolari della fase di carico

4.2.9 Avvio del ciclo

All' avvio del ciclo verranno eseguiti due cicli di purging, in cui verrà creato il vuoto all'interno delle camere per poi immettere argon puro.

Solo successivamente il sistema consentirà un ulteriore ciclo o l'avvio del riscaldamento.

4.2.10 Fine ciclo e scarico della pressione

Il sistema allo step di scarico del gas consentirà l'opzione di scarico in atmosfera o all'

interno del pacco bombole. La scelta è fatta in base all'analisi del gascromatografo.

4.2.11 Estrazione del carico

Scaricata la pressione il recipiente può essere aperto per la rimozione della camera termica e dal carico (Figura 10).

4.2.12 Arresti di emergenza

Tutti i moduli pressa sono dotati di pulsanti per l'arresto di emergenza. Nel caso di attivazione dell'arresto di emergenza, tutte le funzioni della pressa vengono arrestate ad eccezione delle pompe dell'acqua di raffreddamento, la valvola di decompressione manuale e la pompa di raffreddamento di emergenza.

5. Conclusioni

La descrizione delle procedure operative e la disamina delle caratteristiche tecniche dell'attrezzatura oggetto del presente studio evidenziano le particolari condizioni di gestione di utilizzo dell'attrezzatura stessa che devono garantire al contempo la qualità del processo produttivo nonché le condizioni di sicurezza degli operatori impegnati.

Gli elevati parametri di pressione e temperatura rappresentano la principale caratteristica che potrebbe emergere da una analisi puramente tecnica e documentale per la realizzazione del processo di *hippatura* descritto.

E' evidente tuttavia che nell'utilizzo dell'attrezzatura particolare attenzione dovrà essere posta non solo ai rischi connessi agli elevati valori di pressione e di temperatura ma anche ai rischi trasversali per la movimentazione mediante specifiche attrezzature di sollevamento nonché alla presenza di gas asfissianti per la eventuale formazione di spazi confinati e, non ultimo, non trascurare le condizioni al contorno per le attività svolte dagli operatori incaricati nella gestione, manutenzione e sorveglianza delle attrezzature stesse.

6. Bibliografia

[1] Quintus Technologies. Pressa per formatura isostatica a caldo (QIH) *Manuale dell'operatore* SE 144900 Rev. 02 Anno 2021

[2] Le monografie di Meccanica. *Pressatura isostatica a caldo: Densità e porosità migliorate*. Gruppo Tecniche Nuove

Reti eterogenee di sensori intelligenti per il monitoraggio di attrezzature e impianti

F. Zonzini¹, M. Zauli¹, N. Testoni¹, L. De Marchi²

¹ Advanced Research Center on Electronic Systems (ARCES), Università di Bologna

² Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e dell'Informazione "Guglielmo Marconi", Università di Bologna

Sommario

Il presente lavoro riguarda lo sviluppo di una rete eterogenea di sensori per il monitoraggio strutturale, in grado di integrare sia nodi sensori inerziali, destinati ad applicazioni di analisi vibrazionale, che nodi piezoelettrici, pensati invece per il controllo di emissioni acustiche. La strumentazione, realizzata in seno ai laboratori del gruppo di ricerca Intelligent Sensor Systems (ISS) dell'Università di Bologna, è contraddistinta da quattro elementi chiave: ridotti consumi (< 40 mW), basso costo, capacità di calcolo locale e miniaturizzazione (dimensioni 20 mm x 33 mm). Oltre a sposare la stessa filosofia implementativa, i nodi condividono lo stesso bus di comunicazione e possono essere connessi in cascata ad una interfaccia di rete comune, che si occupa di gestire autonomamente i dispositivi, settarne i parametri e trasmettere i segnali acquisiti/processati. Ciò consente di rendere la rete complessiva altamente scalabile e versatile, ma soprattutto di integrare nodi sensori equipaggiati con tecnologie di misura differenti. Uno dei vantaggi fondamentali dell'elettronica prodotta è quella di sfruttare la potenza di calcolo a bordo per processare, localmente ed in stretta prossimità al punto in cui l'informazione viene acquisita (da cui il concetto di nodo "intelligente"), i segnali registrati ed estrarre le caratteristiche di interesse. La rete ISS-Lab si propone dunque come una soluzione efficiente ed innovativa per la realizzazione di sistemi di monitoraggio su larga scala, in grado di competere con alternative commerciali economicamente onerose e altamente invasive.

1. Introduzione

Eseguire verifiche di integrità strutturale è una delle priorità fondamentali in molteplici scenari applicativi [1]. Tale esigenza diviene poi di cruciale importanza in contesti intrinsecamente fragili, dei quali il territorio italiano è, non a caso, un esempio indiscusso. Partendo infatti dal tessuto architettonico, urbano e artistico, di cui il crollo del ponte Morandi è forse la testimonianza più recente, l'Italia dei grandi impianti industriali rilancia quotidianamente la sfida di garantire un utilizzo sicuro, nonché previdente e continuo, delle proprie infrastrutture.

Al contempo, la complessità crescente degli attuali impianti civili ed industriali ha posto nuove sfide nello sviluppo, implementazione e installazione di nuove reti di monitoraggio, che devono soddisfare requisiti di basso costo, limitati consumi, minima invasività e ridotta latenza, così da garantire un monitoraggio non solo in tempo reale, ma anche continuo e sul lungo periodo [2]. In aggiunta, molti dei danni che si vanno a verificare nelle strutture nascono da una concausa di fenomeni concorrenti che possono perciò avere effetto su scale diverse. Per questo motivo, l'approccio adottato nei sistemi di monitoraggio più avanzati è quello di sfruttare tecnologie di misura diverse, e catturare dunque risposte

strutturali differenti, con l'obiettivo finale di fornire una panoramica quanto più esauriente, dettagliata e puntuale, delle attuali condizioni di salute strutturale [3].

A tal proposito, sempre maggior successo risultano i sistemi in grado di catturare sia la risposta statica che dinamica delle strutture. Nel primo caso, una delle tecniche più funzionali è quella basata sull'analisi emissioni acustiche (EA) e prevede il monitoraggio nel tempo dell'attività acustica a cui la struttura è sottoposta [4]. Tale attività è associata principalmente alla formazione e crescita di micro-fessure, tipiche conseguenze di fenomeni di corrosione, impatto superficiale o danneggiamento interno. Dal rateo di crescita con cui gli eventi acustici vengono registrati, si procede dunque ad individuare il livello di integrità strutturale e segnalare potenziali allarmi. Nel secondo caso, mediante l'utilizzo di sensori inerziali (primi fra tutti, i sensori per accelerazione) si vanno a registrare misure di vibrazione [5], quindi proprietà dinamiche macroscopiche, dalle quali estrarre parametri legati ai modi propri di vibrare della struttura (e per questo detti *parametri modali*): fra questi, si annoverano le frequenze naturali di vibrazione e le forme modali. Il monitoraggio, in questo caso, si fonda sull'identificazione nel tempo di variazioni rispetto ai valori nominali. Ciò risulta di importanza strategica anche nell'ambito di sistemi pressurizzati, soprattutto in risposta agli stimoli indotti da agenti atmosferici (vento, temperatura, etc.) o movimenti del terreno e devono, pertanto, essere tenuti in opportuna considerazione.

In questo contesto, il presente lavoro propone una rete eterogena di nodi sensori, divisi in due categorie: quelli per analisi di emissione acustica e quelli per monitoraggio basato su vibrazioni. Accanto alla compattezza e al design innovativo, la rete si contraddistingue per la caratteristica esclusiva di integrare capacità di calcolo locale e, quindi, di poter pre-processare l'informazione direttamente nel punto stesso in cui essa viene acquisita. Da qui, l'attributo "intelligente". Ciò evita la necessità di dover trasferire, con un onere energetico e temporale non trascurabile, lunghe serie temporali verso unità accentratrici, azione questa altamente energivora che rappresenta una delle maggiori fonti di consumo anche nei sistemi di monitoraggio più avanzati.

Il contenuto della presente memoria è strutturato come segue. In Sezione 1 viene introdotta la rete di monitoraggio ISS-Lab, descrivendone gli elementi costitutivi nonché quelli comuni a tutte le tecnologie di misura adottate. Particolare attenzione viene rivolta anche agli aspetti di rete, specialmente al meccanismo di sincronizzazione, che rappresenta un punto essenziale per la corretta fase di inferenza strutturale. Successivamente, i dettami del nodo per EA e di quello per analisi di vibrazione sono presentati in Sezione 2 e 3, rispettivamente; sezioni specifiche sono riservate alla discussione delle principali tecniche di elaborazione da eseguirsi a bordo sensore per l'estrazione immediata di parametri funzionali. Una sezione conclusiva (Sezione 4) chiude poi il lavoro.

1. Architettura rete di monitoraggio ISS-Lab

La rete di monitoraggio ISS-Lab, progettata in senso ai laboratori del gruppo di ricerca Intelligent Sensor Systems (ISS) dell'Università di Bologna, è dotata di alta modularità, scalabilità e livello di integrazione, in modo da fornire una soluzione funzionale per il monitoraggio continuo e su larga scala di strutture di grandi dimensioni. Infatti, in base all'alimentazione fornita, è possibile connettere contemporaneamente fino a 64 dispositivi.

Globalmente, il sistema di monitoraggio consta di tre elementi: nodi sensori per vibrazioni, nodi sensori per emissioni acustiche e una interfaccia di rete che interpreta e traduce lo scambio bidirezionale di informazioni fra i nodi ed una opportuna interfaccia di

programmazione esposta all'utente. L'architettura modulare a blocchi ha consentito di mantenere invariato il fattore di forma, che è pari a (30 mm x 23 mm) per ciascuna tipologia. Nella presente Sezione verranno esposte architetture comuni ai due tipi di nodi sensore, mentre si rimanda alla Sezione 2 per una descrizione più esaustiva del nodo per EA. I dettagli del nodo per vibrazioni si possono invece trovare in Sezione 3.

Ciascun nodo sensore integra al proprio interno un microcontrollore (MCU) STM32F303 commerciale e alimentato a 3.3 V, caratterizzato da bassi consumi, risorse di calcolo digitale compatibili con l'esecuzione di istruzioni in virgola mobile e slot di memoria integrati (40 KiB SRAM e 256 KiB FLASH) che consentono l'acquisizione, la memorizzazione e la post-elaborazione dei segnali registrati. Inoltre, tale componente garantisce un alto livello di integrazione in quanto dotato sia di tutte le periferiche necessarie per comunicare con gli altri elementi del dispositivo, sia di impostare internamente il clock di sistema grazie ad un oscillatore RC interno. Di conseguenza, è stato possibile snellire il design circuitale a favore di un notevole guadagno nel fattore di forma e, contestualmente, nel dispendio energetico.

Tutti i nodi dialogano mediante un unico bus cablato, detto Sensor Area Network (SAN), che sfrutta un meccanismo di comunicazione Data-over-Power basato su protocollo RS-485 opportunamente adattato per far fronte ai requisiti specifici del monitoraggio strutturale e sfruttare al massimo le capacità di calcolo disponibili. Tale protocollo, noto a tutti i sensori installati, consente di gestire meccanismi differenti di trasduzione in modo assolutamente trasparente per il manutentore finale. La scelta di una comunicazione cablata è stata determinata dalla volontà specifica di garantire alte velocità di trasmissione (200 kb/s), ridurre il peso e l'ingombro dell'elettronica (< 4 g), nonché rendere l'operazione di trasmissione stessa più sicura e immune a disturbi, essendo questa fase non solo onerosa energeticamente, ma anche particolarmente delicata rispetto ad attacchi esterni. Inoltre, al fine di poter estrarre misure coerenti e cross-correlare l'informazione tra i diversi nodi, si rende indispensabile garantire un alto livello di sincronizzazione: per adempiere a tale requisito si è fatto ricorso ad un time-stamp univoco generato da un oscillatore a 32-bit e frequenza 64 MHz, aggiornato periodicamente e trasmesso ai dispositivi.

L'algoritmo di sincronizzazione si basa su una strategia three-way handshake simile a quella adottata nel Transmission Control Protocol (TCP) [6]:

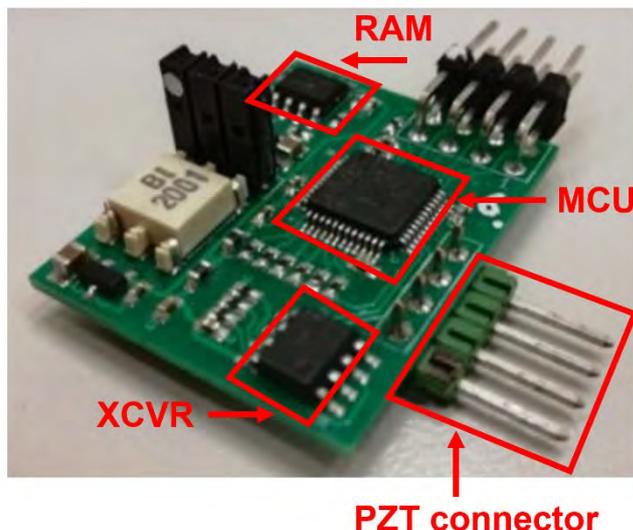
1. L'interfaccia di rete comunica punto-punto con ciascun nodo della rete inviando un messaggio di sincronizzazione
2. Il nodo ricevente notifica verso l'interfaccia la ricezione del pacchetto mandando un messaggio analogo al mittente
3. L'interfaccia comunica nuovamente in modo puntuale la corretta ricezione

Le fasi 1-2 e 2-3 vengono usate, rispettivamente, dall'interfaccia e da ciascun nodo sensore per calcolare il tempo di andata e ritorno del segnale. Quest'ultima quantità è poi utilizzata a scopo correttivo al momento dell'effettiva acquisizione, quando cioè un messaggio di sincronizzazione è mandato broadcast da uno-a-tutti (dall'interfaccia verso i singoli nodi) per compensare gli effetti dovuti a derive locali nei clock interni ai singoli MCUs. Sulla base di tale protocollo è stato misurato un errore di sincronizzazione medio dopo 2400 s di osservazione pari a 4.7 ms.

Per rispettare i requisiti di alimentazione richiesti, ciascuna tipologia di dispositivi integra un regolatore di tensione (LDO), che fissa la tensione di alimentazione a 3.3 V; inoltre, un tranceiver (XCVR) consente di connettere il MCU, al bus di sistema ed esporre dunque il singolo nodo non solo all'esterno, ma anche agli altri nodi attivi della rete.

2. Nodo sensore per AE

Il nodo sensore per EA è costituito dai blocchi funzionali evidenziati in Fig. 1(a) (per una descrizione estesa si rimanda a [7]). Fra gli altri elementi circuitali è opportuno citare la presenza di una circuiteria analogica per alte prestazioni, comprendente comparatori, amplificatori, convertitori analogico-digitali (ADC) e digitale-analogici. Tale dispositivo, come si può evincere dall'etichetta PZT connector evidenziata in Fig. 1(a), è costituito da tre canali di acquisizione connessi ad un trasduttore PZT altamente specializzato e multi-elettrodo, con una risposta piatta in frequenza in un ampio range di valori (la presenza del quarto connettore è necessaria per portare il segnale di massa). Ciascun trasduttore è collegato poi ad un amplificatore a guadagno programmabile che fornisce nove differenti livelli di guadagno, da 1 a 23 volte il valore di tensione in ingresso. Ciascun segnale analogico è poi campionato e quantizzato per mezzo di un ADC rail-to-rail a 12 bit integrato, caratterizzato da una frequenza di campionamento fino a 800 kHz. Per aumentare la sensibilità e il rapporto di reiezione al rumore in ingresso a ciascun canale piezoelettrico è stato inoltre inserito un circuito di pre-amplificazione (Fig. 1(b)). Tale componente è costituito da tre blocchi: (i) un amplificatore JFET a singolo stadio ed alto guadagno con carico attivo, (ii) un filtro passivo e (iii) un circuito di polarizzazione. Fra le altre figure di merito di questo pre-amplificatore è opportuno citare la un guadagno di 19 dB su un'ampia banda spettrale (compresa tra 5 kHz e 1 MHz), una densità di rumore di $31 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ alla frequenza di 100 kHz, nonché bassa distorsione armonica.



(a)



(b)

Figura 1. Prototipo del nodo sensore per EA con evidenziati i principali elementi circuitali (a) e pre-amplificatori integrati in ciascun disco (sensore) piezoelettrico (b) per aumentare la sensibilità dei canali di acquisizione connessi al nodo sensore.

2.1 Algoritmi di calcolo per EA

Gli algoritmi di estrazione di parametri acustici implementati a bordo dei nodi per EA sono stati sviluppati in ottemperanza alle norme di ispezione americane e giapponesi, in quanto rappresentano una sorta di standard *de facto* universalmente riconosciuto, quali JIS Z 2342-2002(2002) per ispezione di strutture pressurizzate. Il microcontrollore di tali nodi è stato dunque programmato per estrarre le quantità mostrate in Fig. 2 e classicamente utilizzate per la valutazione di integrità in ambito EA. La loro estrazione è basata su meccanismi di sogliatura, a valle dei quali tutte le informazioni temporali di interesse possono essere

identificate. Fra queste, è opportuno specificare l'istante temporale associato al primo (t_0) o all'ultimo (t_{end}) attraversamento della soglia, quello relativo al valore di picco (t_{peak}) e alla sua ampiezza (U_{max}) e la durata dell'evento acustico, inteso come tempo intercorso tra t_0 e t_{end} . Unitamente a tali quantità dirette, gli algoritmi di stima sono stati ottimizzati per ricavare quantità intrinsecamente più complesse, quali il tempo di salita, l'energia e il numero di eventi acustici. Pertanto, è discrezione dell'utente configurare i nodi affinché, su richiesta e al verificarsi di un evento acustico, tali informazioni vengano estratte e trasferite quale messaggio aggiuntivo nel pacchetto di dati in uscita.

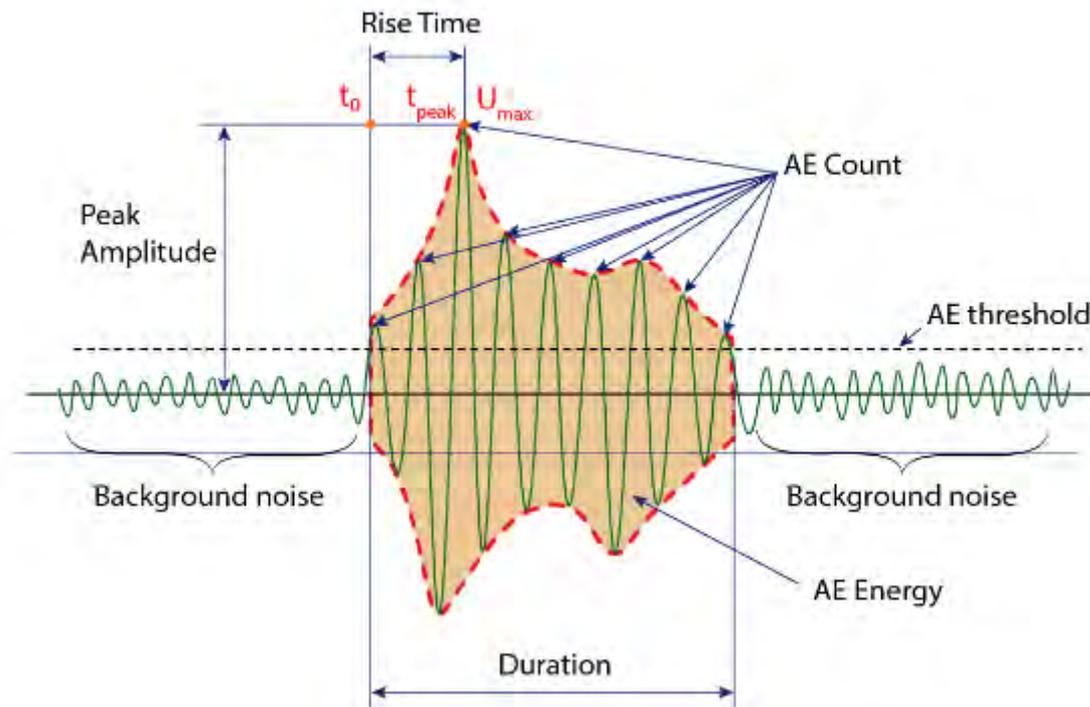


Figura 2. Parametri per analisi basata su EA estratti direttamente a bordo del nodo sensore.

3. Nodo sensore per vibrazioni

Gli elementi costitutivi del nodo sensore per analisi vibrazionale sono esposti in Fig. 3. L'unità inerziale di misura (IMU) rappresenta il cuore del nodo sensore ed è costituita dal dispositivo LSM6DSL iNEMO corrispondente ad una coppia accelerometro/giroscopio 3D digitali realizzata in tecnologia MEMS. In Tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche meccaniche di tale dispositivo, divise tra parte lineare (per accelerazioni) e rotazionale (per velocità angolari).

	Lineare	Rotazionale
Frequenza campionamento	1.6-6664 Hz	12.5-6664 Hz
Densità di rumore	$80 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	$4 \text{ mdps}/\sqrt{\text{Hz}}$
Sensitivity	0.061 mg/LSB	4.375 mdps/LSB
Fondo-scala	$\pm 2/\pm 16 \text{ g}$	$\pm 125/\pm 2000 \text{ dps}$

Tabella 1. Caratteristiche meccaniche dell'unità inerziale LSM5DSL integrata nel nodo sensore per vibrazioni.

Come si può evincere dalla lettura della Tabella, nonostante una densità di rumore medio-alta, il sensore inerziale è in grado di funzionare in un range di valori piuttosto ampio e con una sensitivity assolutamente comparabile a quella di accelerometri piezoelettrici con ingombro e costi decisamente maggiore. Da un punto di vista operativo, il flusso di elaborazione dell'informazione parte dalla registrazione delle vibrazioni strutturali tramite IMU, passando alla successiva memorizzazione dei campioni nella RAM interna del microcontrollore. Le istruzioni e i coefficienti del filtro digitale sono invece immagazzinati nella memoria FLASH, in modo da garantire funzionalità di pre-processing embedded. Infine, i dati vengono raccolti nella SRAM esterna a cui vengono inviati con protocollo seriale, nell'attesa di una successiva elaborazione. La descrizione completa del nodo sensore per vibrazioni può essere consultata in [8].

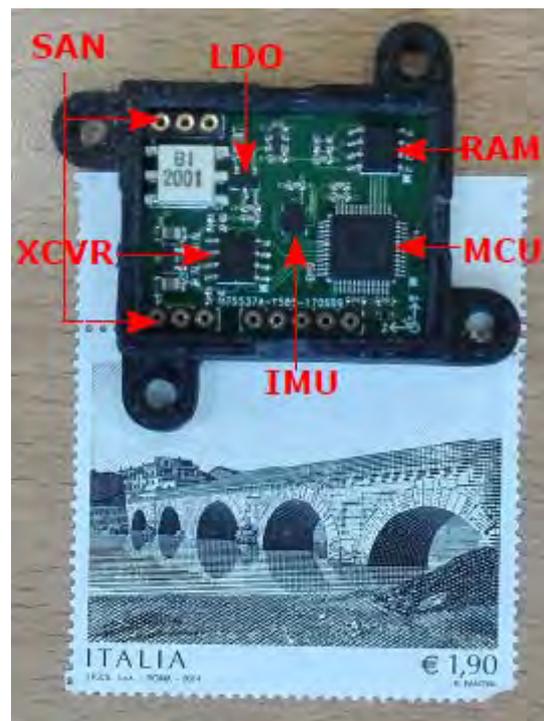


Figura 3. Prototipo del nodo sensore per analisi di vibrazioni con evidenziati i principali elementi circuitali.

3.1 Algoritmi di calcolo integrati per analisi di vibrazione

Dal momento in cui l'analisi di vibrazione si basa su informazioni estratte nel dominio della frequenza, si ricorre tipicamente alla densità spettrale di potenza, combinata eventualmente con algoritmi di rilevazione del picco, per stimare i parametri modali associati alle componenti vibrazionali di interesse. Per questo motivo, data l'importanza di tale strumento e considerata anche la sua natura algoritmica, fondata sostanzialmente su operazioni di somma e moltiplicazione che lo rendono facilmente eseguibile dalle unità aritmetico-matematiche su cui il calcolo digitale si fonda, ciascun nodo può eseguire, su richiesta, il calcolo dello spettro del segnale acquisito e fornirlo in uscita. Così facendo, è possibile l'ammontare di informazione effettivamente utile da trasmettere attraverso la rete, in quanto è sufficiente, per esempio, ricavare la posizione ed il valore dei punti di picco dello spettro per avere tutte le informazioni utili a livello di diagnostica strutturale.

In aggiunta, sono stati embeddati algoritmi di data fusion volti alla stima di grandezze vibrazionali derivate. Più nel dettaglio, grazie alla possibilità di acquisire simultaneamente

sia accelerazioni che quantità angolari. È possibile configurare il nodo sensore affinché restituisca anche valori di tilt o inclinazione [9], che rappresentano un importante indice di stabilità della posizione relativa della struttura nel tempo. Questi dati, in particolare, sono ottenuti per mezzo di filtraggi lineari, ovvero dalla combinazione di misure lineare ed angolari.

4. Conclusioni

In questa memoria è stata presentata una rete eterogenea di sensori intelligenti sviluppata dal gruppo di ricerca ISS-Lab dell'Università di Bologna. Due tipologie di nodi sensore sono state descritte, atte a catturare con sufficiente livello di precisione sia l'attività dinamica che statica della struttura: nodi sensori per EA connessi a trasduttori piezoelettrici e nodi sensori per vibrazioni integranti una unità di misura inerziale. Unitamente ai ridotti consumi, minimo fattore di forma e peso leggero, i nodi possono essere definiti intelligenti in quanto sfruttano le capacità di calcolo integrate per eseguire operazioni di pre e post processamento a bordo, ricavando direttamente le caratteristiche di interesse senza la necessità di inviare lunghe serie temporali verso unità centrali. Ciò consente di efficientare notevolmente il sistema di monitoraggio stesso, in particolare di comprimere il contenuto informativo utile da trasmettere e rende, dunque, la soluzione proposta altamente competitiva rispetto a soluzioni commerciali decisamente più onerose in termini di consumo, costi, dimensioni.

5. Bibliografia

- [1] P. Cawley. Structural Health Monitoring: Closing the gap between research and industrial development. *Structural Health Monitoring*. 2018; vol. 17: pp. 1225-1244.
- [2] F. Ubertini, S. Laflamme, E. Chatzi, B. Glisic, F. Magalhães. Dense sensor networks for mesoscale SHM: innovations in sensing technologies and signal processing. *Measurement Science and Technology*. 2017; vol. 28: p. 040103.
- [3] F. Zonzini, M. M. Malatesta, D. Bogomolov, N. Testoni, L. De Marchi, A. Marzani. Heterogeneous sensor-network for vibration-based SHM. Atti della Conferenza 2019 IEEE International Symposium on Measurements & Networking (M&N), Catania, Luglio 2019.
- [4] M.T.I. Khan. Structural Health Monitoring by Acoustic Emission Technique. *Structural Health Monitoring from Sensing to Processing*. 2018.
- [5] C. Rainieri, G. Fabbroncino. Operational modal analysis of civil engineering structures. Springer, New York. 2014, 142: 143.
- [6] F. Zonzini, M. M. Malatesta, D. Bogomolov, N. Testoni, L. De Marchi, A. Marzani. Vibration-based SHM with Up-Scalable and Low-cost Sensor Networks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*. 2020; vol. 69: pp 7990-7998.
- [7] N. Testoni, L. De Marchi, A. Marzani. A stamp size 40ma 5 grams sensor node for impact detection and location. Atti della Conferenza su *European Workshop on SHM*. Bilbao, 2016.
- [8] N. Testoni, C. Aguzzi, V. Arditì, F. Zonzini, L. De Marchi, A. Marzani, T.S. Cinotti. A sensor network with embedded data processing and data-to-cloud capabilities for vibration-based real-time SHM. *Journal of Sensors*, 2018.
- [9] N. Testoni, F. Zonzini, A. Marzani, V. Scarponi, L. De Marchi. A Tilt Sensor Node Embedding a Data-Fusion Algorithm for Vibration-Based SHM. *Electronics*. 2019; vol. 8: p. 45.

Algoritmi di Intelligenza Artificiale per la stima del tempo di arrivo di Emissioni Acustiche

F. Zonzini¹, D. Bogomolov^{1,3}, T. Dhamija², L. De Marchi², A. Marzani³

¹ Advanced Research Center on Electronic Systems (ARCES), Università di Bologna

² Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e dell'Informazione "Guglielmo Marconi", Università di Bologna

³ Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, DICAM, Università di Bologna

Sommario

Fra le tecniche di monitoraggio non distruttivo per il monitoraggio strutturale (SHM), quella per Emissioni Acustiche (EA) è una delle più efficaci per la caratterizzazione dell'integrità strutturale di impianti industriali quali grandi serbatoi per lo stoccaggio di idrocarburi e serbatoi in pressione. Il monitoraggio basato su EA si fonda sul controllo in tempo reale e continuativo dell'attività acustica della struttura, ed in particolare nel monitoraggio di alcuni parametri tipicamente estratti dalle registrazioni delle EA quali il tempo di arrivo (ToA), l'ampiezza e l'energia dei segnali registrati. Scopo di questo lavoro è presentare un metodo innovativo per la stima del tempo di arrivo (ToA). La strategia proposta consiste nell'utilizzare una rete neurale convoluzionale (CNN) multistrato, al posto di classici algoritmi quali la cross-correlazione o l'Akaike Information Criterion (AIC), per la stima del ToA, cercando di superare i limiti dei metodi convenzionali nel gestire, con sufficiente robustezza, scenari molto rumorosi, perturbati da derive locali o da outliers. Se adeguatamente addestrati, infatti, i modelli di Deep Learning possono apprendere autonomamente la relazione input-output tra i segnali elaborati e, quindi, stimare il ToA in modo accurato anche per scenari rumorosi o caratterizzati da elementi imprevedibili. L'algoritmo implementato è stato utilizzato per la caratterizzazione di segnali sintetici generati per una piastra quadrata in alluminio, mostrando un errore medio per la stima del ToA del 3%, rispetto ad un errore medio del 44% del più popolare AIC.

1. Introduzione

Il monitoraggio strutturale basato su EA presenta alcuni intrinseci vantaggi nell'ambito industriale in quanto consente di rilevare difetti pericolosi in una fase iniziale di degrado [1]. Questo approccio favorisce l'identificazione di punti deboli nelle strutture di grandi dimensioni, inclusi tubazioni e scambiatori di calore, tubature e serbatoi di stoccaggio, colonne e reattori, ecc. Uno dei vantaggi di questo metodo è la possibilità di localizzare la sorgente delle emissioni, associabile ad un difetto, catturando in modo passivo le onde acustiche che si propagano nel mezzo. Questo consente di monitorare le strutture senza la necessità di rimuoverle dal servizio [2].

Uno dei parametri di interesse da estrarre da un segnale acustico è il cosiddetto tempo di arrivo (ToA), noto anche come onset-time, che viene successivamente utilizzato per la fase di monitoraggio. In particolare, sotto alcune ipotesi di omogeneità, il ToA viene utilizzato per stimare la posizione della sorgente del segnale ovvero a localizzare l'area in cui il danno strutturale stia evolvendo. Tra i vari metodi di localizzazione della sorgente, l'intensità del segnale ricevuto (RSS), l'angolo di arrivo (AoA) e la differenza nel tempo di arrivo (TDoA), sono spesso utilizzati per alimentare approcci geometrici atti a localizzare la sorgente in una, due o tre dimensioni [3]. Queste strategie si basano sostanzialmente sul calcolo di ToA

di vari segnali ricevuti ad una rete di sensori, e risultano più robuste rispetto a metodologie che sfruttano ad esempio l'energia dei segnali, specialmente nei contesti di monitoraggio a lungo termine dove l'accoppiamento tra i sensori e la struttura può degradare. Tuttavia, diversi fattori, sia deterministici che di natura stocastica, possono influenzare negativamente l'accuratezza nella stima del ToA. Nel primo caso, ad esempio, vibrazioni indotte da una pompa o da un motore posto in prossimità della struttura oggetto del monitoraggio possono oscurare la sorgente acustica. Nel secondo caso, sorgenti di rumore imprevedibili, quali interferenze elettromagnetiche, pioggia o impatti meccanici causati nelle vicinanze del sistema di monitoraggio, possono dare luogo a falsi segnali di emissione acustica.

Sebbene esistano algoritmi statistici per la determinazione del ToA, come l'Akaike Information Criterion (AIC) [4, 5] e la cross-correlazione [6], largamente utilizzati anche per bassi rapporti di segnale rumore (SNR), i fattori sopra menzionati possono influenzare negativamente la riproducibilità e l'accuratezza dei loro risultati nella stima del ToA. Di conseguenza, specialisti in vari campi continuano a lavorare oggigiorno allo sviluppo e validazione di metodi per la stima del ToA che siano resistenti ad alti livelli di rumore, e robusti rispetto a anomalie deterministiche e/o stocastiche.

Negli ultimi anni, per risolvere problemi di elaborazione del segnale di grande complessità, hanno riscontrato grande successo i metodi di "Machine Learning" (ML). Nel campo della sismologia, ad esempio, sono state proposte soluzioni automatiche e robuste per la stima del ToA. I lavori significativi in questa direzione includono l'utilizzo di metodi basati su forme d'onda modello [7], ovvero che cercano anomalie rispetto ai dati sismici rilevati in precedenza, come pure algoritmi basati sui picchi dei segnali sismici rilevati mediante logiche di "fuzzy clustering" [8]. Un altro esempio degno di attenzione è stato esaminato nel lavoro di Zachary E. Ross (2018) [9], dove la stima del ToA associato all'onda sismica primaria (P wave) è stato formulato come un problema di "Pattern Recognition" affidato ad un algoritmo di deep learning opportunamente addestrato.

In questo articolo, proponiamo l'utilizzo di una rete neurale convoluzionale (CNN) a due stadi che utilizza una serie di strati monodimensionali per la stima del ToA. La rete è stata sviluppata e addestrata utilizzando dati pseudo-sperimentali generati con un algoritmo di ray-tracing appositamente costruito in ambiente MATLAB. In particolare, sono stati generati segnali di EA esistenti in una piastra quadrata di alluminio, con dimensioni 1000 mm x 1000 mm x 3 mm, considerando diverse distanze di propagazione. I segnali sono stati poi corrotti con vari rapporti segnale-rumore al fine di validare la robustezza dell'algoritmo proposto. Una valutazione statistica degli errori nella stima dei ToAs mostra la superiorità dell'algoritmo proposto rispetto all'AIC di almeno un ordine di grandezza in termini di precisione e tolleranza al rumore.

Il documento è organizzato come segue. L'algoritmo proposto è presentato nella Sezione 2. La Sezione 3 descrive la fase di addestramento e validazione sperimentale su dati simulati della rete neurale. Infine, nella Sezione 4 vengono fornite le conclusioni del lavoro e uno sguardo a potenziali sviluppi futuri.

2. CNN per la stima del ToA

Le reti convoluzionali (CNN) sono una classe di reti neurali artificiali che possono estrarre informazioni da dati grezzi, conservarle sotto forma di pesi e "bias", e successivamente usarle per fare classificazioni e/o previsioni di nuovi dati. Questo avviene attraverso due fasi, ovvero *estrazione* e *classificazione* delle caratteristiche, descritte come segue:

1. **fase di estrazione:** qui avvengono le operazioni di convoluzione con l'obiettivo specifico di estrarre tutte le caratteristiche importanti dai dati di input. Più livelli

convoluzionali sono impilati uno dopo l'altro e ciò consente a ciascun livello della rete di identificare diverse proprietà del segnale in ingresso in modo completo. Più nel dettaglio, il primo stadio cattura le caratteristiche di basso livello, mentre i livelli successivi catturano le caratteristiche di alto livello. Le convoluzioni sono generalmente seguite da livelli di *pooling*, che sono responsabili della riduzione della dimensione spaziale delle caratteristiche convolute, nonché della riduzione della complessità computazionale per l'estrazione delle caratteristiche dominanti.

2. **fase di classificazione:** è costituita da *strati densi* completamente connessi che vengono utilizzati per apprendere relazioni non lineari fra le caratteristiche di alto livello caratterizzanti gli output della fase precedente e infine fare previsioni, come ad esempio stimare il ToA per questo caso specifico.

Le CNN offrono prestazioni elevate per la classificazione di dataset a diverse dimensioni. Nel caso di segnali monodimensionali, come per i transienti delle EA, i vantaggi delle CNN si ottengono utilizzando strati convoluzionali 1D e catturando così le dipendenze spaziali e temporali attraverso l'applicazione di filtri corrispondenti.

2.1 Architettura CNN

La rete CNN implementata è composta da cinque livelli (Conv1D + MaxPooling) in cascata, uno dopo l'altro, ciascuno con una dimensione del kernel di 10 x 10. Il numero di filtri in ogni strato aumenta da 50 a 250, con passo di 50, per ciascuno dei cinque strati, come si evince dalla rappresentazione schematica di Fig. 1. Una funzione di attivazione non lineare, la Rectified Linear Unit (ReLU), viene utilizzata all'uscita di ogni strato. In uscita dai cinque livelli è stato aggiunto un strato di Global Average Pooling ed in cascata un strato denso caratterizzato da 1024 unità e dalla funzione di attivazione ReLU. Infine, è stato aggiunto un livello denso in uscita, con solo 1 unità e la funzione di attivazione lineare, dove il ToA associato al segnale di ingresso viene prelevato.

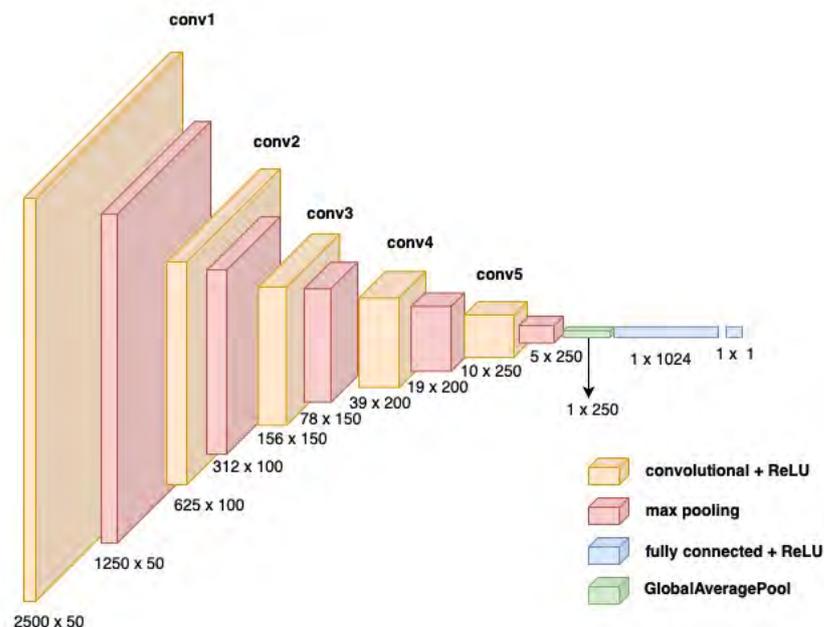


Figura 1. Rappresentazione schematica della rete CNN a cinque livelli utilizzata per la stima del ToA.

3. Validazione numerica

In questa sezione viene presentata la strategia di validazione pseudo sperimentale della rete CNN precedentemente descritta. In particolare, nella sezione 3.1 viene discussa la generazione del dataset utilizzato per l'addestramento e la validazione della rete, con particolare enfasi sulla rappresentatività dei segnali utilizzati e sulla loro variabilità rispetto a scenari reali. Nella sezione 3.2, invece, vengono mostrati dei risultati preliminari che dimostrano la validità della strategia algoritmica proposta.

3.1 Generazione del dataset

Gli algoritmi di apprendimento automatico di solito richiedono enormi set di dati su cui essere addestrati al fine di contemplare la pletora di tutte le possibili configurazioni sorgente-sensore. In questo lavoro, è stato considerato un sottoinsieme rappresentativo di tali configurazioni per la quali le EA sono state simulate in modo sintetico utilizzando un approccio analitico. Tale strategia ha consentito sia di ridurre i tempi di generazione del database di segnali, contemplando diversi SNR e diverse distanze relative dei sensori, sia di associare a ciascuna serie temporale il corretto ToA necessario successivamente per quantificare le prestazioni di stima degli algoritmi utilizzati. A tal fine è stato considerato quale ToA di riferimento per una data distanza tra sorgente del segnale EA e sensore quello stimato tramite l'AIC in condizioni di rumore nullo.

Lo scenario di sperimentazione considera una piastra quadrata in alluminio con dimensioni superficiali di 1000 mm x 1000 mm, e spessore 3 mm. Le EA sono simulate mediante un algoritmo (scritto in MATLAB) che trasforma il segnale in input (alla sorgente) nel segnale in output ad una data distanza considerando il comportamento dispersivo e multimodale delle onde guidate nella piastra. L'algoritmo è in grado di gestire e modellare l'interazione delle onde con i bordi della piastra fino al 4° ordine di riflessione. Quale segnale di input è stato assunta un'onda sinusoidale, modulata con una gaussiana, con frequenza centrale di 250 kHz. Dato il contenuto in frequenza del segnale in input, è risultato necessario contemplare solo i modi fondamentali della piastra, simmetrico (S0) e antisimmetrico (A0), nella generazione del database.

Ogni serie temporale è costituita da 5000 valori, acquisiti ad una frequenza di campionamento teorica di 2 MHz, compatibilmente con i sistemi commerciali per il monitoraggio di EA. La costruzione del database contempla segnali ottenuti variando tre parametri, e considerando le variazioni combinate dei parametri al fine di generare un database ricco. In particolare, sono stati variati (i) i livelli di rumore, considerando un SNR da 0 a 30 dB a passi interi di 1dB per step; (ii) la distanza percorsa, che è stata selezionata come mostrato in Fig. 2, in cui i punti blu e rossi rappresentano rispettivamente la posizione della sorgente di EA e del sensore; (iii) il tempo di pre-trigger, modificandolo in modo random tra 100 e 1500 campioni al fine di simulare la grande variabilità di tale quantità in funzione dell'ambiente di propagazione. Complessivamente più di 60.000 segnali sono stati generati per formare il dataset, l'80% dei quali è stato utilizzato in modo casuale per scopi di addestramento della rete mentre il restante 20% è stato utilizzato per la validazione.

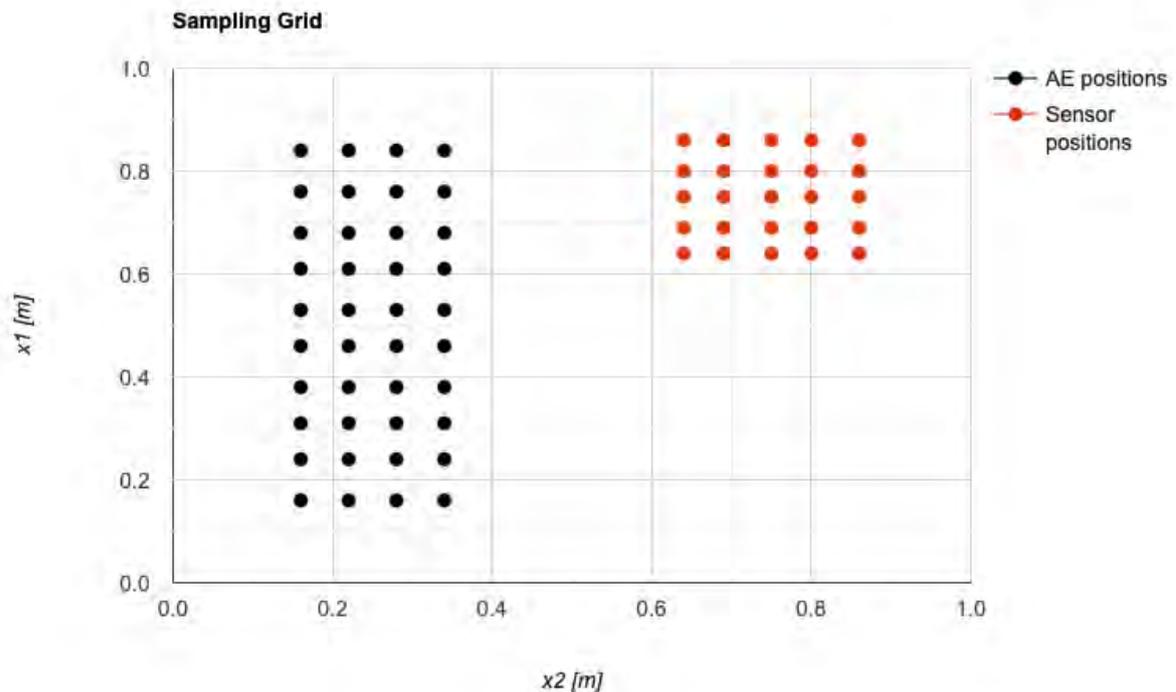


Figura 2. Griglia di campionamento usata per la generazione del dataset analitico: i punti in nero si riferiscono alle posizioni delle sorgenti di EA mentre quelli in rosso alla posizione dei sensori in ascolto.

A titolo di esempio, la Fig. 3 mostra un segnale di test ed evidenziati i ToA stimati. Il marker a croce in nero denota il vero ToA stimato mediante l'algoritmo AIC in assenza di rumore, mentre i pallini rosso e giallo indicano, rispettivamente, i ToA stimati dalla CNN e dall'AIC. Come si può osservare, c'è un notevole allineamento verticale tra il valore cercato e quello stimato dalla CNN mentre il ToA stimato con l'AIC è affetto da un errore significativo.

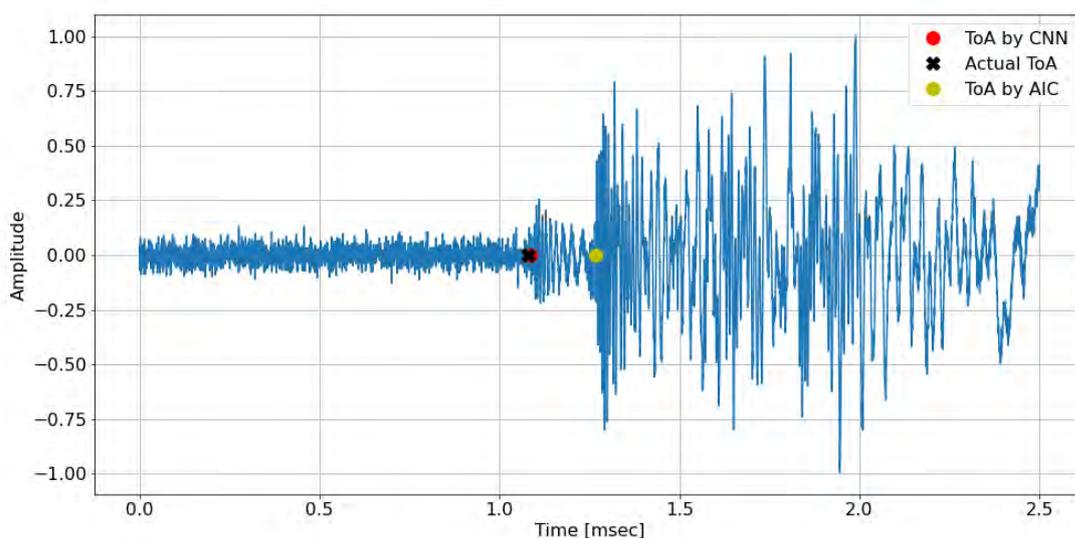


Figura 3. Segnale di prova con ToA calcolato dalla rete CNN (indicatore rosso rotondo) e con AIC (indicatore giallo rotondo) sovrapposto all'etichetta reale (indicatore nero incrociato).

3.2 Testing

I metodi basati sulle statistiche del secondo ordine dei segnali sono considerati un punto di riferimento nel settore e, quindi, sono presi come principali concorrenti per dimostrare la qualità dei tempi di arrivato predetti dalla CNN proposta in questo lavoro.

L'errore nella stima del ToA viene assunto come:

$$E = \sum_{i=1}^N E_i = \sum_{i=1}^N \frac{\widehat{ToA}_i - ToA}{ToA}$$

dove \widehat{ToA}_i è il tempo stimato mentre ToA_i è quello effettivo, è stato assunto come principale metrica di valutazione delle prestazioni. In particolare, minore è il valore di E , migliore è la precisione ottenuta. La distribuzione degli errori nella stima del ToA per la rete CNN e per l'AIC, assieme alla funzione di distribuzione gaussiana degli stessi, sono rappresentati in Fig. 3. I risultati mostrano un errore medio del 3,20% per la rete CNN ed un errore medio del 47,01% per l'AIC, ovvero almeno un ordine di grandezza di differenza tra i due metodi. Inoltre, vale la pena osservare che gli errori dell'AIC sono distribuiti su un intervallo molto elevato, elevata deviazione standard, rispetto a quelli relativi all'uso della CNN che risultano concentrati vicino al valore medio. Una possibile ragione della grande dispersione dei valori del ToA nell'uso di AIC è data dalla incapacità di tale algoritmo nel gestire ambienti rumorosi significativi.

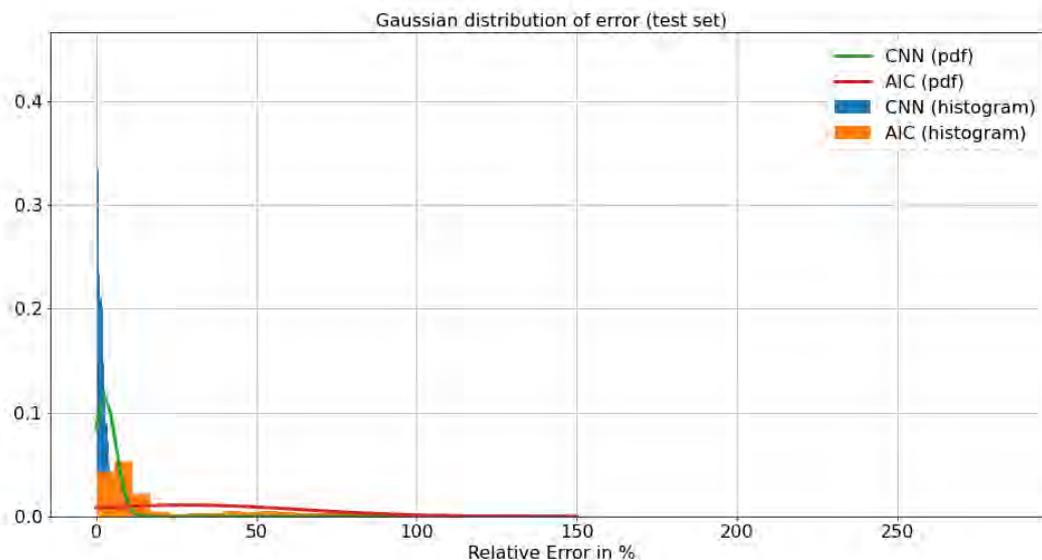


Figura 4. Distribuzione Gaussiana dell'errore assoluto medio tra i valori effettivi e quelli stimati: i risultati del metodo AIC sono in arancione, quelli della rete CNN in blu.

4. Conclusioni

In questo lavoro è stato presentato un metodo innovativo per la stima del ToA in segnali dispersivi e multimodali legati alle EA esistenti in una piastra. L'algoritmo impiegato si ispira a recenti soluzioni nel campo dell'intelligenza artificiale. La soluzione, che si basa su una CNN multistrato, ha il peculiare vantaggio (una volta opportunamente addestrata) di fornire risultati coerenti anche per SNR significativamente bassi. Infatti, quando testato su un set di dati sintetico generato per la caratterizzazione di una lastra di alluminio quadrata, ha ottenuto risultati 10 volte più accurati rispetto all'algoritmo AIC, che può essere considerato

uno standard nel campo. Sviluppi futuri saranno dedicati al test dell'algoritmo sui segnali di EA reali ottenuti in condizioni di laboratorio.

5. Bibliography

- [1] Gholizadeh, Samira & Leman, Z. & Baharudin, B T. (2015). A review of the application of acoustic emission technique in engineering. *Structural Engineering & Mechanics*. 54. 1075-1095. 10.12989/sem.2015.54.6.1075.
- [2] A. Berkovits and D. Fang, Study of Fatigue Crack Characteristics by Acoustic Emission, *Eng. Fracture Mech.*, 51 (3) (1995), pp. 401416.
- [3] Rosic, Maja & Simic, Mirjana & Pejovic, P. Hybrid genetic optimization algorithm for target localization using TDOA measurements, Conference: 4th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRANAt: Serbia (2017).
- [4] St-Onge, Andy. (2011). Akaike Information Criterion Applied to Detecting First Arrival Times on Microseismic Data. 30. 10.1190/1.3627522.
- [5] Niccolini, Gianni & Xu, Jie & Manuello, Amedeo & Lacidogna, Giuseppe & Carpinteri, Alberto. (2012). Onset time determination of acoustic and electromagnetic emission during rock fracture. *Progress In Electromagnetics Research Letters*. 35. 51-62. 10.2528/PIERL12070203.
- [6] Adrián-Martínez, S. & Ardid, Miguel & Bou-Cabo, Manuel & Felis, Ivan & Llorens, C. & Martínez-Mora, Juan & saldaña, Maria. (2015). Acoustic Signal Detection Through the Cross-Correlation Method in Experiments with Different Signal to Noise Ratio and Reverberation Conditions. 10.1007/978-3-662-46338-3_7.
- [7] Ross, Z. E., Rollins, C., Cochran, E. S., Hauksson, E., Avouac, J.-P., & Ben-Zion, Y., Aftershocks driven by afterslip and fluid pressure sweeping through a fault-fracture mesh. *Geophysical Research Letters*, 2017GL074634, (2017). <https://doi.org/10.1002/2017GL074634>
- [8] Chen, Y. (2018). Automatic microseismic event picking via unsupervised machine learning. *Geophysical Journal International*, 212(1), 88–102. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx420>
- [9] Ross, Zachary & Meier, Men-Andrin & Hauksson, Egill. (2018). P Wave Arrival Picking and First-Motion Polarity Determination With Deep Learning. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 123. 10.1029/2017JB015251.

Modellazione della vita utile residua dei serbatoi di stoccaggio atmosferici contenenti idrocarburi liquidi

M.F. Milazzo¹, G. Ancione¹, P. Bragatto², C. Mennuti²

¹ Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Messina, Messina

² Inail - Dit

Sommario

Dopo l'entrata in vigore della Direttiva 2012/18/UE, i gestori degli stabilimenti a rischio di incidente rilevante sono tenuti a valutare e gestire l'invecchiamento delle apparecchiature attraverso una pianificazione dettagliata, con l'obiettivo di controllare l'integrità e prevenire perdite indesiderate di materiali pericolosi. Per questa ragione è essenziale stimare lo stato di salute di ogni apparecchiatura e prevederne il tempo di vita utile residuo. I serbatoi di stoccaggio atmosferici sono apparecchiature che meritano attenzione particolare per quanto riguarda le perdite per il deterioramento dei fondi. La prevenzione di tali perdite è molto importante anche dal punto di vista ambientale, oltre che dal punto di vista della sicurezza; infatti, in accordo al D.Lgs. 152/2006, le autorizzazioni AIA rilasciate negli ultimi anni e i controlli che ne discendono hanno ulteriormente aumentato l'interesse sul controllo dell'integrità dei serbatoi. Per contribuire al raggiungimento di questi obiettivi, è in fase di sviluppo un sistema per la previsione del degrado delle apparecchiature e della vita utile residua. Il sistema è costituito da hardware e software, in cui i modelli previsionali traggono informazioni da sensori installati sulle apparecchiature e da un database contenente lo storico delle ispezioni spessimetriche. Questo lavoro presenta uno studio preliminare effettuato per la derivazione del modello di previsione del tempo di vita residuo rispetto ai meccanismi che interessano i serbatoi di stoccaggio atmosferico, ovvero la corrosione interna delle strutture metalliche esposte agli idrocarburi e la corrosione di fondo dei piani inferiori. Viene inoltre fornito un confronto tra il metodo proposto e lo standard EEMUA.

1. Introduzione

Le misure di integrità del fondo dei serbatoi di stoccaggio atmosferici possono essere eseguite solo quando il serbatoio è vuoto. Le emissioni acustiche, già testate in recenti progetti di ricerca [1], potrebbero essere utili per verificare la presenza di degrado in corso su serbatoi in servizio; tuttavia, esse sono assolutamente complementari alle misurazioni dirette dello spessore. Durante le fermate pianificate, l'intero fondo viene attentamente esaminato attraverso e, attualmente, la migliore tecnica di indagine disponibile è quella delle perdite di campo magnetico (Magnetic Flux Leakage, MFL) effettuata anche con dispositivi di scansione mobili (floor scanner). Le misure puntuali dello spessore con la tecnica degli ultrasuoni (UTM) sono comunque le più diffuse e, in ogni caso, indispensabili per integrare alle indagini MFL, rilevamenti nei punti più difficili da raggiungere; inoltre, le misure UTM sono ancora la migliore soluzione nei casi in cui il dispositivo MFL non possa entrare all'interno del serbatoio. I costi indiretti per uno screening completo del fondo del serbatoio sono indipendenti dalle tecniche e, comunque, risultano molto elevati, in quanto il serbatoio deve essere messo fuori servizio per un lungo periodo, svuotato e bonificato; quindi, i lavoratori, compresi gli ispettori, durante l'esecuzione delle misure devono rimanere a lungo in un ambiente altamente pericoloso. Pertanto, sebbene l'intervallo di ispezione tipico sia 10 anni, nella pratica correnti estensioni sono accettate. Tali intervalli possono anche essere ridotti al fine di garantire che il tempo medio, prima del

raggiungimento di condizioni di non sicurezza (con riferimento allo spessore minimo), sia molto inferiore al tempo atteso per la successiva ispezione.

Sulla base degli standard più comuni [2-3], il tasso di corrosione si stima come rapporto tra la riduzione dello spessore e l'intervallo di rilevamento e viene utilizzato per prevedere il tempo di vita residuo (Residual Useful Lifetime, RUL) e pianificare una manutenzione appropriata volta alla prevenzione dei rilasci di sostanze pericolose. Purtroppo, le misurazioni discrete di spessore non possono determinare con certezza la profondità massima di corrosione delle lastre di fondo, dove solitamente i materiali presentano corrosione localizzata sotto forma di pit. Per questo motivo, al fine di valutare il rischio di perforazione del serbatoio di stoccaggio, sarebbe opportuno utilizzare un approccio probabilistico con l'utilizzo di una modellazione stocastica del fenomeno. A tale scopo è frequente l'uso della teoria dei valori estremi [4-6]. La letteratura mostra diverse applicazioni di approcci statistici alla corrosione, basati sull'analisi dei valori estremi: Joshi ha caratterizzato i dati di corrosione ottenuti da UTM effettuate sulle lastre del fondo di serbatoi di stoccaggio di grezzo [7]; Shibata ha determinato il periodo di ritorno ottimale e predetto la massima corrosione da un diagramma di Gumbel [8]; Bolzoni et al. hanno applicato i modelli probabilistici per la descrizione della corrosione localizzata nell'industria petrolifera [9]; Kasai et al. hanno combinato l'analisi dei valori estremi e l'inferenza Bayesiana per la previsione della massima profondità di corrosione [10]. Altri studi usano l'approccio per la previsione della probabilità di guasto di tubazioni, componenti e macchinari [11-13].

Una valutazione probabilistica del tempo di vita del serbatoio, che tiene conto degli aspetti stocastici della corrosione, potrebbe anche essere utile per una comprensione più rigorosa della ragionevolezza degli approcci adottati dalle pratiche comuni, soprattutto quando possono essere sfruttate poche misure puntuali di spessore. Nelle sezioni che seguono si riporta lo studio condotto per la derivazione di un modello di previsione del danno massimo atteso rispetto ai meccanismi di deterioramento che influenzano il fondo dei serbatoi di stoccaggio atmosferici. Il modello è stato sviluppato mediante un'analisi dello stato del fondo, ottenuta raccogliendo misure di spessore con la tecnica degli ultrasuoni (UTM).

2. Metodologia

La metodologia proposta per la stima del tempo residuo di vita di un serbatoio combina la teoria dei valori estremi, utilizzata con l'approccio dei massimi in un intervallo, e l'inferenza Bayesiana per elaborare i dati raccolti durante le ispezioni con UTM. La distribuzione di Gumbel [14] viene utilizzata per stimare la profondità massima in una vasta area della quale viene ispezionata una piccola superficie (nello specifico poche misure puntuali). Si usano le seguenti espressioni:

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right) \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right) \cdot \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right) \quad (2)$$

dove: x = massima profondità di corrosione per ogni lastra costituente la pavimentazione del fondo del serbatoio; $F(x)$ e $f(x)$ = funzione probabilità cumulata e funzione densità probabilità; α e β = parametri della distribuzione di Gumbel, rispettivamente il parametro di scala e il parametro di posizione.

L'entità della corrosione si ottiene dalle UTM come segue:

$$x_s = s_o - s \quad (3)$$

dove: x_s = profondità di corrosione; s_o = spessore nominale della pavimentazione del fondo del serbatoio; s = spessore misurato.

In genere, si introduce una variabile ridotta (y), definita come segue e che consente di riscrivere l'equazione (1) nella forma (5):

$$y = \frac{x - \beta}{\alpha} \quad (4)$$

$$y = -\ln \left[\ln \left(\frac{1}{F(y)} \right) \right] \quad (5)$$

L'equazione (5) si utilizza per costruire il diagramma di Gumbel, mentre la probabilità cumulata può essere calcolata semplicemente mediante la seguente equazione:

$$F(y) = \frac{i}{N+1} \quad (6)$$

dove: N = numero totale di misure di spessore; i = rango della misura.

Tracciando y in funzione di x , si ottiene una linea retta (plot position), la cui pendenza e intercetta sono $1/\alpha$ e $-(\beta/\alpha)$. Il parametro di posizione β è la moda della distribuzione, ovvero il valore di corrosione più frequente, mentre il valore di α rappresenta la dispersione dei pit.

La corrosione assume forme diverse e le loro statistiche potrebbero essere diverse. La scelta della distribuzione è cruciale per i calcoli e l'accuratezza dei parametri di distribuzione. Esistono vari criteri per la verifica della distribuzione che meglio fitta i dati di profondità di corrosione [15]. In ogni caso ogni qualsiasi altra distribuzione è sempre riconducibile a quella di Gumbel.

Per prevedere la probabilità del danno massimo atteso (ovvero la perforazione del fondo del serbatoio) e il tempo di vita residuo, mediante l'analisi dei valori estremi e il diagramma di Gumbel, sono richiesti le distribuzioni di probabilità del parametro di scala e di parametro di posizione al tempo a cui si vuole effettuare la previsione. Tali distribuzioni sono calcolabili attraverso inferenza Bayesiana:

$$\chi''(\alpha | x) = \frac{\chi'(\alpha) \cdot f(x | \alpha)}{\int \chi'(\alpha) \cdot f(x | \alpha) \cdot d\alpha} \quad (7)$$

$$\lambda''(\beta | x) = \frac{\lambda'(\beta) \cdot f(x | \beta)}{\int \lambda'(\beta) \cdot f(x | \beta) \cdot d\beta} \quad (8)$$

dove: $\chi'(\alpha)$ e $\chi''(\alpha|x)$ = distribuzioni di probabilità a priori e a posteriori di α dopo un determinato periodo di utilizzo del serbatoio di stoccaggio; $\lambda'(\beta)$ e $\lambda''(\beta|x)$ = distribuzioni di probabilità a priori e a posteriori di β dopo un determinato periodo di utilizzo del serbatoio di stoccaggio; $f(x|\alpha)$ e $f(x|\beta)$ = funzioni di verosimiglianza.

I valori attesi dei due parametri, che possono così essere ottenuti in riferimento al fissato periodo di utilizzo del serbatoio, consentono di elaborare un nuovo *plot position*, attraverso la quale è possibile determinare la probabilità di perforazione, il tasso di corrosione e il valore del *RUL*. Per applicare le equazioni (8) e (9) è necessario disporre delle

distribuzioni a priori dei valori di α e di β attesi dopo gli ulteriori anni di utilizzo del serbatoio.

La determinazione della distribuzione di probabilità di alfa e beta al variare del tempo di utilizzo del serbatoio è stata studiata usando un set di ispezioni effettuata su serbatoi con caratteristiche simili a quello oggetto di studio. I dati sono stati resi disponibili nell'ambito di una convenzione sottoscritta tra INAIL e l'associazione UNEM (Unione Energie per la Mobilità). Per ogni ispezione del fondo è stata applicata la teoria dei valori estremi come indicato sopra e, dopo l'identificazione della distribuzione di probabilità che meglio si adatta alle profondità di corrosione, sono stati stimati i valori dei parametri di scala e di posizione. I valori dei parametri sono stato correlati al tempo di utilizzo del serbatoio e, sovrapponendo tutti gli andamenti temporali dei parametri di scala e di posizione dei serbatoi, è stato possibile determinare la distribuzione dei valori per ogni tempo di utilizzo del serbatoio (probabilità a priori).

3. Caso studio

Il caso studio è un deposito costiero e l'apparecchiatura oggetto di studio è un grande serbatoio atmosferico a tetto fisso, utilizzato per lo stoccaggio di diversi solventi aromatici leggeri a base di nafta. Il serbatoio ha una capacità massima di circa 3000 m³ ed è in servizio dal 1962 in un sito Seveso. Il deposito è incluso in un'area che comprende edifici residenziali, autostrade e ferrovie, nonché elementi vulnerabili naturali (un torrente e una spiaggia).

Lo studio si è concentrato sul fondo del serbatoio, che è la parte di maggiore rilevanza dal punto di vista delle perdite di contenimento in quanto anche una perdita modesta potrebbe inquinare le acque sotterranee, il torrente, la spiaggia e il mare con costi di bonifica elevati. Il fondo è composto da 53 lastre in acciaio al carbonio, saldate tra loro per coprire un'area di circa 360 m². Lo spessore nominale del fondo è 8 mm. Nell'ultimo decennio, è stato ispezionato due volte a sette anni di distanza. Prima delle ispezioni, è stato svuotato e pulito. Il protocollo di ispezione includeva un'estesa ispezione visiva, un controllo completo delle perdite e un numero di misure di spessore con la tecnica degli ultrasuoni (UTM) per ogni lastra del fondo. La Tabella 1 riporta i parametri statistici di base delle due ispezioni. La corrosione è stata quantificata come differenza tra lo spessore nominale (8 mm) e lo spessore misurato.

ID ispezione	Anno	N° punti	Media spessori misurati [mm]	Deviazione standard	Minimo spessore misurato [mm]
1	2010	126	5,90	0,30	4,7
2	2017	252	5,79	0,23	3,9

Tabella 1. Parametri di base delle ispezioni.

È stato analizzato l'insieme delle massime profondità di corrosione determinate per ogni lastra del fondo del serbatoio per l'ispezioni del 2010 e del 2017. Sono stati costruiti i grafici della probabilità cumulata e della variabile ridotta rispetto alla corrosione del fondo. Successivamente è stata effettuata la regressione lineare per i grafici y vs. x e sono stati determinati i parametri attuali della dispersione di Gumbel.

4. Risultati e validazione

I risultati della regressione sono riportati in Figura 1(a)-(b) e i parametri della distribuzione ottenuti sono elencati in Tabella 2. Confrontando i parametri ottenuti per il 2010 e il 2107, si osserva: la moda della distribuzione di Gumbel, essendo la profondità del pit più frequente, cresce nell'ultimo periodo di operatività del serbatoio, mentre il parametro di

scala risulta leggermente aumentato e l'incremento è da attribuire all'aumento della varianza dei valori massimi causato dall'evoluzione della corrosione localizzata.

ID ispezione	Anno	Parametro di scala (α)	Parametro di posizione (β)
1	2010	0,261	2,041
2	2017	0,303	2,237

Tabella 2. Parametri della distribuzione di Gumbel.

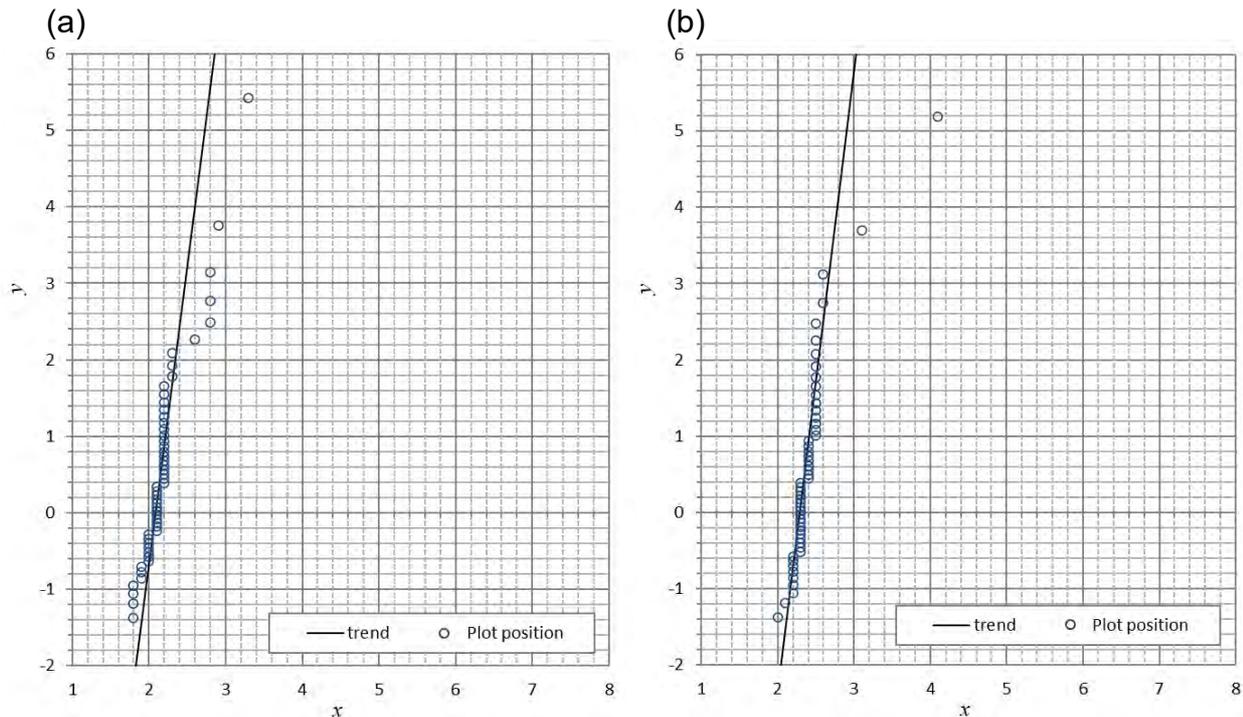


Figura 1. Plot position: (a) ispezione 2010, (b) ispezione 2017.

L'elaborazione degli UTM del 2010 è stata utilizzata per prevedere il trend dei massimi di corrosione per il 2017 e stimare la velocità di evoluzione del fenomeno secondo lo schema descritto in Sezione 2; mentre gli UTM del 2017 sono stati impiegati per la validazione dei risultati.

Nelle equazioni (8) e (9), x è il massimo valore di corrosione rilevato tra i massimi del 2010, ovvero 3,3 mm. Le distribuzioni a posteriori di α e di β , ottenute mediante inferenza Bayesiana, sono riportate in Figura 2 e 3, insieme alle distribuzioni a priori. Ogni valore di α e di β , indicato nelle figure, è rappresentativo di una classe riportata a fianco dello stesso grafico. I valori attesi dopo sette anni di utilizzo sono rispettivamente $\alpha = 0,298$ e $\beta = 2,41$.

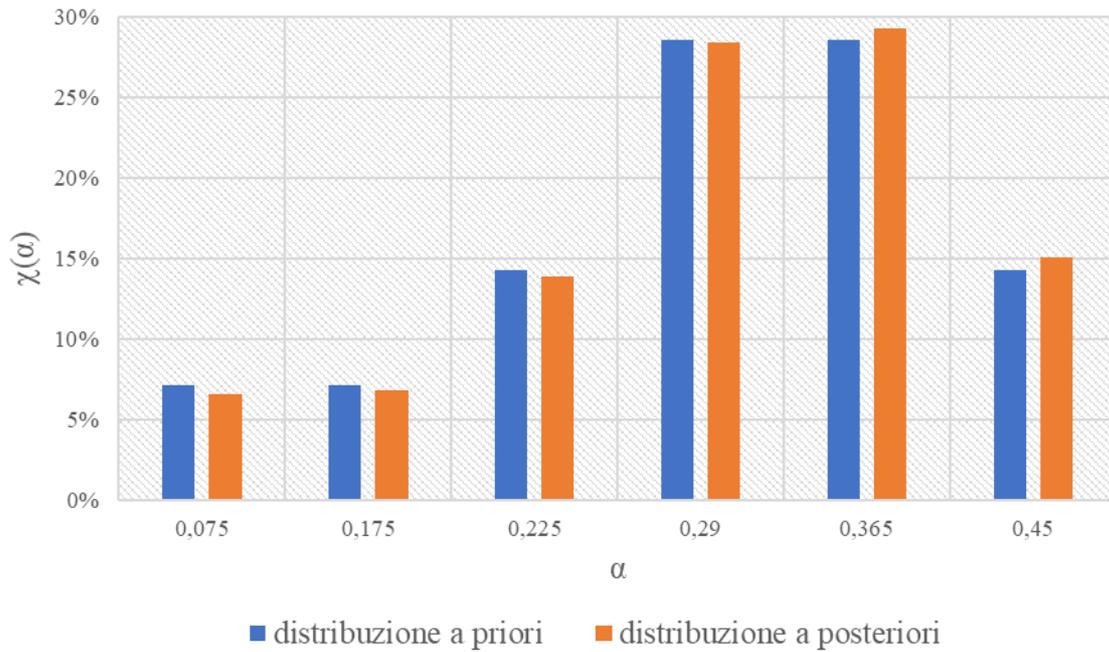


Figura 2. Distribuzione a priori e a posteriori del parametro di scala.

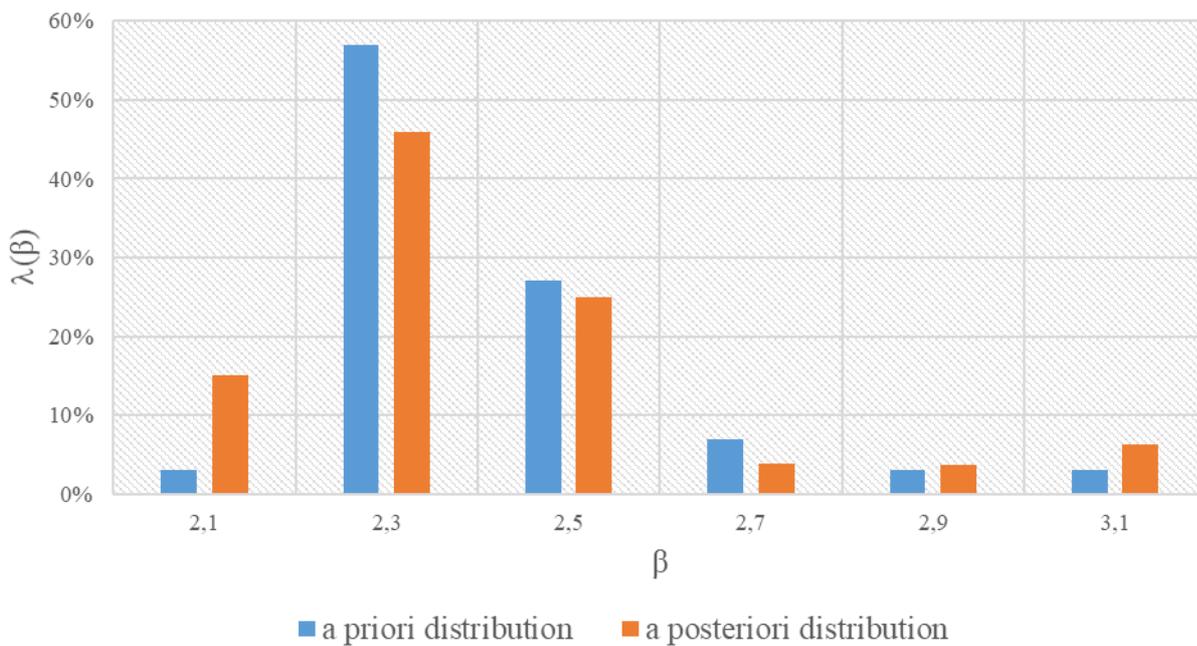


Figura 3. Distribuzione a priori e a posteriori del parametro di posizione.

La Figura 4 mostra una previsione della *plot position* per il 2017 e un confronto con quelle ottenute tramite elaborazione delle UTM del 2010 e del 2017. Si osserva che nel 2010, circa il 94 % dei pit hanno profondità minore o uguale a 2,8 mm, mentre la proiezione per il 2017 mostra che con la stessa probabilità i pit avranno una profondità minore o uguale a circa 3,2 mm. Le elaborazioni delle UTM del 2017 sono state utilizzate per validare la stima della previsione e si osserva che in realtà la corrosione risulta minore o uguale a 3,1 mm con una probabilità cumulata del 94%. La proiezione, quindi, sovrastima il trend di profondità dei pit di circa 0,01 nel 94% dei casi.

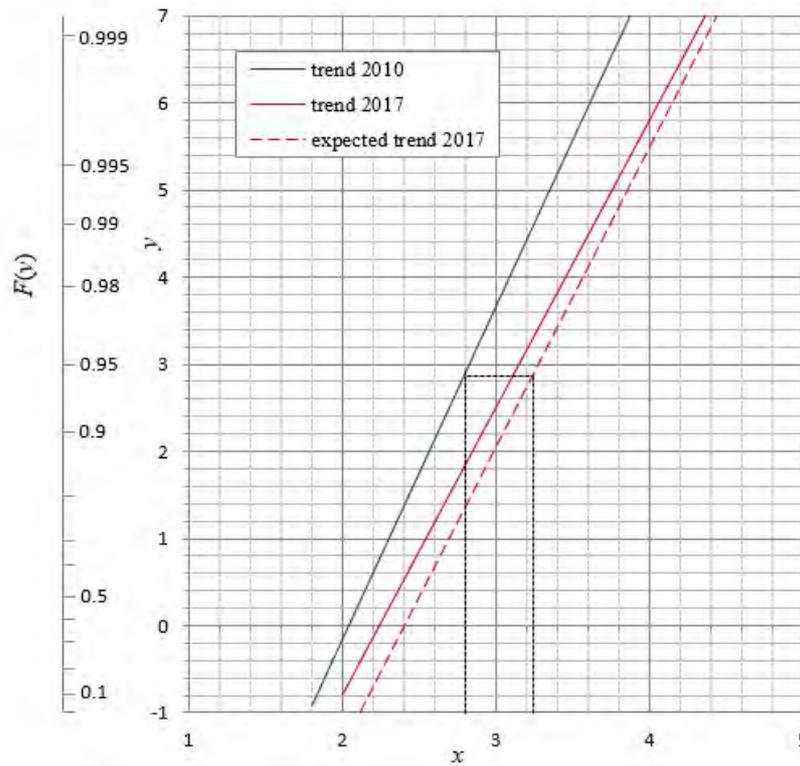
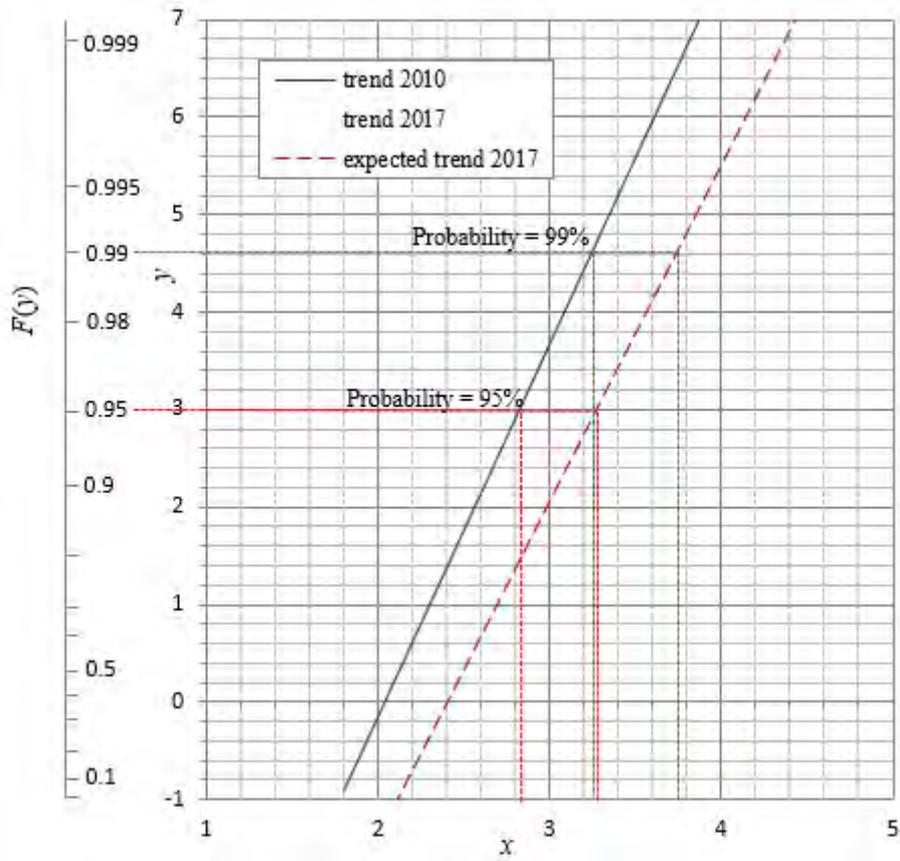


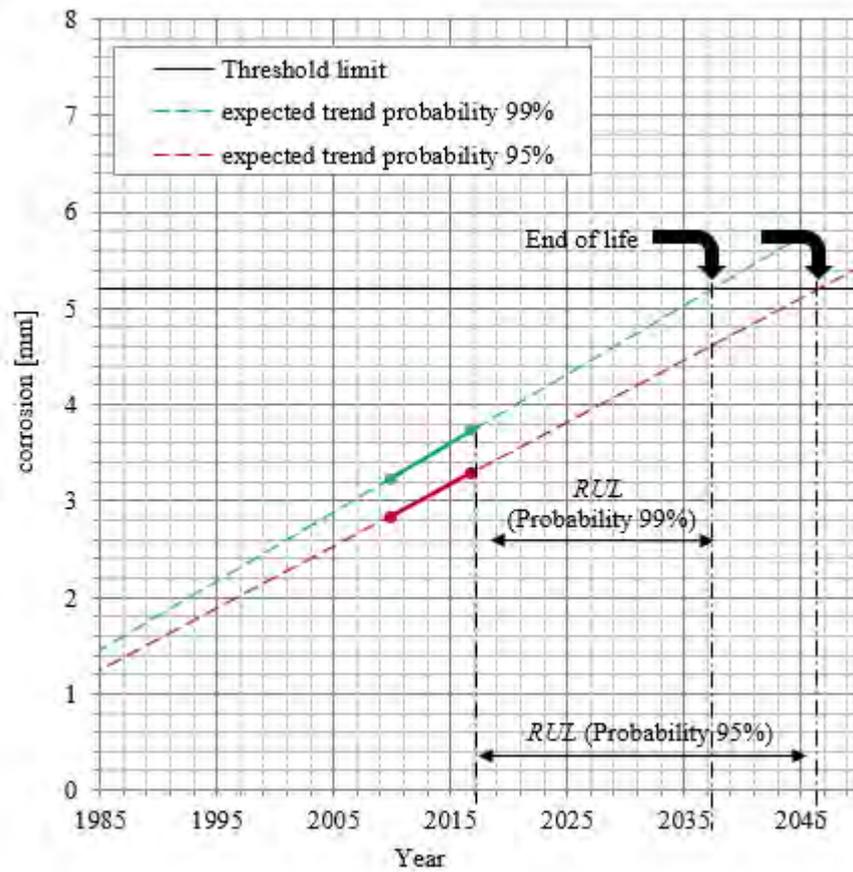
Figura 4. Plot position e previsioni.

La stima del *RUL* è stata effettuata in Figura 5(b) assumendo un trend lineare per l'evoluzione del fenomeno corrosivo, che viene ottenuto estraendo la previsione dalla Figura 5(a) per valori di probabilità cumulata pari a 95% e 99%. In Figura 5(b), tale previsione è evidenziata dal tratto continuo, che poi è stato estrapolato su un intervallo di tempo più esteso rispetto a quello che intercorre tra le due ispezioni. Il *RUL* è dato dall'intervallo di tempo, a partire dall'ultima ispezione, nel quale con un dato valore di probabilità $P(X > x_{\text{limite}})$ potrebbe essere raggiunto un valore di corrosione superiore al limite che compromette la sicurezza del sistema. In Figura 5(b), il *RUL* si raggiunge quando la retta, rappresentante l'evoluzione del fenomeno, interseca il valore limite fissato a 5,2 mm. La stima del tempo di vita è stata effettuata per valori di probabilità cumulata pari a 95% e 99%, vale a dire per $P(X > 5,2 \text{ mm})$ pari 0,05 e 0,01.

La velocità di corrosione è il coefficiente angolare della linea rappresentante la tendenza del fenomeno corrosivo; essa risulterà circa 0,07 mm/anno con una probabilità di 0,99.



(a)



(b)

Figura 5. a) Calcolo della probabilità dei pit aventi specifiche profondità, b) Stima RUL.

Il tasso di corrosione è stato confrontato con i valori ottenuti dallo standard EEMUA. I risultati sono sintetizzati nella Tabella 3. Il tasso di corrosione (r) è comparabile (anche se lievemente inferiore) rispetto al valore riportato da EEMUA per la combinazione acciaio al carbonio e solvente (0,15 mm/y). Il valore è stato corretto opportunamente per tenere conto degli effetti di vaiolatura. Il metodo EEMUA si basa su diverse check-list per fondi, coperture e coperture. Utilizza una scala a 4 livelli per classificare sia la probabilità che le conseguenze delle perdite (trascurabile, bassa, media, alta). Le classi risultanti dall'applicazione della lista di controllo al fondo del serbatoio sono alta per le conseguenze e media per le probabilità. Ulteriori compensazioni e penalità sono stati aggiunti per considerare le tecniche ispettive. L'ispezione visiva integrata dai punti UTM ha penalità pari a - 0,1. Questa valutazione è molto conservativa e la dispersione dei dati delle misure di spessore indica un'elevata incertezza. Inoltre, se si utilizzasse lo spessore medio, r sarebbe due volte e mezzo inferiore e il tempo per la successiva ispezione risulterebbe 10 anni. Pertanto, il metodo riconosciuto nell'attuale pratica ingegneristica è davvero discutibile ed è altamente auspicabile l'applicazione di un approccio meno conservativo.

Dati iniziali		Risultati		Risultati	
Spessore minimo 2010	4,70 mm	Tasso di corrosione r	0,11 mm/y	Valutazione di probabilità	Media
Sperssore minimo 2017	3,90 mm	Fattore di vaiolatura	1,05	Fattore di Confidenza K	0,5
Spessore permesso	2,5 mm	aggiustameto r'	0,12 mm/y	Crediti/Penalità	0
Margine di sicurezza	0,2 mm	RUL	10 y	K'	0,5
Intervallo di ispezione	7 y	Valutazione delle conseguenze	alto	Tempo alla prossima ispezione	6,1 y

Tabella 3. Confronto con metodo EEMUA.

5. Conclusioni

Il metodo proposto fornisce informazioni meno conservative e specifiche rispetto allo standard EEMUA, poiché utilizza i dati raccolti ad ogni ispezione. Il tasso di corrosione calcolato è molto vicino a quello ottenuto dallo standard API, che è meno conservativo di quello ottenuto da EEMUA. La valutazione probabilistica del RUL consente all'operatore di pianificare in modo più flessibile la data della prossima ispezione. In questo modo riesce a bilanciare meglio le esigenze contrapposte (integrità vs. sicurezza sul lavoro), ovvero garantire l'integrità dell'attrezzatura nel tempo e minimizzare gli effetti sulla sicurezza sul lavoro dovuti ad interventi all'interno del serbatoio. Inoltre, dato che il monitoraggio con tecnica delle emissioni acustiche (AE) può identificare aree dove la corrosione è più attiva, fornendo preziose informazioni per una più efficace misurazione dello spessore ultrasonico o per localizzare possibili perdite di prodotto, la sua combinazione con l'approccio proposto consente di sfruttare in modo più efficace la prognosi per la gestione della sicurezza.

6. Bibliografia

[1] Demichela M., Cozzani V., Marzani A., Baldissone G., Messina M. Aging Facilities prognostic & health management: data collection, analysis and use. *CET*. 2019, 77: 925-930.

[2] The Engineering Equipment and Materials Users Association (EEMUA). Users' Guide to the Inspection, Maintenance and Repair of above Ground Vertical Cylindrical Steel Storage Tanks. Publication EEMUA n. 159. 5th ed. London, 2018

- [3] American Petroleum Institute (API). Risk-Based Inspection Methodology. API Recommended Practice API RP 581. 3rd ed. New York, 2016.
- [4] Health & Safety Executive (HSE). Guidelines for use of statistics for analysis of sample inspection of corrosion. *Research report* n. 016, 2002.
- [5] Shibata T. Corrosion probability and statistical evaluation of corrosion data. In UHLIG'S Corrosion Handbook. ECS-The Electrochemical Society. 3rd ed. Ottawa, 2011, pp. 365-384.
- [6] Velázquez J.C., Caleyó F., Valor A., Hallen J.M. Predictive Model for Pitting Corrosion in Buried Oil and Gas Pipelines, *Corrosion*. 2009; 65(5): 332-342.
- [7] Joshi N.R. Statistical analysis of UT corrosion data from floor plates of a crude oil aboveground storage tank. *Mater. Eval.* 1994, 52(7): 846-849.
- [8] Shibata T. Evaluation of corrosion failure by extreme value statistics, *ISIJ International*. 1991; 31(2): 115-121.
- [9] Bolzoni F., Fassina P., Fumagalli G., Lazzari L., Mazzola E. Applicazione dei modelli probabilistici allo studio della corrosione localizzata, *Metall. Ital.* 2006; 6:9-15.
- [10] Kasai N., Mori S., Tamura K., Sekine K., Tsuchida T., Serizawa Y. Predicting maximum depth of corrosion using extreme value analysis and Bayesian inference, *Int. J. Press. Vessels Pip.*. 2016; 146: 129-134.
- [11] Lee S.H., Choe B.H., Kim Y.P., Kim W.S., Ko Y.T., Lee J.H., Paik U. Probabilistic Assessment for Failure probability of Pipe Lines by Extreme Value Distribution, *Mater. Sci. Forum*, 2005; 486-487: 229-232.
- [12] Schneider C., Application of Extreme Value Analysis to Corrosion Mapping Data, *4th European-American Workshop on Reliability of NDE - We.2.A.3*. 2004.
- [13] Ishikawa Y., Ozaki T., Hosaka N., Nishida O. Prediction of Localized Corrosion Damage of Some Machine Components by Means of Extreme Value Statistical Analysis, *Transactions ISIJ*. 1982; 22: 977-983
- [14] Gumbel E.J. Statistics of Extremes, Columbia University Press, New York, 1958.
- [15] Beretta S., Affidabilità delle costruzioni meccaniche, Springer-Verlag, Milano, Italia, 2009.

Procedura di valutazione dello stato d'integrità di membrature mediante analisi termica IR

R. Balistreri¹, E. Pichini Maini², A. Gabbia³

¹ Inail - Uot di Cagliari

² Inail - Dit

³ SARLUX SRL

Sommario

Nel presente lavoro gli autori illustrano l'utilizzo della termografia per la valutazione dello stato di conservazione delle attrezzature a pressione a seguito del degrado strutturale da esercizio.

La memoria ripercorre le fasi del processo che ha portato alla definizione di una procedura per la valutazione qualitativa dello stato di integrità di membrature a pressione: la prima fase ha riguardato una applicazione preliminare "in situ" dell'analisi termica su una tubazione scelta tra quelle più adatte, per caratteristiche, layout e condizioni di esercizio, in funzione presso la raffineria Sarlux di Sarroch. La seconda fase, sviluppata in laboratorio su 4 provini realizzati ad hoc e su un campione ricavato direttamente dalle attrezzature dell'impianto oggetto della indagine preliminare "in situ", al fine di calibrare il sistema di misura e di individuare la configurazione di maggiore sensibilità.

Nella terza fase si sta procedendo alla sperimentazione, sempre nella raffineria Sarlux di Sarroch - impianto a rischio di incidente rilevante - su attrezzature a pressione per le quali fosse disponibile uno storico dei controlli e la registrazione periodica dello stato di conservazione così da poter confrontare i risultati ottenuti mediante l'analisi termica IR con le misure strumentali correntemente effettuate.

Di tutte le due fasi si forniscono i risultati ottenuti, la strumentazione utilizzata, l'efficacia della tecnica e le criticità osservate.

La memoria evidenzia le condizioni necessarie affinché la tecnica IR sia industrializzabile e automatizzabile, nonché i suoi punti di forza: il monitoraggio qualitativo delle attrezzature effettuato in continuo mediante visione termografica permette di restringere l'esecuzione dei controlli strumentali per la misurazione quantitativa del danno alle sole zone messe precedentemente in evidenza dall'analisi IR ed eventualmente valutate oggetto di degrado o danneggiamento in atto. Si ottengono così positive ricadute sulla sicurezza degli operatori addetti ai controlli ND che possono 'mirare' i loro interventi limitandoli al 'se, quando e dove' valutati necessari; sulla predisposizione dei piani di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento (corrosione, erosione, cricche) di attrezzature e impianti; sulla loro ulteriore esercibilità riducendo significativamente il pericolo di perdita di contenimento di sostanze pericolose, evento estremamente critico negli impianti RIR.

1. Introduzione

La metodologia di indagine termografica è di uso corrente nell'industria petrolchimica per il controllo di attrezzature a pressione e macchinari sottoposti a importanti sollecitazioni termica e termo meccanica; il metodo viene normalmente impiegato nel monitoraggio delle temperature di pelle di componenti meccaniche e di attrezzature a pressione refrattariate internamente, allo scopo di valutare che le condizioni di esercizio rientrino nei limiti previste dalle specifiche di funzionamento del componente, sia in termini termici (integrità del refrattario) che meccanici (attriti, vibrazioni ecc.).

Nell'impianto CCR della raffineria Sarlux di Sarroch sono esercite alcune tubazioni a pressione che svolgono la funzione di trasferire un fluido erosivo, composto da catalizzatore granulare e idrogeno gassoso ad alta temperatura (fluido di convogliamento), soggette ad un rapido assottigliamento causato dall'azione erosiva del catalizzatore granulare che le attraversa. Queste attrezzature sono sottoposte ad un piano di monitoraggio che prevede controlli spessimetrici a ultrasuoni effettuati ad intervalli stabiliti. Le stesse, al raggiungimento dei limiti di spessore stabiliti dalla specifica di linea, sono periodicamente sostituite con nuove tubazioni.

L'analisi termografica delle superfici metalliche al fine di misurarne lo spessore è un metodo applicabile in particolari condizioni al contorno e con l'utilizzo di attrezzature molto sofisticate; per le particolari condizioni di esercizio delle tubazioni di convogliamento del catalizzatore e per la grande disponibilità di dati oggettivi sull'evoluzione dell'erosione, si è ritenuto proporre un controllo sperimentale, da affiancare ai metodi tradizionali normalmente impiegati, volto a misurare almeno in termini qualitativi l'evoluzione dell'assottigliamento delle pareti delle tubazioni attraversate dal catalizzatore mediante la misura della variazione della temperatura di superficie al progredire della riduzione di spessore della parete della tubazione attraversata dal fluido erosivo.

La scelta di sperimentare la tecnica di indagine termografica alle attrezzature in oggetto è stata suggerita dalla presenza di alcune condizioni al contorno favorevoli, tra le quali:

1. la presenza di rapidi transitori di temperatura, nell'ordine di $50\div 100^{\circ}\text{C}/\text{min.}$;
2. la presenza di gradienti di spessore nella sezione trasversale dovuti al lay-out della tubazione e al massimo potere erosivo lungo la generatrice esterna della tubazione;
3. le superfici esterne delle tubazioni che sono facilmente raggiungibili sia per eseguire i controlli con le tecniche diagnostiche che per trattare le superfici stesse con pitturazioni che consentano di sperimentare trattamenti superficiali speciali, investigare e discriminare i fattori che influiscono sull'ottenimento di immagini termografiche che siano rappresentative di uno stato fisico derivato dall'evoluzione geometrica del fenomeno in atto piuttosto che da fattori correlati alle condizioni climatiche e ambientali che interferiscono sulla risposta termografica superficiale dell'attrezzatura oggetto di indagine.

Il lavoro che qui si presenta ripercorre tutte le attività compiute fino a luglio 2021 con le relative considerazioni ma con l'obiettivo di raccontare lo stato delle attività che progrediranno durante l'autunno 2021 e l'inverno 2021/2022.

2. Scelta delle attrezzature e dei dispositivi di monitoraggio

Per la tipologia di indagine che si è inteso sperimentare, sono stati definiti i requisiti fisici e ambientali che limitano la scelta di superfici metalliche da sottoporre all'indagine con metodologia termografica; sono state individuate le seguenti proprietà della superficie metallica e/o della tubazione:

1. che fosse sottoposta esclusivamente a fenomeni di erosione/corrosione a cinetica rapida;
2. che fosse soggetta a consolidata analisi di durata che consente una precisa indagine predittiva circa l'evoluzione del processo di danneggiamento;
3. che fosse facilmente ispezionabile e trattabile superficialmente con vernici richieste dalla sperimentazione e monitorabile con le tecniche di indagine tradizionale, per il confronto oggettivo dei risultati;
4. che fosse sottoposta a regime termico tale da presentare variazioni repentine della temperatura.

È stata individuata una tubazione, la CCR-P225 componente dell'unità CCR, che collega il reattore CCR – R2 all'accumulatore CCR – D23. La sua funzione è quella di trasferire il catalizzatore dal recipiente di accumulo D23 al reattore R2. Il suo funzionamento è

intermittente e avviene all'incirca ogni 30 minuti. A seconda del carico dell'unità, la temperatura può variare tra 20°C e 150°C. Le sue caratteristiche termo-meccaniche sono correlate alla specifica di linea Saras n. PC320D, rev. 1 del dicembre 2005, che prevede, per temperature fino a 300 °C, la pressione massima di progetto di 37,3 bar, per diametri da ½" (DN15) fino a 12" (DN300), materiali acciaio al carbonio A105 (FLANGE), API5L/A106 gr. B (TUBI), A234WPB (CURVE, TEE ecc.).

Nello specifico la CCR-P225 ha diametro 2.1/2" (DN 65) e spessore nominale 7,01 mm; materiale acciaio al carbonio (carbon steel), tipo API 5L (ASTM A106 gr. B) e connessioni ad attacco rapido DUR-O-LOK in ASTM A105. La sua geometria viene schematizzata nelle figure 1, 2 e 3.

La tubazione CCR-P225 è stata scelta anche perché soggetta esclusivamente a fenomeni di erosione a cinetica rapida. In essa il catalizzatore in forma granulare viene trasportato fluidificato mediante idrogeno gassoso ad alta temperatura. Malgrado la geometria della linea sia stata progettata appositamente (i cambi di direzione sono realizzati con curve ad ampio raggio) per ridurre i fenomeni erosivi dovuti alla miscela trasportata, nel corso degli anni di esercizio si è riscontrato un costante e rapido assottigliamento nei tratti dell'estradosso tra le sezioni n-n e m-m, come indicato nelle figure 2 e 3.

Figura 1

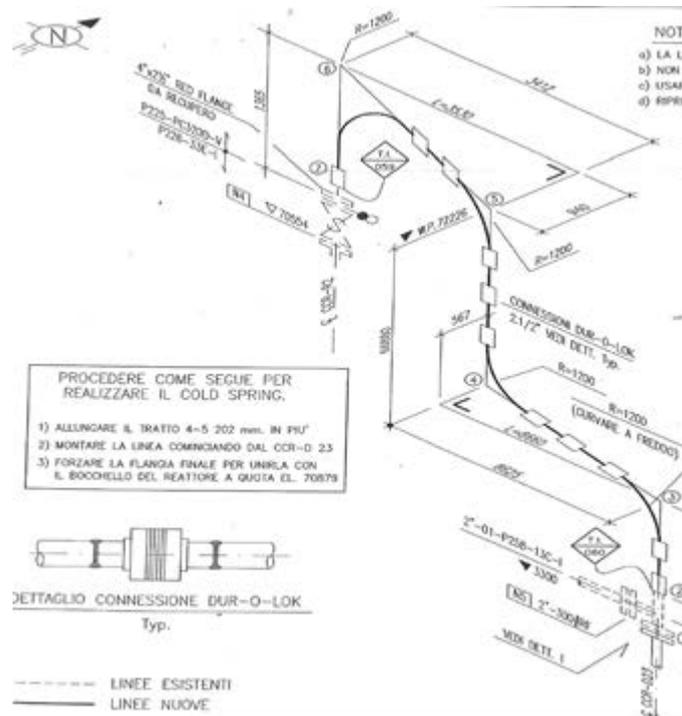


Figura 2

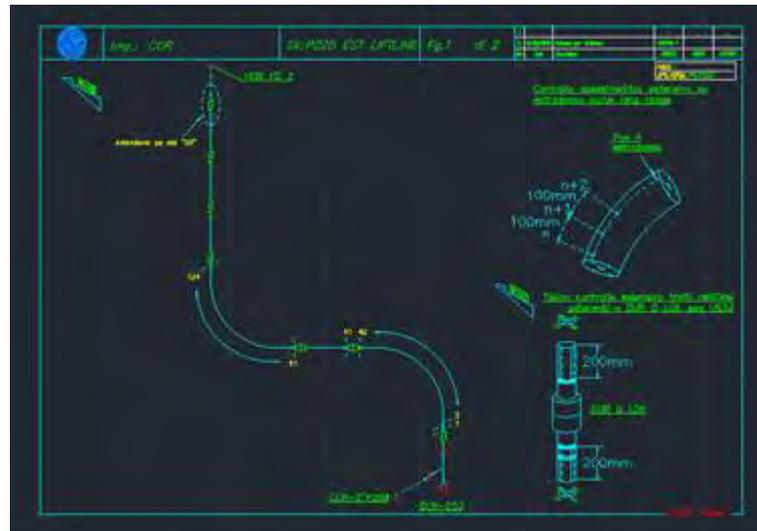
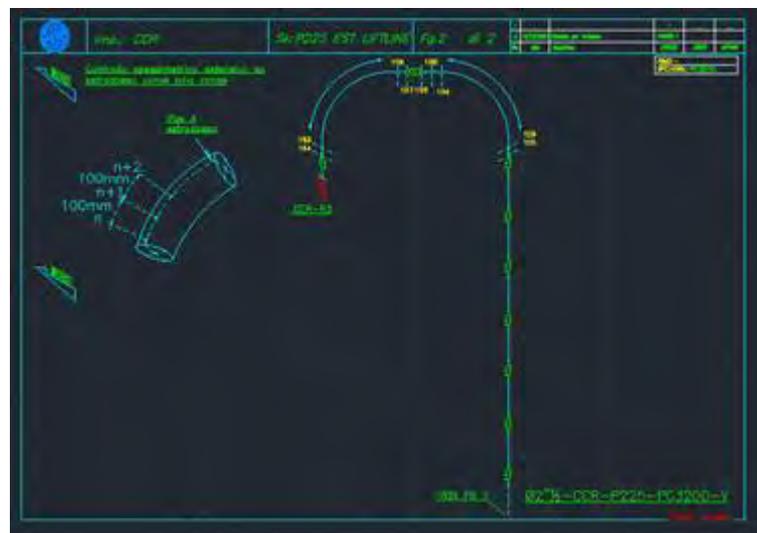


Figura 3



Le termocamere utilizzate per l'indagine sono:

1. Termocamera FLIR GF309 (vedi foto 1), utilizzata principalmente nella prima fase della campagna di monitoraggio;



Foto 1

2. Termocamera FLIR, modello FLIR T1030sc (vedi foto 2 e 3), abbinata a dispositivo HSDR/HSI (high-speed data acquisition/high speed interface, foto 4) e all'applicativo ResearchIR 4; questa termocamera è stata utilizzata nella sperimentazione sui provini in laboratorio e viene utilizzata nella terza campagna di monitoraggio.



Foto 2



Foto 3



Foto 4

3. Provini per l'analisi di laboratorio

Al fine di analizzare il comportamento di superfici metalliche soggette a transitori di temperatura in condizioni al contorno controllate, sono stati commissionati alla CMF Spa di Portoscuso quattro provini in acciaio al carbonio, lavorati al tornio al fine di presentare sulla superficie di intradosso delle riduzioni di spessore di varia dimensione e profondità che simulano i danneggiamenti tipici. Questi provini, denominati SA6, SA60, SA7 e SA8 sono schematizzati nelle figure 3 e 4 e nelle foto 5 e 6 e hanno spessore rispettivamente di 5 mm (provini di figura 3) e 10 mm (provini di figura 4).

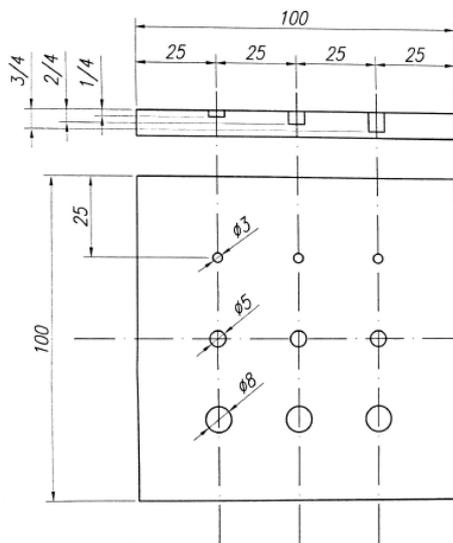


Figura 3

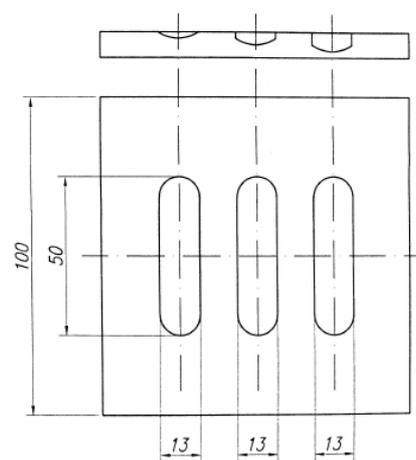


Figura 4

PROVINO N.SA8

Foto 5

PROVINO N.SA6



PROVINO N. SA60

PROVINO N.SA7

PROVINO N.SA8

Foto 6

PROVINO N.SA6



PROVINO N. SA60

PROVINO N.SA7

La superficie di intradosso è stata mantenuta “tal quale” con la calamina di laminazione o il naturale strato di ossido, a meno delle aree lavorate al tornio o al trapano dove la superficie risulta lucida. La superficie di estradosso, oggetto della ripresa termografica, è stata trattata nel seguente modo:

Il provino SA60 è stato rivestito con un semplice strato di carta adesiva a bassa impedenza termica e alta emissività;

Il provino SA6 è rivestito per 2/3 circa del naturale strato d'ossido e per un terzo è lucidato con disco abrasivo;

I provini SA7 e SA8 sono internamente ed esternamente mantenuti “tal quale” con la calamina opaca di laminazione.

Al fine di analizzare il comportamento della tubazione CCR-P225 in condizioni al contorno ideali, si sono commissionati alla ditta Mintor SRL di Assemmini dei provini ricavati da un tratto della tubazione esercita, sostituita nel corso di precedenti fermate ed estratti nella zona più soggetta al fenomeno erosivo. Sono stati realizzati due provini della lunghezza di 200 mm ciascuno, di spessore massimo di 7,5 mm (Spessore nominale 7,1 mm) e minimo intorno ai 2,5 mm. Questi provini sono ripresi nelle FOTO 7 e 8.



Foto 7



Foto 8

4. Campagne di controllo

La prima campagna venne effettuata sulla tubazione CCR-P225 tal quale si presentava a seguito del normale esercizio. I risultati della prima campagna hanno fornito un gran numero di informazioni che sono servite per implementare la seconda campagna e l'indagine sperimentale in laboratorio su provini pre-confezionati.

La seconda campagna è stata effettuata nel corso della primavera del 2021, in laboratorio e in totale assenza di interferenze ambientali. I risultati di questa indagine sono descritti nel successivo paragrafo 6.

La terza campagna, ancora in corso di svolgimento, ha lo scopo di verificare l'attendibilità dei risultati dell'indagine sperimentale in laboratorio applicando le medesime modalità di esame alla condizione "in situ" (la tubazione CCR-P225), a meno delle inevitabili interferenze ambientali.

4.1 Prima campagna di controlli

Nel corso del 2018 si procedette alla prima campagna di controllo e monitoraggio, utilizzando la termocamera FLIR, modello GF309, avente le seguenti caratteristiche [1]:

Specifiche tecniche	
Imaging e dati sulle ottiche	
Campo visivo (FOV) / Distanza minima di messa a fuoco	Obiettivo da 14,5°: 14,5° x 10,8° / 0,5 m Obiettivo da 24°: 24° x 18° / 0,3 m
numero f	1,5
Sensibilità termica/NETD	<25 mK @ +30 °C
Messa a fuoco	Automatica (singolo tocco) o manuale (elettrico o sull'obiettivo)
Zoom	Zoom digitale continuo 1-8x
Miglioramento digitale dell'immagine	Filtro riduzione rumore
Focal Plane Array (FPA) / Intervallo spettrale	InSb raffreddato / 3,8-4,05 µm

Presentazione dell'immagine	
Display	Ampio display integrato da 4,3 pollici LCD, 800 × 480 pixel
Mirino	OLED orientabile, integrato, 800 × 480 pixel
Regolazione automatica dell'immagine	Continua/manuale; standard o basata su istogramma
Regolazione manuale dell'immagine	Livello/span
Modalità immagine	Immagine IR, immagine visiva
Misurazione	
Intervallo di misura della temperatura	da -40 a +1500 °C
Accuratezza	±1 °C nell'intervallo di temperatura (0-100 °C)

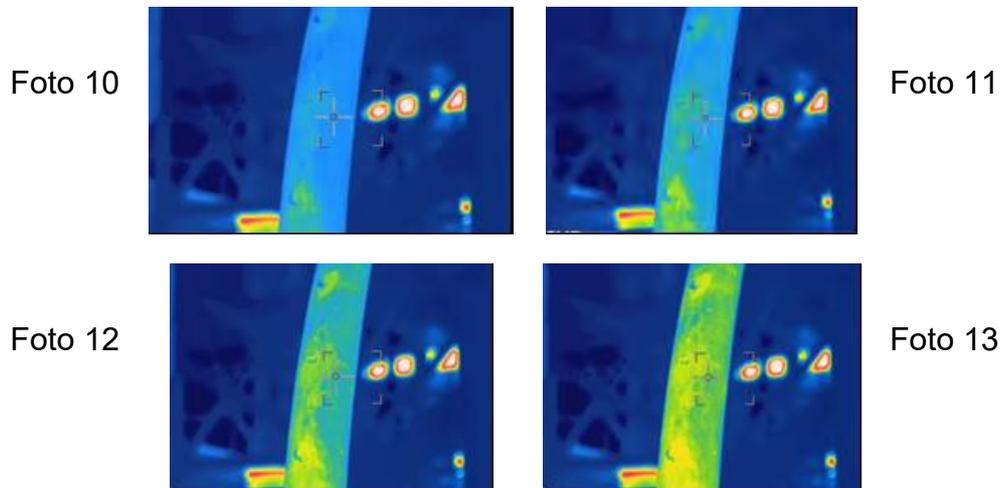
Durante la prima campagna di controlli hanno evidenziato le seguenti indicazioni: la tubazione P225 si presenta come indicato nella fotografia 1; nel contempo è stata eseguita la scansione termografica della stessa superficie, con il risultato che viene esposto nelle fotografie n. 9 e dalla 10 alla 13, estratte dal filmato eseguito il 17/06/2018 alle ore 16:30 utilizzando la termocamera FLIR, modello GF309, durante il trasferimento del catalizzatore che è avvenuto a partire dalla temperatura di 25°C per salire alla temperatura di 140°C con un gradiente di 100÷120°C/min. circa.

La prima campagna di controlli ha consentito la valutazione qualitativa del fenomeno; ha permesso di constatare che nell'uso industriale ci sono delle condizioni al contorno che risultano imprescindibili nell'applicazione del metodo termografico. Queste sono:

1. la necessità che la superficie esposta all'indagine termografica presenti una pitturazione uniforme, priva di macchie o sostanze disomogenee nei confronti dell'emissività rispetto al resto della superficie. Nell'applicazione eseguita ed indagata, la presenza delle piazzole utilizzate per la misura spessimetrica a UT, dove risultava evidente la pulizia dallo strato di pittura e l'apposizione del grasso accoppiante (vedi foto 9), abbia influito in modo sostanziale sul risultato dell'indagine.
2. La variazione repentina e uniforme della temperatura lungo la superficie indagata risulta una condizione al contorno imprescindibile per poter valutare almeno qualitativamente l'assottigliamento della parete metallica.
3. L'assenza di incrostazioni nell'intradosso del materiale indagato è anch'essa una condizione che potrebbe influire nella errata interpretazione dei risultati dell'indagine termografica.

Foto 9





La prima campagna di controllo ha dunque evidenziato alcune condizioni imprescindibili per la corretta interpretazione dei filmati e la necessità di utilizzare strumenti di indagine più performanti, sia dal punto di vista termografico che da quello della acquisizione dell'immagine. La scelta di utilizzare strumenti ad alta frequenza di immagini al secondo (almeno trenta immagini al secondo) e macchine termografiche a più alta risoluzione è sembrata essere in linea con l'obiettivo prefissato. Vista la particolare delicatezza di tali strumenti si è pertanto orientata la seconda fase di controllo verso due fasi successive: una prima fase condotta in laboratorio su provini realizzati ad hoc e una seconda fase da condurre in impianto per verificare l'influenza delle condizioni al contorno (radiazioni termiche climatiche, radiazioni termiche provenienti dall'impianto, vento ecc.) nell'analisi spessimetrica mediante termografia.

4.2 Seconda Campagna di Controlli

A seguito delle risultanze della prima campagna si sono impostate le condizioni al contorno per condurre la seconda campagna di controlli. Utilizzando la Termocamera FLIR, modello FLIR T1030sc e il dispositivo HSDR/HSI (high-speed data acquisition/high speed interface) e all'applicativo ResearchIR 4, sono state simulate in laboratorio le condizioni al contorno ritenute ideali almeno per l'indagine qualitativa.

La Termocamera FLIR, modello FLIR T1030sc le seguenti caratteristiche [2]:

Imaging e dati ottici		Identificazione obiettivo	Automatico
Risoluzione IR	1024 x 768 pixel	Numero di diaframma	1,1
Risoluzione MSX	1024 x 768 pixel	Frequenza immagini	30 Hz
UltraMax	Sì	Messa a fuoco	Istantanea o manuale
Sensibilità termica/NETD	< 20 mK @ +30 °C	Zoom digitale	1-8x continuo
Campo visivo (FOV)	45° x 34°	Ottimizzazione immagini digitali	Riduzione adattativa digitale del rumore
Distanza minima di messa a fuoco IR	0,2 m	Dati del rilevatore	
Distanza minima di allineamento visivo IR	0,5 m	Tipo di rilevatore	FPA (Focal Plane Array), microbolometro non raffreddato
Lunghezza focale	21,2 mm	Intervallo spettrale	7,5 - 14 µm
Risoluzione spaziale (IFOV)	0,80 mrad	Pitch del rilevatore	17 µm
Identificazione obiettivo	Automatico	Costante di tempo	< 10 ms

Sono stati commissionati alla CMF Spa di Portoscuso quattro provini in acciaio al carbonio (vedi par. 3), lavorati al tornio al fine di presentare sulla superficie di intradosso delle riduzioni di spessore di varia dimensione e profondità che simulano i danneggiamenti tipici. I quattro provini sono stati opportunamente rivestiti con carta adesiva che aumenta e uniformizza l'opacità della superficie metallica (vedi foto 7). Sono stati quindi montati su tre diversi supporti - realizzati mediante l'utilizzo di un pannello in XPS ad alta densità STYRODUR 3035 CS liscio, avente spessore 40 mm, conducibilità termica $\lambda_d = 0,032$ W/(m \cdot °K) e resistenza termica $R_d = 1,25$ (m 2 \cdot °K)/W – e mediante un flusso di aria calda a

65°C forzata a lambire esclusivamente le superfici di intradosso dei provini si è simulato un repentino aumento di temperatura in tali zone. Nelle immagini che seguono sono esemplificati i risultati dell'indagine sperimentale.

4.2.1 Risultanze della Seconda Campagna di Controlli

Nel proseguo della memoria vengono mostrate le immagini estratte dai filmati di 10 sec. prodotti in laboratorio con l'ausilio della termocamera FLIR 1030sc (applicazione ResearchIR, algoritmi di fabbrica PE SCALE o APE SCALE) investendo con flussi di aria calda le superfici di intradosso dei provini, sigillati entro canali d'aria ermetici e isolati termicamente. Seguono dunque i risultati delle diverse sperimentazioni.

4.2.1.1 - Provino SA6, fori allineati, spessore 5 mm, flusso aria calda tangente.

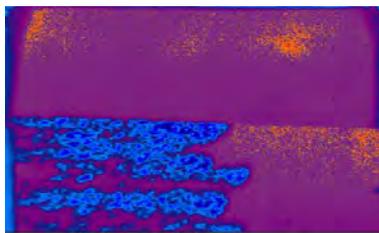


Foto 14

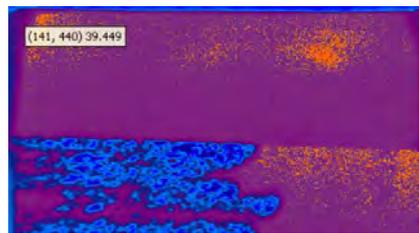


Foto 15

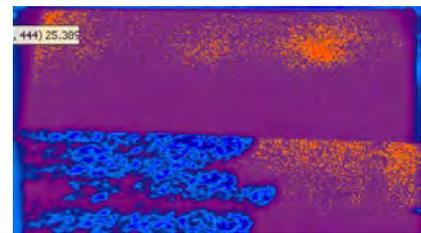


Foto 16



Foto 17



Foto 18

Provino n.SA6 (sp. 5 mm)

Le immagini FOTO 14, 15, 16 sono estratte applicando una segmentazione nell'intorno di 42°C con forcilla di 0.5÷0.8°C. Le foto 17 e 18 mostrano l'intradosso e l'estradosso del provino spesso 5 mm (la foto 18 è specchiata a 180° per avere la piena sovrapposizione).

Si noti come la presenza dei fori, per quanto di profondità diverse, viene rilevata (solo nella parte superiore del provino) e sia sufficientemente indicativa di discontinuità nello spessore del provino. Pur non rilevandosi chiare indicazioni quantitative, sono evidenti gli aspetti qualitativi dello stato del provino. È inoltre evidente l'effetto prodotto dalla carta adesiva che uniformizza ed eleva il grado di emissività della superficie rivestita.

4.2.1.2 - Provino SA7, asole allineate, spessore 10 mm, flusso aria calda tangente.

Le immagini foto 19, 20, 21 sono estratte applicando segmentazione nell'intorno di 41°C con forcilla di 0.4÷0.6°C. Le foto 22 e 23 mostrano l'intradosso e l'estradosso del provino spesso 10 mm (la foto 23 è specchiata a 180° per avere la piena sovrapposizione).

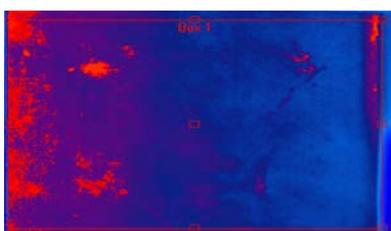


Foto 19

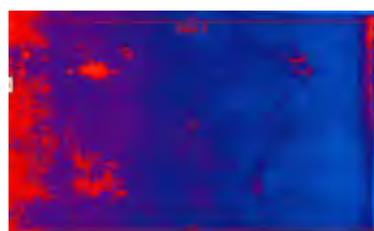


Foto 20

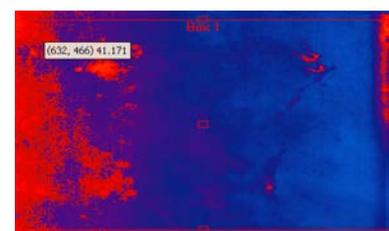


Foto 21

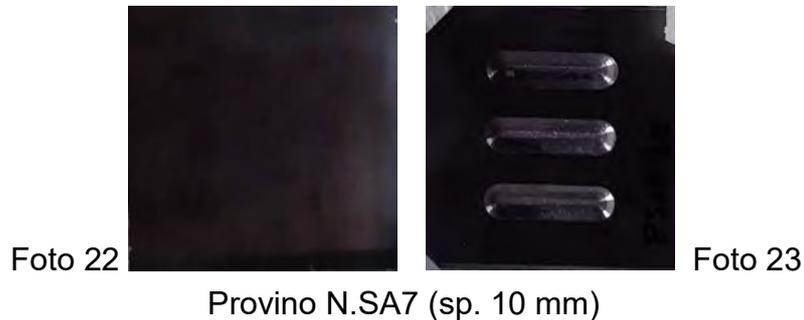


Foto 22

Foto 23

Provino N.SA7 (sp. 10 mm)

Si noti come la presenza dei tre solchi, per quanto di profondità diverse, venga solo parzialmente rilevata (peraltro parrebbero verticali anziché orizzontali come in realtà sono). La presenza di una discontinuità nello spessore del provino è solo ipotizzabile ma non evidenziata; qualitativamente, lo stato del provino non è perfettamente apprezzabile. In questo caso ricordiamo come lo spessore sia doppio rispetto a quello del provino SA6 e la superficie di estradosso sia perfettamente uniforme e sufficientemente opaca (alta emissività). Qui il risultato è condizionato dal flusso d'aria scaldante, tangente alla superficie e di conseguenza non in grado di generare un ΔT sufficientemente rapido per vincere la velocità di propagazione del calore nella massa del provino.

4.2.1.3 - Provino SA60, fori allineati, spessore 5mm, flusso aria calda tangente.

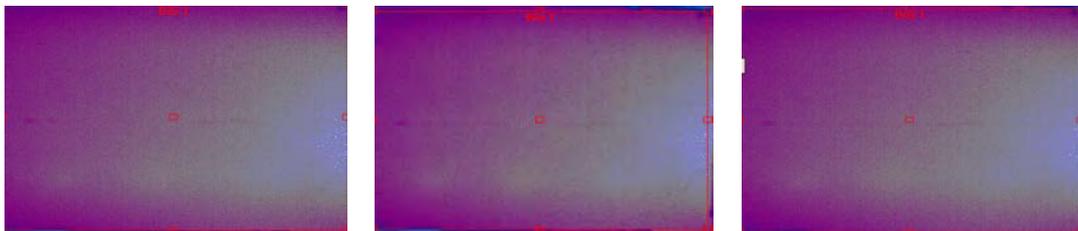


Foto 24

Foto 25

Foto 26



Foto 27

Foto 28

Provino N.SA60 (sp. 5 mm)

Le immagini foto 24, 25, 26 sono estratte applicando una segmentazione nell'intorno di $30,55^{\circ}\text{C}$ con forcella di $0,05^{\circ}\text{C}$. Le foto 27 e 28 mostrano l'intradosso e l'estradosso del provino spesso 5 mm (la foto 27 è specchiata a 180° per riprodurre la piena sovrapposizione).

Risulta visivamente come la presenza delle tre file di fori, per quanto di profondità diverse, appena accennata. La presenza di una discontinuità nello spessore del provino è solo ipotizzabile ma non evidenziata; qualitativamente, lo stato del provino è appena apprezzabile. La superficie di estradosso è perfettamente uniforme e sufficientemente opaca (alta emissività).

4.2.1.4 - Provino SA8, asole allineate, spessore 10 mm, flusso aria calda perpendicolare

Le immagini FOTO 24, 25, 26 sono estratte applicando una segmentazione nell'intorno di $29,9^{\circ}\text{C}$ con forcella di $0,2^{\circ}\text{C}$. Le foto 27 e 28 mostrano l'intradosso e l'estradosso del provino spesso 10 mm (la foto 28 è specchiata a 180° per avere la piena sovrapposizione).

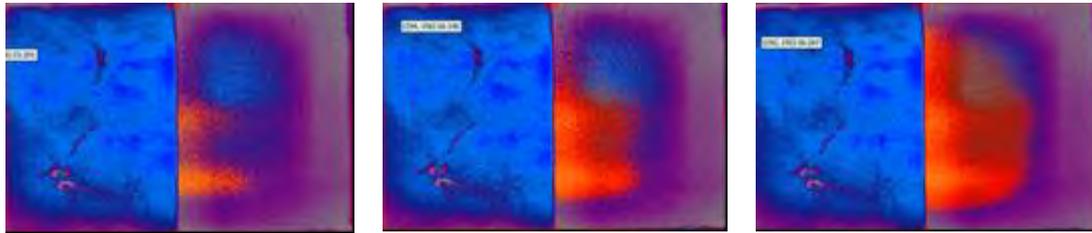


Foto 24

Foto 25

Foto 26

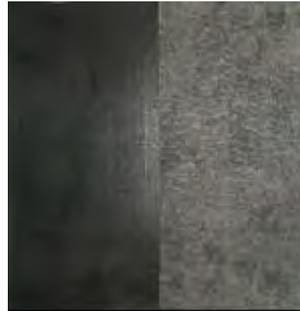


Foto 27



Foto 28

Provino N.SA8 (sp. 10 mm)

Si noti come la presenza dei tre solchi, di profondità crescenti dal basso verso l'alto, venga ben rilevata per quelli di profondità pari a $\frac{3}{4}$ e $\frac{1}{2}$ lo spessore mentre è appena accennata per quello di profondità pari a $\frac{1}{4}$ dello spessore. La presenza di una discontinuità nello spessore del provino è ben evidente sia qualitativamente che quantitativamente. Peraltro lo stato del provino è apprezzabile nella zona rivestita con la carta adesiva mentre non sono indicative le informazioni che si possono leggere nell'area "tal quale". Ricordiamo come lo spessore del provino sia doppio rispetto a quello dei provini SA6 e SA60. Il buon risultato ottenuto dall'esame termografico è influenzato dal flusso d'aria scaldante che in questo esperimento è stato diretto perpendicolarmente alla superficie e non tangente come nelle prove precedenti: il ΔT che si genera sulla superficie di estradosso evidenzia le differenze di temperatura dovute al minor tempo di propagazione del calore nella direzione perpendicolare alla superficie, in funzione allo spessore attraversato dal flusso.

Al fine di analizzare il comportamento della tubazione CCR-P225 in condizioni al contorno ideali, si è commissionato alla ditta Mintor SRL di Assemmini dei provini ricavati da un tratto della tubazione esercita, sostituita nel corso di precedenti fermate, estratti nella zona più soggetta al fenomeno erosivo. I due provini della lunghezza di 200 mm ciascuno (vedi par. 3.4), sono stati collocati su idoneo supporto e collegati l'uno all'altro in opposizione, unendo cioè l'estremità di uno all'estremità dell'altro in modo che la zona che presenta la massima riduzione di spessore risulti attigua a quella che del secondo provino ha lo spessore più elevato (si vedano le foto 20, 21, 22, 23, 24 e 25). Il tubo così confezionato è stato fatto attraversare internamente da una corrente d'aria calda a 65 °C e sottoposto all'esame termografico in assenza di perturbazioni. Nelle immagini che seguono sono esemplificati i risultati dell'indagine sperimentale.

4.2.1.5 - Provino T, riduzione uniforme di spessore, spessori 7,3/2,3mm, flusso aria calda tangente.

Le immagini sopra (FOTO 14, 15, 16) sono estratte applicando una segmentazione nell'intorno di 42°C con forcella di 0.5÷0.8°C. Le foto 32 e 33 mostrano l'estradosso del provino T e gli spessori rilevati con spessimetro a ultrasuoni Arroweld, mod. ARW-N, cod. MT160.

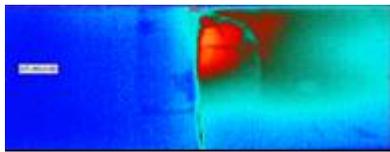


Foto 29

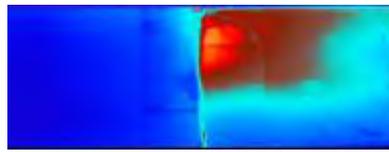


Foto 30

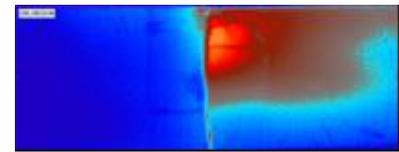


Foto 31



Foto 32

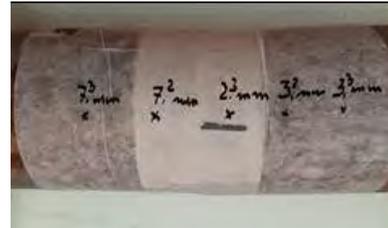


Foto 33

Provino N.T (sp. 7,3 mm/2,3 mm)

Si noti come la presenza della zona sottospessore venga rilevata e l'immagine IR risulti sufficientemente indicativa di discontinuità nello spessore del provino: pur non potendosi trarre chiare indicazioni quantitative, sono evidenti gli aspetti qualitativi del suo stato. Risulta inoltre evidente l'effetto prodotto dalla carta adesiva che uniformizza ed eleva il grado di emissività della superficie rivestita.

4.3 Conclusioni della Seconda Campagna di Controlli

La seconda campagna di controlli ha consentito valutazione qualitativa e in alcuni casi anche quantitativa del fenomeno; ha permesso di constatare che in laboratorio, in condizioni di assenza di perturbazioni ambientali esterne, il metodo consente di apprezzare qualitativamente e, con l'ausilio di ulteriori strumenti analitici, anche quantitativamente le dimensioni e l'estensione delle discontinuità presenti nei provini testati

Si ribadiscono peraltro le condizioni al contorno che sono risultate imprescindibili nell'applicazione del metodo termografico durante la prima campagna in impianto e cioè:

1. la necessità che la superficie esposta all'indagine termografica presenti una pitturazione uniforme, priva di macchie o sostanze disomogenee nei confronti dell'emissività rispetto al resto della superficie. Nelle applicazioni indagate solo la presenza della carta gommata adesiva sulla superficie di estradosso ha influito in modo sostanziale sul risultato dell'indagine.
2. La variazione repentina e uniforme della temperatura lungo la superficie indagata risulta una condizione al contorno imprescindibile per poter valutare almeno qualitativamente e quantitativamente l'assottigliamento della parete metallica.
3. La propagazione del calore attraverso la superficie della membratura (tubazione o piastra piana) deve avvenire nel modo più uniforme e diretto possibile rispetto alla direzione del fluido scaldante o refrigerante.

La seconda campagna di controllo ha evidenziato come in condizioni di laboratorio l'esame termografico eseguito con strumenti ad alta frequenza di immagini al secondo (almeno trenta immagini al secondo) e alta risoluzione centra l'obiettivo prefissato a determinate condizioni. La particolare delicatezza di tali strumenti e le condizioni al contorno necessarie a monitorare con la massima efficacia l'evoluzione degli spessori della linea CCR-P225 orienta la terza fase di controllo da condurre in impianto per verificare l'influenza delle condizioni esterne (radiazioni termiche climatiche, radiazioni termiche provenienti dall'impianto, vento ecc.) nell'analisi spessimetrica mediante termografia.

4.4 Terza Campagna di Controlli

La terza campagna di controllo è attualmente in corso e prevede alcune sequenze di monitoraggio che si eseguiranno nell'autunno/inverno 2021 con l'utilizzo simultaneo delle

due termocamere a disposizione del gruppo di ricerca (la FLIR GF309 e la FLIR T1030sc) posizionate sui supporti già testati durante la prima campagna e in modo da ottenere immagini e filmati sovrapponibili.

La tubazione CCR-P225 nella fermata attualmente in corso verrà rivestita con uno strato uniforme di vernice nero-opaca ad alta resistenza termica (smalto spray per alta temperatura per superfici metalliche sottoposte ad alte temperature fino a 600° C in continuo e con punte fino a 800° C), da applicarsi sopra il normale strato di primer protettivo antiruggine, al fine di massimizzare l'emissività della superficie monitorata e minimizzare la riflettività e l'influenza delle perturbazioni termiche esterne sull'immagine termografica registrata.

Questa terza fase consentirà di valutare l'applicazione industriale del metodo, individuando le limitazioni e le condizioni al contorno che risulteranno imprescindibili per garantire l'affidabilità della tecnica diagnostica. Qualora la tecnica si dimostrasse industrialmente applicabile, seppur con limitazioni e specifiche condizioni al contorno, si potranno elaborare procedure di monitoraggio robuste e affidabili.

5. Conclusioni

La memoria evidenzia le condizioni necessarie affinché la tecnica IR fornisca delle indicazioni di tipo qualitativo e quantitativo nell'indagine spessimetrica per valutare il degrado delle attrezzature a pressione e sottolinea quali siano i limiti della sua industrializzazione ed eventuale automatizzazione.

Certamente sono individuati punti di forza, quali il monitoraggio qualitativo delle attrezzature effettuato in continuo mediante visione termografica che permette di restringere l'esecuzione dei controlli strumentali per la misurazione quantitativa del danno alle sole zone messe precedentemente in evidenza dall'analisi IR ed eventualmente valutate oggetto di degrado o danneggiamento in atto. In alcuni casi si sono riscontrate delle indicazioni che opportunamente elaborate potranno in futuro fornire indicazioni quantitative del danneggiamento il corso (questa è una delle evoluzioni future della ricerca).

L'utilizzo della tecnica potrà avere ricadute positive:

1. sulla sicurezza degli operatori addetti ai controlli ND che potranno "mirare" i loro interventi limitandoli al "se, quando e dove" valutati necessari.
2. sulla predisposizione dei piani di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento (corrosione, erosione, cricche) di attrezzature e impianti;
3. sulla loro ulteriore esercibilità riducendo significativamente il pericolo di perdita di contenimento di sostanze pericolose, evento estremamente critico negli impianti RIR.

Le future evoluzioni della ricerca si concentreranno sulla analisi e studio di applicativi che partendo dalle matrici di dati generate dalla macchina termografica sviluppino dei criteri di misura quantitativa del grado di danneggiamento e lo studio di appositi filtri digitali appositamente finalizzati alla messa in evidenza della riduzione dello spessore, e possibilmente scevri dalle discontinuità superficiali.

6. Bibliografia

[1] - Manuale FLIR, modello GF309

[2] - Manuale FLIR, modello FLIR T1030sc

Ringraziamenti

Si ringraziano le ditte CMF Spa di Portoscuso (SU) e Mintor Srl di Macchiareddu (CA) per l'alta professionalità e la grande disponibilità dimostrate nella realizzazione e il confezionamento dei provini utilizzati durante la campagna di verifiche in laboratorio.

Big-data e gestione dell'interoperabilità in applicazioni IOT di monitoraggio strutturale

L. Gigli¹, C. Aguzzi^{1,2}, L. Sciuillo¹, L. Montecchiari¹, A. Trotta¹, F. Montori^{1,2}, I. D. Zyrianoff¹, T. Salmon Cinotti^{1,2}, L. Bononi¹, M. Di Felice^{1,2}

¹ Dipartimento di Informatica - Scienza e Ingegneria, Università di Bologna

² Centro di Ricerca sui Sistemi Elettronici per l'Ingegneria dell'Informazione e delle Telecomunicazioni "Erocole De Castro", Università di Bologna

Sommario

La realizzazione di sistemi avanzati di manutenzione predittiva in scenari di monitoraggio strutturale richiede un approccio interdisciplinare e l'integrazione di competenze da svariati ambiti dell'ingegneria e dell'informatica. In riferimento a quest'ultima, un ruolo cruciale è svolto dalle tecnologie per la raccolta, lo storage ed il processamento dei dati provenienti dai sistemi di monitoraggio. Infatti, da un lato esiste la necessità di gestire, in modo efficiente e scalabile, i volumi di data potenzialmente significativi (big-data) provenienti dallo scenario. Dall'altra, è necessario tenere in considerazione il requisito dell'interoperabilità in presenza di sistemi di monitoraggio eterogenei in termini di dispositivi (es. tipologie di sensori differenti) e/o di piattaforme software. In questo articolo, viene descritta l'esperienza maturata dal gruppo di ricerca dell'Università di Bologna all'interno del progetto INAIL BRIC 2018 MAC4PRO, sul tema dello sviluppo di soluzioni software a supporto di scenari di monitoraggio strutturale di opere civili ed impianti industriali, quali ad esempio attrezzature a pressione. In particolare, viene presentata la piattaforma **MODRON**, attraverso la quale è possibile effettuare monitoraggio/configurazione remota dei sensori e la raccolta/processamento di time-series. La piattaforma gestisce l'interoperabilità di sensori eterogenei (es. accelerometri, piezo-elettrici) mediante approcci basati sul recente standard W3C Web of Things (WoT). Inoltre, garantisce supporto ad i big-data prodotti dai sensori mediante algoritmi di processamento, time-series database distribuiti e dashboard di visualizzazione. Infine, viene descritta la validazione della piattaforma in setup sperimentali di monitoraggio strutturale, relativi a strutture metalliche poste all'interno dei laboratori di ricerca del dottorato EIT4SEMM (Engineering and Information Technology for Structural and Environmental Monitoring and Risk Management) dell'Università di Bologna.

1. Introduzione

L'Internet of Things (IoT) rappresenta un paradigma emergente e pervasivo, caratterizzato da una forte espansione sia in termini di dispositivi connessi sia di investimenti aziendali [1]; secondo stime recenti di Gartner [2], la pandemia del Covid-19 potrebbe addirittura aver accelerato tale crescita nel 2020. Una delle ragioni principali di tale successo è data dall'integrazione di tecnologie appartenenti a domini differenti (sensoristica, reti, big-data, algoritmi), attraverso le quali è possibile costruire vere e proprie pipeline di dati che possono abilitare sistemi altamente automatizzati di monitoraggio. A tal proposito, molti sistemi di monitoraggio IoT sono disponibili in mercati verticali quali l'industria 4.0 o l'agricoltura di precisione [1]. Il monitoraggio strutturale o structural health monitoring (SHM) rappresenta uno dei settori emergenti in cui la realizzazione di pipeline di dati IoT può supportare applicazioni avanzate di manutenzione predittiva di opere civili [3]. Al tempo stesso, lo sviluppo su larga scala di sistemi SHM pone nuove problematiche e sfide di ricerca in tutte le fasi di realizzazione

della pipeline, dall'acquisizione dati fino alla loro effettiva valorizzazione [4]. Da un lato, è opportuno ricordare che il monitoraggio di infrastrutture di grandi dimensioni (es. ponti) o diffuse (es. insiemi di edifici) può richiedere l'installazione di grandi quantità di sensori, che a sua volta potrebbero generare ingenti volumi di dati soprattutto in presenza di segnali di tipo accelerometrico; sono quindi necessarie soluzioni altamente scalabili per la gestione, memorizzazione e processamento dei big-data prodotti dallo scenario. A tal proposito, molte soluzioni proposte utilizzano approcci di edge computing per limitare la quantità di dati inviata verso il cloud, spostando parte del pre-processamento in prossimità della struttura [5][6]. Dall'altro, esiste il problema della portabilità, ossia la possibilità di replicare sistemi SHM esistenti su nuove strutture riducendo la necessità di costosi adattamenti delle piattaforme hw/sw. Infine, occorre menzionare l'impatto della frammentazione IoT alimentata dalla disponibilità sul mercato di un numero enorme di dispositivi di sensing con caratteristiche differenti (es. con differenti interfacce di programmazione o protocolli di acquisizione). La maggior parte delle soluzioni IoT-SHM in letteratura non considera l'interoperabilità, che al contrario rappresenta uno dei requisiti principali di un ecosistema IoT. Inoltre, le soluzioni di data-management sono spesso sviluppate ad-hoc per lo scenario di interesse ma risultano difficilmente esportabili a causa del supporto esclusivo per componenti di sensing e/o di protocolli di rete (es. mqtt [7][8]). In quest'ottica, si registra un interesse crescente verso l'utilizzo di tecniche semantiche per l'integrazione di sorgenti dati SHM eterogenee [9].

L'articolo di ricerca descrive una nuova piattaforma software, denominata **MODRON**, per la gestione di big-data eterogenei in scenari SHM. La piattaforma è stata sviluppata all'interno del progetto INAIL BRIC 2018 MAC4PRO. A differenza di quanto noto dalla letteratura esistente, la piattaforma è progettata in modo da astrarre dalle tecnologie di sensing in uso e quindi da aumentarne la portabilità e la riusabilità. Il supporto all'eterogeneità dei sensori è garantito dall'utilizzo dello standard Web of Things (WoT) [10], recentemente promosso dal consorzio W3C. Lo standard mira ad ottenere l'interoperabilità tra piattaforme/dispositivi IoT eterogenee, consentendo di associare ad ogni entità fisica o virtuale dell'IoT un'interfaccia Web Thing (WT). Quest'ultima include una collezione di meta-dati, detta Thing Descriptor (TD), attraverso il quale è possibile descrivere in maniera uniforme e ben definita l'interfaccia di ogni componente IoT. La piattaforma **MODRON** supporta nativamente l'acquisizione dati da sensori eterogenei (es. accelerometri, piezo), associando ad ogni sorgente dati una componente WT. Inoltre, la piattaforma si basa su un'architettura edge-cloud e su tecnologie consolidate sui dati (InfluxDB, Grafana) per la storage distribuito e la visualizzazione delle misurazioni raccolte. Nell'articolo vengono descritte l'architettura della piattaforma e le sue principali componenti. Quest'ultime sono state validate su due setup sperimentali di monitoraggio strutturale realizzati all'interno del progetto MAC4PRO.

La Sezione 2 descrive lo stato dell'arte dei sistemi IoT-SHM, focalizzandosi su piattaforme di gestione dati e sulla sfida dell'interoperabilità. La Sezione 3 introduce i requisiti funzionali alla base della piattaforma **MODRON**. L'architettura di quest'ultima è descritta nella Sezione 4. La componente edge è presentata nella Sezione 5, quella cloud in Sezione 6. I due setup sperimentali sono presentati in Sezione 7. Alcuni sviluppi futuri sono menzionati nella Sezione 8.

2. Stato dell'arte

Molti articoli di ricerca recenti sottolineano i vantaggi dell'utilizzo di tecnologie IoT per la realizzazione di sistemi SHM [3][5], sia per quanto riguarda la possibilità di utilizzare reti di sensori wireless, sia per l'implementazione di processi di analisi predittiva mediante algoritmi di machine learning [4]. Al tempo stesso, la maggior parte della letteratura sui

sistemi IoT-SHM si concentra sulla sensoristica o sull'analisi dei dati [4], mentre si utilizzano soluzioni non specializzate per la gestione dei dati dello scenario. In [6], viene proposta un'architettura software generica per scenari SHM basata su quattro livelli. Molte soluzioni, tra cui [7][8] utilizzano il protocollo mqtt per l'acquisizione dati e database relazionali per lo storage delle misurazioni. In generale, il tema dell'interoperabilità in scenari SHM è poco investigato sebbene molti studi riconoscano la complessità di integrare sorgenti eterogenee all'interno di un Building Information System (BIM). A tal proposito, registriamo un interesse crescente verso ontologie in grado di descrivere semanticamente le informazioni di una struttura e quelle del sistema di monitoraggio [9]. La piattaforma **MODRON** affronta il problema dell'interoperabilità mediante l'utilizzo dello standard W3C Web of Things (WoT), le cui caratteristiche sono brevemente richiamate nella Sezione seguente.

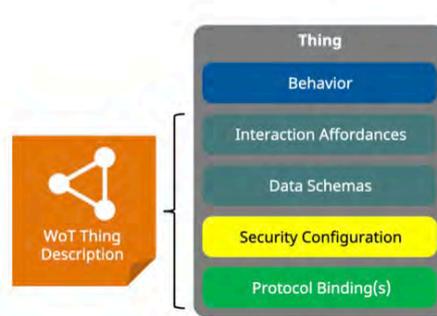


Figura 1. Architettura di una Web Thing (WT) secondo lo standard W3C [10].

2.1 Lo standard W3C Web of Things

Il W3C WoT è uno standard promosso dal consorzio W3C al fine di abilitare l'interoperabilità tra sistemi e piattaforme IoT eterogenee [10]. La componente principale dello standard è costituita dalla Web Thing (WT) definita come un'entità fisica o virtuale, le cui interfacce di interazione con l'esterno sono formalmente definite. Infatti, il W3C WoT non si focalizza sull'implementazione delle componenti IoT, piuttosto sulla descrizione delle sue capabilities, in modo che altre componenti software siano in grado di interagire con essa in maniera autonoma. In particolare, ogni WT valida dispone delle componenti mostrate in Figura 1:

- *Protocol Bindings*: definiscono la mappatura tra le Affordance ed i protocolli di rete (es. http, coap, mqtt) supportati dalla WT.
- *Security Configurations*: definiscono i meccanismi di controllo degli accessi alla WT.
- *Data Schemas*: definiscono la struttura dei dati in input/output.
- *Affordances*: definiscono le capabilities della WT attraverso il modello Proprietà-Evento-Azione (PAE). Utilizzando tale modello, un nodo sensore di temperatura potrebbe essere modellato nel modo seguente: (i) la proprietà tempAttuale restituisce il valore attuale della temperatura; (ii) le azioni cambiaScala, accendi e spegni consentono di modificare l'unità di misura e di attivare/disattivare il monitoraggio; (iii) l'evento valoreEstremo produce notiche asincrone ogni volta che i valori di temperatura sono al di fuori di range predefiniti.
- *Behaviour*: definisce l'implementazione del comportamento della WT. Nell'esempio precedente, il behaviour include anche l'implementazione delle azioni cambiaScala, accendi e spegni.

Le prime quattro componenti della WT formano la Thing Description (TD), una collezione di meta-dati codificati nel linguaggio JSON-LD. La codifica può includere annotazioni semantiche, quindi le ontologie proposte per il SHM potrebbero essere naturalmente integrate nel WoT. La piattaforma **MODRON** utilizza una WT per ogni sensore delle infrastrutture di monitoraggio, come dettagliato nelle Sezioni seguenti.

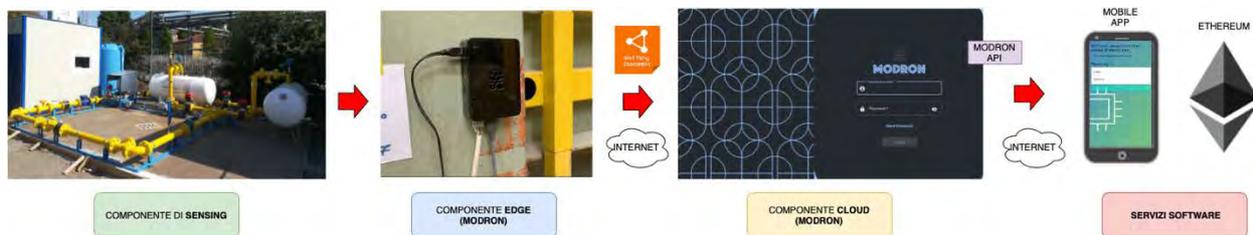


Figura 2. Architettura del sistema SHM.

3. Requisiti di progetto

L'analisi dello stato dell'arte evidenzia un interesse crescente verso sistemi SHM basati su approcci IoT. Al tempo stesso, molte delle soluzioni proposte sembrano specifiche di un caso d'uso ma difficilmente portabili su altri scenari. L'obiettivo dello studio corrente è quello di progettare e sviluppare in via prototipale piattaforme dati per scenari SHM, in grado di astrarre dalle tecnologie di sensing e dalle caratteristiche della struttura monitorata. In particolare, l'obiettivo è quello di supportare i seguenti requisiti funzionali (RF):

- **RF1: Interoperabilità:** la piattaforma deve essere in grado di supportare sorgenti dati/sensori eterogenei basati su formati dati e/o protocolli di comunicazione differenti, minimizzando i costi di sviluppo e di manutenzione del software.
- **RF2: Riconfigurabilità:** la piattaforma deve consentire di controllare da remoto e/o di cambiare la configurazione degli elementi del sistema di monitoraggio.
- **RF3: Estensibilità:** la piattaforma deve consentire l'integrazione di nuovi plug-in o moduli software, ad esempio relativi a nuovi algoritmi di processamento dati.
- **RF4: Scalabilità:** la piattaforma deve garantire l'efficienza delle operazioni anche a fronte di installazioni dense di sensori e di volumi ingenti di dati prodotti.

A tal proposito, lo studio descrive una versione estesa della piattaforma **MODRON**; alcune componenti di tale piattaforma sono state presentate in lavori precedenti [11][12]. La piattaforma supporta RF1 ed RF2 mediante la tecnologia W3C WoT precedentemente menzionata, e si basa su architettura modulare a micro-servizi per RF3. Infine, essa utilizza soluzioni distribuite e tecnologie di gestione delle time-series per RF4.

4. Architettura del sistema

Si considera un'architettura di sistema SHM basata sulle quattro componenti (logiche) mostrate in Figura 2. In particolare, la componente di *Sensing* include tutte le infrastrutture di monitoraggio installate sulla struttura, quali reti di sensori/attuatori o videocamere. Nella sezione corrente si astrae dalla tecnologia di sensing utilizzata, così come dalla struttura monitorata, in quanto non oggetto di interesse dello studio corrente: tuttavia, nella descrizione del testbed (Sezione 6) vengono presentati due scenari nei quali la componente di *Sensing* è costituita rispettivamente da una rete di sensori accelerometrici, e da una rete di sensori piezo-elettrici ad emissioni acustiche. La componente *Edge* è formata da nodi di calcolo, denominati anche come *Nodi Edge (NE)* nel seguito, connessi alla rete Internet e collocati in prossimità della struttura monitorata. In generale, si prevede un ruolo duplice per

i NE. Da un lato, essi espongono le interfacce di accesso ai sensori attraverso una rappresentazione uniforme che astrae dalla loro implementazione e dai protocolli di acquisizione dati; in questo studio, la rappresentazione è basata sulla tecnologia W3C Web of Things (WoT) precedentemente introdotta. Dall'altro lato, i NE possono ospitare algoritmi di pre-processing al fine di filtrare i dati raccolti dai sensori e di estrarre le caratteristiche salienti (feature). I dati raccolti ed opportunamente processati dai NE sono quindi trasmessi tramite una connessione Internet alla componente *Cloud*, Quest'ultima è in esecuzione presso uno o più server remoti, e consiste nel software responsabile per lo storage, aggregazione e visualizzazione dei dati SHM, oltre che delle interfacce attraverso le quali l'utente può modificare la configurazione dei sensori. Infine, la componente di *Servizi* include software di terze parti in grado di acquisire dati tramite le API della componente Cloud, e di processarli/visualizzarli per scopi dipendenti dal dominio applicativo. Come esempi di servizi abilitati dalla piattaforma **MODRON**, nel progetto MAC4PRO è stata sviluppata un'app Android che abilita il controllo remoto dei sensori da connessione mobile; inoltre, è stata sviluppato un servizio di integrazione con la blockchain Ethereum, in modo da consentire la certificazione dei dati di monitoraggio e da impedirne l'alterazione o la falsificazione a posteriori [12]. L'obiettivo dello studio corrente è quello di investigare gli aspetti di data management; per questo motivo, le sezioni successive si concentrano sulla descrizione delle componenti **MODRON** Cloud (Sezione 4) e **MODRON** Edge (Sezione 5).

5. MODRON Edge

Sul lato edge, la piattaforma MODRON prevede uno strato software installato su ciascun NE. Su quest'ultimo, è in esecuzione il Servient software node-wot (<https://github.com/eclipse/thingweb.node-wot>) che abilita la creazione e l'operatività di rete delle Web Thing (WT) presenti sul NE. Tramite il concetto di WT, ed in particolare tramite il paradigma PAE, è possibile definire un'interfaccia di accesso uniforme per ciascuna componente del livello di *Sensing*, astraendo dalla sua implementazione. In questo modo è possibile gestire dalla piattaforma **MODRON** cloud sensori eterogenei e/o provenienti da produttori differenti, minimizzando la necessità di connettori ad-hoc e riducendo i costi di sviluppo e manutenzione software. In particolare, nel progetto MAC4PRO sono previste tre tipologie di WT, rispettivamente WT *Sensore*, WT *Struttura* e WT *Processing*. Nel primo caso, la WT modella le interazioni con dispositivi fisici di tipo sensore: in particolare, sono stati modellati sensori low-power di tipo accelerometrico e piezo basati su Emissioni Acustiche (EA), sviluppati internamente dalle unità di ricerca del progetto. Nella Tabella 1 viene mostrato un frammento del TD di un sensore accelerometrico, codificato in linguaggio JSON-LD: nello snippet di codice si può notare come i valori tri-assiali siano esposti come proprietà del modello. In aggiunta, ogni proprietà dispone di descrizione semantica attraverso l'ontologia SOSA (<https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/>).

```
Acceleration:
  type: "object"
  @type: "sosa:Observation"
  forms:
    0:
      op:
        0: "readproperty"
        contentType: "application/json"
        htv:methodName: "GET"
      readOnly: true
      writeOnly: false
      observable: false
```

```

properties:
  sosa:hasResult:
    type: "object"
    @type: "sosa:Result"
    properties:
      x:
        type: "number"
        unit: "qudt:Gravity"
      y:
        type: "number"
        unit: "qudt:Gravity"
      z:
        type: "number"
        unit: "qudt:Gravity"
  sosa:ResultTime:
    type: "string"
    @type: "xsd:DateTime"
  description: "Current acceleration result"
  ssn:forProperty: "qudt:Acceleration"

```

Tabella 1. Frammento del TD associato ad un sensore accelerometrico.

Le WT *Struttura* modellano l'oggetto del monitoraggio. Come tali, esse non sono connesse ad alcun dispositivo fisico, ma possono essere pensate come il Digital Twin della struttura monitorata. Pertanto, esse contengono riferimenti alla lista delle WT *Sensore*, ed in aggiunta possono esporre nuove azioni, ad esempio per attivare/disattivare tutti i sensori con un unico comando. Infine, le WT *Processing* modellano micro-servizi che effettuano computazione sui dati raccolti, quali ad esempio algoritmi di pre-processamento dei dati dei sensori per l'estrazione delle feature. Un ulteriore studio in [13] investiga la possibilità di migrare dinamicamente WT *Processing* tra nodi di computazione di un'architettura distribuita, es. dai nodi cloud ai nodi edge, Infine è prevista un'ulteriore classificazione delle WT in base alla loro modalità di interazione: WT *Visualizzazione* e WT *Controllo*. Nel primo caso, è possibile monitorare le proprietà o gli eventi della WT ma non cambiarne lo stato. Nel secondo caso, è possibile agire su cambiamenti di stato cambiando il valore delle proprietà o eseguendo azioni. La distinzione tra le classi di WT consente di implementare sistemi di controllo degli accessi in sistemi di monitoraggio SHM multi-utente. Ad esempio, account di tipo *amministratore* potranno accedere alle WT *Controllo*, mentre account di tipo *utente semplice* potranno accedere solo alle WT *Visualizzazione*. Essendo prevista la possibilità di esporre WT differenziate per lo stesso sensore, un account utente sarà impossibilitato a modificare lo stato del dispositivo.

6. MODRON Cloud

Sul lato cloud, la piattaforma **MODRON** consiste in un framework software a micro-servizi, sviluppato prevalentemente attraverso il linguaggio Typescript. L'architettura è altamente modulare in modo da consentire l'integrazione di nuovi micro-servizi, e lo sviluppo di nuovi algoritmi, ad esempio per il processamento dei dati da sensori specifici. Inoltre, a differenza di altre piattaforme IoT, essa è nativamente orientata alla tecnologia W3C WoT; in questo modo è possibile supportare nuove sorgenti dati di cui sia presente un TD sul lato edge. Nella Figura 3 è mostrata la lista dei moduli con le interazioni dati tra gli stessi. A seguire, vengono forniti dettagli tecnici per ciascuno dei moduli presenti:

- *Thing Discovery Service* (TDS): il modulo consente di registrare nuove WT presenti sul **MODRON** Edge. Ogni volta che una nuova WT viene esposta nel sistema (es. a

- seguito dell'installazione di un sensore), essa notifica la propria presenza alla API del TDS: quest'ultima funge da registro delle TD attive nel sistema SHM.
- *Thing Acquisition Service* (TAS): il modulo consente di acquisire dati in real-time dalle WT Sensore registrate presso il TDS. In particolare, sono supportate due modalità di acquisizione dati, rispettivamente note come *push-based* e *pull-based*. Nel primo caso, la WT Sensore invia una nuova misurazione quando disponibile. Nel secondo caso, il modulo TAS interroga proattivamente ogni Sensore WT chiedendo nuove misurazioni a comando oppure con frequenza prestabilita.
 - *Thing Aggregation Service* (TAGS): il modulo consente di processare i dati raccolti dalle WT Sensore, estraendo delle metriche aggregate dalle misurazioni sulla base di finestre temporali. Esempi di parametri statistici estratti da ogni finestra temporale includono: massimo, minimo, media, varianza, etc. Inoltre, possono essere sviluppati algoritmi specifici per la tipologia di sensore in uso, quali il calcolo della Power Spectral Density (PSD) per sensori di tipo accelerometrico.
 - *Thing Persister Service* (TPS): il modulo gestisce l'archiviazione delle misurazioni su memoria secondaria, e fornisce le API per le operazioni di accesso/modifica ai dati stessi. Vista l'ingente mole di dati potenzialmente raccolti in uno scenario SHM, si è scelto di utilizzare database management system (DBMS) altamente scalabili e distribuiti. L'implementazione attuale è basata su InfluxDB (<https://www.influxdata.com>). Sono disponibili due database, uno per le misurazioni raw raccolte dal TAS, un altro per i dati aggregati generati dal modulo TAGS.
 - *Thing Visualization Service* (TVS): il modulo consente di monitorare e di controllare, attraverso un'interfaccia grafica, tutte le WT presenti nel sistema e registrate presso il TDS. In particolare, il modulo sfrutta il fatto che ogni WT disponga di una descrizione ben definita per costruire dinamicamente l'interfaccia Web di controllo/interazione. Tale interfaccia consente, ad esempio, di osservare i dati prodotti da una WT Sensore, di modificare i parametri di configurazione tramite form Web, di eseguire comandi tramite pulsanti o di ricevere notifiche asincrone generate dal dispositivo.
 - *Data Visualization Service* (DVS): il modulo consente di visualizzare le misurazioni salvate dal TPS. Per ogni WT Sensore, è possibile visualizzare l'ultima misurazione raccolta oppure di accedere allo storico. Il modulo integra le librerie del tool Grafana (<https://www.influxdata.com>), che rappresenta uno degli strumenti open-source più popolari per la visualizzazione di dati IoT.
 - *Data Exporter Service* (DES): il modulo consente di esporre le misurazioni salvate attraverso file in diversi formati (JSON, CSV). È possibile filtrare i dati su scala temporale, e/o di selezionare i sensori d'interesse.

7. Validazione sperimentale

Il corretto funzionamento delle componenti della piattaforma **MODRON** è stato testato attraverso due setup sperimentali realizzati all'interno del progetto MAC4PRO. In particolare, sono state sensorizzate due strutture mediante reti di sensori differenti, al fine di dimostrare l'interoperabilità della piattaforma e l'acquisizione da strutture/sorgenti differenti. I due setup sono dettagliati nelle Sezioni seguenti.

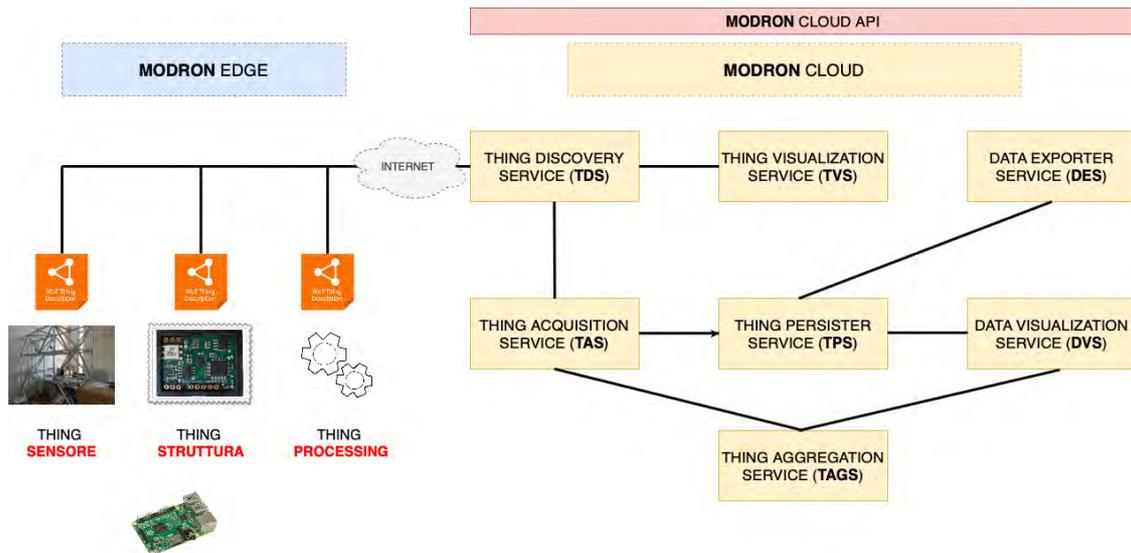


Figura 3. Componenti della piattaforma MODRON.

7.1 Setup sperimentale con nodi accelerometrici

Il setup consiste della struttura metallica mostrata in Figura 4(a). La struttura metallica reticolare è alta circa 5 metri ed è collocata presso i laboratori sperimentali di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Bologna. Sulla struttura sono stati installati 12 sensori MEMS, ciascuno dei quali dotato di accelerometri e giroscopi tri-assiali. Ciascun sensore è basato su microcontrollore STM32F303 a 32 bit, con un'unità FPU per il data pre-processing. Per quanto riguarda la topologia, i sensori formano due reti multi-hop cablate con tecnologia data-over-power; ciascuna rete include un collettore (Cluster Head), a sua volta connesso al NE [11]. Quest'ultimo è costituito da un nodo Raspberry PI 3+ con sistema operativo Raspbian. Come già detto nelle sezioni precedenti, ogni sensore MEMS è associato ad una corrispondente WT Sensore esposta dal **MODRON** Edge. Sulla piattaforma **MODRON** Cloud è possibile controllare lo stato del sensore e modificarne i parametri di configurazione, quali la frequenza di acquisizione, mediante l'interfaccia Web corrispondente: quest'ultima è generata dinamicamente dal TVS sulla base del TD del sensore. In Figura 4(b) viene mostrata tale interfaccia. In Figura 4(c) viene mostrato uno screenshot del DVS relativo alle misurazioni prodotte da un nodo sensore in una finestra temporale d'interesse.



Figura 4. Setup sperimentale con nodi accelerometrici: la Figura (a) mostra la struttura metallica, la Figura (b) mostra l'interfaccia Web di gestione di un WT Sensore generata automaticamente dal TVS. Infine, uno screenshot del DVS con le misurazioni triassiali è mostrato in Figura (c).

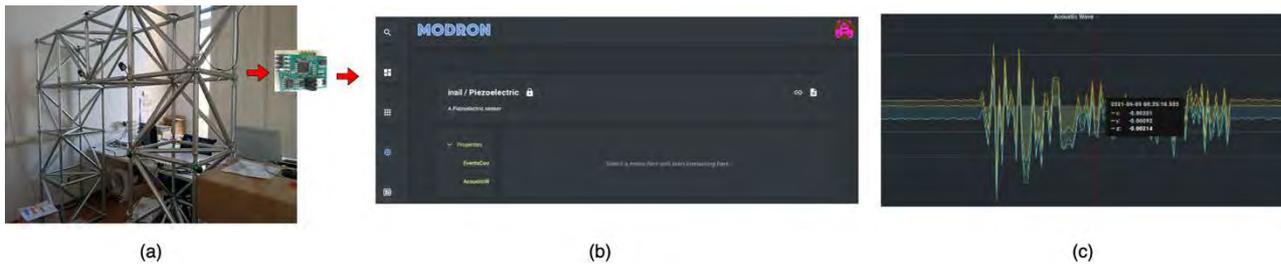


Figura 5. Setup sperimentale con nodi accelerometrici: la Figura (a) mostra la struttura metallica, la Figura (b) mostra l'interfaccia Web di gestione di un WT Sensore generata automaticamente dal TVS. Infine, uno screenshot del DVS con l'onda acustica è mostrato in Figura (c).

7.2 Setup sperimentale con nodi piezo

Il setup consiste della struttura metallica mostrata in Figura 5(a). La struttura metallica è un esempio di travatura reticolare collocata presso i laboratori sperimentali di ricerca del dottorato EIT4SEMM, all'interno del Centro di Ricerca sui Sistemi Elettronici "Erode de Castro" dell'Università di Bologna. Sulla struttura sono stati installati 6 sensori piezo-elettrici. Ciascuno include una circuiteria analogica per alte prestazioni, comprendente comparatori, amplificatori, convertitori analogico-digitali (ADC) e digitale-analogici; inoltre, ogni nodo è dotato tre canali di acquisizione connessi ad un trasduttore PZT altamente specializzato e multi-elettrodo, con una risposta piatta in frequenza in un ampio range di valori. Ciascun segnale analogico è poi campionato e quantizzato per mezzo di un ADC rail-to-rail a 12 bit integrato, caratterizzato da una frequenza di campionamento fino a 800 kHz. I dettagli dello schema circuitale dei sensori sono disponibili in [12]. In maniera simile a quanto descritto per il setup precedente, sono state sviluppate *WT Sensore* per i nodi della rete. Chiaramente, il TD di tali sensori differisce sensibilmente da quello dei nodi accelerometrici: l'interfaccia Web per la gestione di un sensore piezo è mostrata in Figura 5(b). Tuttavia, anche in questo caso, l'interfaccia è stata generata dal TVS in modo completamente automatico mediante il parsing del TD della WT. Infine, in Figura 5(c) viene mostrato uno screenshot del DVS con una forma d'onda acquisita da un nodo piezo durante il periodo di monitoraggio della struttura.

8. Conclusione e sviluppi futuri

In questo articolo abbiamo descritto lo sviluppo di una piattaforma di gestione dati per applicazioni IoT di monitoraggio strutturale, progettata e realizzata all'interno del progetto INAIL MAC4PRO. In particolare, è stato investigato il problema dell'interoperabilità determinato dalla frammentazione delle sorgenti dati e dei sensori. Per risolvere tale problematica, abbiamo proposto l'utilizzo dello standard Web of Things (WoT) recentemente introdotto dal consorzio W3C al fine di costruire interfacce uniformi di acquisizione dati dallo scenario. La piattaforma proposta, denominata **MODRON**, include componenti lato edge e lato cloud. La componente lato edge consente di esporre interfacce W3C WoT di acquisizione dati da sensori eterogenei. La componente lato cloud consente di registrare le Web Thing (WT) presenti nello scenario, e di gestire l'acquisizione dati, il controllo della configurazione dei sensori e lo storage/processamento/esportazione/visualizzazione delle misurazioni raccolte. La piattaforma è stata validata su due setup sperimentali. In particolare, sono state testate la capacità della piattaforma di acquisire dati da reti eterogenee, minimizzando la necessità di nuovi sviluppi software, e la scalabilità del sistema di gestione dati a fronte di workload significativi prodotti in 3 mesi di monitoraggio. La

piattaforma è tutt'ora in fase di completamento, e si prevedono molti sviluppi futuri sia dal punto di vista tecnico sia dal punto scientifico. Per quanto riguarda il primo punto, si prevede di espandere l'insieme dei sensori supportati e degli algoritmi di processamento/aggregazione dati. Per quanto riguarda il secondo punto, si prevede di estendere le funzionalità del sistema monitoraggio al fine di integrare il monitoraggio di attività umane, es. di manutentori nell'area della struttura ed impegnati in operazioni critiche. A tal proposito, un prototipo del dispositivo wearable per il riconoscimento di eventi critici (es. cadute) è stato sviluppato in [14].

9. Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato dall'INAIL all'interno del progetto BRIC 2018, ID = 11 framework MAC4PRO ("Smart maintenance of industrial plants and civil structures via innovative monitoring technologies and prognostic approaches").

10. Bibliografia

- [1] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015
<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2020-10-29-gartner-survey-reveals-47-percent-of-organizations-will-increase-investments-in-iiot-despite-the-impact-of-covid-19->
- [3] C. J. A. Tokognon, B. Gao, G. Y. Tian, Y. Yan, "Structural Health Monitoring Framework Based on Internet of Things: A Survey," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 619–635, 2017
- [4] L. Sun, Z. Shang, Y. Xia, S. Bhowmick, S. Nagarajaiah, "Review of bridge structural health monitoring aided by big data and artificial intelligence: From condition assessment to damage detection", *Journal of Structural Engineering*, vol. 146, no. 5, p. 04020073, 2020
- [5] M.A. Mahmud, K. Bates, T. Wood, A. Abdelgawad, K. Yelamarthi, "A complete internet of things (iiot) platform for structural health monitoring (shm)," in 2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), 2018, pp. 275–279
- [6] F. Lamonaca, C. Scuro, P. F. Sciammarella, R. S. Olivito, D. Grimaldi, and D. L. Carnì, "A layered iiot-based architecture for a distributed structural health monitoring system," *Acta IMEKO*, vol. 8, no. 2, pp. 45–52, 2019
- [7] P. Pierleoni, M. Conti, A. Belli, L. Palma, L. Incipini, L. Sabbatini, S. Valenti, M. Mercuri, and R. Concetti, "Iiots solution based on mqtt protocol for real-time building monitoring," 2019 IEEE 23rd International Symposium on Consumer Technologies (ISCT), 2019, pp. 57–62
- [8] M. Bacco, P. Barsocchi, P. Cassara, D. Germanese, A. Gotta, G. R. Leone, D. Moroni, M. A. Pascali, and M. Tampucci, "Monitoring ancient buildings: Real deployment of an iiot system enhanced by uavs and virtual reality," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 50 131–50 148, 2020
- [9] R. Li, T. Mo, J. Yang, S. Jiang, T. Li, and Y. Liu, "Ontologies-based domain knowledge modeling and heterogeneous sensor data integration for bridge health monitoring systems," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 1, pp. 321–332, 2021
- [10] W3C Working Group. (2020) WoT Reference Architecture (Proposed Recommendation 9 April 2020). [Online]. Available: <http://www.w3.org/TR/wot-architecture/>

- [11] C. Aguzzi, L. Gigli, L. Sciallo, A. Trotta, F. Zonzini, L. De Marchi, M. Di Felice, A. Marzani, and T. S. Cinotti, "Modron: A scalable and interoperable web of things platform for structural health monitoring," in 2021 IEEE 18th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). IEEE, 2021, pp. 1–7
- [12] L. Gigli, L. Sciallo, F. Montori, A. Marzani, M. Di Felice, "Blockchain and Web of Things for Structural Health Monitoring Applications: A Proof of Concept", sottomesso per pubblicazione presso conferenza, 2021
- [13] C. Aguzzi, L. Gigli, L. Sciallo, A. Trotta, and M. Di Felice, "From cloud to edge: Seamless software migration at the era of the web of things," IEEE Access, vol. 8, 2020
- [14] A. Ghibellini, L. Bononi, M. Di Felice, "Intelligence at the IoT Edge: Activity Recognition with Low-Power Microcontrollers and Convolutional Neural Networks", sottomesso per pubblicazione presso conferenza, 2021

Utilizzo dell'Analisi delle Componenti Principali (PCA) per la rilevazione di anomalie nelle strutture reticolari di impianti industriali

A.E. Milani¹, P. Baraldi¹, A. Palermo², A. Marzani², E. Zio^{3,1}

¹ Energy Department, Politecnico di Milano

² Alma Mater Studiorum Università di Bologna

³ MINES ParisTech, PSL Research University, CRC

Sommario

In questo lavoro si propone una procedura di rilevamento automatico di danni o difetti nelle strutture reticolari. La metodologia proposta utilizza le frequenze naturali della struttura da analizzare, stimabili dalle risposte vibrazionali (spostamenti, velocità o accelerazioni) misurate tramite opportuni sensori, e fornisce in output la classificazione dello stato del manufatto come sano o danneggiato. L'approccio sviluppato per il rilevamento delle anomalie si basa sull'uso dell'analisi delle componenti principali (PCA) per la ricostruzione delle frequenze naturali caratteristiche di una struttura in condizioni non danneggiate. La presenza del danno viene evidenziata applicando il test Q-statistico alle differenze (residui) tra le frequenze naturali osservate e i loro valori ricostruiti dal modello PCA. La strategia di rilevamento delle anomalie qui proposta viene applicata a un set di dati "sintetico", contenente le frequenze naturali di strutture reticolari sane e danneggiate, calcolate mediante simulazioni agli elementi finite. La presenza di possibili variazioni nelle condizioni operative della struttura, quali ad esempio, temperatura, flusso del fluido, presenza di rumore ambientale, viene simulate mediante opportune variazioni nei parametri meccanici della struttura. I risultati ottenuti mostrano che il modello proposto è in grado di riconoscere correttamente lo stato della struttura reticolare con un numero limitato di falsi e/o mancati allarmi.

1. Introduzione

Le strutture reticolari o a traliccio sono largamente utilizzate negli impianti di produzione energetica e nell'industria petrolchimica quali supporto per condutture e apparecchiature ausiliarie come pompe, stazioni di servizio, collettori, stazioni antincendio e di pronto soccorso. In aggiunta, le strutture a traliccio vengono spesso impiegate per sostenere gli elementi degli impianti di illuminazione ed altri dispositivi (ad esempio impianti di raffrescamento/riscaldamento). Negli impianti dell'industria petrolchimica e chimica, e in particolare negli stabilimenti a rischio di incidente rilevante, il cedimento delle strutture reticolari di sostegno può innescare una catena accidentale ad impatto significativo. Pertanto, l'identificazione tempestiva dei danni nelle strutture reticolari è fondamentale per evitare incidenti catastrofici che possono causare gravi conseguenze sia per l'ambiente che per le vite umane (Grant & Hinze, 2014). Negli ultimi decenni sono state proposte diverse tecniche, automatiche e non, per rilevare difetti o danni in strutture reticolari o intelaiate basate, principalmente, sulla osservazione/variazione delle caratteristiche modali della struttura (ad esempio, frequenze e/o forme modali). In particolare, tecniche basate sulla variazione dell'indice MAC (Modal Assurance Criterion), delle matrici di flessibilità, dell'indice di energia di deformazione modale, hanno mostrato risultati promettenti nell'identificare e rilevare la presenza e la posizione dei danni strutturali. Il lettore può fare riferimento ai lavori di Montazer

& Seyedpoor, 2014 e Alvandi & Cremona, 2006 per una più ampia panoramica dei metodi disponibili.

In questo lavoro si propone un metodo basato sulla combinazione dell'Analisi alle Componenti Principali (Principle Component Analysis - PCA) (Jolliffe & Cadima, 2016) e del test statistico Q (Mujica, Rodellar, Fernandez, & Guemes, 2010) per rilevare la presenza di difetti in strutture reticolari. Il metodo sviluppato riceve in input le frequenze naturali della struttura monitorata, che possono essere stimate dai segnali di accelerazione misurati da un opportuno set di sensori, e fornisce in output la classificazione dello stato della struttura reticolare come sano o danneggiato. La PCA viene utilizzata per ricostruire le frequenze naturali caratteristiche di una struttura reticolare sana; il test Q-statistico viene utilizzato per identificare deviazioni nelle differenze (o residui) tra le frequenze naturali misurate e ricostruite. L'esistenza di residui non nulli indica la presenza di difetti. La metodologia viene qui testata utilizzando set di frequenze naturali di una struttura a traliccio in alluminio, in condizioni sane, calcolate mediante un modello FEM dedicato. Gli scenari danneggiati vengono simulati introducendo una riduzione delle caratteristiche di rigidità in un elemento strutturale a scelta e calcolando i relativi dataset di frequenze naturali.

Il lavoro è organizzato come segue: nella Sezione 2 viene descritto il caso studio, il modello agli elementi finiti, e la strategia adottata per la generazione delle distribuzioni di frequenze. La Sezione include la descrizione dettagliata della tecnica proposta per il rilevamento dei difetti, ovvero la ricostruzione delle frequenze mediante PCA e il test Q-statistico per i residui. Il metodo così descritto è applicato alla struttura in oggetto nella Sezione 4, dove sono presentati e discussi alcuni risultati preliminari. Conclusioni e possibili estensioni del metodo vengono discusse nella Sezione 5.

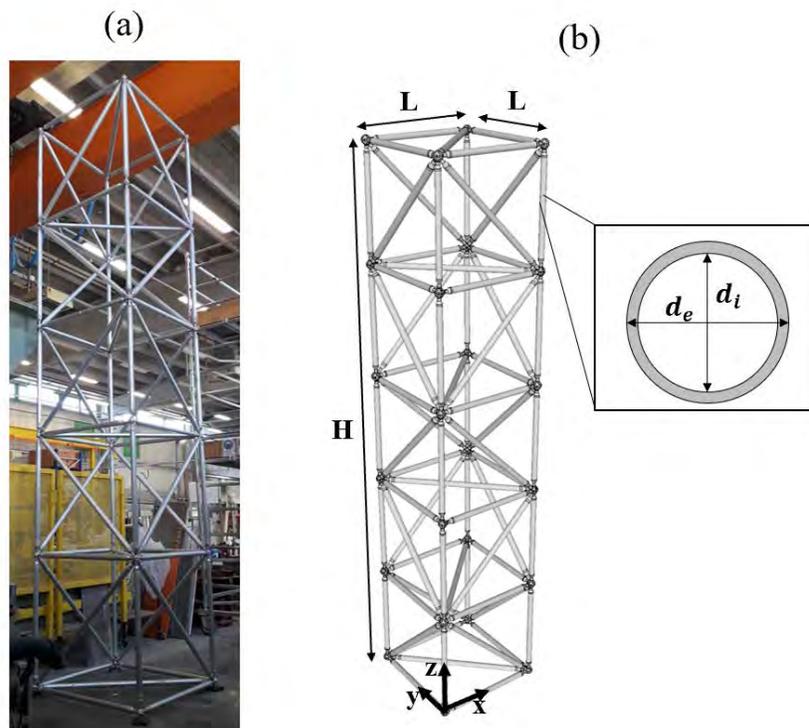


Figura 1. (a) La struttura reticolare collocata nel laboratorio LISG dell'Università di Bologna. (b) Geometria della struttura.

2. Caso studio

La struttura reticolare in oggetto rientra nei test-case del progetto “Manutenzione intelligente di impianti industriali e opere civili mediante tecnologie di monitoraggio 4.0 e approcci prognostici” (MAC4PRO) finanziato dall'Istituto nazionale Assicurazione Infortuni sul Lavoro (INAIL) all'interno del BRIC 2018. La reticolare si trova attualmente presso il Laboratorio LISG dell'Università di Bologna (Figura 1a) ed è composta da $B = 70$ barre in lega di alluminio 6061, disposte in 5 moduli cubici, con dimensioni di $1 \times 1 \times 1$ metri, per un'altezza complessiva di 5 metri (Figura 1b).

Le barre hanno sezione circolare con diametro esterno $d_e = 0.042$ m diametro interno $d_i = 0.036$ m, per sezione complessiva $A = 3.67e - 4 \text{ m}^2$. La presenza di nodi quasi sferici nelle sezioni terminali delle barre permette la rotazione relativa tra le stesse. La struttura è appoggiata su delle basette metalliche fissate al piano di base tramite ancoraggi. Le caratteristiche modali della struttura, ovvero frequenze proprie e modi, sono state calcolate utilizzando un modello FEM sviluppato nell'ambito del progetto MAC4PRO. La geometria del modello trascura la presenza dei nodi; ogni barra $i = 1, \dots, B$ è modellata come un singolo elemento lineare con Modulo di Young equivalente E_i , sezione trasversale $A_i = A$, lunghezza L_i e densità $\rho_i = \rho$. Data la geometria della reticolare, tutte le barre orizzontali e verticali hanno lunghezza $L = 1$ m, mentre le diagonali hanno lunghezza $L_d = 1,42$ m. I Moduli di Young equivalenti delle aste orizzontali, verticali e diagonali sono stati stimati tramite prove sperimentali su aste selezionate e tenendo conto del contributo di rigidezza dei nodi. In accordo, il Modulo di Young assegnato alle barre orizzontali e verticali è pari a $E = 48,7$ GPa e alle barre diagonali è uguale a $E_d = 51,94$ GPa. La densità del materiale assunta nel modello, $\rho = 3130 \text{ kg/m}^3$, tiene conto del contributo di massa dei nodi sferici. La massa di ciascuna barra è modellata utilizzando una matrice a masse concentrate. La deformabilità delle piastre di supporto metallico che sostengono la base della struttura è modellata mediante molle verticali di rigidezza k_g (vedi schema in Fig. 2). La risposta modale della struttura viene calcolata utilizzando un approccio FE classico (sviluppato con un algoritmo in ambiente MATLAB), assemblando la matrice di rigidezza K e la matrice di massa M . I parametri modali sono quindi ottenuti risolvendo il problema agli autovalori:

$$[\mathbf{K}(E_i, A_i, L_i) - \omega_j^2 \mathbf{M}(\rho_i, A_i, L_i)] \Phi_j = 0 \quad (1)$$

dove ω_j e Φ_j indicano, rispettivamente, la j^{th} frequenza naturale e forma modale della struttura, con $j = 1, \dots, n$ e n il numero dei gradi di libertà ($n = 64$ in questo esempio).

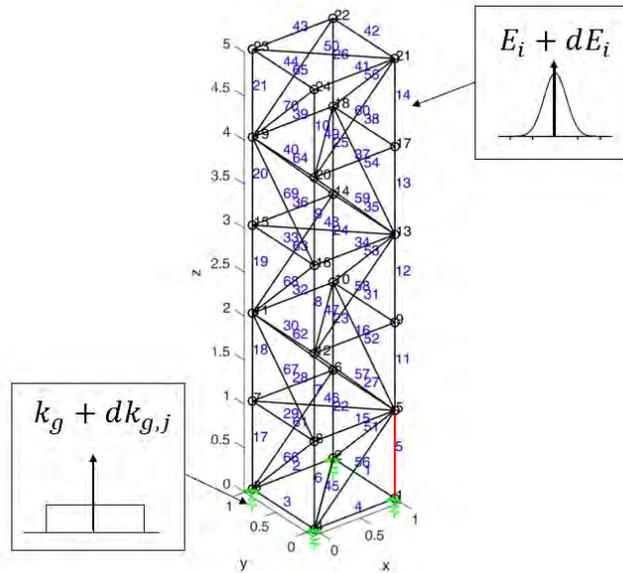


Figura 1. Schema del modello FEM sviluppato in ambiente Matlab. In rosso, un possibile elemento danneggiato.

Per la creazione del primo set di dati, sono state considerate $H=100$ strutture sane, e le corrispondenti $n = 64$ frequenze naturali sono state simulate risolvendo il problema agli autovalori dell'Eq. 1. Le frequenze naturali sono state organizzate nella matrice $X_H = \{x_H^{(h)}, h = 1, \dots, H\}$, dove $x_H^{(h)}$ è un vettore a $n=64$ dimensioni contenente le frequenze proprie della struttura. Ogni struttura è soggetta a specifiche condizioni ambientali e operative (es. temperatura) che determinano variazioni dei suoi parametri meccanici. Queste variazioni sono state simulate campionando:

- il modulo di Young \tilde{E}_i di ciascuna barra da una distribuzione normale con media E_i e deviazione standard $\sigma_{E_i} = 0.05$;
- 2) la rigidità dei supporti \tilde{k}_g da una distribuzione uniforme continua compresa tra $[k_g - 0.05k_g; k_g + 0.05k_g]$.

Le strutture con difetti sono state simulate seguendo il medesimo approccio. La presenza di un danno strutturale è stata modellata come riduzione del parametro di rigidità $E_i A_i$ della barra dove è localizzato il danno. Come prima analisi, vengono considerati solo gli scenari in cui una singola barra è danneggiata.

Ogni configurazione è quindi caratterizzata da un indice di danno:

$$DI_i = 1 - \frac{E_i(d)A_i(d)}{E_i(h)A_i(h)}, \quad i = 1, \dots, B \quad (2)$$

dove (d) e (h) si riferiscono, rispettivamente alla struttura danneggiata e sana. Nello specifico sono stati considerati 9 livelli di danno, DI_i (10%, 20%, 30%, ..., 90%) localizzati, singolarmente, su quattro barre. Complessivamente, sono state simulate 100 diverse condizioni ambientali e operative per ciascuno dei 10 livelli di danno e per ciascuna delle 4

possibili barre difettose, per un dataset $X_D = \{x_D^{(d)}, d = 1, \dots, D\}$ contenente 3600 strutture danneggiate. Sebbene il modello FE permetta di ottenere le $n = 64$ frequenze naturali della struttura, solo le prime sei sono state utilizzate per il rilevamento dei difetti, nell'ottica di operare con le prime frequenze naturali disponibili dal monitoraggio strutturale. Per questo, la dimensione dei vettori delle frequenze naturali, $x_H^{(h)}$ e $x_D^{(d)}$ è ridotta a $K = 6$. L'obiettivo di questo lavoro è quindi sviluppare un metodo in grado di rilevare se una struttura reticolare monitorata caratterizzata all'istante t dalle prime $K = 6$ frequenze naturali $x_{test}^{(t)}$ è in uno stato sano o difettoso/danneggiato.

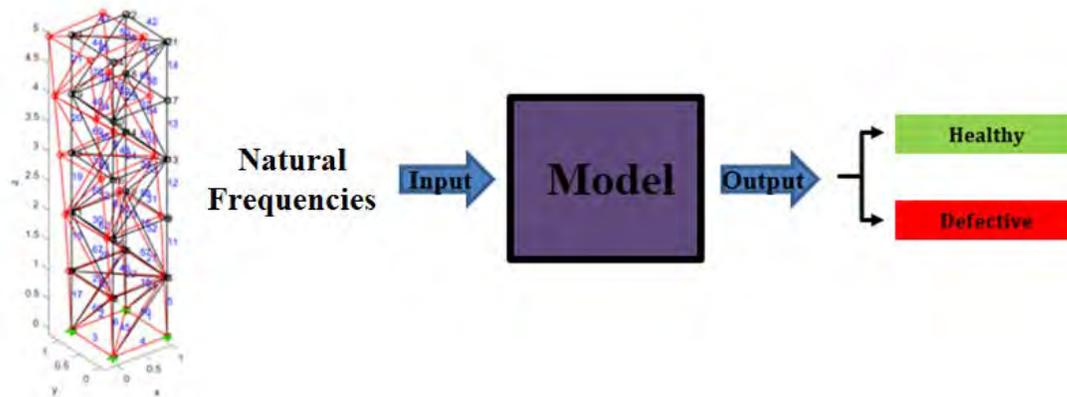


Figura 3. Schema del problema.

3. Il modello per il rilevamento dei difetti

Il modello sviluppato per il rilevamento dei difetti nelle strutture reticolari si basa sull'applicazione sequenziale dei due moduli riportati in Figura 4. Il primo modulo riceve in ingresso le frequenze proprie $y_{test}^{(t)}$ di una struttura identica, sana, operante nelle stesse condizioni ambientali (ricostruzione del segnale). L'approccio si basa sull'uso dell'analisi delle componenti principali (PCA), una tecnica di ricostruzione del dato largamente utilizzata in diversi settori industriali (Li, Peng e Wang, 2018) (Pozo, Vidal e Salgado, 2018). La PCA permette di ridurre la dimensionalità dello spazio del segnale originale, considerando solo quelle Componenti Principali (PC) che descrivono la maggior quota parte della variabilità dei dati tra strutture sane. Quindi, proiettando su queste direzioni principali le frequenze naturali di una struttura di test, si ottengono le ricostruzioni del dato in condizioni sane.

Natural Frequencies

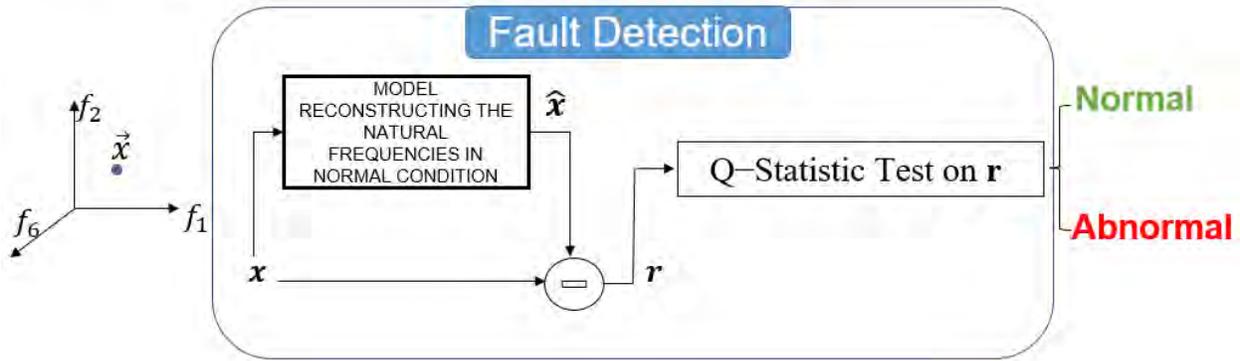


Figura 4. Modello di rilevamento dei difetti.

La procedura adottata è riassunta qui di seguito:

1. i dati, K -dimensionali, delle strutture sane $X_{H,train}$ sono proiettati nello spazio K -dimensionale delle componenti principali;
2. si effettua una riduzione della dimensionalità dello spazio dei componenti principali da K a $z < K$, trascurando i PC con le minime varianze associate;
3. viene eseguita un'anti-trasformazione dallo spazio ridotto dei PC z allo spazio dei dati K -dimensionali originale.

Si noti che il modulo di ricostruzione è costruito utilizzando solo i dati sani $X_H = \{x_H^{(h)}, h = 1, \dots, H\}$ e l'unico parametro da impostare è la dimensionalità z dello spazio ridotto del PC.

Il secondo modulo, che ha lo scopo di rilevare il verificarsi di una condizione anomala, riceve in ingresso i residui $r_{test}^{(t)} = y_{test}^{(t)} - x_{test}^{(t)}$ e produce in output lo stato (sano o difettoso) della struttura reticolare. A questo scopo, le componenti del vettore dei residui vengono aggregate nello scalare $Q^{(t)}$ calcolando la somma dei quadrati:

$$Q^{(t)} = (y_{test}^{(t)} - x_{test}^{(t)}) \cdot (y_{test}^{(t)} - x_{test}^{(t)})^T = r_{test}^{(t)} \cdot r_{test}^{(t)T} \quad \text{with } Q^{(t)} \in [0; \infty] \quad (3)$$

che è indipendente dal segno dei residui. A questo punto, il test statistico Q viene applicato per valutare, con un certo livello di confidenza α , se la struttura è in uno stato sano o difettoso (Mujica, Rodellar, Fernandez e Guemes, 2010). La quantità Q_α è definita da:

$$Q_\alpha = \vartheta_1 \left[\frac{C_\alpha \sqrt{2\vartheta_2 h_0^2}}{\vartheta_1} + 1 + \frac{\vartheta_2 h_0 (h_0 - 1)}{\vartheta_1^2} \right]^{\frac{1}{h_0}} \quad (4)$$

dove C_α è la deviazione normale standard corrispondente al percentile superiore $(1 - \alpha)$, mentre i parametri ϑ_i e h_0 sono calcolati dai dati sani $X_H = \{x_H^{(h)}, h = 1, \dots, H\}$:

$$\vartheta_i = Tr[Cov(X_{H,train})] - \sum_{n=1}^M \lambda_n^i \quad (5)$$

$$h_0 = 1 - \frac{2\theta_1\theta_3}{3\theta_2^2} \quad (6)$$

Se $Q^{(t)} < Q_\alpha$, la struttura reticolare viene classificata come sana, altrimenti viene rilevata la presenza di un difetto (Jackson & Mudholkar, 1979). L'impostazione del livello di confidenza α dipende dalla specifica applicazione. In questo lavoro il livello di confidenza è stato definito considerando un compromesso ottimale tra falsi e mancati allarmi.

4. Risultati

I dati simulati relativi a strutture sane $X_H = \{x_H^{(h)}, h = 1, \dots, H\}$ e danneggiate $X_D = \{x_D^{(d)}, d = 1, \dots, D\}$ sono stati suddivisi in 3 set: dati di allenamento (training), di validazione (validation) e di test. Il training set è formato dai vettori delle frequenze naturali di 60 strutture sane ed è utilizzato per definire le componenti principali. Il set di validazione è formato dai vettori delle frequenze naturali di 20 strutture sane e di 2000 strutture difettose. Viene utilizzato per impostare gli iperparametri del modello (il numero di componenti principali nello spazio ridotto, z , e il livello di confidenza, α). Infine, il test set è formato dai dati sani e difettosi rimanenti e viene utilizzato per valutare le prestazioni del modello sviluppato. La divisione dei dati nei tre insiemi viene eseguita mediante campionamento casuale.

La scelta degli iperparametri è stata eseguita secondo un approccio "trial and error". La Figura 5 mostra la curva ROC ottenuta valutando il tasso di falsi positivi (falso allarme) e falsi negativi (mancato allarme) nel set di convalida, considerando diverse combinazioni del numero di componenti principali ($n_{PC} = 1, 2, 3, 4, 5$) e del livello di confidenza ($\alpha = 0.80, 0.81, 0.82, \dots, 0.99$). La coppia di iperparametri $z = 1$ e $\alpha = 0.92$ produce il miglior compromesso tra falso positivi e falso negativi, ovvero con la minima distanza euclidea dalla migliore prestazione teorica possibile (falsi positivi nulli e falsi negativi nulli).

Il metodo di rilevamento dei difetti così definito è stato applicato al set di test per valutarne le prestazioni complessive sui dati non utilizzati per lo sviluppo del modello. La tabella 1 riporta il tasso di mancati e falsi allarmi ottenuti. Si sottolinea che il numero di falsi positivi può essere ulteriormente ridotto: 1) scegliendo una diversa impostazione degli iperparametri tale da diminuire il numero di falsi positivi (e aumentare i falsi negativi (Figura 5); 2) utilizzando un numero maggiore di dati relativi a strutture sane per il calcolo delle componenti principali e l'impostazione degli iperparametri del modello.

La Figura 6 riporta il tasso di mancati allarme in funzione della dimensione del difetto. Si noti che tutti i difetti caratterizzati da una riduzione della sezione trasversale della barra superiore al 40% vengono rilevati correttamente.

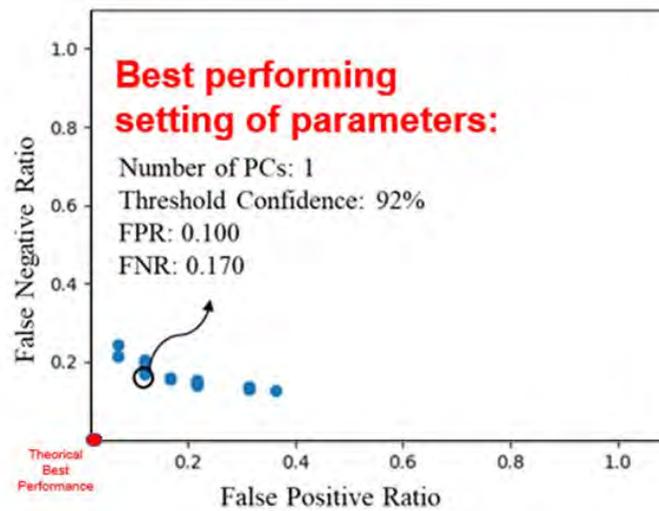


Figura 5. Curva ROC

In definitiva, tenuto conto della robustezza strutturale della struttura reticolare e dei fattori di sicurezza tipicamente impiegati per la progettazione delle strutture, le prestazioni del modello sviluppato sono ampiamente soddisfacenti.

Tasso di Falsi Positivi (Falso Allarme)	0.200
Tasso di Falsi Negativi (Mancato Allarme)	0.105

Tabella 1. Performance del metodo

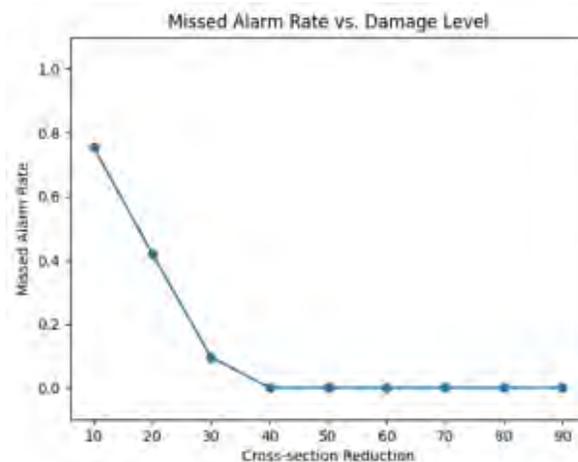


Figura 6. Rate di mancato allarme in funzione della riduzione della sezione trasversale

5. Conclusioni

In questo lavoro si è proposto un modello di rilevamento automatico per l'identificazione di difetti/danni nelle strutture reticolari. Il modello utilizza come dati in ingresso le frequenze naturali della struttura e fornisce in uscita la classificazione della struttura come sana o difettosa. Il modello proposto ricostruisce le frequenze naturali della struttura sana utilizzando l'analisi delle componenti principali, calcola i residui tra i dati veri e quelli ricostruiti e applica il test statistico Q per rilevare la presenza di un difetto. La metodologia è stata testata utilizzando un dataset di frequenze naturali sintetico simulato mediante un modello FE che riproduce il comportamento di una vera struttura reticolare. I risultati mostrano che la presenza di un danno nella struttura può essere correttamente identificata. Futuri sviluppi del metodo saranno dedicati alla i) riduzione del tasso di falsi allarmi, ovvero strutture sane erroneamente classificate come danneggiate e ii) allo sviluppo di metodo automatico per la localizzazione dell'elemento danneggiato, in modo da facilitare la pianificazione di interventi di manutenzione.

6. Bibliografia

- [1] Alvandi, A., & Cremona, C. (2006). Assessment of vibration-based damage identification techniques. *Journal of Sound and Vibration*, 179-202.
- [2] Grant, A., & Hinze, J. (2014). Construction worker fatalities related to trusses: An analysis of the OSHA fatality and catastrophic incident database. *Safety Science*, 54-62.
- [3] Jackson, J., & Mudholkar, G. (1979). Control Procedures for Residuals Associated with Principal Component Analysis. *Technometrics*, vol. 21, no. 3, 341-349.
- [4] Jiong, T. (2005). Frequency response based damage detection using principal component analysis. *ICIA 2005 - Proceedings of 2005 International Conference on Information Acquisition*, (pp. 407-412). Hong Kong.
- [5] Jolliffe, I., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*.
- [6] Li, W., Peng, M., & Wang, Q. (2018). Fault identification in PCA method during sensor condition monitoring in a nuclear power plant. *Annals of Nuclear Energy*, 135-145.
- [7] Montazer, M., & Seyedpoor, S. M. (2014). A New Flexibility Based Damage Index for Damage Detection of Truss Structures. *Shock and Vibration*, Article ID 460692.
- [8] Mujica, L., Rodellar, J., Fernandez, A., & Guemes, A. (2010). Q-statistic and T2-statistic PCA-based measures for damage assessment in structures. *Structural Health Monitoring*.
- [9] Pozo, F., Vidal, Y., & Salgado, O. (2018). Wind Turbine Condition Monitoring Strategy through Multiway PCA and Multivariate Inference. *Energies*.
- [10] Tu, J., Yun, C., Xu, X., Tang, Z., & Wu, J. (2019). PCA-based temperature effect compensation in monitoring of steel beam using guided waves. *6th East Asian-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*. Brisbane.

Monitoraggio dell'integrità strutturale di apparecchi in pressione mediante emissione acustica

G. Mirasoli, C. Brutti, A. Chiappa, L. Mancini, S. Porziani, M.E. Biancolini

Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa "Mario Lucertini", Università di Roma "Tor Vergata"

Sommario

In questo studio si mostra come la modellazione FEM possa essere utilizzata per simulare l'emissione di onde acustiche, causata da un'estensione locale o dalla nascita di un difetto nella struttura. Il metodo di controllo non distruttivo basato sulle emissioni acustiche è alla base di sistemi di monitoraggio accurati e affidabili. L'elaborazione dei segnali ottenuti con la modellazione della propagazione di difetti nel componente permette di valutare il range di frequenze di interesse per la messa a punto del sistema di sensori necessari al monitoraggio della struttura, tenendo conto della velocità di propagazione e dell'attenuazione geometrica di tali segnali.

1. Introduzione

Le strutture sono soggette a vari tipi di guasti durante il loro funzionamento. Il meccanismo di guasto dipende dal tipo di carico esterno, dalle condizioni di lavoro, dai cambiamenti microstrutturali all'interno della struttura, etc. Vari tipi di danni nelle strutture metalliche includono fatica, attrito, collasso statico, etc. È importante rilevare il danno nella sua fase iniziale per prevenire un collasso. Il monitoraggio strutturale (*Structural Health Monitoring* SHM) è una tecnologia emergente con molteplici applicazioni nella valutazione di strutture critiche. L'emissione acustica (*Acoustic Emission* AE) è un metodo di monitoraggio strutturale passivo che ha un grande potenziale per il rilevamento precoce dei danni e la prevenzione del cedimento completo della struttura. Fondamentale è la comprensione della sorgente AE per identificare i segnali corretti e separarli dal rumore e dai segnali dovuti ad altri fattori (ambiente, variazioni di temperatura, attrito in giunti, etc.) [1]. Sono stati condotti numerosi studi per l'interpretazione dei segnali di emissione acustica con il metodo degli elementi (*Finite Element Method* - FEM) [2–5]. Diversi studi hanno considerato la sorgente AE come un monopolo o una sorgente puntiforme dipolo [6]. Nello studio presentato in questa memoria la sorgente dell'emissione acustica considerata è la propagazione di una cricca all'interno del componente. Sono stati considerati due modelli: una piastra con cricca di bordo, e il mantello cilindrico di un serbatoio in pressione. L'emissione dell'onda acustica viene misurata attraverso l'acquisizione di segnali di spostamento e deformazione della struttura, i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli semi-analitici presenti in letteratura. L'elaborazione dei segnali ottenuti, con la modellazione della propagazione di difetti nel componente, permette di valutare il range di frequenze di interesse per la messa a punto del sistema di sensori necessari per il monitoraggio della struttura, tenendo conto della velocità di propagazione e dell'attenuazione geometrica di tali segnali.

2. Modellazione FEM dell'emissione acustica

In questa sezione si riportano le impostazioni FEM ed i risultati ottenuti per scenari di crescente complessità della propagazione AE. Le considerazioni teoriche sono riportate in ogni sottosezione dedicata, introducendo le velocità di propagazione per valutare i risultati numerici.

2.1. Caso 1: Piastra elastica lineare con cricca di bordo

Le onde ad ultrasuoni guidate (*Ultrasonic Guided Waves* - UGW) sono alla base di un metodo efficace per la valutazione non distruttiva (*Non destructive Evaluation* - NDE) e il monitoraggio strutturale (SHM) [7]. Portano vantaggi innegabili rispetto alle onde bulk, come una più ampia capacità di ispezione e una maggiore versatilità. La loro azione è particolarmente apprezzata per la scansione di strutture traviformi o piastriformi come tubi, binari ferroviari o laminati, come nei lavori di Lowe et al. (1998) e Leckey et al. (2018) [8][9]. Le velocità dei segnali dipendono dalla geometria della guida d'onda. Nel caso di struttura piastriforme in materiale isotropo, con confini liberi da stress e sotto l'ipotesi di deformazione piana, ci si riconduce al classico problema della propagazione delle onde di Lamb. Le ben note soluzioni di Rayleigh-Lamb [10]:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad (1)$$

per i modi simmetrici e

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2pq} \quad (2)$$

per i modi antisimmetrici, dove con k si intende il numero d'onda e con h metà dello spessore della piastra. I parametri p e q derivano dalla frequenza circolare ω , dal numero d'onda k e dalla velocità di propagazione bulk c_i :

$$p^2 = \left(\frac{\omega}{c_l}\right)^2 - k^2 \quad (3)$$

e

$$q^2 = \left(\frac{\omega}{c_T}\right)^2 - k^2 \quad (4)$$

Se si cercano le caratteristiche d'onda per una generica sezione trasversale della guida d'onda, non esiste una soluzione analitica. In questo studio si è ricorso alla modellazione FEM. Tali modelli sono stati validati con modelli semi-analitici.

Nel modello FEM, la piastra è stata modellata in 3D. Le proprietà geometriche e del materiale (acciaio Fe275, considerato elastico-lineare) sono le seguenti:

- $s = 7.9$ cm;
- $b = 31.4$ cm;
- spessore $t = 4.7$ mm;
- Modulo di Young $E = 210$ GPa
- Coefficiente di Poisson $\nu = 0,3$
- Densità $\rho = 7800$ kg/m³

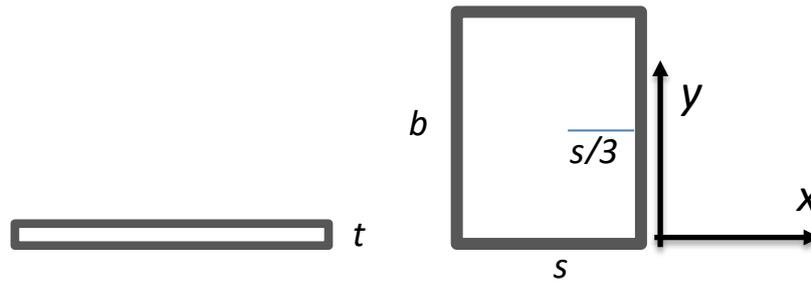


Figura 1. Geometria piastra

La propagazione bulk associata presenta velocità longitudinale $c_l = 6005.8$ m/s e velocità di taglio $c_t = 3210.3$ m/s. Non sono stati considerati gli effetti di smorzamento. La piastra presenta una cricca di bordo di lunghezza pari ad $s/3$. Di seguito viene esposta la procedura utilizzata per simulare la propagazione del difetto all'interno del materiale e la conseguente emissione AE. L'analisi effettuata è di tipo *full transient* con metodo implicito. In Figura 2 viene riportata la sequenza della simulazione.

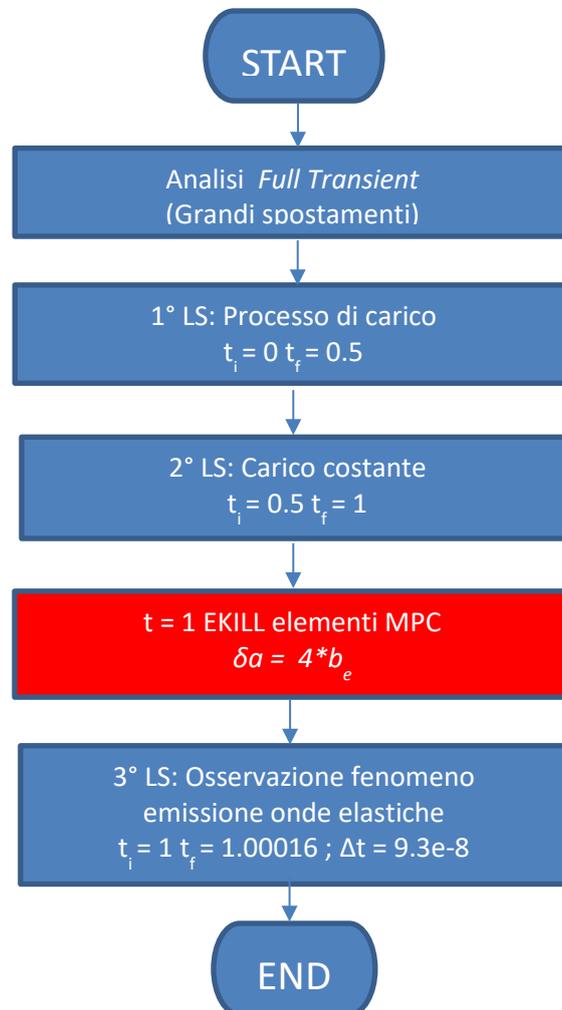


Figura 2. Sequenza analisi

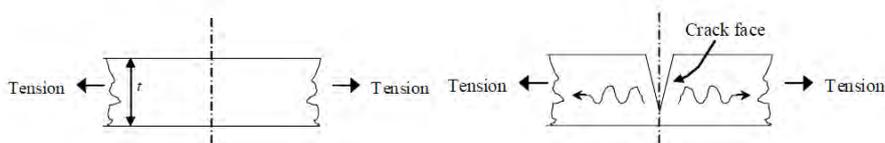


Figura 3. Condizioni di carico e propagazione della cricca

La struttura viene prima caricata con una forza di trazione agli estremi, successivamente al tempo $t = 1\text{ s}$ i nodi nella posizione di crescita della cricca vengono rilasciati causando l'emissione dell'onda. Il modello è costruito con elementi solidi, particolare attenzione si è posta alla scelta della dimensione dell'elemento e allo step temporale utilizzato per catturare il fenomeno dell'emissione acustica.

La frequenza massima del problema dinamico determina sia lo step temporale di integrazione che la dimensione dell'elemento [11]. Per ottenere tali informazioni di solito si ricorre alla trasformata di Fourier (FT). In questo studio i valori sono quelli raccomandati in altri lavori [12] e successivamente verificati. La dimensione dell'elemento utilizzata è pari a $b_e = 1.17\text{ mm}$, mentre lo step temporale $\Delta t = 9.3e^{-8}\text{ s}$. In Figura 4 sono riportati gli andamenti del segnale di spostamento longitudinale della piastra (direzione y).

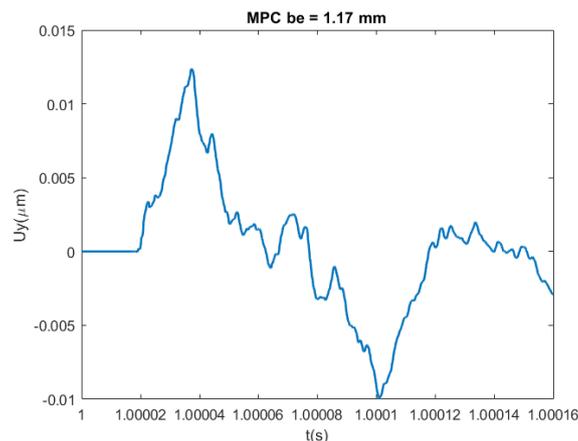


Figura 4. Segnale di spostamento in direzione y

Il contenuto in frequenza dei segnali ottenuti è ottenuto attraverso l'utilizzo della Fast Fourier Transform (FFT). I risultati ottenuti sono riportati in Figura 5.

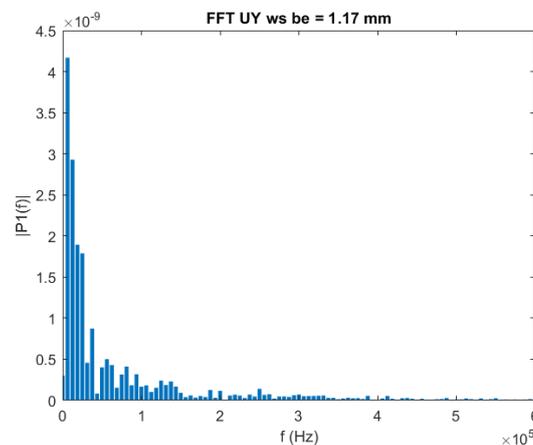


Figura 5. FFT spostamento in direzione y

Dal grafico in Figura 5, si osserva come le frequenze del problema dinamico varino nell'intervallo $[0-150\text{ kHz}]$ circa. In Figura 6 sono riportate le lunghezze d'onda e le velocità di gruppo in funzione della frequenza, di onde Lamb che propagano all'interno di una piastra con le stesse dimensioni considerate per il modello numerico.

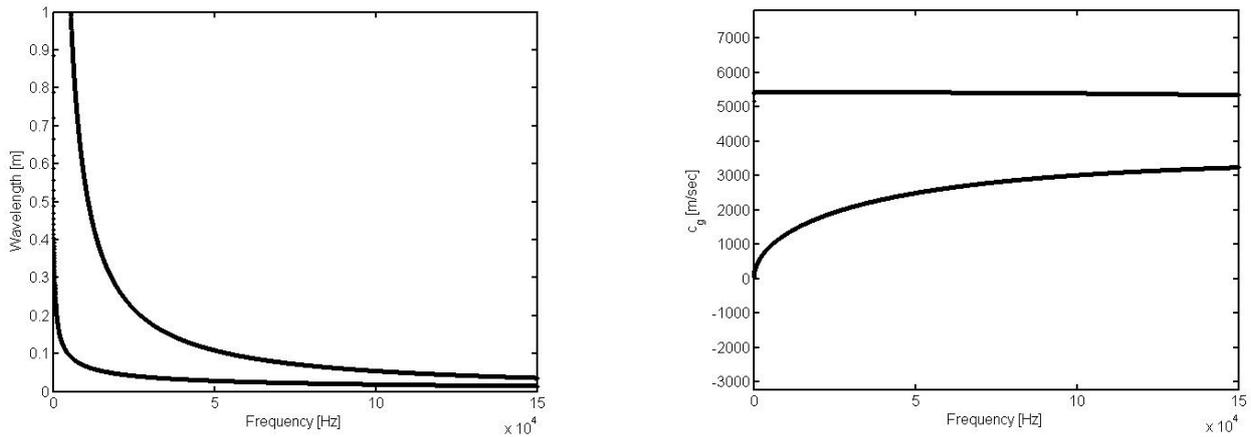


Figura 6. Lunghezze d'onda e velocità di gruppo per la geometria considerata.

La lunghezza minima d'onda risulta essere pari a $\lambda_{min} = 1.167$ cm. La dimensione dell'elemento deve essere minore di tale valore, in differenti lavori sono raccomandati almeno 10 nodi per lunghezza d'onda [9]. La velocità di gruppo nel modello FEM è pari a $c_{FEM} = 5518$ m/s, mentre quella calcolata con il metodo semi analitico vale $c_{group} = 5439$ m/s.

$$\frac{\lambda_{min}}{b_e} = 9.974 \quad (5)$$

$$\Delta t = \frac{CFL b_e}{c_l} = 9.72e^{-8} \text{ s} \quad (6)$$

$$c_{\%} = \frac{c_{FEM} - c_{group}}{c_{group}} 100 = 1.45\% \quad (7)$$

dove con $CFL = 0.5$ si intende il numero di Courant. Dai risultati ottenuti si capisce come la discretizzazione della mesh sia adeguata e come lo step temporale sia in grado di catturare il fenomeno della propagazione. La velocità c_{group} riportata è quella relativa al modo S_0 , confrontandola con quella ottenuta numericamente, si nota come siano in buon accordo, con un errore minore del 2%.

2.2. Piastra con cricca di bordo materiale elasto-plastico

Con l'obiettivo di valutare la forza necessaria per l'avanzamento della cricca, il passo successivo di questo studio è stato quello di considerare il materiale costituente la piastra come un materiale elasto-plastico incoerente (acciaio Fe275). I dati caratteristici sono i seguenti:

- Modulo di Young $E = 210$ GPa
- Coefficiente di Poisson $\nu = 0.3$
- Densità $\rho = 7800$ kg/m³
- Modulo tangente $E_t = 8.3$ GPa
- Tensione di snervamento $\sigma_y = 275$ MPa

Come ben noto, l'acciaio è un materiale che esibisce una plasticizzazione se caricato oltre il limite elastico del materiale. Per lo studio della propagazione di difetti all'interno di materiali

con queste caratteristiche, si fa ricorso alla meccanica della frattura elasto-plastica. Nell'ambito di questa teoria, uno degli strumenti più utilizzati è il J-integral:

$$J = \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \int_{\Gamma_0} \left[(w + T)\delta_{li} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_l} \right] n_i d\Gamma \tag{8}$$

J può essere interpretato come un analogo plastico del fattore di intensità delle sollecitazioni (K) utilizzato nella meccanica della frattura elastica lineare, ovvero possiamo utilizzare un criterio come $J > G_{IC}$ come criterio di crescita della cricca [13]. Il valore di G_{IC} per materiali che plasticizzano dipende dalla lunghezza iniziale della cricca e dal grado di plasticizzazione. Tale dipendenza può essere espressa nel seguente modo [14]:

$$G_{IC} = G_{fr} \delta a \tag{9}$$

La costante di proporzionalità G_{fr} è un parametro relativo alla deformazione dell'apice della fessura ed è meno sensibile alla dissipazione plastica globale. Il calcolo della forza necessaria alla propagazione di δa è di tipo iterativo ed è rappresentato nello schema sottostante [15].

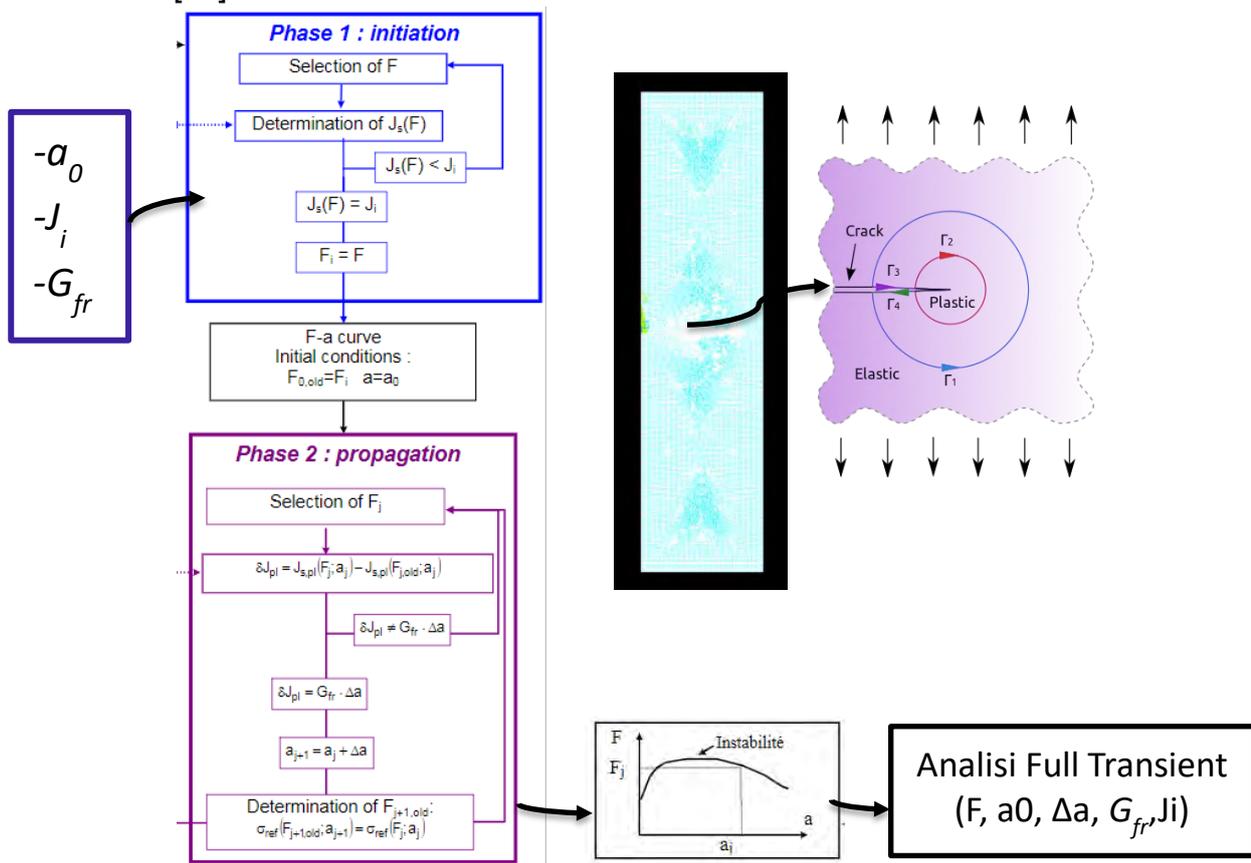


Figura 7. Calcolo iterativo della forza di propagazione della cricca

Nella procedura compare J_i , che rappresenta il valore del J-integral necessario per la propagazione iniziale. Nel nostro caso i dati di partenza sono i seguenti:

- $a_0 = s/3$
- $J_i = 100 \text{ kJ/m}^2$

- $G_{fr} = 90 \text{ MPa}$
- $\delta a = 1 \text{ mm}$

Per il calcolo della forza necessaria alla propagazione del difetto entrano in gioco il calcolo del J-integral sia nel caso plastico che elastico. La componente plastica del J-integral viene calcolata sottraendo la componente elastica corrispondente [15]:

$$J_{pl}(F_i, a_i) = J_{tot}(F_i, a_i) - J_{el}(F_i, a_i) \tag{10}$$

Il calcolo di queste grandezze avviene attraverso opportuni modelli FEM. Nel caso elastico, la mesh utilizzata prevede l'utilizzo di elementi parabolici iso-parametrici con i nodo intermedi in prossimità dell'apice della cricca spostati in *quarter point position*, in modo da replicare in maniera opportuna l'andamento singolare delle tensioni in funzione della distanza dall'apice della cricca. Per valutare la bontà dei modelli FEM, è stato effettuato un confronto con il valore del fattore di intensità degli sforzi K, ottenuto con la soluzione analitica, nel caso di piastra con cricca di bordo e materiale elastico lineare.

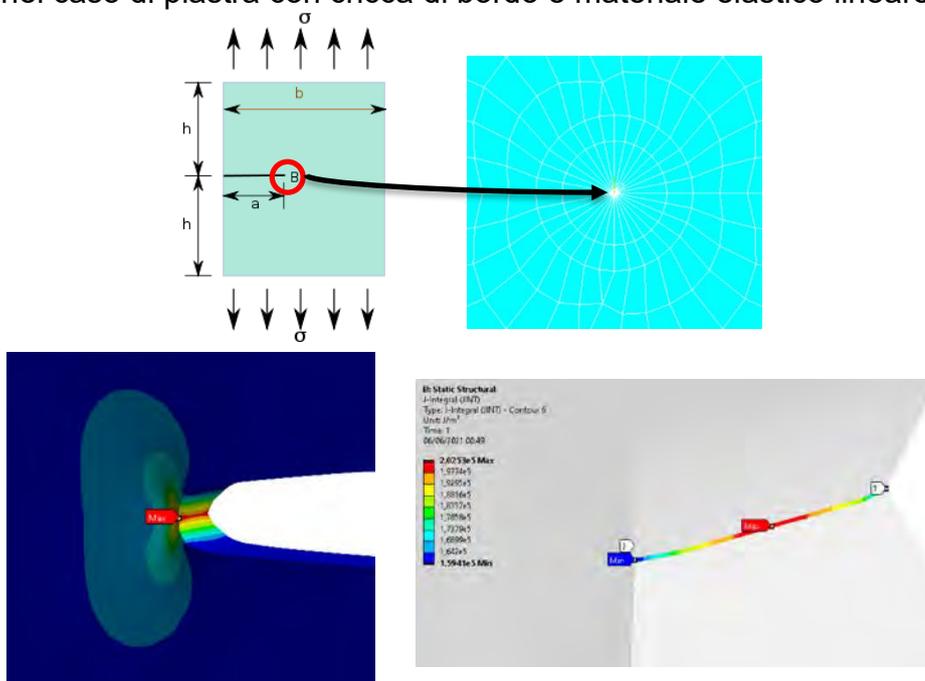


Figura 8. Calcolo dei parametri di frattura nel caso di piastra

I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 1, e confermano la bontà del modello.

	FEM	Analitico	$\delta\%$
K (MPa·m^{1/2})	94.39	92.29	2.27

Tabella 1. Confronto soluzione analitica e numerica

Il calcolo iterativo restituisce il valore della forza necessaria per la propagazione del difetto, di lunghezza iniziale a_0 , di una quantità pari a δa :

- $F = 70.65 \text{ kN}$

In Figura 9 sono riportati l'andamento dello spostamento in direzione longitudinale y e della trasformata di Fourier dello stesso, come effettuato nell'analisi precedente. Si osserva come la plasticizzazione del materiale (circonscritta nell'intorno dell'apice della cricca) non influisca sulla velocità di propagazione del segnale all'interno della piastra.

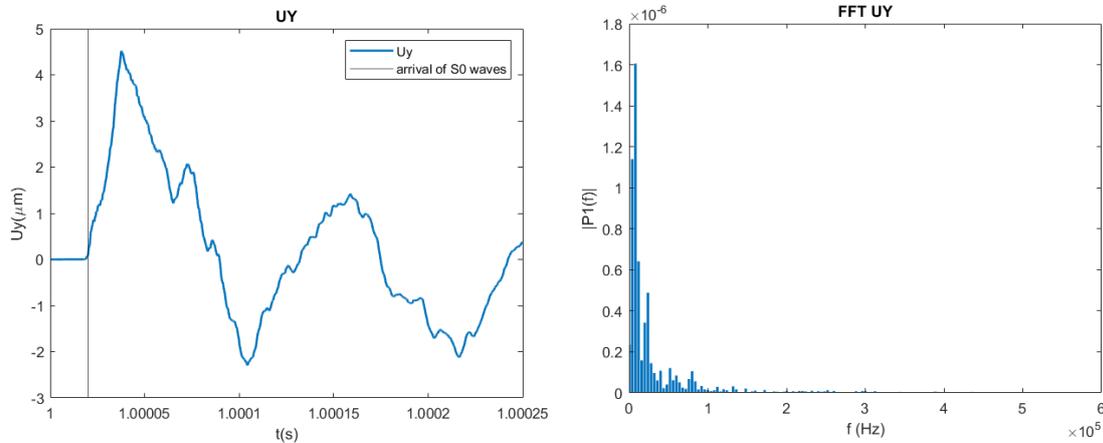


Figura 9. Segnale di spostamento in direzione y e FFT del segnale

2.3. Mantello cilindrico con cricca circonferenziale.

Il successivo caso di studio ha riguardato l'analisi dell'emissione AE in un mantello cilindrico soggetto ad una pressione interna p_i , con una cricca di bordo in direzione circonferenziale. La geometria della cricca è riportata in Figura 10.

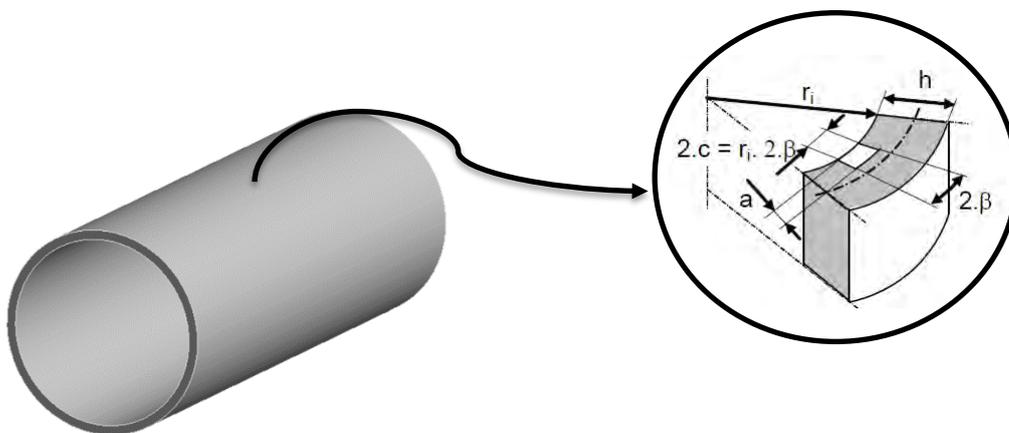


Figura 10. Geometria tubolare con cricca circonferenziale

La geometria e il materiale (acciaio Fe275) sono di seguito riportate:

- raggio interno $R1 = 50$ mm
- spessore $s = 5$ mm
- $2\beta = 5$ mm
- $a = 1$ mm
- Modulo di Young $E = 210$ GPa
- Coefficiente di Poisson $\nu = 0.3$
- Densità $\rho = 7800$ kg/m³

In Figura 11 sono riportati lo spostamento in direzione assiale e la FFT del segnale.

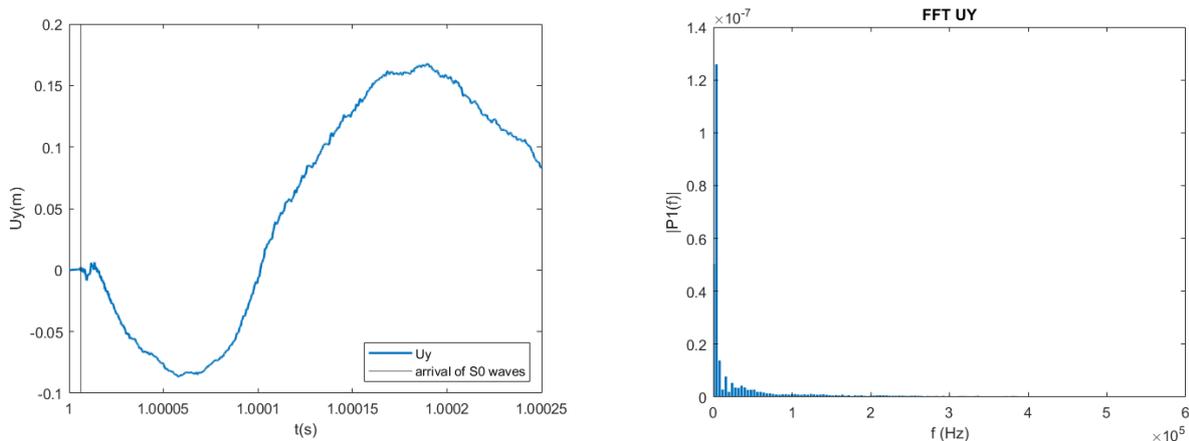


Figura 11. Segnale di spostamento in direzione assiale e FFT del segnale

In Figura 12 sono riportate le velocità di gruppo per la geometria in questione. La velocità di gruppo nel modello FEM è pari a $c_{FEM} = 5500$ m/s, mentre quella calcolata con il metodo semi analitico vale $c_{group} = 5390$ m/s.

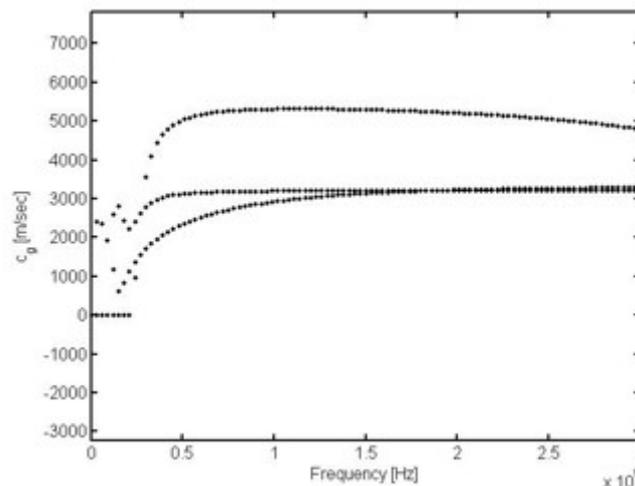


Figura 12. Velocità di gruppo nel caso di geometria cilindrica

$$c_{\%} = \frac{c_{FEM} - c_{group}}{c_{group}} 100 = 2.04\% \quad (11)$$

La velocità c_{group} riportata è quella relativa al modo S0, confrontandola con quella ottenuta numericamente, si nota come siano in buon accordo, con un errore di circa il 2%.

3. Conclusioni

In questo studio la modellazione FEM è stata utilizzata per simulare l'emissione di onde acustiche, causata da un'estensione locale o dalla nascita di un difetto nella struttura. Sono stati considerati due casi: una piastra con cricca di bordo, e il mantello cilindrico di un serbatoio in pressione. L'emissione dell'onda acustica viene misurata attraverso l'acquisizione di segnali di spostamento e deformazione della struttura. I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli semi-analitici presenti in letteratura. L'elaborazione dei segnali, permette di valutare il range di frequenze di interesse per la messa a punto del sistema di sensori necessari per il monitoraggio della struttura, tenendo conto della velocità di propagazione e dell'attenuazione geometrica di tali segnali.

4. Ringraziamenti

Il lavoro è stato sviluppato nell'ambito del progetto di ricerca "Manutenzione intelligente (smart maintenance) di impianti industriali e opere civili mediante tecnologie di monitoraggio 4.0 e approcci prognostici – MAC4PRO", finanziato dal bando BRIC-2018 dell'Istituto Nazionale Assicurazione Infortuni sul Lavoro – Inail.

Bibliografia

- [1] Janapati, V.; Kopsaftopoulos, F.; Li, F.; Lee, S.J.; Chang, F.-K. Damage detection sensitivity characterization of acousto-ultrasound-based structural health monitoring techniques. *Struct. Health Monit.* 2016,
- [2] Prosser, W.H.; Hamstad, M.A.; Gary, J.; O'gallagher, A. Finite Element and Plate Theory Modeling of Acoustic Emission Waveforms. *J. Nondestruct. Eval.* 1999, 18, 83–90.
- [3] Åberg, M. Numerical modeling of acoustic emission in laminated tensile test specimens. *Int. J. Solids Struct.* 2001, 38, 6643–6663.
- [4] Sause, M.G.R.; Horn, S. Simulation of Acoustic Emission in Planar Carbon Fiber Reinforced Plastic Specimens. *J. Nondestruct. Eval.* 2010, 29, 123–142.
- [5] Zelenyak, A.; Hamstad, M.; Sause, M. Modeling of Acoustic Emission Signal Propagation in Waveguides.
- [6] Hamstad, M.A.; O'Gallagher, A.; Gary, J. Modeling of buried monopole and dipole sources of acoustic emission with a finite element technique. *J. Acoust. Emiss.* 1999, 17, 97–110. Rizzo, P., Yu, L.L. and Marzani, A., 2012. *Structural Health Monitoring of Civil Structures: New Methodologies and Field Applications 2012.*
- [7] A. Chiappa, F. Giorgetti, A. Marzani, M. Messina, G. Augugliaro, C. Mennuti, M. E. Biancolini, AIAS International Conference on stress analysis. Comparison on numerical models for Acoustic Emission propagation.
- [8] Lowe, M.S.J., Alleyne, D.N., Cawley, P., 1998. Defect detection in pipes using guided waves. *Ultrasonics* 36, 147-154
- [9] Leckey, C.A.C., Wheeler, K.R., Hafiychuk, V.N., Hafiychuk, H., Timuçin, D.A., 2018. Simulation of guided-wave ultrasound propagation in composite laminates: benchmark comparisons of numerical coded and experiment. *Ultrasonics* 84, 187-200
- [10] Rose, J.L., 2014. *Ultrasonic guided waves in solid media.* Cambridge University Press, New York USA
- [11] A. Chiappa, S. Iakovlev, A. Marzani, F. Giorgetti, C. Groth, S. Porziani, M.E. Biancolini, An analytical benchmark for a 2D problem of elastic wave propagation in a solid, *Engineering Structures*, Volume 229, 2021, 111655, ISSN 0141-0296.
- [12] Bartoli I, Marzani A, Lanza di Scalea F, Viola E. Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section. *J Sound Vib* 2006;295(3):685–707
- [13] Rice, James R. "Mathematical analysis in the mechanics of fracture." *Fracture: an advanced treatise* 2 (1968): 191-311.
- [14] Dhar, S & Marie, Stéphane & Chapuliot, Stéphane. (2008). Determination of critical fracture energy, G_{fr} , from crack tip stretch. *International Journal of Pressure Vessels and Piping - INT J PRESSURE VESSELS PIPING.* 85. 313-321.
- [15] AFCEN code RCCMR- Design and construction rules for mechanical components of nuclear installations.

La digitalizzazione come strumento per l'analisi di rischio e la valutazione dell'affidabilità degli asset. Caso studio sui serbatoi di stoccaggio atmosferici

A. Pette¹, A. Nanni², E. Cartapati², D. Muneroni², S. Alessandri²

¹ Bureau Veritas Nexta

² RAN Innovation, Roma

Sommario

La creazione del modello digitale integrato (più comunemente chiamato “digital twin”) offre notevoli vantaggi nell'analisi, nella valutazione dell'affidabilità degli asset e nella successiva individuazione degli interventi correttivi da adottare.

Grazie al digital twin è possibile integrare tutte le informazioni raccolte mediante le diverse tecnologie presenti sul mercato (laser scanner, droni, robot semoventi per le indagini non distruttive, sensori per l'identificazione dinamica delle strutture etc) e poter costruire in maniera rapida ed efficace un modello per la simulazione dello stato di salute di un asset.

Il lavoro presenta un caso applicativo relativo ad un serbatoio di stoccaggio all'interno di un sito a rischio di incidente rilevante, mostrando come sia possibile attraverso le diverse fasi (rilievo, analisi, valutazione del rischio, individuazione degli interventi correttivi) valutare l'affidabilità di un asset e renderlo più sicuro attraverso l'uso di un modello digitale integrato.

1. Introduzione

Il caso in esame mostra, in particolare, quanto sia utile l'utilizzo della tecnologia laser scanner per una conoscenza approfondita della geometria del serbatoio e come questi dati, correlati ad altre informazioni acquisite in campo, possano permettere la costruzione del digital twin.

Il laser scanner 3D è uno strumento di rilievo che consente l'acquisizione di milioni di punti sulle superfici dell'apparecchiatura da analizzare garantendo un controllo completo dei difetti geometrici dell'apparecchiatura stessa.

Gli stessi dati possono essere utilizzati anche per analisi volumetriche di dettaglio (taratura fiscale), per la costruzione di modelli digitali parametrici e per la costruzione di modelli FEM accurati, al fine di verificare l'impatto che gli eventuali difetti riscontrati possono avere sulla sicurezza strutturale dell'asset (in condizioni di esercizio, in condizioni sismiche e più in generale in corrispondenza del verificarsi di eventi NaThec).

In quanto segue viene illustrato il lavoro di rilievo ed analisi di un serbatoio di stoccaggio di olio grezzo, in condizioni di esercizio.

2. Descrizione dell'opera

Il serbatoio analizzato è un serbatoio a tetto galleggiante con un diametro interno pari a 55000 mm. Il mantello è costituito da 6 ricorsi di virole con spessore decrescente verso l'alto la cui altezza complessiva è pari a circa 16200 mm. Gli spessori nominali variano dai 22 mm della prima virola fino agli 8,2 mm dell'ultima. Il serbatoio, esternamente coibentato, contiene olio grezzo.

3. Rilievo con laser scanner 3D

Essendo il serbatoio in esercizio non è stato possibile indagare la fascia bassa del mantello (prime due virole circa). La restante porzione di mantello, dalla quota di circa 6500mm alla quota di 16200 mm, è stata rilevata con scansioni effettuate dalla passerella sommitale.

Il rilievo 3D è stato condotto mediante laser scanner effettuando circa 50 scansioni. Una parte di esse sono state effettuate attorno del serbatoio a quota bacino mentre la restante parte delle scansioni sono state effettuate dalla passerella sommitale del serbatoio stesso.

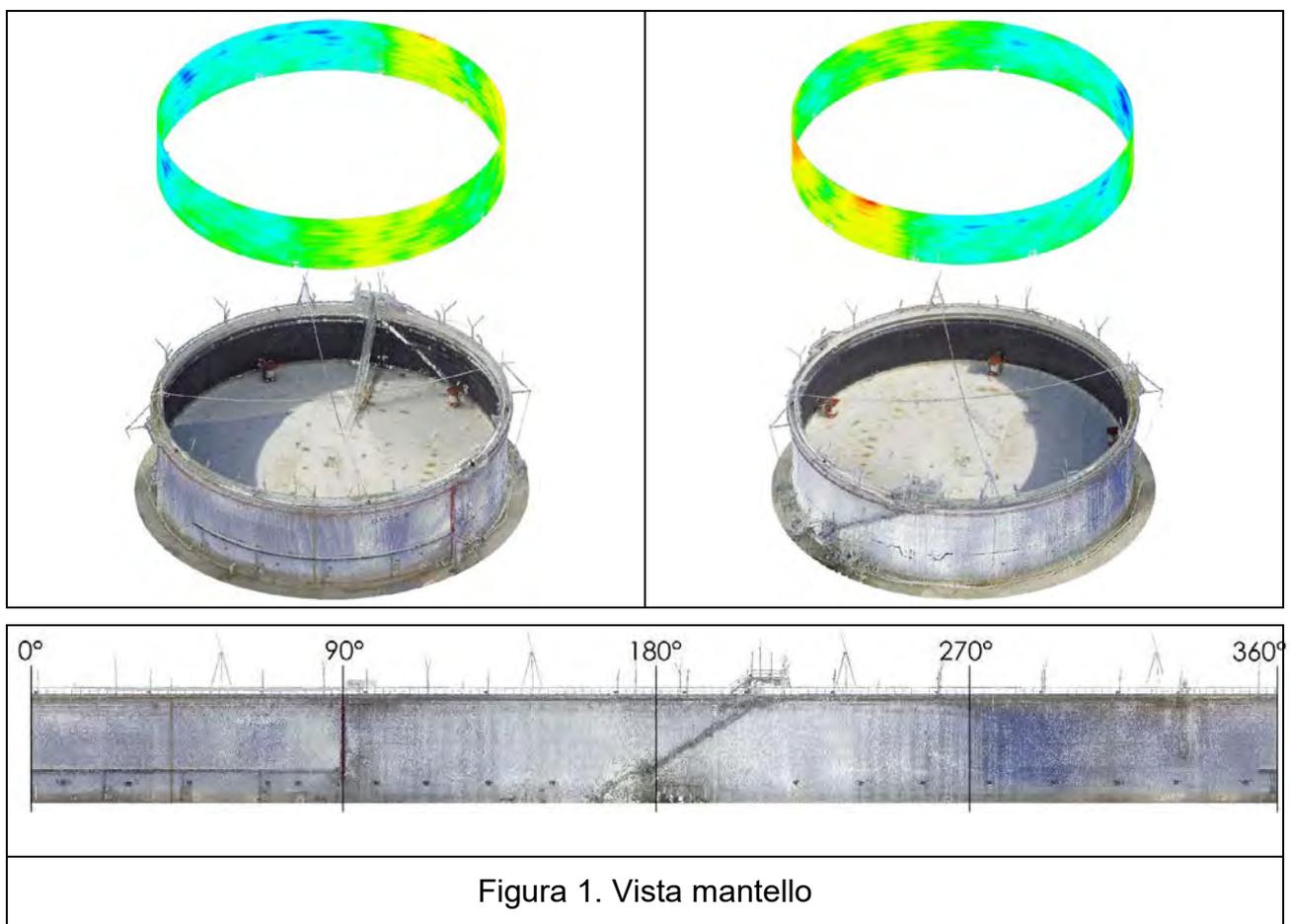
La presenza della coibentazione ha reso necessario la creazione di aperture di dimensioni circa 500mm x 500mm con un passo regolare, ove possibile, di circa 10m, poste ad una distanza di circa 2700mm dalla quota del trincarino a causa della presenza di uno strato isolante non rimovibile incollato al mantello.

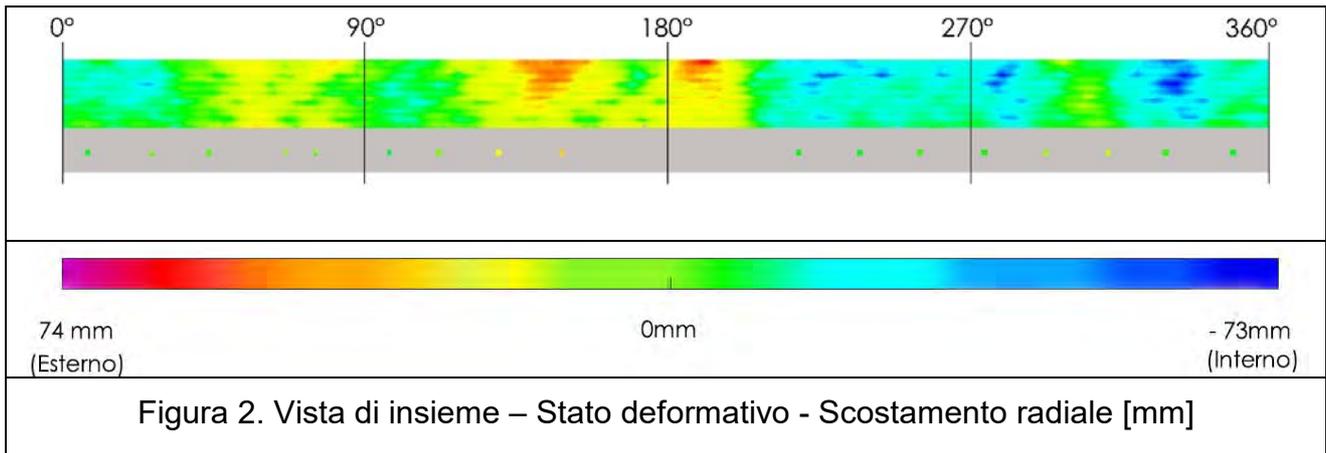
I dati acquisiti sono stati normalizzati al fine di allineare sulla superficie interna i punti rilevati dall'esterno.

Poiché il serbatoio analizzato al momento del rilievo era in esercizio, con altezza del liquido variabile durante il rilievo, ai fini della normalizzazione si è tenuto conto della temperatura dell'aria, della temperatura del liquido contenuto nel serbatoio, dello spessore della virola corrispondente al punto di rilievo, e dell'altezza di riempimento al momento del rilievo, funzione del giorno e dell'orario di ciascun rilievo.

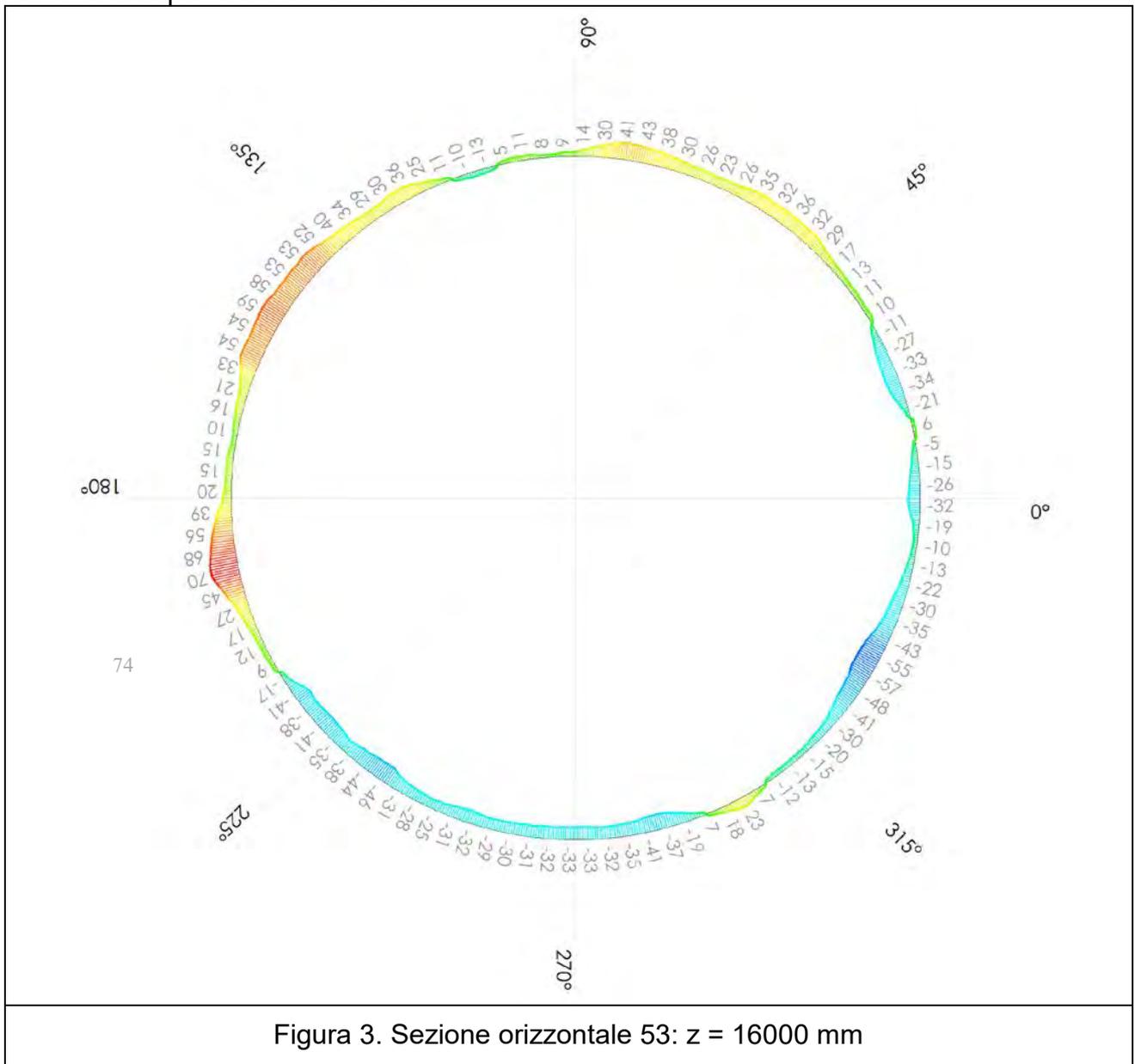
La normalizzazione e l'analisi dei dati acquisiti è avvenuta mediante algoritmi sviluppati dagli autori stessi.

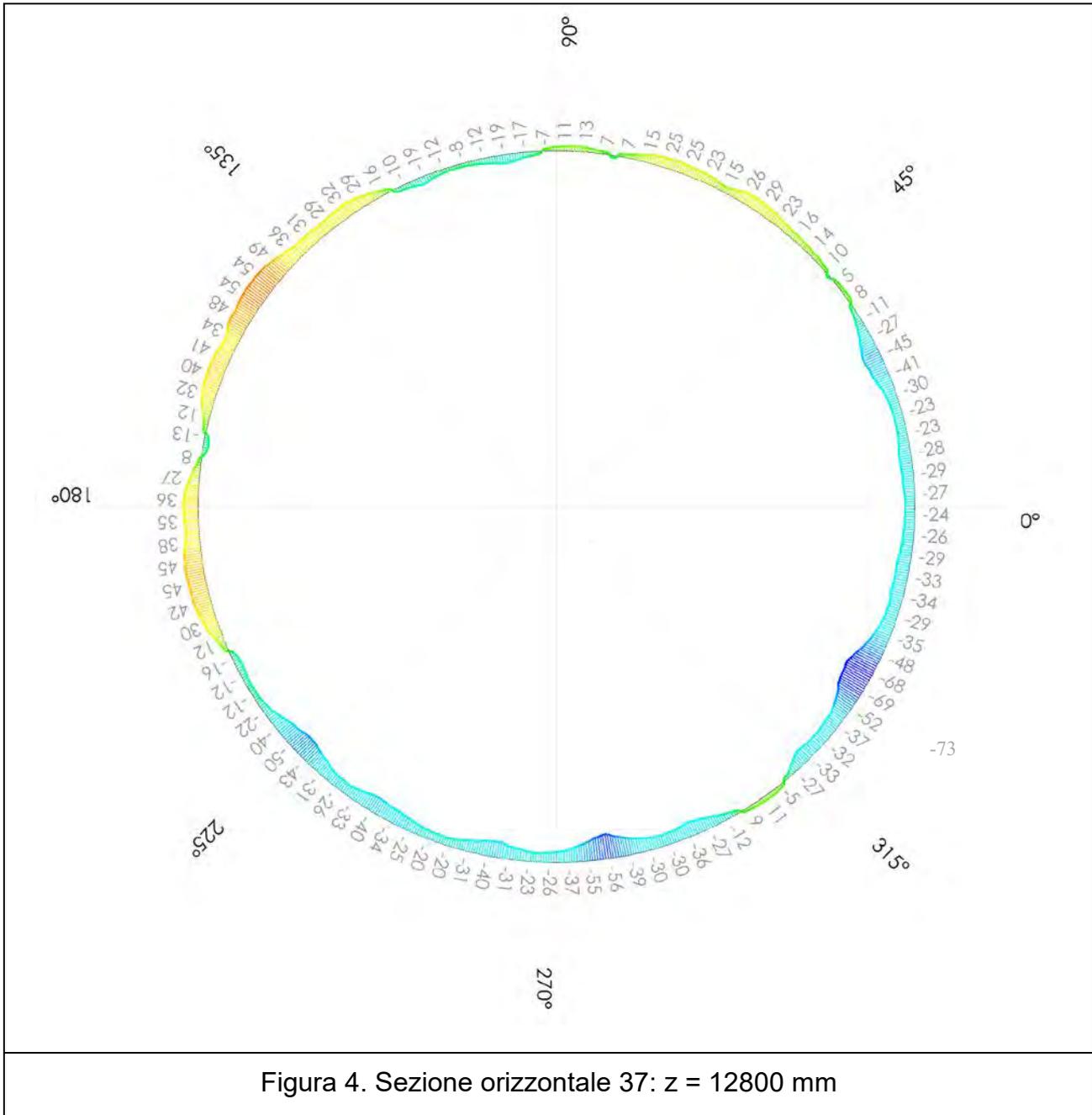
Le figure seguenti illustrano una vista d'insieme del serbatoio (rilievo laser scanner 3D) e lo stato scostamento radiale del mantello.





In Figura 3 ed in Figura 4 sono rappresentate le sezioni orizzontali del serbatoio alle quote in cui si è misurata la massima deformazione del mantello verso l'esterno e verso l'interno. Le verifiche, grazie all'ausilio del laser scanner, sono state eseguite con continuità sull'intera superficie del mantello.





Allo stesso modo sono state eseguite le verifiche di verticalità, in Figura 5 è illustrato l'andamento della deformazione sul serbatoio in una sezione verticale del mantello.

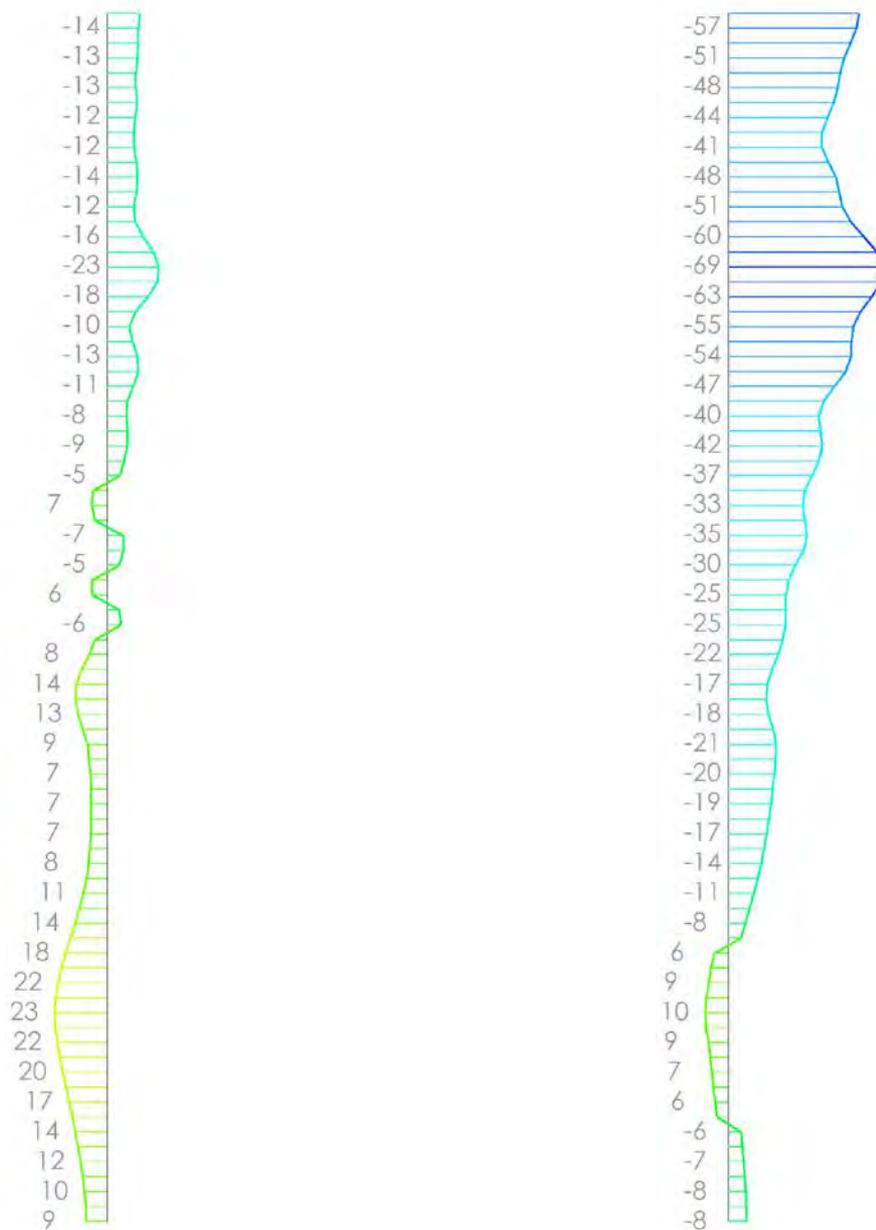


Figura 5. Sezione verticale: 312°(SX) - 330°(DX)

Per studiare in dettaglio il funzionamento del tetto galleggiante si è analizzata, inoltre, con continuità lungo l'altezza del serbatoio, la variazione dello spazio interstiziale tra il limite esterno del tetto galleggiante ed il mantello, tenendo conto anche delle condizioni operative della tenuta.

In Figura 6 è illustrata una delle sezioni rappresentative del sistema tetto-mantello.

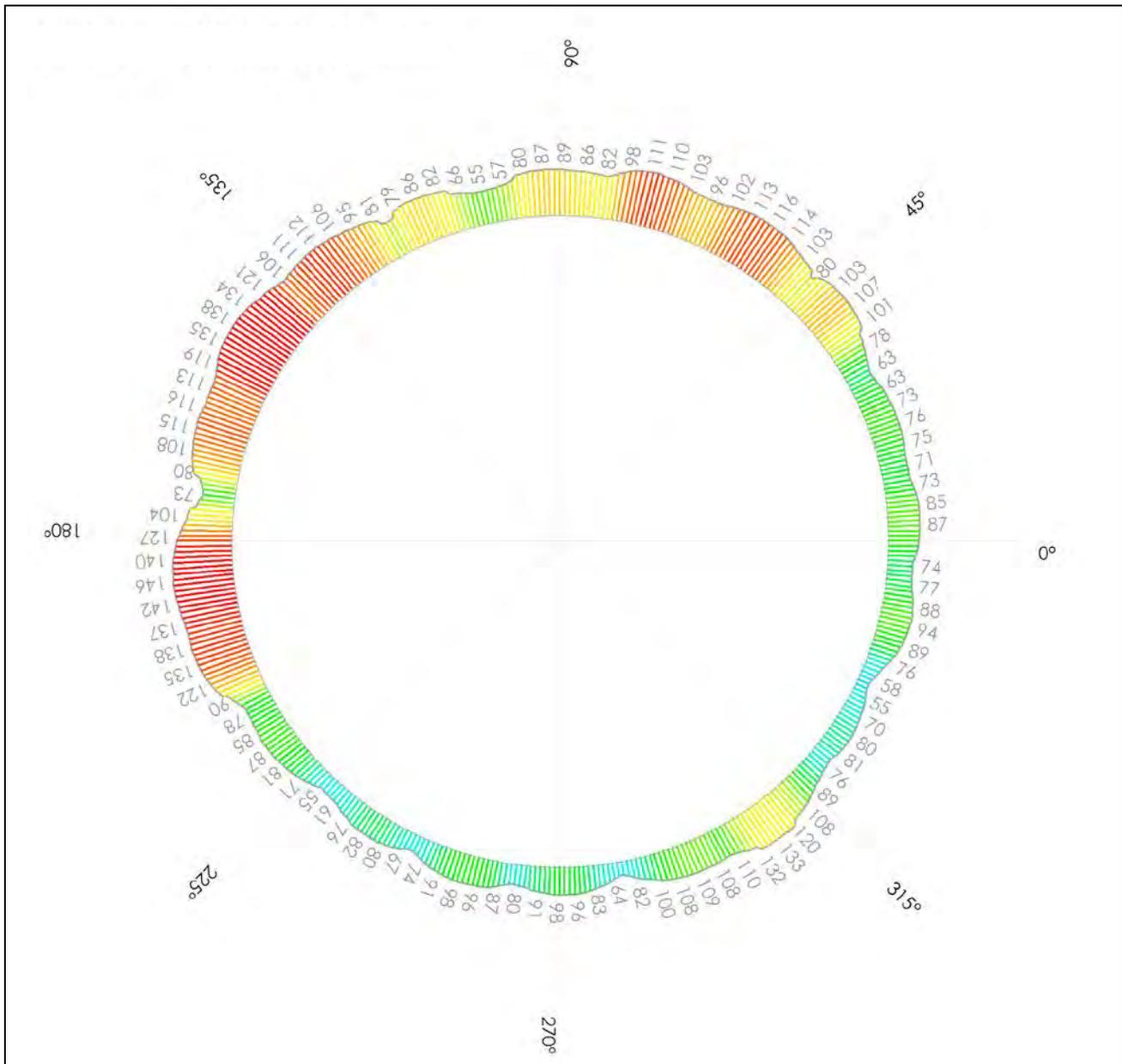


Figura 6. Sezione orizzontale 41: z = 13800 mm

4. Gemello digitale

Il rilievo mediante laser scanner 3D ha consentito anche la costruzione del gemello digitale 3D/BIM, come illustrato in Figura 7.

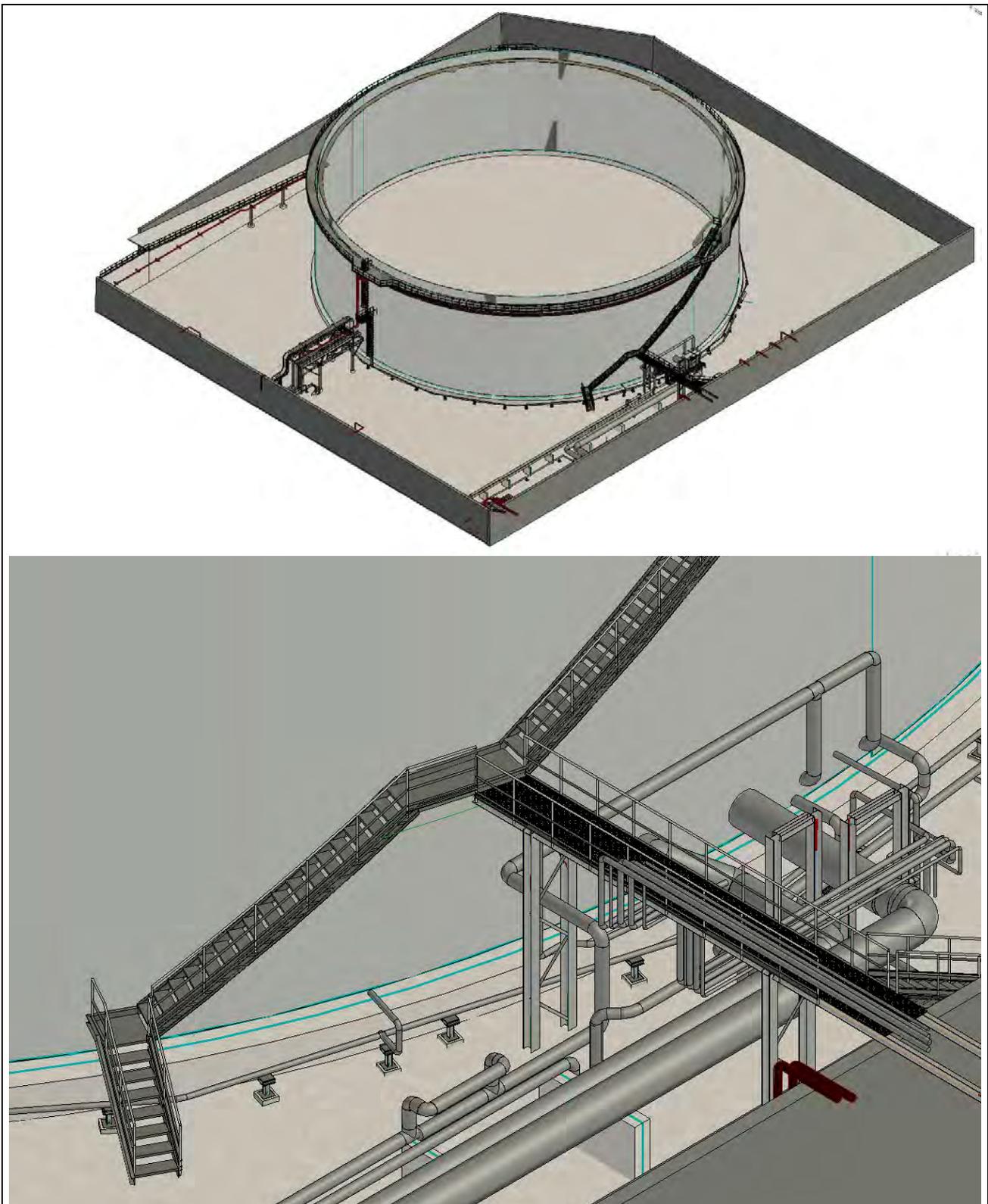


Figura 7. Modello BIM del serbatoio

Dal modello digitale è possibile ricavare un modello FEM per la valutazione della vulnerabilità dell'asset rispetto ad azioni statiche o dinamiche. Questa modalità di rilievo consente di tenere conto della geometria reale dell'asset, considerando sia lo stato deformativo che l'eventuale stato corrosivo. In Figura 8 è rappresentato, a titolo esemplificativo, il modello FEM di un serbatoio costruito seguendo lo stato deformativo rilevato (le deformazioni del mantello del serbatoio sono state amplificate per una migliore comprensione del lettore).

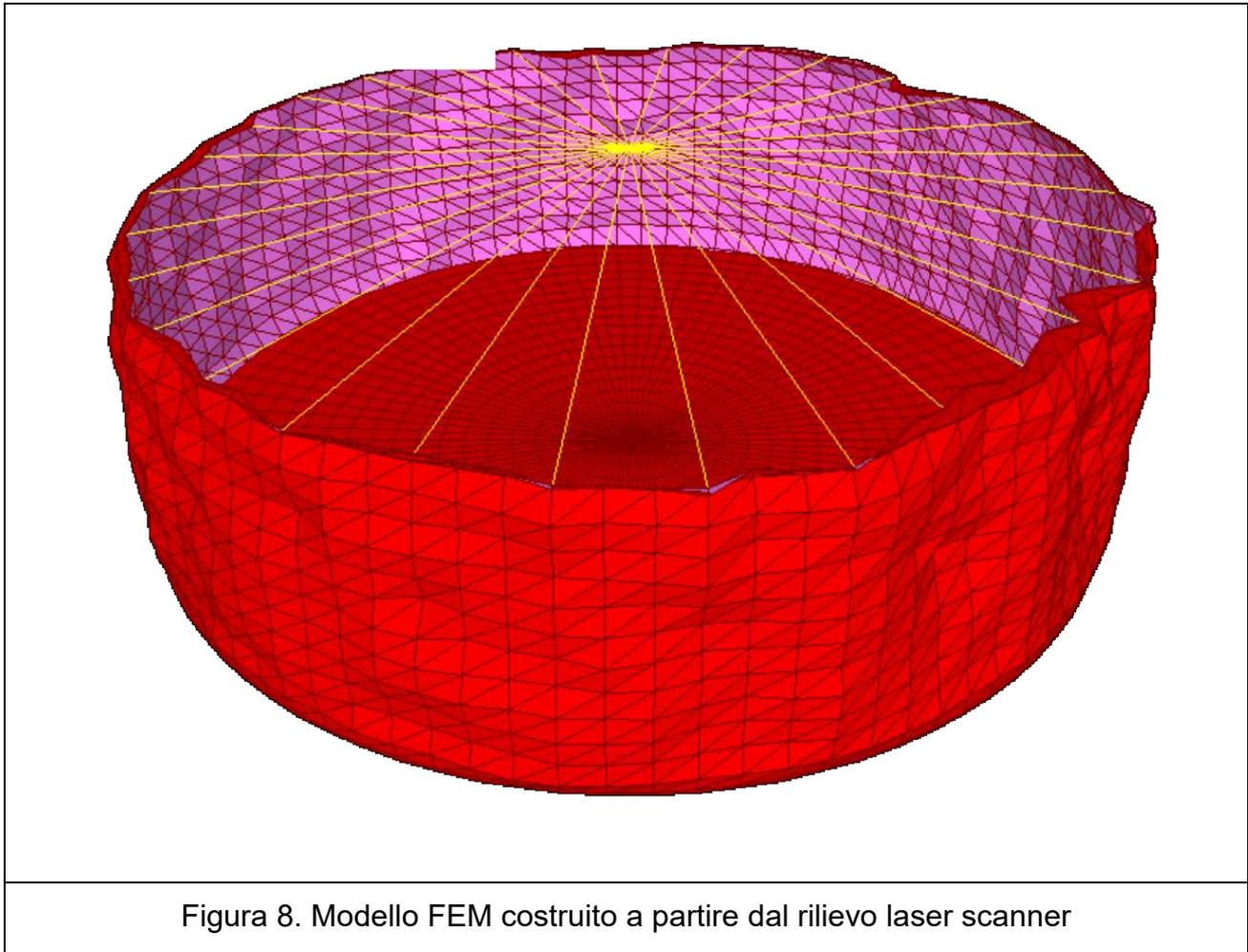


Figura 8. Modello FEM costruito a partire dal rilievo laser scanner

In Figura 9, invece, è mostrata un modello FEM del serbatoio che tiene conto dello stato corrosivo. Il rilievo con laser scanner ed il relativo modello BIM sono stati utilizzati per la sostituzione delle virole corrose del serbatoio e la progettazione ed il montaggio della struttura di supporto utilizzata per la manutenzione.

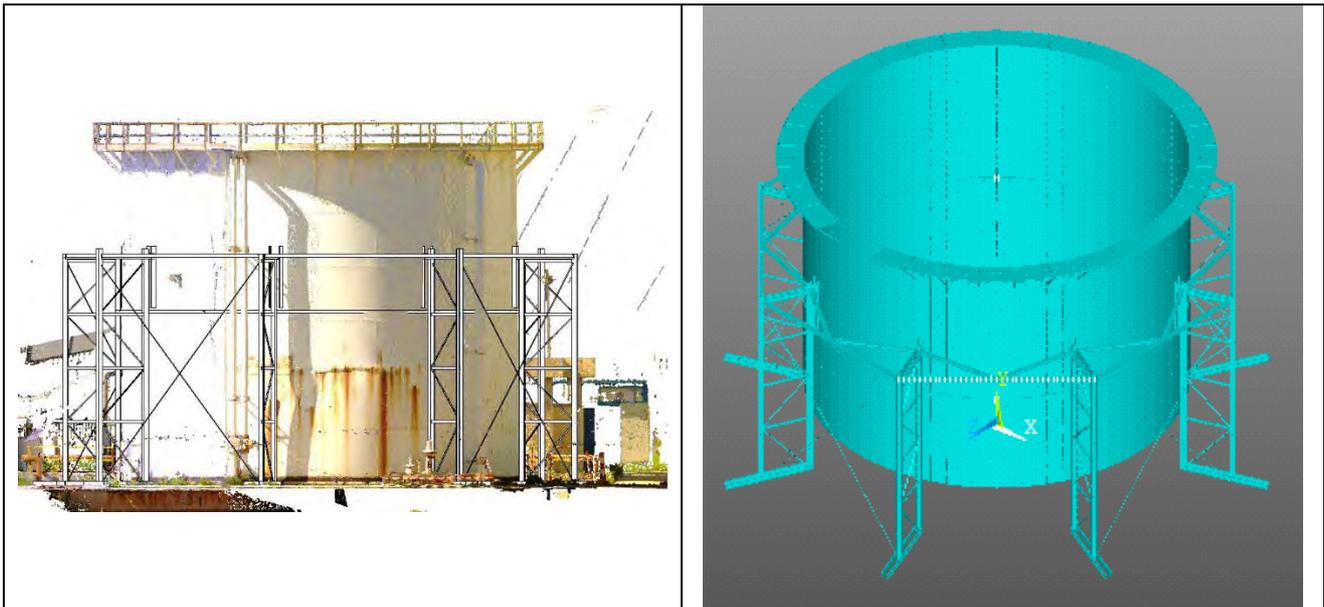


Figura 9. Modello BIM e FEM

5. Analisi di rischio

L'utilizzo del laser scanner 3d e la costruzione del gemello digitale consente di analizzare più facilmente l'apparecchiatura nel contesto in cui è inserita e di valutare le conseguenze di un danno anche sulle apparecchiature circostanti.

Nell'analisi del comportamento dinamico dell'apparecchiatura, ai fini della valutazione dei danni che possono produrre perdite di contenuto, è necessario considerare le reali condizioni di vincolo delle tubazioni collegate all'apparecchiatura in esame ed alle apparecchiature adiacenti.

Le curve di fragilità, che esprimono la probabilità di superamento di un determinato stato limite al variare dell'intensità dell'azione sismica, e che rappresentano il primo passo nella valutazione del rischio, possono essere calcolate direttamente in termini di rilascio di contenuto. Uno degli aspetti principali, in tal senso, è la definizione di una relazione tra comportamento strutturale, danno e rilascio. Tale relazione, che viene definita principalmente sulla base dei risultati di prove sperimentali, viene generalmente espressa in funzione di parametri numerici di risposta, quali rotazioni relative in corrispondenza dei punti di attacco delle tubazioni o stati tensionali sul mantello.

La realizzazione di un modello FEM che tenga conto di queste relazioni può essere pertanto facilitata dall'utilizzo del laser scanner che rileva le reali configurazioni e relazioni spaziali.

Il gemello digitale così realizzato può essere utilizzato anche all'interno di una procedura integrata per la valutazione dell'effetto domino come conseguenza di un evento NaTech.

Ad ogni tipologia di rilascio, che può generarsi da una apparecchiatura come conseguenza di un evento sismico, può seguire un evento, quale incendio od esplosione, che produce a sua volta un effetto fisico (irraggiamento o sovrappressione) sulle apparecchiature circostanti. Diverse catene incidentali possono essere generate dal danno contemporaneo di più apparecchiature, in funzione delle posizioni relative delle singole apparecchiature e degli effetti di schermatura o di interferenza.

Il Metodo di Simulazione Monte Carlo (MCS) consente la generazione automatica di tutti i possibili scenari di danno e catene incidentali e delle relative frequenze di occorrenza (Alessandri et al 2016).

6. Conclusioni

L'esperienza operativa mostra come sia ormai indispensabile sfruttare il modello digitale integrato per migliorare la capacità di controllo, ridurre il rischio di incidenti ed aumentare la sicurezza degli impianti. La gestione della complessità di un impianto industriale e della valutazione del rischio di incidente rilevante, infatti, richiede l'utilizzo di strumenti digitali per l'acquisizione rapida dei dati e la modifica degli stessi in funzione delle modifiche che l'impianto subisce nel tempo; ciascuna apparecchiatura deve essere, infatti, analizzata sia singolarmente sia nel contesto in cui è inserita, soprattutto ai fini del calcolo dell'effetto domino innescato da eventi NaThec.

Il rilievo e l'analisi ripetuta nel tempo, inoltre, consente di valutare l'evoluzione dei fenomeni ed un aggiornamento costante del calcolo del rischio.

7. Bibliografia

[1] API STANDARD 653 (fourth edition, april 2009; addendum 1, august 2010; addendum 2, january 2012): "Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction" e successive modifiche;

[2] API STANDARD 650 (twelfth edition, march 2013; errata, july 2013); "Welded Tanks for Oil Storage" e successive modifiche.

Controlli metallografici innovativi nell'ambito della valutazione di vita consumata per scorrimento viscoso di tubazioni del vapore principale in acciaio grado 91 secondo la UNI/TS 11325

L. Casiraghi, A. Corsi, A. Staffolani, D. Benini, G. Merckling

RTM Breda S.r.l.

Sommario

Le centrali a ciclo combinato costruite nei primi anni 2000 sono prossime o sono già arrivate al completamento delle prime 100000 ore di esercizio, e devono essere oggetto dei controlli previsti per i componenti eserciti in regime di scorrimento viscoso.

In questo lavoro viene analizzato il caso di una centrale a ciclo combinato con due gruppi caldaia e una turbina a vapore. Le tubazioni del vapore surriscaldato e risurriscaldato sono realizzate in acciaio martensitico grado 91, e al momento della valutazione avevano accumulato circa 95000 ore.

Il piano di ispezione, definito anche in base alla UNI 11096, ha previsto i consueti controlli difettoscopici ed esami metallografici del caso, opportunamente intensificati nelle posizioni più critiche identificate dall'analisi preliminare, più esami aggiuntivi necessari per correttamente caratterizzare il grado 91: sono state eseguite repliche estrattive classiche e repliche estrattive a substrato metallico per l'analisi dello stato di precipitazione delle particelle; questi esami, rispetto all'analisi della cavitazione, permettono la valutazione di condizioni di danno intermedie.

Le evidenze sperimentali, unite alle valutazioni di calcolo della frazione di vita consumata, hanno permesso di determinare la vita residua e l'intervallo di ricontrollo opportuno.

1 Introduzione

La valutazione di vita consumata delle attrezzature a pressione esercite in regime di scorrimento viscoso è regolata dalle specifiche tecniche UNI/TS 11325, nelle parti 2 e 4, in combinazione con la norma UNI 11096, che regola la pianificazione dei controlli non distruttivi e metallurgici.

Lo strumento principale per la valutazione del danno incipiente da scorrimento viscoso sono tradizionalmente le repliche metallografiche, per mezzo delle quali l'analisi della cavitazione fornisce una buona valutazione della frazione di vita consumata. Da tempo è noto però che in acciai al 9-12%Cr la cavitazione non è un parametro conservativo per la valutazione del danno da creep, in quanto una cavitazione osservabile al microscopio avviene al ridosso del regime terziario, anche al 90% della frazione di vita consumata. È quindi necessario applicare metodi alternativi, basati ad esempio sull'analisi dei precipitati, per ottenere informazioni utili alla valutazione di vita consumata per condizioni di danno intermedie.

La normativa UNI/TS 11325, nella versione attualmente in vigore, non contiene indicazioni su quali controlli eseguire su tali acciai (indicazioni che saranno invece contenute nella prossima revisione): RTM Breda ha negli ultimi anni sviluppato un metodo di controllo innovativo, basato su una replica estrattiva su supporto metallico – *metalloreplica* – da analizzare al microscopio elettronico (SEM), qui applicato alla valutazione di vita consumata di tubazioni, in parallelo alla replica estrattiva tradizionale [1] [2].

Questo lavoro mostra, nell'ambito della valutazione di vita consumata, l'applicazione dei due metodi (metalloreplica e replica estrattiva convenzionale), l'analisi e il confronto dei risultati ottenuti con i due metodi, con l'obiettivo di determinare la frazione di vita consumata.

2 Dati generali e calcolo preliminare di vita consumata

L'analisi preliminare delle tubazioni, dei materiali e delle condizioni di esercizio ha identificato i tratti di linee effettivamente eserciti in regime di scorrimento viscoso.

Le linee sono costruite con acciaio grado 91 nelle parti più calde (progettate a 570°C) e in acciaio grado 22 e acciaio al carbonio nelle parti progettate a temperature inferiori.

Dati generali di progetto e di processo	
Pressione di progetto della sezione di Alta Pressione Vapore SH	139 barg
Pressione di progetto della sezione di Riscaldamento Vapore RH	39 barg
Temperatura di progetto del vapore all'uscita SH e RH	570°C
Temperatura di esercizio del vapore all'uscita SH e RH	565°C
Codice di costruzione	ASME B31.1

Tabella 1. Dati generali delle tubazioni oggetto della valutazione.

Al momento dell'esecuzione dei controlli, le linee avevano accumulato circa 95000 ore di esercizio e circa 540 avviamenti.

Le sollecitazioni necessarie alla valutazione di vita consumata sono state determinate con un'analisi di linea svolta con il software AutoPipe v12, tramite la quale sono state calcolate le sollecitazioni di esercizio sulle linee, comprendenti diversi pezzi speciali a Y, fucinati, che collegano i rami di tubazioni provenienti dai due GVR al tratto finale che è connesso alla turbina a vapore.

Nella Figura 1 è rappresentata una vista globale del modello in ambiente AutoPipe, con il dettaglio del pezzo a Y e il *contour plot* delle sollecitazioni calcolate.

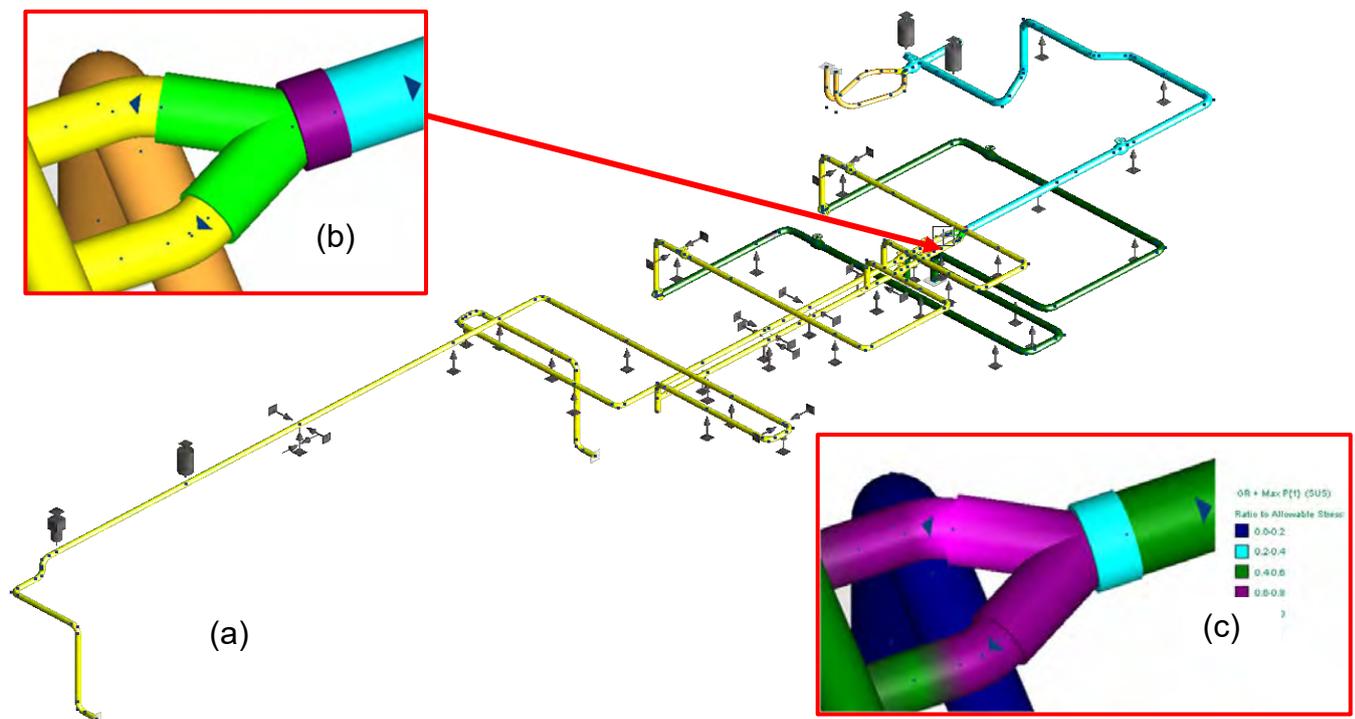


Figura 1. (a) Modello AutoPipe delle linee del vapore surriscaldato e posizione del pezzo a Y, (b) Dettaglio del pezzo a Y oggetto della valutazione, con visualizzazione a colori dei differenti spessori, (c) Contour plot della sollecitazione

Le analisi strutturali sono state integrate da simulazioni numeriche agli Elementi Finiti (FEM) in ambiente MSC Marc: in una prima fase sono stati calcolati i fattori di flessibilità e di intensificazione delle sollecitazioni del pezzo a Y, non previsti nel codice in quanto pezzo fuori standard, poi implementati nel modello AutoPipe v12 per l'analisi di flessibilità.

In una fase successiva delle analisi, essendo il pezzo a Y sede delle maggiori sollecitazioni, queste sono state approfondite con simulazioni a creep: una volta calcolati i carichi di linea in condizione di esercizio, questi sono stati implementati nel modello FEM insieme alla pressione e temperatura di esercizio, e alle curve velocità di scorrimento in funzione di sollecitazione e temperatura (è stato considerato il modello di Norton).

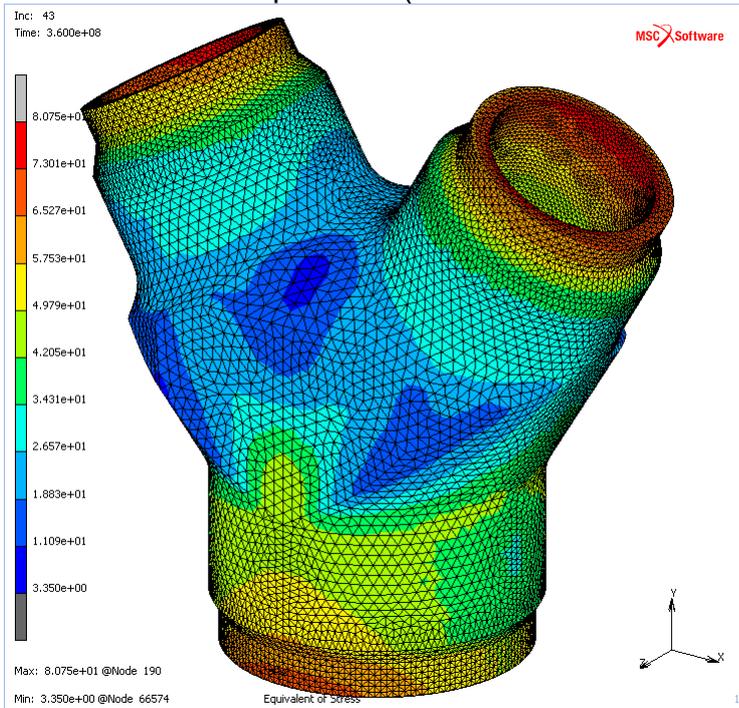


Figura 2. Risultati della simulazione a creep. Vista globale del modello e mappa della sollecitazione stabilizzata in esercizio, dopo 100000h simulate

L'obiettivo di tali simulazioni è, oltre il calcolo della frazione di vita consumata teorica, anche di calcolare la sollecitazione agente nel punto esatto dove saranno poi eseguiti gli esami metallurgici, in quanto sarà poi un parametro necessario nella valutazione della vita consumata (capitolo 3).

Nella Figura 2 è rappresentata la sollecitazione stabilizzata in esercizio (che tiene conto del rilassamento delle tensioni di picco e secondarie) dopo 100000h di esercizio simulate.

La frazione di vita consumata teorica è stata infine calcolata con il metodo della MasterCurve, utilizzando la descrizione parametrica della resistenza a creep del grado 91 disponibile sui datasheet ECCC [3]. Il calcolo della frazione di vita consumata è riassunto in Tabella 2 per 3

posizioni significative sulle tre saldature della Y, corrispondenti alle posizioni che saranno oggetto degli esami metallurgici. Il tempo a rottura teorico è di circa 300000 ore, il che significa una frazione di vita consumata massima di circa il 36%.

Componente	Materiale	$\sigma_{creep,max}$	T	$P_{MH}(\sigma_{creep})$	t_u	t_{es}	$z = t_{es}/t_u$
		MPa	°C	MPa	h	h	-
Branch1	SA182 F91	77.1	565	-0.042	325020	95600	29.5%
Branch2		79.1		-0.042	269830		35.6%
RUN		78.9		-0.042	273873		35.0%

Tabella 2. Riassunto del calcolo di vita consumata del pezzo a Y sulle linee SH

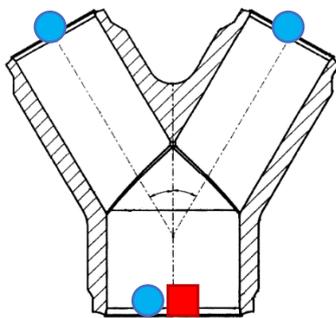
3 Esami metallurgici

Il piano di controllo, preparato secondo la UNI 11096, ha previsto i controlli difettoscopici e metallografici di base (esame magnetico, ultrasonoro, repliche morfologiche convenzionali e durezza), che non hanno rilevato problemi di sorta e non verranno ulteriormente considerati in questa sede, riservando la trattazione agli esami innovativi specifici per il grado 91, precedentemente introdotti.

L'esame innovativo applicato per questo lavoro è chiamato *metalloreplica*, ed è stato sviluppato da RTM Breda negli ultimi anni [2] [4]. Si tratta di una replica estrattiva a substrato metallico, in cui le particelle vengono estratte utilizzando il supporto di una lamina di metallo puro, a differenza delle repliche estrattive classiche, che utilizzano resina o polimero. Brevemente, le differenze principali sono le seguenti:

- la replica estrattiva classica, è eseguita con un supporto di resina o polimero: la replica viene ripreparata (solitamente previo discioglimento del supporto, ma anche, in alcuni approcci, con un ulteriore trasferimento delle particelle ad altro supporto elettricamente conduttivo) e analizzata al TEM (Microscopio Elettronico a Trasmissione), il che permette di analizzare le dimensioni, la cristallografia e la composizione chimica di ciascuna particella ma fa perdere l'informazione sulla posizione della particella nel materiale. Vengono analizzate in genere circa 200 particelle e classificate per tipo e – generalmente – dimensione.
- la metalloreplica viene prelevata con supporto metallico e direttamente analizzata al SEM (Microscopio Elettronico a Scansione). Normalmente l'analisi si limita a misurare le particelle e a produrre diagrammi di frequenza per classi di dimensione; è però possibile osservarle nella loro esatta posizione. Vengono esaminate in genere almeno circa 1000 particelle, numero che garantisce una buona affidabilità statistica (ma nel campione possono esserne presenti parecchie migliaia, con la possibilità di estendere o riprendere i conteggi, se utile o necessario).

Lo studio presente si è concentrato principalmente sul pezzo a Y, per il quale sono calcolate le massime frazioni di vita consumata e di cui sono state esaminate tutte le saldature, ognuna in tutte le caratteristiche 5 zone.



- metalloreplica
- estrattiva

Figura 3. Schema delle posizioni di prelievo

Nella Figura 3 sono rappresentate le posizioni di prelievo delle metallorepliche e dell'unica replica estrattiva; sulla saldatura del *run* è stata eseguita, in posizione immediatamente adiacente alla metalloreplica, una replica estrattiva classica, successivamente analizzata al TEM, per confrontare i risultati ottenibili con i due metodi.

Nella Figura 4(a) viene mostrata l'attrezzatura per il prelievo in campo di una metalloreplica, costituita da una pressa opportunamente fissata al componente con bracci orientabili e regolabili, in modo che il pistone, azionato da una pressione controllata, si avvicini alla superficie perpendicolarmente.

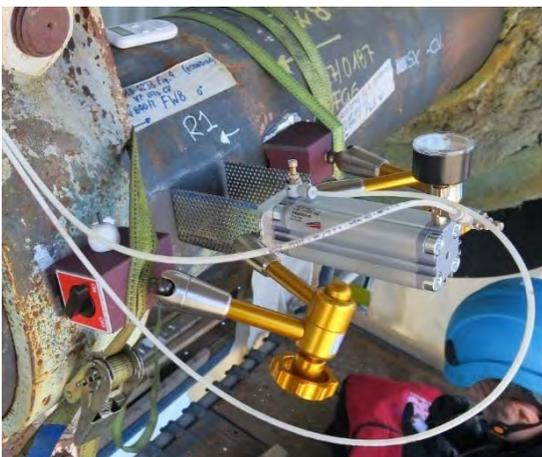
Nella figura Figura 4(b) è invece visibile il campione dopo estrazione, poggiato sul porta-campione e all'interno della capsula protettiva con cui viene poi portato al laboratorio per le analisi.

Sorvolando sui risultati dei controlli difettoscopici e spessimetrici, che non hanno mostrato problematiche di rilievo (nessun difetto e spessori nei limiti a disegno), andiamo a discutere delle evidenze metallografiche e microstrutturali.

Le repliche metallografiche, mostrano per le posizioni in grado 91 la tipica microstruttura composta da martensite rinvenuta, come atteso. Le durezza, misurate con strumento portatile, sono superiori al limite minimo di 190±200HB normalmente considerato per il

materiale base di nuova fornitura. Non è infine presente cavitazione: tutte le posizioni di replicazione hanno una condizione classificata come di livello 1/A secondo gli usuali schemi di classificazione basati sulla scala di Neubauer (ECCC [5], UNI [6]).

Essendo assodato che il criterio della cavitazione (e quindi la scala Neubauer) non è conservativo per la caratterizzazione di condizioni di danno da creep intermedio nell'acciaio grado 91, andiamo ora a illustrare la valutazione dei risultati delle metallorepliche, e della replica estrattiva, comparando i valori di frazione di vita consumata valutabili attraverso i due metodi.



(a)



(b)

Figura 4. Metalloreplica: (a) attrezzatura pneumatica per il prelievo della metalloreplica (b) campione dopo estrazione, nel suo portacampione

3.1 Analisi delle metallorepliche

Illustriamo brevemente il procedimento di analisi delle metallorepliche, dalla definizione di una curva di riferimento e alla valutazione di un componente reale

Nella Figura 5 sono riportate due immagini di una metalloreplica analizzata al SEM, a due ingrandimenti diversi, in cui sono visibili le particelle. Un aspetto secondario ma interessante è che oltre alle particelle, grazie alla grande malleabilità del substrato metallico della metalloreplica, rimane impressa sul campione anche la microstruttura e sub-microstruttura del materiale: questa è, grazie poi all'elevata conduttività del materiale, osservabile ad alto e basso ingrandimento, con il vantaggio di poter osservare le particelle presenti nella loro vera posizione nella matrice (cosa possibile con una replica estrattiva solo dopo doratura e non a questi ingrandimenti).

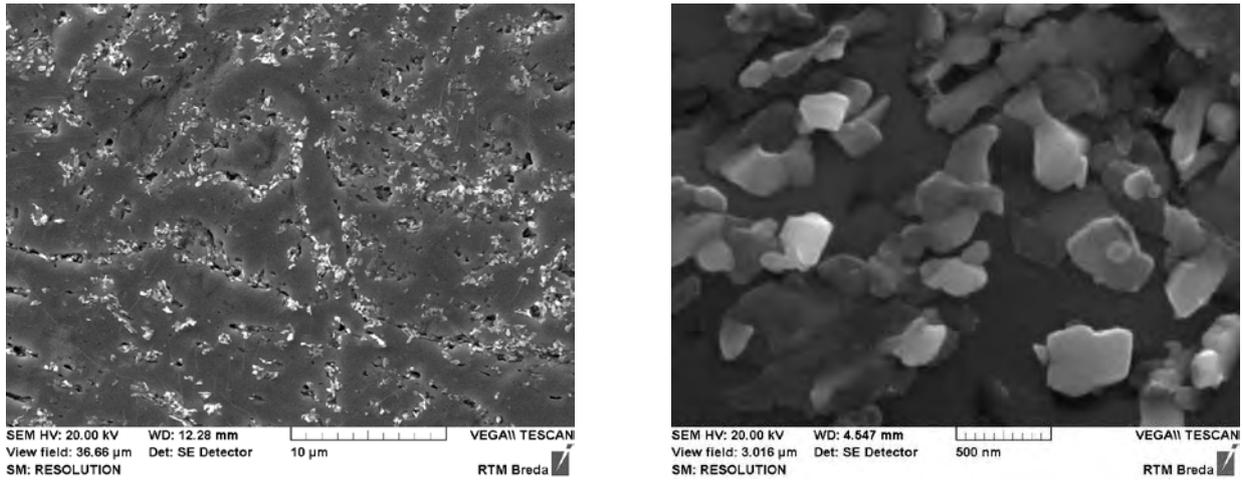


Figura 5. Immagine di una metalloreplica al SEM, a basso e alto ingrandimento. sono visibili le particelle, chiare su sfondo scuro.

L'analisi di una posizione d'esame prevede il conteggio e la classificazione per dimensione delle particelle presenti: in Figura 6 sono riportate le curve di distribuzione della dimensione delle particelle eseguite su una provetta di creep interrotta ad intervalli prefissati, corrispondenti a frazioni di vita consumata nota: la curva di distribuzione della dimensione delle particelle ha generalmente un andamento log-normale, di cui per interpolazione possono essere determinati i parametri. Si osserva che la curva del materiale non esercito (curva verde in Figura 6) mostra un valore massimo in corrispondenza delle classi minori (particelle più piccole) e un andamento via via discendente andando verso i diametri maggiori; l'esposizione allo scorrimento fa abbassare e traslare verso destra il picco, con il progredire del danno, e fa nascere picchi secondari a dimensioni intermedie. Tali curve di distribuzione possono essere quindi analizzate definendo una curva di riferimento che correla la frazione di vita consumata (nota, per ogni interruzione) con

- i parametri della curva log-normale interpolante
- la dimensione media dell'80% delle particelle
- la quantità di particelle presenti in un determinato intervallo di dimensione.

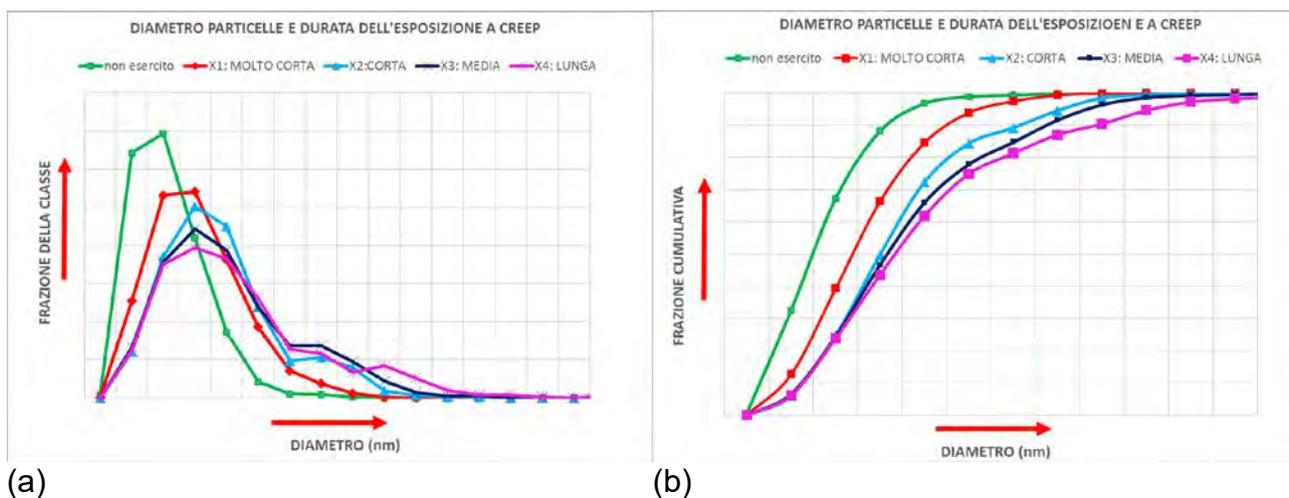


Figura 6. Effetto dell'esposizione a creep sulla dimensione delle particelle, misurato da prove interrotte su materiale base. (a) Curva di distribuzione. (b) Curva cumulativa

Per ciascuna delle 5 zone delle tre saldature qui analizzate, sono state contate le particelle presenti e classificate per dimensione: la Figura 7 dà un esempio delle curve di classificazione costruite, in una delle tre saldature esaminate.

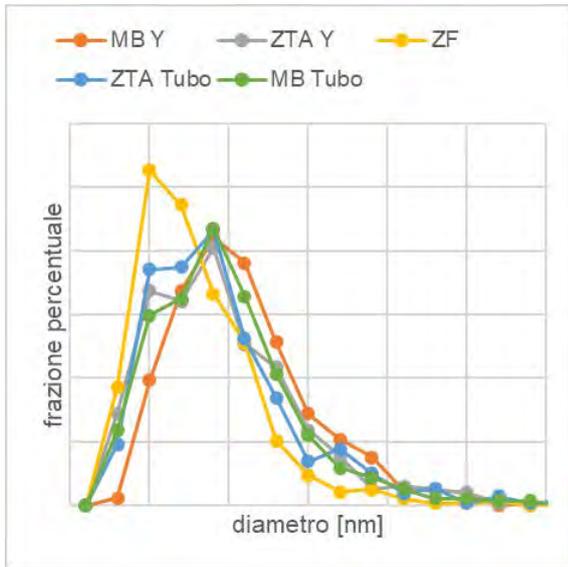


Figura 7. Classificazione del diametro delle particelle analizzate con metalloreplica in una delle posizioni di esame

L'analisi delle curve, svolta ad un livello semplicemente qualitativo valutandone l'aspetto, suggerisce che come prima cosa la zona fusa è quella che presenta il danno minore, in quanto tra le 5 curve è quella più simile a quella del materiale non esercito, mentre nelle altre posizioni si sta già verificando l'abbassamento del picco e la sua traslazione verso destra.

Inoltre, la curva relativa alla ZTA lato tubo, sembra mostrare il sorgere di un picco secondario sulla destra della campana, il che suggerisce danneggiamento di livello almeno intermedio o comunque peggiore delle altre posizioni su ZTA o materiale base.

L'analisi quantitativa prevede, analogamente a quanto svolto sulle prove interrotte, il conteggio e la classificazione delle particelle presenti sulla metalloreplica, l'interpolazione della curva con funzioni opportune e la determinazione dei

parametri caratteristici della distribuzione, i quali comparati con le curve di riferimento hanno fornito la frazione di vita consumata nelle posizioni analizzate.

3.2 Valutazione delle repliche estrattive

I risultati dell'esame TEM di una replica estrattiva forniscono, per ciascun tipo di particella ($M_{23}C_6$, MX, Laves ecc.) il numero di particelle presenti tra tutte quelle analizzate (o analizzabili – particelle in cluster sono di difficile analizzabilità), la rispettiva frazione percentuale, e la dimensione media. Quest'ultimo dato, in particolare, è stato utilizzato per la stima del tempo a rottura del materiale analizzato [1].

Il metodo utilizzato per la valutazione della vita residua si basa principalmente sull'equazione di Monkman-Grant, che mette in relazione la velocità minima di creep e il tempo a rottura, sull'equazione di Norton-Dorn e su un'equazione di crescita delle particelle. Il tutto viene espresso dalla correlazione di due parametri: PD, parametro che tiene conto della dimensione delle particelle, e PS, parametro che esprime l'aumento della velocità minima di creep (maggiori velocità corrispondono a minori tempi a rottura) secondo le equazioni

$$PD = (T) (20 + \log(D))/100 \quad (1)$$

$$PS = \log(\dot{\epsilon}) = n \log(\sigma) - A \log(t) \quad (2)$$

dove D è il diametro medio delle particelle ($M_{23}C_6$, MX, Laves, ...), T la temperatura assoluta, $\dot{\epsilon}$ è l'aumento della velocità minima di creep con il danno, n l'esponente di Norton, σ è la sollecitazione agente, A una costante e t il tempo a rottura.

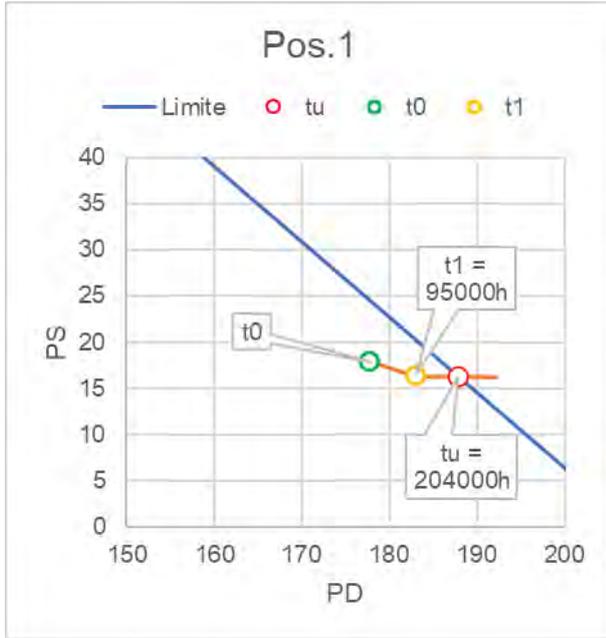


Figura 8. Diagramma PS-PD per il calcolo della frazione di vita consumata mediante repliche estrattive, in una delle posizioni di analisi. t_0 è la condizione iniziale (ipotesi), t_1 la condizione attuale (replica), t_u il tempo a rottura stimato

Dato uno stato definito da tempo trascorso, temperatura, sforzo e dimensione delle particelle, si costruisce per ciascun tipo di particella un diagramma come in Figura 8, dove dal tempo t_0 si ipotizza una crescita parabolica del diametro della particella, fino ad intersecare la linea continua (tracciata sulla base di prove sperimentali).

Il tempo t_u per cui si ha l'intersezione è il tempo totale per cui ci si attende rottura, o quantomeno un degrado della resistenza del materiale tale da compromettere la stabilità del componente, per il materiale non esercito. È possibile costruire un diagramma come quello in Figura 8 e svolgere il calcolo per ciascun tipo di particella ($M_{23}C_6$, MX e Laves): si ottengono ovviamente risultati diversi, a causa delle incertezze dovute alla dispersione e scarsità dei dati. Il risultato considerato per le valutazioni (Tabella 3 al capitolo successivo) è il più conservativo che

si ottiene tra tutti i tre tipi di particella, e solitamente è ottenuto per i carburi MX.

3.3 Risultati e discussione

Le frazioni di vita consumata valutate tramite le metallorepliche, la replica estrattiva e il calcolo teorico, presentano ovviamente valori diversi tra loro, ma mostrano a nostro parere una buona correlazione. Nella Tabella 3 sono riassunti i risultati ottenuti con tutti i diversi metodi applicati, nelle 3 saldature ispezionate sulla Y, analizzate in 5 posizioni (Materiale Base e Zona Termicamente Alterata dai due lati, più la Zona Fusa).

I valori di frazione di vita consumata sperimentali sono abbastanza coerenti con i valori teorici e tra di loro, se si guarda a quanto ottenuto sulla saldatura del *run*. Proprio in questa posizione si ottengono valori molto concordanti sul materiale base in particolare sul lato tubazione.

Il massimo valore in assoluto è calcolato in corrispondenza della ZTA lato tubo, sulla saldatura del *run*, e anche in questo caso con valori molto simili tra i due metodi sperimentali ma con la più alta differenza col valore teorico.

È possibile che un danno del 49÷52% sia una stima forse eccessivamente conservativa? Sicuramente non trova conferma nei valori di durezza misurati nella stessa posizione, i quali non mostravano niente di anomalo o che potesse suggerire un degrado particolarmente veloce (ricordiamo che si tratta della prima valutazione di vita consumata su questo componente).

Per le durezza come per la valutazione quantitativa delle repliche estrattive manca inoltre il punto di riferimento del materiale a nuovo specifico per la posizione di indagine: Il fatto che la durezza, per esempio, sia tuttora "superiore al minimo di norma" non significa per certo che non ci sia stato degrado, perché la durezza "a nuovo" potrebbe essere stata al massimo di norma e il decadimento in esercizio quindi di oltre 50 punti Brinell. Allo stesso modo le

Saldatura	Posizione	Metalloreplica	Estrattiva	Calcolo
Branch 1	MB Y	35%	/	30%
	ZTA Y	24%		
	ZF	1%		
	ZTA tubo	26%		
	MB tubo	18%		
Branch 2	MB Y	35%	/	36%
	ZTA Y	24%		
	ZF	32%		
	ZTA tubo	13%		
	MB tubo	33%		
Run	MB Y	35%	43%	35%
	ZTA Y	24%	47%	
	ZF	6%	28%	
	ZTA tubo	52%	49%	
	MB tubo	44%	47%	

Tabella 3. Comparazione tra le frazioni di vita consumata valutate tramite metallorepliche, replica estrattiva sulla saldatura del *run*, e calcolo teorico

valutazioni delle repliche estrattive con le curve di riferimento hanno bisogno di riferirsi allo stato “di partenza” del materiale nuovo, generalmente completamente ignoto e – soprattutto per ZTA e ZF – sicuramente diverso rispetto a materiali base del tubo. Altre valutazioni tra campioni prelevati da tubo e ZTA nuovi hanno mostrato che lo stato iniziale della ZTA sembrava, valutato con i riferimenti del materiale base, già danneggiato tra l’8 e il 12% (dati interni RTM Breda).

Inoltre i set di curve di riferimento, sia per l’analisi delle metallorepliche, sia per l’analisi delle estrattive, è costituito soprattutto da prove su materiale non saldato. I risultati ottenuti sul materiale base vengono quindi estesi e/o inclusi nella valutazione

delle altre zone della saldatura, assumendo che la modifica termo-meccanica delle particelle in esercizio segua le stesse leggi di quelle del materiale base, assunzione credibile, ma per ora non suffragata da prove sperimentali in modo sufficiente, dato che sono molto scarsi dati numerici quantitativi reperibili in letteratura.

4 Conclusioni

In questo lavoro abbiamo illustrato l’applicazione di esami metallurgici innovativi nell’ambito dell’applicazione della UNI/TS 11325 per la valutazione di vita consumata di componenti realizzati in acciaio di grado 91, eserciti in regime di scorrimento viscoso.

La tecnica applicata è stata sviluppata negli ultimi anni da RTM Breda ed è denominata *metalloreplica*: questa tecnica permette di eseguire una replica estrattiva su supporto metallico, analizzabile al SEM e utilizzabile per la valutazione della vita consumata di componenti soggetti a scorrimento viscoso. La metalloreplica è stata, in questo lavoro, applicata in parallelo alla replica estrattiva classica, per un confronto tra i due metodi. Le frazioni di vita consumata valutata con le due tecniche sperimentali mostrano una buona correlazione tra di loro, e anche con quanto ottenuto con il calcolo teorico.

Se dal lato del prelievo della metalloreplica, in laboratorio e in campo, la tecnica è giunta ad uno stadio abbastanza maturo, dal punto di vista dell’analisi della condizione del materiale è sicuramente necessario estendere la ricerca almeno ai seguenti aspetti:

- studio dei carichi ciclici e dell’interazione con lo scorrimento viscoso;
- ampliamento della base statistica su cui poggiano le curve di riferimento, con lo studio di più colate e dell’influenza delle temperature di tempra, ma soprattutto di rinvenimento, sullo stato di precipitazione iniziale;
- caratterizzazione con prove interrotte di campioni di materiale saldato, con provini di sola zona fusa, di zona termicamente alterata simulata e/o contenenti il giunto completo.

In ogni caso, la valutazione del danno da creep tramite metalloreplica e analisi SEM mostra una buona correlazione sia con metodi sperimentali analoghi, sia con i calcoli teorici, oltre a godere di una relativa facilità di esecuzione.

5 Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico nell'ambito del bando istituito dal Decreto 20 giugno 2013 a valere sul Fondo per la crescita sostenibile, per la realizzazione del progetto di ricerca e sviluppo concernente «Ricerca e sviluppo di una nuova tecnica per la previsione del comportamento meccanico e l'ulteriore esercibilità di materiali metallici da applicare in campo industriale tramite previsione microstrutturale», identificativo 130, CUP: B78C15000150008.

6 Riferimenti

- [1] G. Merckling e L. Casiraghi, «Ipotesi di correlazione quantitativa di risultati microstrutturali con la durata di esposizione per acciai al 9%Cr,» in *Atti del convegno SAFAP 2018*, Bologna, 2018.
- [2] A. Salvo e G. Merckling, «Metallografia non distruttiva innovativa per la previsione della vita residua di materiali metallici,» in *SAFAP 2018*, Bologna, 2018.
- [3] ECCC, *ECCC Data Sheets [Issue 2, Revision 002]*, 2017.
- [4] A. Salvo, A. Staffolani, D. Benini, A. Corsi e G. Merckling, «Residual Life Assessment of Metallic Materials by an Innovative Non-Destructive Metallographic Test,» in *1st Eperc International Conference*, Roma, 2019.
- [5] ECCC, *ECCC RECOMMENDATIONS*, vol. 6 Residual Life Assessment and Microstructure, 2005.
- [6] UNI, *UNI 11374 – Prove non distruttive: "Esame metallografico per replica su attrezzature a pressione soggette a scorrimento viscoso a caldo"*, 2010.
- [7] RTM Breda, «Dati interni».
- [8] UNI, *UNI/TS 11325-2: Procedura di valutazione dell'idoneità all'ulteriore esercizio delle attrezzature e degli insiemi a pressione*, 2013.
- [9] UNI, *UNI/TS 11325-4: Metodi operativi per la valutazione di integrità di attrezzature a pressione operanti in regime di scorrimento viscoso applicabili nell'ambito della procedura di valutazione di cui alla UNI/TS 11325-2*, 2013.
- [10] UNI, *UNI 11096: Controlli sullo stato di integrità strutturale di attrezzature a pressione soggette a scorrimento viscoso a caldo*, 2012.
- [11] G. Merckling e L. Casiraghi, «Microstructural Parameters and Creep Exposure for 9Cr Steels. A Tentative Quantitative Correlation Based on "Metallic" Replication,» in *1stEperc International Conference*, Roma, 2019.

Il rischio di rottura, per eventi sismici, delle tubazioni non intercettabili connesse alla radice dei serbatoi sotto pressione per gpl

P. Addonizio¹, N. Pedicini¹, U. Nisticò², F. Nisticò², L. Ruffo²

¹ Inail - Uot di Napoli

² Studio di Progettazione impianti industriali Safety Company S.n.c. Napoli

Sommario

Il terremoto è una delle calamità naturali più disastrose, temuto sull'intero pianeta ed in particolare in Italia perché è in gran parte ad alta sismicità.

Pertanto tutto il nuovo patrimonio edilizio, compreso quello degli impianti industriali, deve essere realizzato in conformità alle norme sismiche vigenti.

Sul patrimonio edilizio/industriale esistente, secondo le suddette norme, sono previsti altresì interventi differenziati di miglioramento e/o adeguamento.

Negli impianti industriali ed in quelli a rischio d'incidente rilevante i sistemi di contenimento primario, i serbatoi, ed in particolare quelli a pressione, rappresentano una delle più importanti fonti di pericolo.

Le attrezzature accessorie dei serbatoi (valvole, tronchetti di collegamento, tubazioni e accessori di controllo), rappresentano "punti critici" particolarmente esposti alla sollecitazione dell'attrezzatura a cui sono collegate, in caso di evento grave, il cui monitoraggio è fondamentale per salvaguardare il serbatoio stesso.

Particolare importanza rivestono, in questo contesto, i tratti di tubazioni posizionati alla RADICE DEI SERBATOI, sia perché rappresentano punti di discontinuità per la differente sezione e rigidità con il serbatoio, sia perché eventuali rotture improvvise non sono facilmente individuabili.

Nel caso in cui si verifichi un evento sismico grave, le tubazioni di collegamento risponderanno come trave a sezione circolare, originando deformazioni plastiche e/o elastiche secondo tipologia e intensità.

Quindi sono di fondamentale importanza le valutazioni delle possibili fessurazioni/rotture del tratto di tubazione a monte della 1°valvola pneumatica posta sull'aspirazione dei serbatoi, evento a cui è associato il maggiore rischio di un rilascio di GPL.

Lo studio mira all'analisi degli effetti indotti dalle onde sismiche sui serbatoi e sulle tubazioni di un impianto di stoccaggio e imbottigliamento di GPL e in particolare sulle tubazioni alla radice dei serbatoi.

1. Gli impianti industriali a Rischio di Incidente Rilevante

Negli impianti industriali vengono svolte spesso anche attività a Rischio di Incidente Rilevante regolamentate dal D.Lgs 26 giugno 2015, n. 105 che recepisce Direttiva 2012/18/UE.

Tale decreto rappresenta oggi il testo unico delle disposizioni sul controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose, abrogando tutti i precedenti decreti emanati in materia.

Al suo interno sono confluiti i contenuti delle precedenti disposizioni, includendo parametri di valutazione ambientale compresi quelli legati al Rischio Sismico.

Nello specifico, sono stati introdotti:

- Adeguamento al sistema internazionale di classificazione delle sostanze pericolose GHS, recepito nell'UE con il regolamento (CE) n. 1272/2008 (regolamento CLP) relativo a classificazione, etichettatura, imballaggio delle sostanze e miscele, obbligatorio dal 1/6/2015.

- Una ridefinizione delle soglie delle sostanze pericolose;
- Valutazione, eventuale, dell'*effetto domino* tra gli scenari incidentali;
- Valutazione degli scenari incidentali derivanti da eventi naturali meteorologici, geofisici, meteomarinari, ceraunici, e dissesti idrogeologici quali terremoti, inondazioni, etc.;
- Attenta, più dettagliata ed esaustiva “informazione” alla popolazione;

2. Gli stabilimenti di stoccaggio, travaso ed imbottigliamento GPL

Come precedentemente detto, lo studio si propone di analizzare gli effetti indotti dalle onde sismiche sulle tubazioni e serbatoi di un impianto di stoccaggio e imbottigliamento di GPL e in particolare sulle tubazioni alla radice dei serbatoi. Le seguenti immagini, relative a collegamenti tra tratti di tubazione, mostrano in successione la presenza di un giunto dielettrico, una valvola a sfera manuale ed una valvola a sfera con attuatore pneumatico.

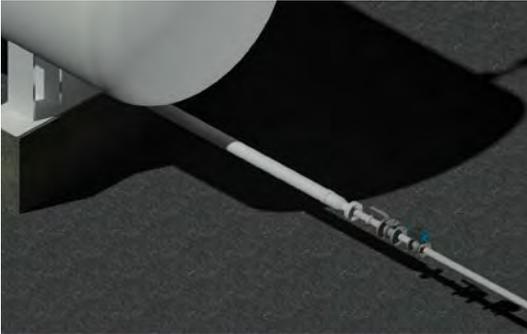


Figura 1. tubo di prelievo

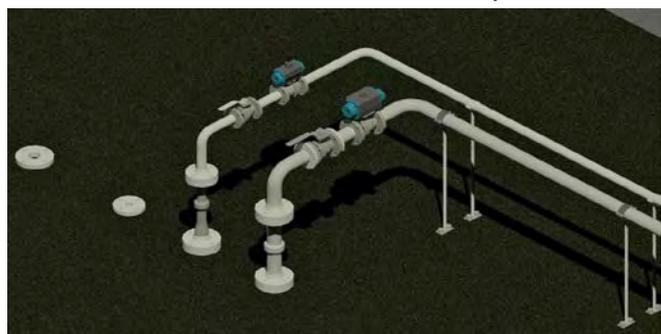


Figura 2. Tubazione fase gas e fase liquida con collegamento diretto su serbatoio.

Possiamo distinguere due casi:

- Tubazione a valle della 1° valvola di intercettazione;
- Tubazione a monte della 1° valvola di intercettazione.

Nel primo caso, in cui sia coinvolta la tubazione a valle della 1° valvola pneumatica, avendo la possibilità di sezionamento del tratto di tubazione, l'intervento su di essa si mostra “più facile”.

Nel secondo caso si comprende la gravità dello scenario in quanto il gas contenuto nel serbatoio, non essendo intercettabile, viene rilasciato in atmosfera causando gravi conseguenze per l'uomo e per l'ambiente circostante. Si tratta in particolare delle tubazioni di collegamento fra i serbatoi di stoccaggio e le macchine di movimentazione, pompe e compressori per GPL, che rappresentano una parte fondamentale del ciclo di lavorazione in un deposito di GPL. Diventa dunque necessario prevenire le eventuali cause di rottura.

Si deve distinguere fra le cause di una rottura occorsa in seguito ad un incidente casuale, generalmente localizzato in un punto specifico, da quelle, molto più severe, prodotte da un sisma. Queste ultime, infatti, tendenzialmente riguardano più punti dello stesso impianto, compromettendo spesso i sistemi di sicurezza e creando effetti molto più gravosi, anche letali.

Possiamo analizzare due casi specifici:

- struttura ex novo;
- struttura esistente.

Nel caso di struttura ex novo occorre eseguire il calcolo della struttura, sulla base di un adeguato studio sismico e geologico del terreno, prevedendo una platea in cls di opportuno spessore rigidamente collegata alle selle di appoggio dei serbatoi.

I serbatoi dovranno essere muniti di proprie selle metalliche di appoggio diretto, solidali tra loro ed al sistema “basamento-sella”. È opportuno dotare i punti di appoggio del serbatoio con dei dissipatori sismici che hanno lo scopo di ridurre le sollecitazioni indotte dal sisma e trasferite agli elementi superficiali, quali tubazioni e valvole connesse direttamente ai

serbatoi. Il sistema “basamento-sella” deve prevedere un numero di selle adeguato alla lunghezza del serbatoio. Difatti, per un serbatoio di lunghezza inferiore a 15 mt, andranno previste n°2 selle; per lunghezze fino a 25mt è preferibile prevedere n°3 selle. Questo consentirà alla struttura una resistenza monolitica e quindi un migliore comportamento alle sollecitazioni sismiche.

In caso di serbatoi tumulati la tubazione di prelievo del GPL dovrà essere anzitutto dotata di dilatatore termico, il quale svolge anche funzione di smorzamento delle azioni sismiche. Il foro di attraversamento del muro di sostegno del tumulo dovrà essere pari almeno al doppio del diametro della tubazione e riempito con una soluzione di schiuma espansa in modo da consentire, in caso di sisma, movimenti oscillatori e orizzontali tali da assorbire le azioni sismiche.



Figura 3. tubazione di prelievo del GPL di un serbatoio tumulato

I bocchelli di prelievo ed immissione, per evitare strozzature agli stessi, devono essere dotate di giunti di dilatazione, i quali consentono, in caso di sisma, di assorbire le sollecitazioni indotte.

Le tubazioni esterne devono essere predisposte con vincoli flessibili evitando incastri che, con la loro rigidità, possano impedire oscillazioni di tipo sia sussultorio (verticale) che ondulatorio (orizzontale) o entrambi, riducendo di fatto la dissipazione delle sollecitazioni indotte dal sisma.

Nel caso di struttura esistente, in cui le selle non siano collegate tra di loro, si ottiene un adeguamento del sistema “basamento-selle” attraverso un elemento di collegamento trasversale per creare un sistema capace di assorbire le sollecitazioni in modo uniforme. Un adeguamento sismico per le tubazioni si realizza con gli interventi già descritti.

3. Analisi sismica

Dal punto di vista legislativo, la normativa antisismica italiana ha subito nel tempo continui aggiornamenti. Questo ha creato evidenti discrepanze strutturali tra impianti industriali realizzati, ad esempio, prima del 1996, tra il 1996 e il 2003, tra il 2003 e il 2009 e successivamente al 2009. Infatti, dal punto di vista del rischio sismico, i dati di progetto per le costruzioni di strutture antisismiche sono notevolmente diverse e, attualmente, impianti collocati in siti territorialmente omogenei, a seconda del periodo di realizzazione, presentano differenti soluzioni progettuali, differenti metodologie di calcolo e di verifica e differenti quantificazioni dei rischi sismici.

È noto ed evidente che le probabilità di accadimento di un evento sismico incrementino le probabilità del verificarsi di un guasto in condizioni ordinarie.

Per un serbatoio in acciaio per lo stoccaggio di GPL partendo dai dati relativi ad un evento sismico calcolato con il sistema NTC 2008, è possibile determinare questo incremento.

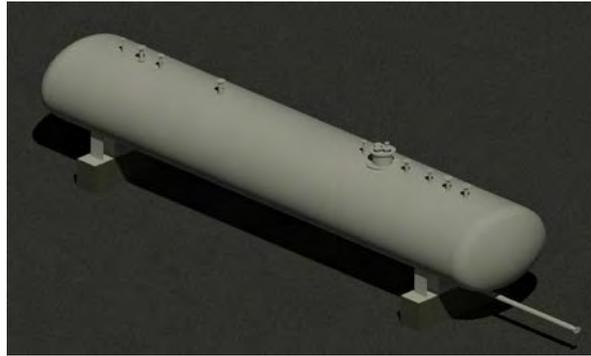


Figura 4. Serbatoio per stoccaggio GPL da 100 m³

Dati serbatoio	Ind.	Valore
Dimetro esterno	D_{ext}	3,00 m
Dimetro interno	D_{int}	2,973 m
Altezza Fasciame	H	3,535 m
Altezza Totale	H_{tot}	4,635 m
Volume interno	V_{int}	100 m ³
Riempimento totale	r max	0,8
Riempimento parziale	r min	0,2
Densità GPL stato liquido	r_l	510 Kg/m ³
Densità GPL stato vapore	r_v	1.87 Kg/m ³

Tabella 1. Dati del Serbatoio per stoccaggio GPL da 100 m³

Il periodo di vibrazione naturale del serbatoio dipenderà, oltre che dalla sua struttura, anche dalla massa complessiva del sistema recipiente-contenuto. Pertanto, presi due livelli di riempimento (massimo e minimo prevedibile), si ha che il corrispondente periodo di vibrazione della struttura sarà:

Grado di Riempimento serbatoio	Periodo di vibrazione T(s)
20%	0.1139
80%	0.1150

Tabella 2. Periodo di vibrazione del serbatoio in funzione del grado di riempimento

Una volta analizzato il comportamento della struttura, bisogna valutare la pericolosità sismica del luogo di installazione dell'impianto, ricavandone i parametri sismici che ne identifichino lo spettro elastico e l'accelerazione spettrale secondo le NTC.

Vita nominale	50 anni
Classe d'uso	IV
Categoria di sottosuolo	B
Categoria topografica	T1
S	1.138
T_B	0.160
T_C	0.480
T_D	2.630
C_C	1.353
S_s	1.138

Tabella 3. Dati di pericolosità del sito e parametri sismici

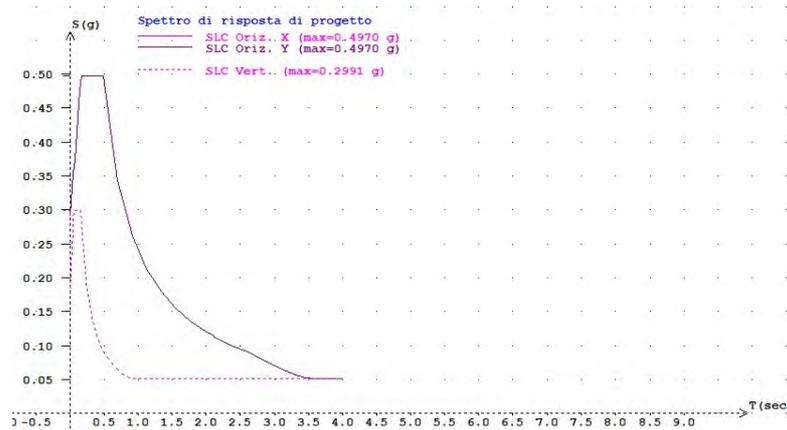


Figura 5. Spettro di risposta elastico

Dopo aver calcolato il tempo di risonanza della struttura relativa al serbatoio di GPL e lo spettro di risposta elastica del suolo, si è ricavata l'accelerazione spettrale di soglia pari a 0.438 g. Fissati in 20 km e 40 km i valori di distanza dalla sorgente del sisma ed una magnitudo pari a 6, è possibile calcolare la probabilità di accadimento del sisma.

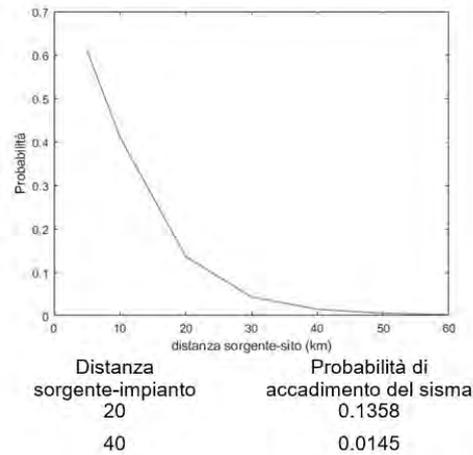


Figura 6. Andamento di una curva probabilistica in funzione della distanza del sito di interesse dalla sorgente del sisma

Partendo dalle frequenze di accadimento degli eventi incidentali caratteristici in fase di funzionamento ordinario, abbiamo che le probabilità dell'evento subiranno un incremento allorché si troveranno in presenza di un generico sisma.

Incidente		Frequenza o/a
Rottura di tubazione principale	F_{rt2}	8,9E-4
Fessurazione di tubazione principale	F_{ft2}	3,4E-3
Rottura di un serbatoio in zona liquida e/o gas	F_{rs}	<1,0E-6
Fessurazione di serbatoio in zona liquida e/o gas	F_{fs}	1,0E-5
Rottura di tubazioni di piccolo diametro (spurgo/prelievo)	F_{rtc}	5,2 E-6
Fessurazione di tubazioni di piccolo diametro (spurgo/prelievo)	F_{ftc}	7,2E-5
Bloccaggio in posizione aperta delle valvole sullo spurgo	F_{bvc}	< 1,0E-6

Tabella 4. Frequenza di occorrenza di eventi incidentali estratto da RdS di uno stabilimento di stoccaggio GPL

Si evince dunque chiaramente l'importanza di una valutazione in fase progettuale degli effetti che un sisma può provocare all'impianto e all'ambiente in generale.

4. Elementi strutturali

4.1 Serbatoio

Uno dei punti nevralgici da considerare è senza dubbio l'elemento di collegamento tra il serbatoio di stoccaggio e le tubazioni. L'attacco del tubo può essere schematizzato come una connessione a rigidità variabile, a seconda del grado di libertà considerato. A tal proposito, per evitare di indebolire la struttura del serbatoio, si rinforza l'intorno dell'innesto del tubo.

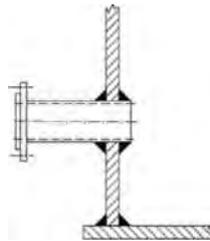


Figura 7. Tronchetto di collegamento al serbatoio

4.2 Tubazioni

Vengono poi analizzate le vibrazioni indotte dal sisma sulle tubazioni e le relative frequenze e i periodi di tali vibrazioni. Si considerano principalmente due differenti configurazioni di tubazioni: quelle "rettilinee" e quelle ad "L", entrambe molto diffuse in un impianto di stoccaggio ed imbottigliamento di GPL.

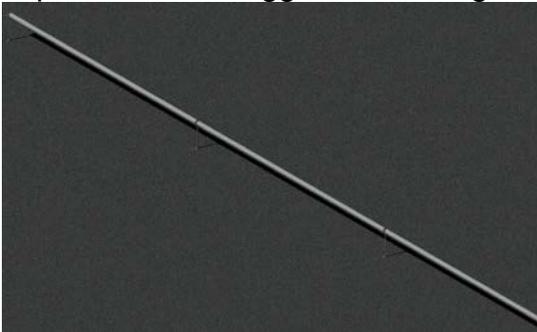


Figura 8. Tubazioni rettilinee

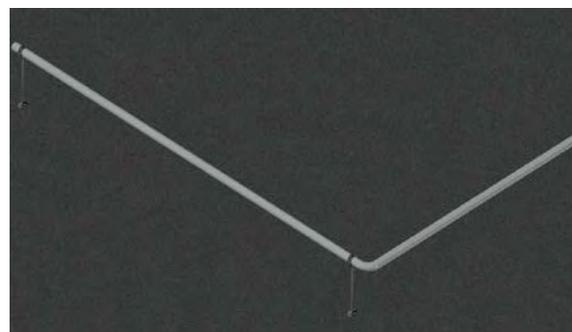


Figura 9. Tubazioni a "L"

5. Dispositivi antisismici per tubazioni

5.1 Isolatore sismico

Per quanto riguarda la protezione sismica delle strutture, negli ultimi anni ha preso sempre più piede la tecnica dell'isolamento sismico. I dissipatori sismici abbattano significativamente le accelerazioni orizzontali rendendo uniforme il moto della sovrastruttura durante il terremoto. Questa è certamente una tecnologia applicabile anche agli impianti industriali.

L'inserimento di isolatori sismici adeguati ad ogni singola situazione, applicati ai serbatoi di stoccaggio di sostanze pericolose, consentirà una progettazione dell'impianto industriale indipendente dal sito di installazione, in quanto si otterrà una notevole attenuazione delle sollecitazioni indotte dal sisma sui serbatoi e conseguentemente sulle tubazioni di connessione. Dal punto di vista strettamente tecnico, lo svantaggio

dell'isolamento sismico è principalmente dato dallo spostamento relativo tra la parte isolata ed il terreno e la conseguente necessità di prevedere un opportuno spazio fra le due parti. Negli impianti industriali, lo "spazio sismico" è spesso attraversato da reti impiantistiche, in particolare tubazioni, contenenti fluidi infiammabili o pericolosi, spesso anche in temperatura e pressione. Per limitare questo problema, per il quale sono comunque già disponibili giunti di dilatazione per ogni esigenza, conviene estendere il più possibile la zona isolata. Le reti impiantistiche che attraversano lo spazio sismico dovranno essere dotate di appositi giunti di espansione in grado di assorbire gli spostamenti relativi fra le due parti in caso di sisma. Ovviamente cavi elettrici e piccole tubazioni (tipiche degli edifici civili) non creano particolari difficoltà. Diverso è il caso di grosse tubazioni contenenti liquidi infiammabili/tossici o ad elevata temperatura e pressione, tipici degli impianti industriali.

5.2 Giunti di espansione

I giunti di espansione rappresentano una soluzione ottimale al fine di ottenere una connessione di tipo elastica tra elementi fissi di un impianto. L'utilizzo di giunti di espansione, in sostituzione ai tradizionali giunti metallici flessibili, può apportare notevoli migliorie strutturali, quali assorbimento delle vibrazioni che si trasmettono lungo le tubazioni dovute alle risonanze prodotte da elementi meccanici, un miglior allineamento delle tubazioni, sia assiale che radiale ed evitare il propagarsi di fenomeni elettrici nelle tubazioni (correnti vaganti).

I giunti di espansione più idonei agli impianti presi in esame, nonché più diffusi sul mercato, sono:

- Compensatori ad omega;
- Compensatori di dilatazione;
- Giunti antisismici.

5.2.1 Compensatori ad omega

I compensatori ad omega rappresentano una soluzione di semplice applicazione, in quanto prevede una aggiunta di un tratto alla traccia delle tubazioni rettilinee, creando appunto una figura a forma di omega. Questa modifica, pur comportando un aumento dell'ingombro, consente di assorbire le dilatazioni termiche assiali senza l'utilizzo di dispositivi e conseguente ulteriore manutenzione.

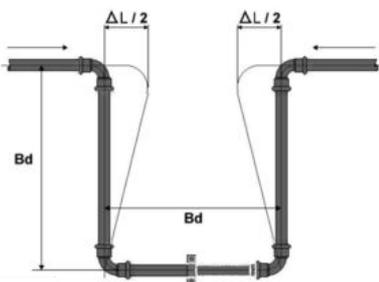


Figura 10. Compensatore a "Omega"

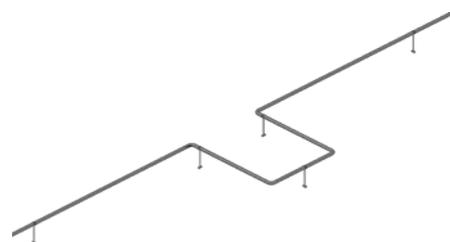


Figura 11. Applicazione su tubazione rettilinea di un compensatore a "omega"

In genere è necessario utilizzare dei vincoli diversi rispetto a quelli utilizzati con tratti rettilinei di tubazione. Questo può rappresentare un vantaggio in quanto il maggior numero di supporti nella zona del tratto omega comporta un aumento dei momenti flettenti ed una maggiore resistenza al movimento trasversale, oltre ad una riduzione dello sforzo normale nella tubazione.

Per una tubazione rettilinea di media lunghezza, apportando uno spostamento assiale, si può giungere ad una condizione critica di carico, per tutte le condotte rettilinee.

Utilizzando un compensatore ad omega, i parametri di resistenza ed instabilità assiale si riducono fino a raggiungere valori tendenzialmente soddisfacenti.

5.2.2 Compensatori di dilatazione

I compensatori di dilatazione sono elementi di connessione flessibili ed a tenuta di pressione. Il dispositivo presenta come principale caratteristica un soffietto in acciaio inossidabile, composto da una serie di ondulazioni parallele tra loro. Questa struttura conferisce la massima flessibilità possibile ad un giunto, unita ad una performante resistenza a pressione. I modelli di compensatori di dilatazione dotati di soffietto più utilizzati in commercio sono:

a) Compensatore assiale:

Caratterizzato da soffietto singolo centrale con terminali flangiati o a saldare. Da utilizzare tra due elementi fissi per assorbire solamente movimenti assiali;



Figura 12. Compensatore assiale

b) Compensatore angolare

Costituito da soffietto centrale racchiuso tra due articolazione a perni contrapposti che svolgono funzione di cerniera. Questa conformazione consente solo un movimento angolare. Tali compensatori necessitano di calcolo dimensionate per sopportare la spinta di fondo della pressione;



Figura 13. Compensatore angolare

c) Compensatore angolare cardanico

Costituito da soffietto centrale racchiuso tra due articolazione a perni contrapposti più una coppia di perni. Rispetto al compensatore angolare semplice ha la possibilità di effettuare movimenti angolari su due piani tra loro perpendicolari;



Figura 14. Compensatore angolare cardanico

d) Compensatore laterale

Composto da due soffietti separati tra loro da una porzione di tubo rigido. I terminali sono uniti da due tiranti esterni utili ad assorbire la spinta di fondo della pressione;

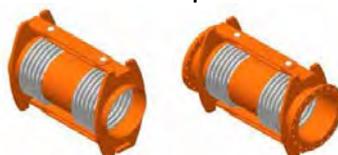


Figura 15. Compensatore laterale

e) Compensatore laterale sferico

Costituito da doppio soffiutto separato da elemento metallico. I due terminali sono vincolati come nel caso del compensatore angolare, ma da uno snodo sferico anziché con perno. In questo caso i movimenti laterali da assorbire possono derivare da qualsiasi piano;



Figura 16. Compensatore laterale sferico

f) Compensatore universale

Questo compensatore, che presenta doppio soffiutto separato da tubo metallico, è capace di assorbire qualunque tipo di movimenti laterali ed assiali, anche combinati;



Figura 17. Compensatore universale

g) Compensatore a spinta eliminata

Questo compensatore può essere costituito da struttura di tipo assiale o universale. La caratteristica principale è quella di riuscire a non scaricare la spinta di fondo sulla tubazione a cui è collegato. Può essere realizzato anche con curva metallica a 90°.



Figura 18. Compensatore a spinta eliminata

5.2.3 Giunti antisismici per le tubazioni.

Il giunto antisismico è un elemento di raccordo metallico capace di resistere alle sollecitazioni generate da eventi geotecnici imprevedibili, anche di grave entità.

Questo dispositivo presenta un collare scorrevole e due giunti flangiati capaci di conferire alla connessione alta flessibilità, possibilità di scorrimento ed estensione ed offrono elevata resistenza meccanica anche allo spostamento.

La protezione delle tubazioni contro fenomeni naturali legati a movimenti del suolo è determinata dalla possibilità di compensare le azioni assiali trasversali ed angolari delle tubazioni grazie alla capacità di deviazione angolare fino a 40°, la possibilità di espandersi, contrarsi e ruotare grazie allo scorrimento del collare metallico.



Figura 19. Raccordo scorrevole, flessibile ed estensibile

6. Conclusioni

Dopo aver analizzato come l'accadimento di un sisma apporti un notevole incremento sulla frequenza del verificarsi di eventi incidentali a cui può essere interessato un impianto di stoccaggio GPL, possiamo provare ad analizzare come gli interventi di mitigazione agiscano su quei dati. Attraverso l'utilizzo degli isolatori sismici elencati in precedenza, si tende a controllare l'azione sulle strutture delle sollecitazioni dettate dal sisma aumentando il periodo naturale della struttura da isolare e creando dissipazione dell'energia sismica. Per la verifica degli isolatori va applicato un incremento dell'accelerazione spettrale al calcolo della probabilità di accadimento di un sisma, lasciando invariati i parametri di magnitudo ($M 6$) e distanza sorgente-impianto (20 km e 40 km); si otterrà in tal modo un decremento delle probabilità che scenderanno rispettivamente a 0.0618 e 0.0043. Applicando il valore ottenuto e rapportandolo ai valori ricavati dalla casistica relativa alla frequenza di accadimento abbiamo che la probabilità espressa indica chiaramente una diminuzione di tutti i casi elencati.

Adottare delle forme di mitigazione, come ad esempio, isolatori sismici, giunti antisismici, compensatori e forme di prevenzione in generale, riduce la probabilità di accadimento degli eventi incidentali da sisma fino ad un 50%, e di conseguenza l'incidenza del sisma sugli effetti dell'evento. In particolare, confrontando i valori delle probabilità di accadimento degli incidenti con sisma e senza isolatori, nelle medesime condizioni ma con l'installazione di isolatori sismici è possibile evidenziare il beneficio che si ottiene tramite i presidi antisismici. I presidi di mitigazione, nel caso specifico conseguono lo scopo di ridurre l'esito quantitativo probabilistico dei principali eventi caratteristici.

7. Bibliografia

- [1] Paolacci, Giannini, De Angelis, Ciampi, Studio sulla applicabilità dell'isolamento sismico mediante l'utilizzo di isolatori per la protezione sismica di componenti di Impianti industriali situati in aree ad elevato rischio Sismico;
- [2] Iervolino I., Dinamica delle strutture e ingegneria sismica. principi e applicazioni, Hoepli, 2021
- [3] Rettore, Vulnerabilità degli elementi non strutturali, effetti provocati da sisma... strategie e soluzioni progettuali per la riduzione del rischio, Maggioli Editore, 2019
- [4] Cirillo, Isolamento Sismico, eurocodici e NTC2018, Hoepli, 2018
- [5] M. Forni, L'isolamento sismico degli impianti a rischio di incidente rilevante, DOI 10.12910/EAI2015-085, 2015
- [6] Decreto Legislativo n.105. (2015, giugno 26). Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose. Gazzetta Ufficiale.
- [7] Decreto Ministeriale del 14.01.2008 "Norme tecniche per le costruzioni"
- [8] Decreto 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni».
- [9] API Standard 650, Welded Steel Tanks for Oil Storage, Addendum 3, 11th Edition;
- [10] Catalogo Giunti antisismici: <https://www.pamline.it/geoflex>
- [11] Catalogo Giunti: <https://www.isopren.it>
- [12] Catalogo Compensatori: <https://www.emiflex.eu>

La modellazione ad elementi finiti applicata ai recipienti nelle attività RIR, scenari d'intervento, gestione del Rischio NaTech indotto da sisma. Esempi e criticità a confronto.

G. Sferruzza¹, V. Nastasi¹, G. Giannelli², A. Muratore², R. Baldelli³, A. Tamburini⁴

¹ Inail - Uot di Palermo

² Inail - Uot di Como

³ RICAM GROUP – Grumello del Monte (BG)

⁴ GRUPPO AUTOGAS NORD - Genova

1. Normative

A partire dall'OPCM 3316 del 2003 [1] (modifiche ed integrazioni all'OPCM n. 3274 del 20 marzo 2003), viene sancito l'obbligo di sottoporre a verifica della sicurezza sismica tutte le aree strategiche e rilevanti sia per le finalità di Protezione Civile, sia per le conseguenze di un eventuale collasso con conseguenti conseguenze in termini di danni ambientali ed umani. Il D. Lgs 105/2015 [2] al capitolo C.7.1 richiede di "Descrivere le precauzioni ed i coefficienti di sicurezza assunti nella progettazione delle strutture con riferimento agli eventi e alle perturbazioni..., nonché i criteri di progettazione assunti per i componenti critici degli impianti...In particolare devono essere indicate le precauzioni e i coefficienti di sicurezza adottati anche sulla base di leggi, regolamenti o norme di buona tecnica, riguardanti ad esempio: le precauzioni adottate per garantire il mantenimento, in occasione degli eventi...della funzionalità e/o messa in sicurezza delle apparecchiature critiche; le precauzioni adottate per resistere ad eventuali spinte idrostatiche sulle apparecchiature e sulle parti di impianto."

Anche negli stabilimenti non RIR la giurisprudenza in materia nel corso degli anni si è espressa circa i doveri del datore di lavoro ai fini del D. Lgs 81/2008 "Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro" ad effettuare la valutazione di tutti i rischi interni allo stabilimento... anche nei confronti del rischio sismico"

Nello specifico si evince l'esigenza per il gestore di stabilimento secondo D. Lgs 105/2015 e per il datore di lavoro secondo D. Lgs 81/2008 di valutare la sicurezza di recipienti (in pressione e atmosferici), asset strategico nella comprensione dei rischi Natech (Natural Hazard Triggering Technological Disasters).

La direttiva Ped e la valutazione dell'invecchiamento delle attrezzature degli impianti assumono rilevanza strategica nella gestione del rischio Natech ai fini di un modello di Business Continuity Management (analisi di rischio, business impact analysis, disaster recovery, business continuity).

Lo strumento attraverso cui valutare la sicurezza dei recipienti è la modellazione ad elementi finiti.

2. La situazione attuale all'interno degli stabilimenti industriali

Negli stabilimenti industriali figura una molteplicità tipologica di recipienti: a pressione, atmosferici, criogenici; la maggioranza sono installati fuori terra, altri interrati, o tumulati. I serbatoi in pressione sono sottoposti a verifiche periodiche di funzionamento e di integrità. Tuttavia tali verifiche si limitano alla sola integrità strutturale dell'apparecchio nelle normali condizioni di funzionamento, ma non prendono in considerazione la verifica strutturale secondo scenari Natech. In taluni casi i recipienti vengono ricondizionati e/o spostati di sito, mantenendo di luogo in luogo le medesime specifiche di installazione (ancoraggio a terra, tipologia di fondazione), senza tener conto delle diverse caratteristiche di terreno e di azione

sismica tra le diverse località. Appare invece chiaro, alla luce delle attuali NTC2018 [3] e delle norme precedentemente citate, come per ogni nuova installazione, ma anche per quelle già esistenti, sia necessario andare a valutare il sistema serbatoio/ancoraggio/fondazione/terreno nel suo insieme, non potendosi ritenere costante il comportamento di tale sistema complesso, eventualmente integrando tale verifica con adeguati sistemi di monitoraggio. Sempre riferendosi alle NTC2018, vengono fatte le idonee considerazioni per l'impatto sismico nei serbatoi atmosferici.

3. La verifica dei serbatoi

3.1. I parametri in gioco

Per la valutazione dell'installazione devono essere stabiliti una serie di parametri, che entrano in azione nella definizione dell'entità dell'azioni sismiche (rischio sismico) ed idrauliche (rischio idrogeologico), protagonisti indiscussi nella valutazione degli scenari Natech in Italia.

È necessario stabilire la Vita nominale del recipiente. La vita nominale viene convenzionalmente definita "come il numero di anni nel quale è previsto che l'opera, purché soggetta alla necessaria manutenzione, mantenga specifici livelli prestazionali". Nei casi dei recipienti, ai fini delle NTC 2018, trattandosi di elementi impiantistici periodicamente sottoposti a verifiche e periodicamente sostituiti, tale parametro può essere posto pari a 50 anni.

È necessario poi definire la classe d'uso dell'elemento ed il coefficiente C_v seguendo quanto indicato nelle NTC 2018 paragrafi: 2.4.2. CLASSI D'USO e 2.4.3. PERIODO DI RIFERIMENTO PER L'AZIONE SISMICA; e nella CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 del MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI paragrafi: C2.4.2 CLASSI D'USO e C2.4.3 PERIODO DI RIFERIMENTO PER L'AZIONE SISMICA.

Il prodotto tra Vita nominale V_N e coefficiente d'uso C_U porta a definire il periodo di riferimento V_R dell'azione sismica definito come quel "lasso di tempo, in cui si ha la probabilità in un detto sito che si verifichi un evento sismico di entità almeno pari ad un valore prefissato".

Al paragrafo 2.4.3 delle NTC 2018 viene riportato: *"Per le costruzioni a servizio di attività a rischio di incidente rilevante si adotteranno valori di C_U anche superiori a 2, in relazione alle conseguenze sull'ambiente e sulla pubblica incolumità determinate dal raggiungimento degli stati limite."*

In tal senso è da ritenersi più corretta l'adozione per i serbatoi contenenti sostanze pericolose o soggetti a rischio rilevante di un periodo di riferimento pari o superiore ai 100 anni.

Un altro importante parametro da determinarsi prima di condurre l'analisi ad elementi finiti sul recipiente è l'individuazione dei parametri geologici e geotecnici relativi alla stratigrafia del terreno oggetto di installazione. Tali dati possono essere estrapolati attraverso prove geologiche sul sito e, dove richiesto, implementazione della microzonazione sismica.

Stabilito il periodo di riferimento e la categoria del terreno, attraverso la mappatura del reticolo sismico dell'Italia, è possibile quindi ricostruire lo spettro sismico (ovvero l'entità dell'azione sismica) da assumere per il calcolo della struttura.

3.2. La modellazione

Noto lo spettro di calcolo, la verifica dei recipienti va condotta considerando gli aspetti peculiari di ciascuna tipologia di serbatoio, concentrando l'attenzione a quelle problematiche che ciascuna tipologia normalmente presenta. [4]

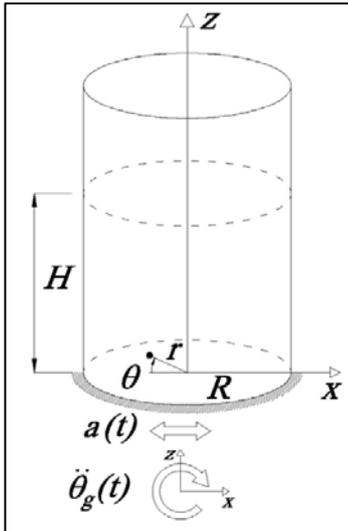


Figura 1. Sistema di coordinate polari di un serbatoio cilindrico

Possiamo distinguere quattro macro-tipologie di serbatoi:

- Serbatoi alti e snelli (ovvero serbatoi in cui il rapporto altezza/raggio sia maggiore a 4, $h/r > 4$), tipicamente i serbatoi criogenici;
- Serbatoi tozzi (ovvero serbatoio per i quali $h/r < 4$);
- Serbatoi orizzontali;
- Serbatoi tumulati.

Ciascuna di queste tipologie presenta caratteristiche peculiari che ne determinano le modalità di modellazione e di verifica, nonché le problematiche in caso di evento sismico.

Per quanto riguarda i serbatoi tumulati (normalmente dei serbatoi in pressione in ambito RIR), trovandosi essi al di sotto della quota campagna, non presentano normalmente particolari problematiche. Va posta adeguata attenzione al dimensionamento corretto delle fondazioni e dei muri di contenimento.

Occorre sottolineare che per tutti i serbatoi in pressione, la base della progettazione deve rifarsi a quanto previsto dalla direttiva di prodotto Ped con le opportune integrazioni e considerazioni

fatte dagli scriventi per quanto riguarda la modellazione e la verifica per gli eventi legati al sisma.

Per quanto riguarda i serbatoi orizzontali (normalmente in pressione in ambito RIR) essi sono costruiti generalmente con delle camere interne o setti che vadano a smorzare gli effetti oscillatori dell'onda che si potrebbe generare internamente in occasione di azioni sismiche. Possono quindi essere trattati come masse agenti nel proprio baricentro e l'attenzione in caso di eventi sismici va posta essenzialmente al corretto dimensionamento per taglio dell'ancoraggio (valutando quindi anche corretti ricoprimenti) ed al dimensionamento delle selle d'appoggio soggette all'azione orizzontale posta alla quota dell'appoggio del serbatoio. A livello delle fondazioni va comunque verificata la capacità portante della fondazione sotto le azioni calcolate in caso sismico ed esclusa la possibilità di liquefazione del suolo.

Discorso più complesso per i serbatoi verticali, distinti in serbatoi alti e snelli ($h/r > 4$) tipicamente serbatoi criogenici e serbatoi tozzi (normalmente serbatoi atmosferici in ambito RIR). Pressione impulsiva e convettiva sono i due principali attori delle sollecitazioni indotte che dovranno essere verificate per il singolo recipiente.

I serbatoi verticali sono sicuramente quelli più soggetti all'azione sismica trovandosi il loro baricentro a quota elevata rispetto all'imposta di fondazione.

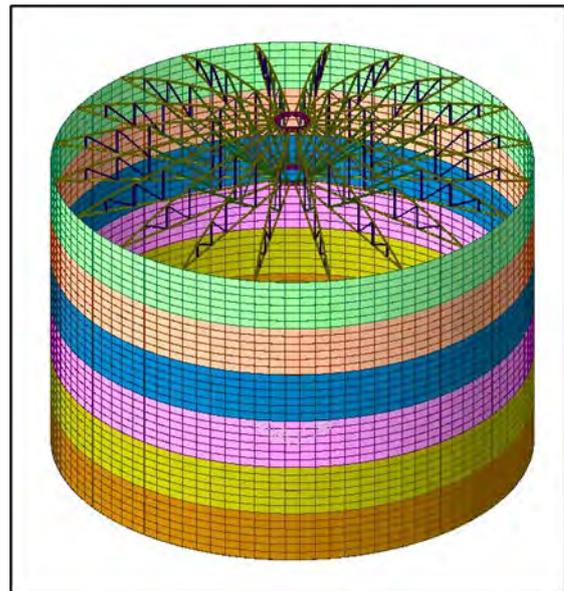


Figura 2. Modellazione FEM di un serbatoio tozzo e della copertura

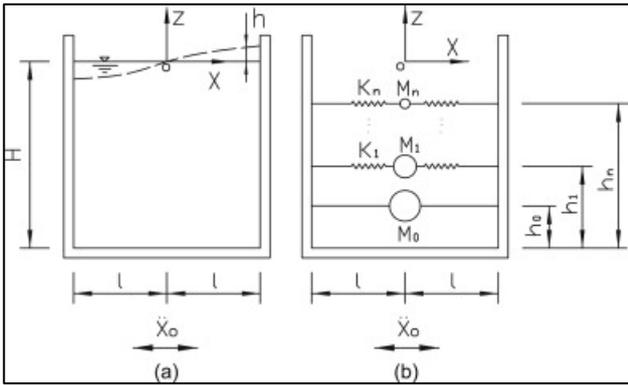


Figura 3. Modello del moto ondoso nel serbatoio per l'analisi sismica

Sotto l'effetto dell'azione sismica, il fluido contenuto nei serbatoi verticali comincia ad oscillare, creando moti ondosi interni che non necessariamente si muovono in concordanza con le oscillazioni del corpo del serbatoio. L'effetto dell'"onda" (sloshing) va ad incrementare per effetto dinamico l'entità dell'azione sismica e non può essere trascurato all'interno della verifica sismica dei serbatoi.

Esistono diverse trattazioni per il calcolo di questo effetto, le più utilizzate sono le API-650 americane e l'Eurocodice 8 parte 4.

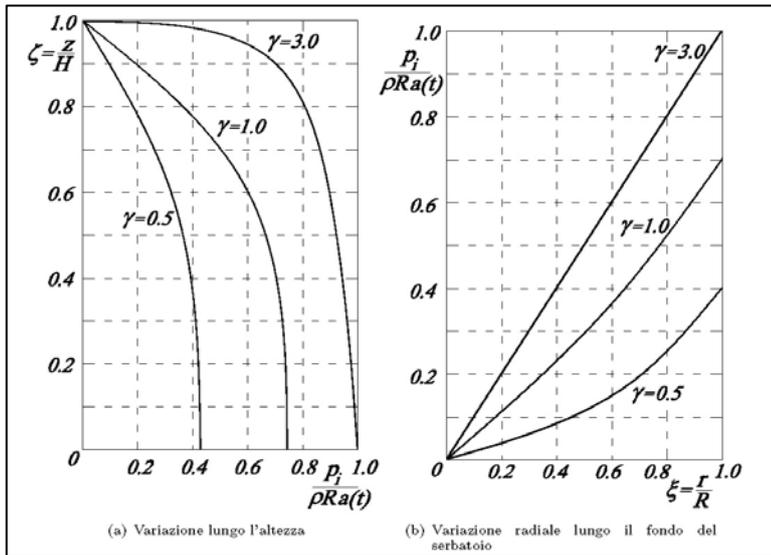


Figura 4. Variazione della pressione impulsiva per tre valori della snellezza normalizzata

L'effetto sloshing risulta però trascurabile per quei serbatoi definiti alti e snelli, ovvero per quei serbatoi in cui il rapporto tra l'altezza del corpo del serbatoio e il raggio dello stesso sia superiore a 4. Nella modellazione di tali serbatoi si può assumere che l'intera massa di liquido si muova in modo concorde con l'oscillazione del corpo del serbatoio.

Per i serbatoi alti e snelli il punto critico di verifica è rappresentato sia dalla verifica delle gambe di appoggio, sia dalla verifica della connessione serbatoio/fondazione con potenziali criticità circa le piastre di base o i tirafondi/tasselli presenti.

Infine non è da trascurarsi la verifica della fondazione, spesso rappresentata da un basamento in calcestruzzo di altezza e peso limitato che potrebbe generare ribaltamento rigido. Più rare le criticità legate a verifiche del mantello o della connessione, in caso di serbatoi criogenici, tra le due camice del serbatoio.

I serbatoi tozzi presentano invece possibili criticità legate agli spessori ridotti del mantello. I più tipici fenomeni di rottura sono rappresentati dal cosiddetto "elephant foot" (dovuto a instabilità elasto-plastica dell'acciaio alla base del serbatoio), dal "diamon shape" (dovuto a instabilità elastica nell'acciaio ad altezze variabili in funzione dello spessore delle virole).



Figura 5. Instabilità elastica "diamond buckling"



Figura 5. Instabilità elastoplastica "elephant foot buckling"

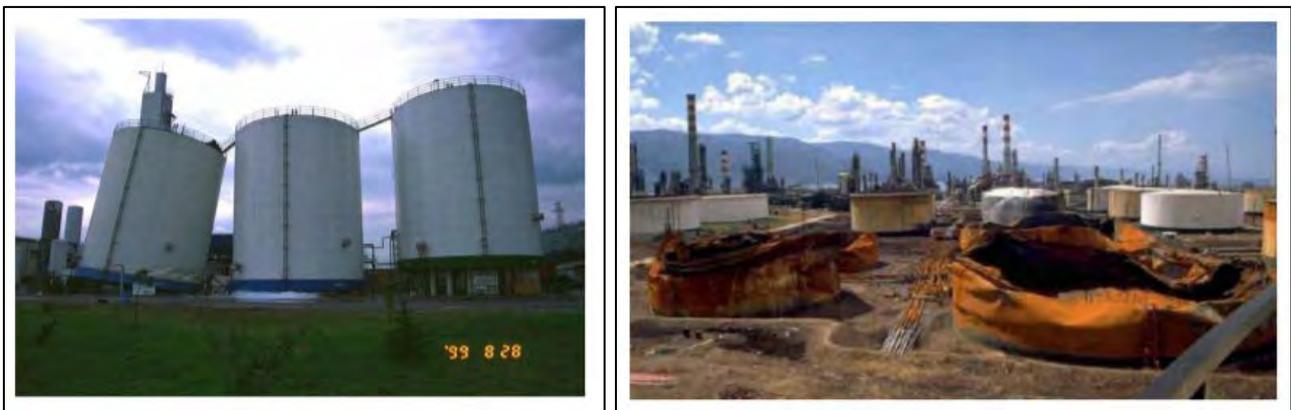


Figura 7. Altri esempi di instabilità e serbatoi incendiati durante l'evento sismico in Alaska del marzo 1964

Anche per i serbatoi tozzi va inoltre prestata attenzione ad eventuali criticità legate alle verifiche della fondazione.

4. Nuove installazioni

Da quanto sopra descritto, appare evidente che in caso di nuove installazioni sia necessario svolgere verifiche di calcolo sia del serbatoio, sia della fondazione sul quale verrà posto, sia dell'ancoraggio da realizzarsi. Generalmente il fornitore del serbatoio rilascia una relazione di calcolo generica, che prende in considerazione parametri peggiorativi (bassa categoria del terreno, sito ad alta sismicità) a favore di sicurezza, e che consente di ritenere il corpo del serbatoio correttamente dimensionato.

Non si prende però in carico la responsabilità di valutare l'effetto combinato del sistema fondazione/serbatoio. È necessario che il progettista delle fondazioni si assuma l'onere di

valutare la struttura nel suo insieme, dimensionando in questo modo correttamente sia l'ancoraggio del serbatoio sia la fondazione. Prendendo di riferimento le sole verifiche rilasciate dal produttore del serbatoio si corre il rischio o di sovradimensionare fondazione e ancoraggi (nei siti a bassa sismicità con buone caratteristiche del terreno) che di sottostimare l'azione sismica e di conseguenza sotto-dimensionare la struttura nel suo complesso.

5. Installazioni esistenti

Per quanto più sopra indicato, dovrebbe essere chiaro che in assenza di relazioni di calcolo che attestino la bontà del complesso serbatoio/fondazione, sia necessario, da parte del datore di lavoro e del gestore di stabilimento, procedere con analisi di valutazione della vulnerabilità sismica di queste parti impiantistiche.

Per lo svolgimento di tali analisi il tecnico incaricato dovrà reperire tutta la documentazione esistente sull'opera (schede tecniche del serbatoio, progetti esecutivi delle fondazioni, relazioni di calcolo antecedenti, eventuali collaudi). In caso di mancanza di suddetta documentazione e, comunque, a conferma della sua bontà dovranno quindi essere svolte in campo indagini sui materiali per identificare i particolari costruttivi e le tipologie dei materiali della struttura. Si dovranno quindi prevedere carotaggi, prove sonreb, prelievi di barre d'armatura sulle fondazioni; prove durometriche, prove spessimetriche sulle gambe/piastre di base dei serbatoi; prove durometriche e indagini ultrasoniche per determinare la profondità d'infissione degli ancoraggi.

Tali prove risultano minimamente invasive e permettono al professionista di implementare un modello di calcolo sufficientemente affidabile.

Dalle analisi condotte si ricaveranno quindi informazioni relative alle massime azioni sollecitanti sopportabili dalla struttura e al tempo di ritorno di tale evento. Implementando tali risultati nell'analisi del rischio NaTech del sito, si potrà quindi stabilire se vi sia o meno la necessità di intervento e quale sia il livello minimo di sicurezza da raggiungere, tenendo in conto anche i possibili effetti domino.

La progettazione dell'intervento potrà poi seguire diverse strade a seconda di dove sia stata identificata la criticità.

6. Esempi pratici – come intervenire sull'esistente

6.1. Serbatoi alti e snelli

I serbatoi alti e snelli sono quei serbatoi per i quali il rapporto tra altezza e raggio del serbatoio è superiore a 4. Rientrano solitamente in questa categoria i serbatoi criogenici o le cisterne di stoccaggio verticale superiori ai 15-50mc.

In generale questo tipo di serbatoi presenta due possibili problematiche in caso di azione sismica:

- Insufficiente ancoraggio al piede dovuto a tirafondi in numero insufficiente o sotto dimensionati, quando non del tutto assenti;
- Instabilità o rottura a pressoflessione delle gambe di sostegno in quanto non dimensionate per possibile azione orizzontale.

In caso la problematica sia legata all'ancoraggio al piede, l'unica risoluzione è l'installazione di nuovi tasselli, prevedendo delle piastre che sormontino quelle esistenti e vadano quindi a bloccarle meccanicamente a terra. Le nuove piastre devono essere opportunamente nervate per poter essere considerate sufficientemente rigide e non si inflettano in caso di sollevamento della piastra di base originale del serbatoio. Ovviamente va verificato che le saldature tra la piastra di base e la colonna siano integre e che siano in grado di sostenere lo sforzo di trazione che si genera. Il sistema descritto permette di agire senza dover saldare nuovi piatti o nervature d'irrigidimento, in modo da poter essere eseguito anche in zone atex. Spesso dei tasselli o tirafondi esistenti, escluso il diametro che può essere rilevato con idonea strumentazione, non si conosce né la profondità d'installazione né la tipologia strutturale (tirafondi con rosette o altri sistemi di vincolo, tasselli con resina o altro). È quindi buona norma non considerare nel calcolo i tasselli già presenti, ma affidare l'azione sismica solamente a quelli di nuova installazione. Pertanto, ai fini di una facilità esecutiva, è possibile prevedere il semplice taglio dei tasselli esistenti.

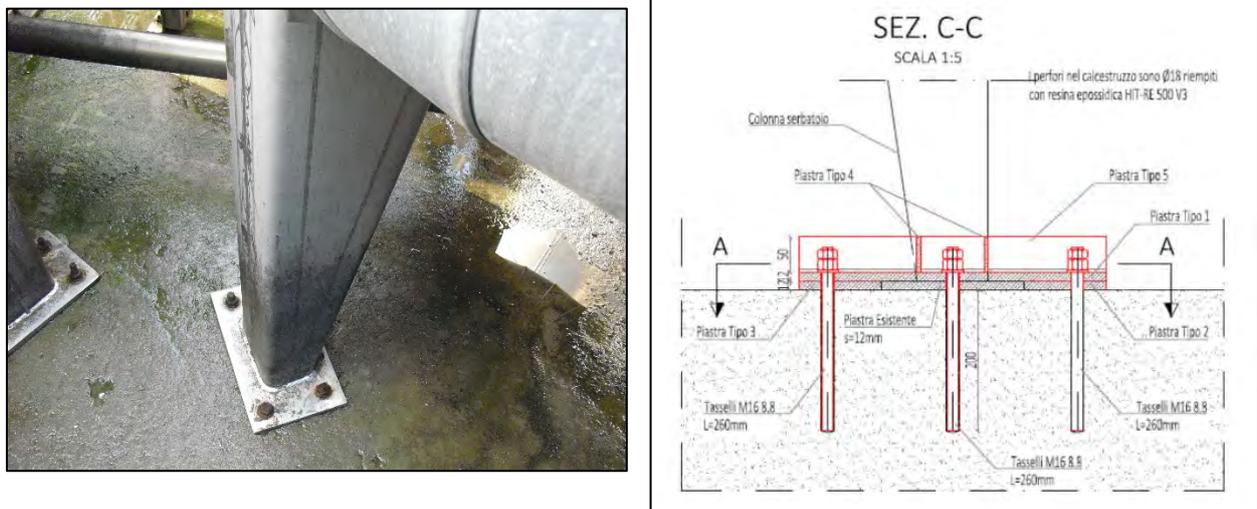


Figura 6. Esempio di piastra con tasselli insufficienti e possibile risoluzione progettuale con installazione di nuovi tasselli

Nelle immagini sopra un tipico esempio dove l'ancoraggio alla base, costituito da 4 barre ormai anche ammalorate, risulta insufficiente. Si è previsto il taglio dei tasselli esistenti e l'installazione di un profilo UPN in sormonto alla piastra esistente con l'installazione di tre nuovi tasselli chimici opportunamente dimensionati per l'azione di trazione estratta dal modello di calcolo.

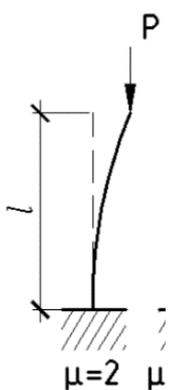


Figura 7.

Coefficiente ad instabilità per la configurazione incastro-mensola

In caso la problematica sia legata alla resistenza delle gambe, si può procedere in vari modi.

Innanzitutto va segnalato che tipicamente nel calcolo ad instabilità delle gambe, i vincoli agli estremi possono essere considerati assimilabili alla configurazione con appoggio alla base e sommità libera di spostarsi lateralmente portando all'adozione di un coefficiente ad instabilità $\mu=2$. Sotto queste condizioni spesso si riscontrano problematiche sia a resistenza per pressoflessione, sia per instabilità dei profili che realizzano le gambe del serbatoio.

In questi casi le soluzioni adottabili possono essere: l'inserimento di controventi di piano tra le gambe in modo da poter considerare un coefficiente μ =tra 0,7 e 1 (in funzione del vincolo realizzato alla base – cerniera o incastro), o l'irrigidimento del profilo che costituisce le gambe del serbatoio installando sulle ali dei piatti d'acciaio (realizzando quindi una sezione composta).

Nell'immagine un intervento su un serbatoio da 100mc in zona sismica, in cui si riscontravano sia problemi a livello delle gambe sia dell'ancoraggio a terra, dove erano presenti solo due tasselli per gamba di diametro ridotto. In questo caso si sono realizzate delle piastre in sormonto all'esistente che andassero a vincolare la gamba realizzando fra l'altro un incastro al piede e permettendo l'assunzione di un $\mu=0,7$. Inoltre sono state previste delle controventature tra le gambe e l'irrigidimento, tramite piatti imbullonati, del profilo stesso della gamba. In figura si visualizza la schematizzazione adottata nel modello di calcolo e la realizzazione del costruttivo di carpenteria. Per valutare eventuali interferenze e dimensionare gli elementi, si è sovrapposto un rilievo laser scanner effettuato appositamente con la modellazione 3D dei pezzi di carpenteria.

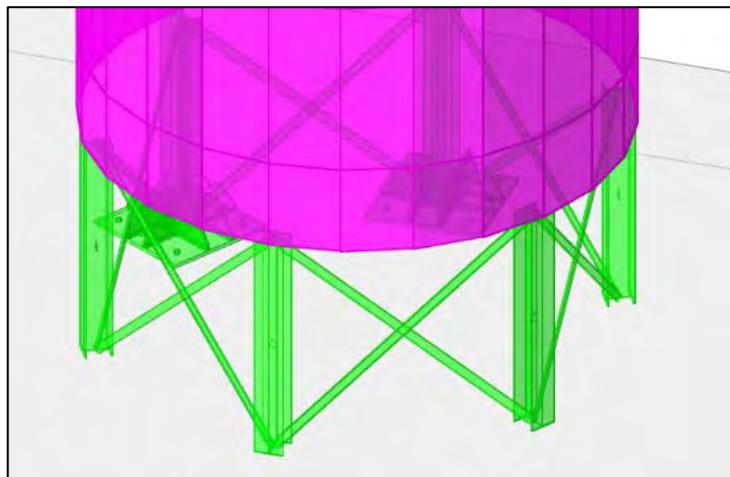


Figura 8. Modellazione dell'inserimento di controventi tra le gambe di un serbatoio verticale



Figura 9. Sovrapposizione tra modello del costruttivo in carpenteria e rilievo laser scanner di un serbatoio verticale

In ogni caso in funzione della soluzione adottata per l'adeguamento, qualunque sia la soluzione scelta, il Gestore dovrà prestare attenzione agli aspetti legati

alla certificazione PED o alla documentazione rilasciata in sede di omologazione per gli apparecchi "ante PED" al fine di valutare se gli interventi di adeguamento sismico comportino una modifica che richiederà di conseguenza una nuova certificazione PED.

Ulteriore attenzione dovrà essere posta per gli apparecchi certificati PED in merito alla destinazione del luogo di installazione con conseguente verifica preliminare finalizzata alla corrispondenza di quanto previsto in sede di certificazione alla reale sismicità della zona.

6.2. Serbatoi orizzontali

Per quanto riguarda i serbatoi ad installazione orizzontale, la problematica più diffusa è legata alla scarsa distanza dai bordi dei tasselli di fissaggio rispetto alle selle in c.a. Sotto azione sismica l'ancoraggio risulta sollecitato a taglio. Tipicamente le barre installate sono in numero sufficiente e la rottura si presenta quindi lato calcestruzzo per scalzamento del bordo di calcestruzzo.



Figura 10. Esempio di collegamento esistente sella/serbatoio in cui la distanza dal bordo è ridotta o il calcestruzzo ammalorato

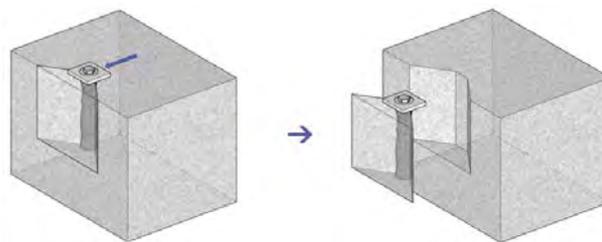


Figura 11. Esempificazione della rottura per taglio di un fissaggio nel calcestruzzo

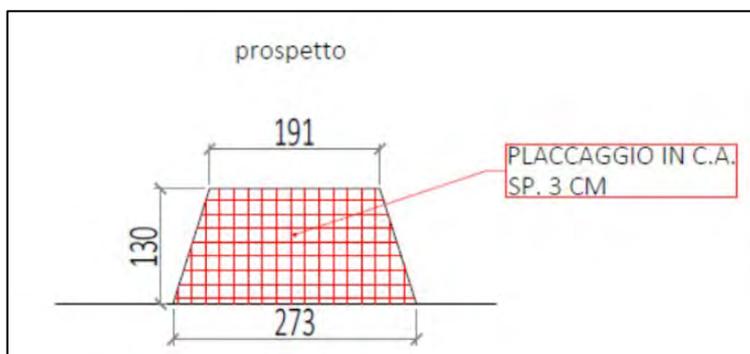


Figura 12. Esempio di placcaggio di una sella per serbatoio orizzontale

In questi casi la soluzione prevede l'ispessimento della sella in calcestruzzo tramite placcaggio con malte fibro-rinforzate o con la tecnica del betoncino armato. Buona norma prevede l'inserimento di barre d'armatura orizzontali all'altezza dei tasselli, in modo che esse rappresentino un ulteriore vincolo in caso di rottura.

Nei casi di serbatoi particolarmente grandi, vige la problematica relativa alla stabilità della fondazione, in particolar modo della verifica a liquefazione del terreno. Infatti se l'orientamento orizzontale pone il serbatoio a quote poco elevate dal terreno, e quindi poco soggetto ad azioni di oscillazione, il peso elevato, di solito concentrato su 2/3 selle, in presenza di falde acquifere, può portare, in caso di sisma, all'instaurarsi di fenomeni di liquefazione del terreno.

6.3. Serbatoi tozzi

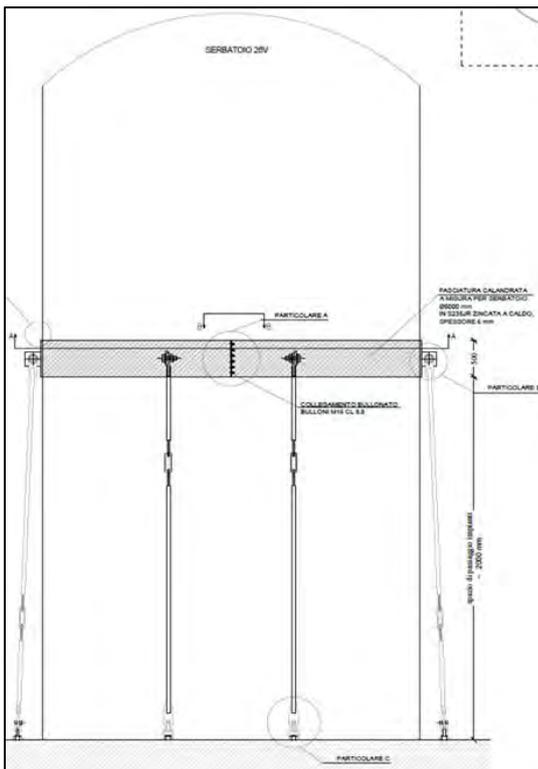


Figura 13. Esempio di intervento di cerchiatura e inserimento ancoraggio alla base su di un serbatoio tozzo

manutenzione del serbatoio, a rimuovere la lamiera deteriorata e sostituirla con una di spessore adeguato. Per serbatoi che non verificano dal punto di vista sismico, in attesa degli adeguamenti, occorre per un possibile utilizzo degli stessi, abbassare il livello del contenuto liquido fino a quando, per i serbatoi in questione, non superano la verifica sismica.

I serbatoi tozzi sono quei serbatoi per cui il rapporto tra altezza e raggio è inferiore a tre. Come da precedente paragrafo, è già stato evidenziato che le problematiche possono essere legate a:

- assenza di vincoli alla base. Non tutti i serbatoi tozzi necessitano di vincolo, le norme API e gli Eurocodici prevedono i due casi, ma in caso di assenza di vincolo vengono sovraccaricati le lamiere alla base generando i fenomeni di elephant foot buckling e diamond buckling già presentati [4]
- instabilità delle lamiere di base o di porzioni in cui si sia rilevato, durante i controlli periodici, un deterioramento delle lamiere.

Gli interventi possono quindi prevedere nel primo caso l'inserimento di vincoli antiribaltamento. Operativamente si può prevedere una cerchiatura con lamiere calandrate del corpo del serbatoio alle quali fissare dei tensori per collegare la fasciatura ai tasselli di base di nuova installazione.

Altra situazione quella che vede un deterioramento della lamiera in alcune zone. In tale situazione, qualora dal modello si evidenziasse una concentrazione di sforzi che porti ad instabilità, si dovrà provvedere, durante una fase di

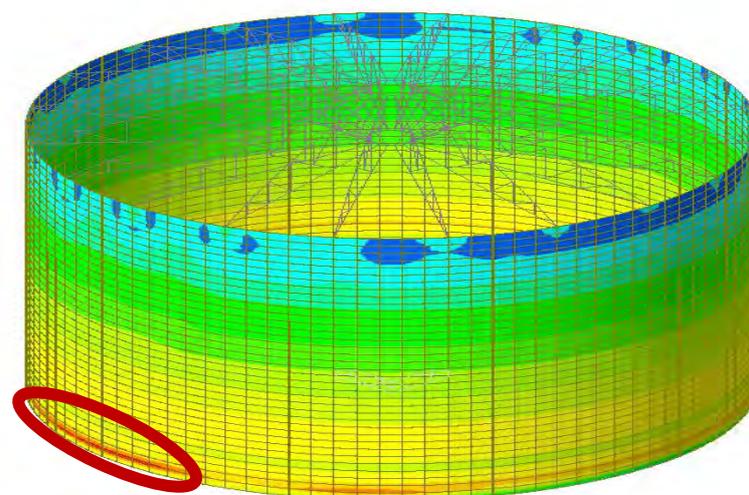


Figura 14. Rappresentazione dei valori di tensione nella lamiera di un serbatoio tozzo: è evidente la zona di concentrazione degli sforzi in corrispondenza di parti di lamiera di spessore ridotto

7. Conclusioni

La finalità del presente articolo è quella di dare delle indicazioni di natura tecnico operativa ai gestori degli stabilimenti RIR, nonché ai funzionari tecnici che a vario titolo sono coinvolti nella attività di verifica di detti stabilimenti, al fine di gestire il rischio NaTech indotto da sisma con particolare riferimento alle diverse tipologie di serbatoi esistenti (alti e snelli, orizzontali e tozzi). Nella trattazione sono descritti gli interventi più frequenti di adeguamento riscontrati, per le tipologie di serbatoio prese in considerazione, nelle verifiche che oramai diversi CTR prescrivono.

Inoltre per completezza, occorre evidenziare che in questo lavoro (per esigenze di spazio) si sono presi in considerazione ai fini della vulnerabilità sismica le sole diverse tipologie di serbatoi, tralasciando di considerare le relative tubazioni di collegamento, alla luce del fatto che le stesse anche se sono coinvolte con maggiore frequenza in collassi dovuti al sisma, quasi sempre portano ad un livello di magnitudo di gran lunga inferiore rispetto ai collassi delle diverse tipologie di serbatoi.

8. Bibliografia

- [1] Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri, OPCM n. 3316 del 2 ottobre 2003 (G.U. n. 236 del 10/10/2003) “Modifiche ed integrazioni all’ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003”;
- [2] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105 Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose. (15G00121) (GU Serie Generale n.161 del 14-07-2015 - Suppl. Ordinario n. 38);
- [3] Decreto 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni G. U. n 42 del 20 febbraio 2018;
- [4] G.M. Calvi, R. Nascimbene Progettare i Gusci. IUSS Press. Pavia, 2011, pp. 541-543-602-603;
- [5] Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti.

Il fenomeno dello sloshing nello studio di vulnerabilità sismica in ottemperanza alle nuove NTC2018 dei serbatoi in Stabilimenti soggetti a Rischio di Incidente Rilevante per la Valutazione dei Rischi naturali e Na-Tech

M. D. Piccioni¹, A. Fraddosio¹, A. Castellano², N. Pecere¹, A. Altieri³

¹ Politecnico Di Bari - dICAR

² Politecnico Di Bari - DMMM

³ Ingegnere

1. Introduzione

I serbatoi di stoccaggio di liquidi sono spesso installati negli stabilimenti a Rischio di incidente rilevante ai sensi del D.Lgs. n.105 del 26 giugno 2015, di recepimento della Direttiva Seveso 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose. Essi sono considerati quali elementi critici nei SGS-PIR in quanto contenenti sostanze pericolose che costituiscono un aggravio del rischio in caso di coinvolgimento in incidente, e sono quindi di fondamentale importanza nell'analisi di rischio di stabilimento e nella valutazione degli effetti di eventi naturali detti Na-Tech. Si tratta di un aspetto di estrema problematicità, derivante sia dalla complessità dei contesti da analizzare, sia dalla scarsità delle indicazioni normative in materia, in particolare per quanto attiene gli impianti ad elevata complessità impiantistica e strutturale.

Nelle attività di analisi del rischio, oltre alle strutture portanti e ai fabbricati edili presenti in stabilimento, sono presenti apparecchiature industriali e utilities che a loro volta processano e/o contengono sostanze pericolose, e che costituiscono un aggravio del rischio in caso di coinvolgimento in incidente.

L'analisi storica di incidenti Na-Tech dimostra come l'occorrenza di eventi naturali, quali ad esempio i terremoti, ha portato al danneggiamento di apparecchiature per uso industriale e al conseguente rilascio di sostanze pericolose, provocando esplosioni, incendi e dispersioni tossiche in atmosfera, con conseguenze molto gravi.

Per l'analisi di tali strutture è quindi molto importante garantire la sicurezza nei confronti non solo dei carichi ordinari di progetto, ma anche di azioni eccezionali quali le azioni sismiche.

Pertanto, la valutazione della risposta sismica dei serbatoi di stoccaggio di liquidi e la progettazione di appropriati ed efficaci interventi di retrofitting meritano grande attenzione da parte dei progettisti.

Un aspetto cruciale è che tali serbatoi sono generalmente riempiti solo parzialmente di liquido: quindi, in occasione di un evento sismico, la risposta strutturale è fortemente condizionata dal cosiddetto fenomeno dello sloshing, ossia dalle azioni che il liquido posto in movimento da parte del sisma esercita sulle pareti della struttura, in quanto libero di muoversi.

Più in dettaglio, la risposta sismica è dominata dall'interazione fluido-struttura in quanto il liquido contenuto genera azioni idrodinamiche impulsive e convettive sulle pareti del serbatoio. Gli effetti sismici di sloshing costituiscono un problema meccanico altamente non lineare, che eventualmente si sovrappone ad altri comportamenti non lineari che caratterizzano la risposta strutturale complessiva, quali eventuali fenomeni di instabilità e di plasticizzazione degli elementi strutturali.

I codici normativi, anche di altre nazioni, propongono generalmente procedure semplificate per la valutazione delle forze sismiche di progetto dei serbatoi in presenza di sloshing. Tuttavia nelle formulazioni semplificate proposte dalle varie norme spesso si riscontrano differenze anche significative; inoltre, tali formulazioni sono essenzialmente

orientate al progetto di nuove strutture, e quindi risultano di difficile applicazione al caso della verifica dei serbatoi esistenti.

Pertanto, per ottenere risultati realmente rappresentativi nelle analisi di vulnerabilità e nel progetto di retrofitting di serbatoi esistenti è necessario studiare esplicitamente l'interazione fluido-struttura, rappresentando nel modello di calcolo gli effetti dello sloshing del liquido.

Tra i diversi possibili approcci di calcolo per descrivere gli effetti dello sloshing, l'attenzione è stata focalizzata sul metodo Coupled Eulerian-LaGrangian (CEL), che pone in interazione un dominio di tipo Lagrangiano che rappresenta il serbatoio e un dominio di tipo Euleriano che rappresenta il fluido. Applicando l'approccio CEL è stato analizzato, con l'ausilio del software ABAQUS, il caso di studio costituito da una sfera tipo Horton, in presenza di un livello di riempimento del liquido pari al 70% del volume totale. L'azione sismica è stata rappresentata da un accelerogramma artificiale spettro-compatibile con il sito di ubicazione del serbatoio, ed i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli convenzionali, ottenibili da una analisi dinamica lineare modale con spettro di risposta.

2. L'interazione Fluido-Struttura (FSI)

L'interazione fluido-struttura (Fluid-Structure Interaction, FSI) è una classe di problemi meccanici governati dalla dipendenza reciproca tra il fluido e la parte strutturale, costituita nel caso in esame dalle pareti del serbatoio. In altre parole, il comportamento del liquido dipende dalla forma della struttura e dal suo movimento, e il movimento e la deformazione del serbatoio dipende dalle forze che il fluido applica alla struttura.

Dal punto di vista matematico, si ricorda che in un tipico problema di meccanica a campo singolo, come un problema di solo fluido o di sola struttura, lo studio è caratterizzato da equazioni differenziali che governano il problema e da una serie di condizioni al contorno.

La situazione è più complicata in un problema FSI. L'insieme delle equazioni differenziali e le condizioni al contorno associate ai domini del fluido e della struttura devono essere soddisfatte simultaneamente.

I domini non si sovrappongono e i due sistemi sono accoppiati all'interfaccia fluido-struttura, con un insieme di condizioni di interfaccia fisicamente significative. Queste condizioni di accoppiamento sono la compatibilità cinematica e l'equilibrio tensionale all'interfaccia fluido-struttura.

La natura intrinsecamente non lineare e dipendente dal tempo della FSI rende molto difficile l'uso di metodi analitici in questa classe di problemi. In particolare, solo in pochi casi sono disponibili studi analitici, condotti di regola assumendo ipotesi fortemente semplificative per trovare soluzioni in forma chiusa del sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali che descrive il problema dinamico.

Negli ultimi decenni ci sono stati progressi significativi nella ricerca computazionale in campo FSI: è possibile affermare che allo stato attuale i metodi computazionali disponibili sono robusti, efficienti e capaci di modellare accuratamente problemi 3D con configurazioni geometricamente complesse a scale spaziali complete.

3. Metodi di calcolo utilizzati nell'interazione Fluido-Struttura

La perturbazione di un contenitore parzialmente riempito, causata da forze esterne determina il movimento della superficie libera dal fluido generando il fenomeno dello sloshing, e conseguentemente genera interazioni del fluido con la struttura, configurando un tipico problema FSI.

La soluzione di un problema computazionale di FSI si trova applicando generalmente il metodo degli Elementi Finiti, all'interno del quale è possibile assumere uno dei seguenti punti di vista di base per la discretizzazione del modello:

- Lagrangiano;

- Euleriano.

Nella descrizione Lagrangiana il movimento del continuo è specificato come una funzione delle coordinate dei punti materiali (a partire da una configurazione di riferimento) e del tempo. Questa è la descrizione che viene generalmente applicata nella meccanica dei solidi, ossia per i problemi strutturali ordinari. Il dominio della struttura è considerato in movimento; nella maggior parte dei casi, il suo movimento segue le particelle materiali, o punti, che costituiscono la struttura. Nei problemi FSI, con la descrizione Lagrangiana mentre la struttura si muove nello spazio, la forma del sottodominio che rappresenta il fluido cambia per conformarsi al movimento della struttura. Il movimento del dominio fluido deve essere considerato nelle equazioni differenziali e nelle condizioni al contorno. Nelle simulazioni che utilizzano la formulazione Lagrangiana, i nodi si muovono insieme al materiale. Pertanto, l'interfaccia tra due parti è tracciata e definita con precisione. In queste simulazioni, le grandi deformazioni possono portare ad una mesh con grandi distorsioni degli elementi.

Nella descrizione Euleriana il movimento del continuo è specificato come una funzione della coordinata spaziale (campo definito in punti fissi dello spazio) e del tempo. È una descrizione che viene generalmente applicata nei problemi di meccanica dei fluidi. Nell'analisi Euleriana è necessaria una mesh di riferimento che rimane indeformata per tracciare il movimento del materiale nel dominio euleriano. I materiali, in tal caso, possono muoversi liberamente attraverso la mesh.

Nei problemi ingegneristici di interazione fluido-struttura nessuno dei due punti di vista descritti soddisfa pienamente le esigenze di modellazione dell'intero fenomeno:

- la formulazione lagrangiana non può gestire le grandi deformazioni del fluido;
- la formulazione euleriana sacrifica l'accuratezza dei risultati quando viene applicata ai solidi.

Pertanto, l'evoluzione dei metodi computazionali FSI ha portato a definire approcci combinati. In particolare, gli approcci maggiormente utilizzati in ambito scientifico sono sostanzialmente i seguenti:

- Approccio ALE (Arbitrary-Lagrangian-Eulerian)
- Approccio CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian)
- Approccio SPH (smoothed particle hydrodynamics)

3.1 Approccio ALE

Tale approccio punta a combinare le caratteristiche più convenienti degli approcci Euleriano e Lagrangiano, eliminando dove possibile gli svantaggi. Nella tecnica ALE (Arbitrary-Lagrangian-Eulerian), conosciuta anche come "metodo misto Euleriano-Lagrangiano", la relazione tra la mesh computazionale e il continuo può essere modificata all'interno dell'analisi FEM, ed è possibile considerare grandi deformazioni poiché si combinano gli aspetti migliori di entrambe le formulazioni: Lagrangiana ed Euleriana.

Infatti, in aggiunta al dominio spaziale e materiale associati rispettivamente alla tecnica Euleriana e Lagrangiana, viene introdotto un dominio di riferimento per trattare la mesh.

In sintesi, le caratteristiche principali della formulazione ALE sono:

- generalmente conserva una mesh di ottima qualità anche nei casi di grandi deformazioni del materiale, consentendo alla maglia di muoversi indipendentemente dal materiale sottostante; la mesh si conserva topologicamente simile durante l'analisi (cioè, gli elementi non sono creati o distrutti)
- può essere utilizzata per analizzare i problemi Lagrangiani (in cui nessun materiale lascia la mesh) e problemi Euleriani (in cui il materiale scorre attraverso la mesh);

3.2 Approccio CEL

Il metodo Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) cerca di catturare i vantaggi sia del metodo Lagrangiano che dell'Euleriano. Nelle analisi numeriche il materiale Euleriano viene seguito mentre scorre attraverso la mesh calcolando la sua frazione di volume Euleriano (EVF). Ad ogni elemento Euleriano viene associata una percentuale, che rappresenta la porzione di quell'elemento riempito con un materiale. Se un elemento Euleriano è completamente riempito con un materiale, il suo EVF è 1; se non c'è materiale nell'elemento, il suo EVF è 0. Il contatto tra i materiali Euleriani e i materiali Lagrangiani è imposto usando un contatto generale che è basato su un "Penalty contact method".

Gli elementi Lagrangiani possono muoversi attraverso la mesh Euleriana senza resistenza finché non incontrano un elemento Euleriano pieno di materiale (EVF = 0).

3.3 Approccio SPH

Il metodo numerico SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) è stato sviluppato alla fine degli anni '70 per trattare il comportamento dei sistemi esistenti in astrofisica, per i quali i metodi (Euleriani) basati sul concetto di mesh si sono rivelati inadatti a causa della mancanza di confini definiti.

L'idea di base del metodo SPH consiste nel modellare un mezzo continuo considerandolo come un insieme di particelle. Da un punto di vista dinamico, le particelle si comportano come punti materiali, ma in realtà sono entità macroscopiche, caratterizzate di quantità cinematiche (velocità, ecc.) e termodinamiche (pressione, ecc.) e in movimento nel tempo. La tecnica SPH consente di prevedere comportamenti molto complessi senza utilizzare alcuna mesh o griglia computazionale, e si basa sull'uso di una funzione 'kernel' che è adatta a rappresentare le derivate dei campi continui in una forma discreta. Questo approccio è coerente sia con la meccanica Lagrangiana che con quella Hamiltoniana, in particolare in termini di applicazione delle leggi di conservazione.

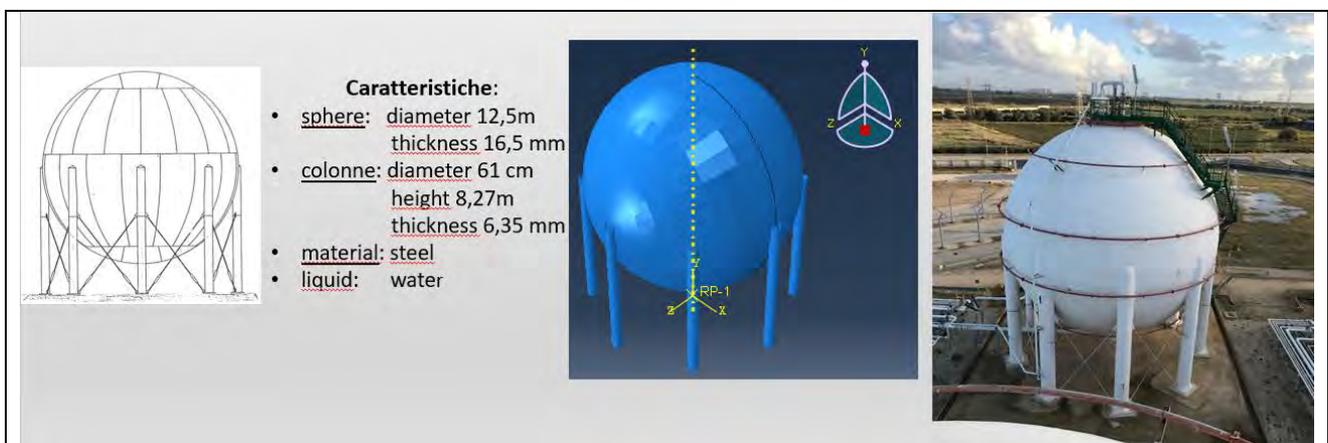


Figura 1. Caratteristiche del serbatoio tipo Horton

4. Caso di studio

Al fine di effettuare un confronto tra un'analisi che tenga conto esplicitamente del fenomeno dello sloshing e la tecnica standard di analisi strutturale in presenza di azioni sismiche, ossia il classico approccio dinamico lineare basato sull'analisi modale e lo spettro di risposta, si è considerato un serbatoio tipo Horton avente le caratteristiche riportate nella figura 1. Si premette che, nel caso dell'analisi dinamica lineare, il calcolo è stato fatto nell'ipotesi di serbatoio completamente pieno, in modo da evitare l'insorgenza di sollecitazioni dovute allo sloshing, in presenza delle quali sarebbe caduta la validità

delle ipotesi alla base del calcolo stesso. Per quanto riguarda le caratteristiche del liquido in termini di massa, si è fatto per semplicità riferimento al caso dell'acqua.

Per definire l'azione sismica, il serbatoio è stato idealmente collocato in una zona sismicamente significativa come la città di L'Aquila, caratterizzata secondo le NTC 2018 dallo spettro di progetto in accelerazione in figura 2. A partire dallo spettro di progetto, attraverso un opportuno software, è stato ricavato l'accelerogramma spettro-compatibile in fig. 3, da impiegare come sollecitazione alla base del modello per lo studio esplicito dell'interazione fluido-struttura.

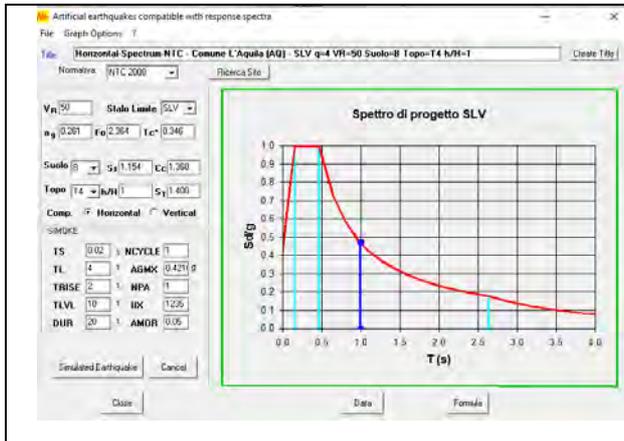


Figura 2. Spettro di progetto in accelerazione conforme alle NTC 2018

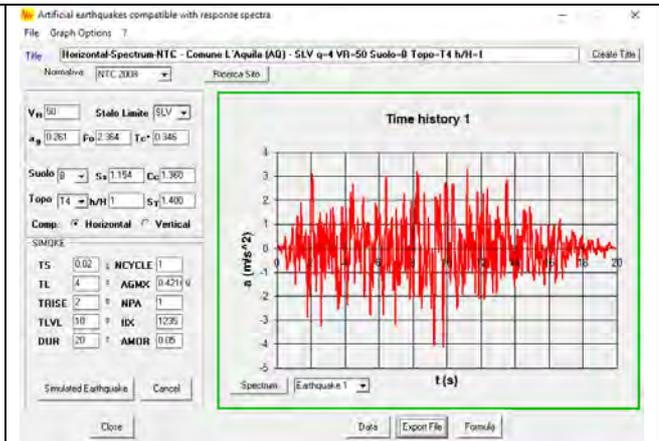


Figura 3. Accelerogramma spettro-compatibile

4.1 Analisi dinamica lineare modale e spettro di risposta

Per le analisi dinamiche lineari è stato utilizzato il software ProSap della 2SI di Ferrara. Nella figura 4 si riporta la geometria del modello analizzato; la mesh impiegata per la discretizzazione in elementi finiti triangolari a 6 nodi per la sfera e in elementi beam per le colonne è mostrata dalla figura 5.

Come anticipato poc'anzi, ai fini delle analisi il recipiente è stato considerato completamente pieno di liquido, con la massa del liquido solidale alla struttura. L'analisi dinamica modale ha permesso di ricavare i risultati in termini di frequenza, periodo e massa eccitata per i primi nove modi di vibrare esposti in figura 6.

Nella determinazione dello spettro di progetto allo SLV è stato considerato un fattore di comportamento pari a $q=1,5$; inoltre ai fini del successivo confronto con l'analisi di sloshing è stato considerato agente solo un sisma orizzontale in direzione X, con i parametri sismici riepilogati in figura 7.

Ai fini del confronto con l'analisi FSI si è soffermata l'attenzione sul taglio alla base delle colonne (figura 8) e sullo spostamento orizzontale, calcolato nell'analisi dinamica lineare con riferimento allo spettro elastico, alla sommità delle colonne (figura 9):

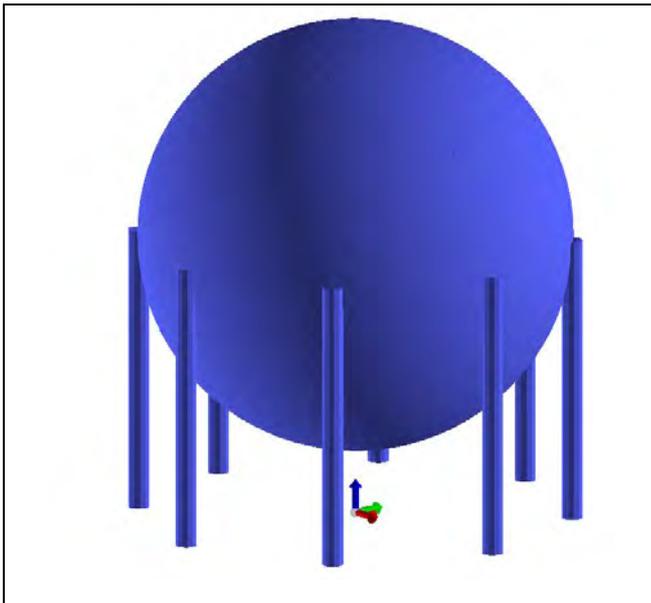


Figura 4. Modello in vista solida

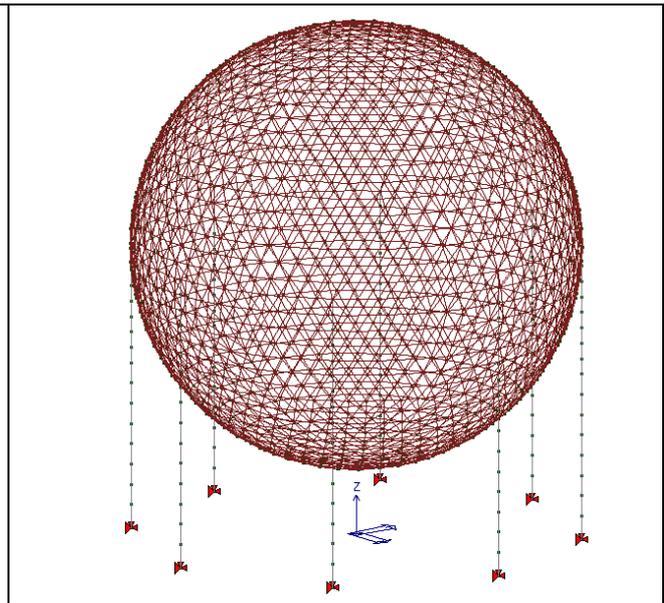


Figura 5. Mesh

Tabella analisi dinamiche

CDC	Modo	Frequen...	Periodo	X M effi...	%	Y M effi...	%	Z M effi...	%	RZ M effi...	%	Energia [...]	Fatt. eta
2	1	0.51367	1.94678	1087348...	99	629.34348	0	0.05479	0	1376.242...	0	0.00000	1.00000
2	2	0.51705	1.93406	628.36703	0	1087404...	99	0.00325	0	46.65704	0	0.00000	1.00000
2	3	0.78710	1.27049	56.73289	0	7.14670	0	0.00187	0	2839310...	99	0.00000	1.00000
2	4	6.10997	0.16367	0.11370	0	30.67023	0	0.04749	0	5.44197	0	0.00000	1.00000
2	5	6.11323	0.16358	31.68274	0	0.07455	0	0.05773	0	0.00141	0	0.00000	1.00000
2	6	7.12849	0.14028	0.06158	0	0.00306	0	1086482...	99	0.05002	0	0.00000	1.00000
2	7	29.32757	0.03410	0.05409	0	0.00457	0	1942.703...	0	0.01599	0	0.00000	1.00000
2	8	40.64014	0.02461	1246.987...	0	22.03946	0	0.54207	0	2.13466	0	0.00000	1.00000
2	9	40.69880	0.02457	22.15118	0	1239.250...	0	0.10413	0	0.00000	0	0.00000	1.00000

Figura 6. Risultati dell'analisi dinamica modale

Parametri e fattori spettrali

S.L.	ag	S	Fo	Fv	TB	TC	TD
SLO	0.079	1.680	2.399	0.910	0.129	0.386	1.916
SLD	0.104	1.680	2.330	1.015	0.132	0.397	2.017
SLV	0.261	1.616	2.360	1.626	0.158	0.475	2.642
SLC	0.334	1.511	2.400	1.872	0.162	0.486	2.936

Verticale per tutti: 1.400

eta SLO: 1.0, q SLD x: 1.0, q SLD y: 1.0, q SLD z: 1.0, q SLU x: 1.5, q SLU y: 1.5, q SLU z: 1.5

Smorzamento... 1.0, 1.0 <= Esistenti v. fragili

Duttilità: ND - non dissipativa, B - media, A - alta

Regolarità: in pianta, in altezza

Edifici isolati: 2.0 T is, 10.0 s esi

S (oriz.)

Sv (vert.)

Figura 7. Parametri e fattori spettrali

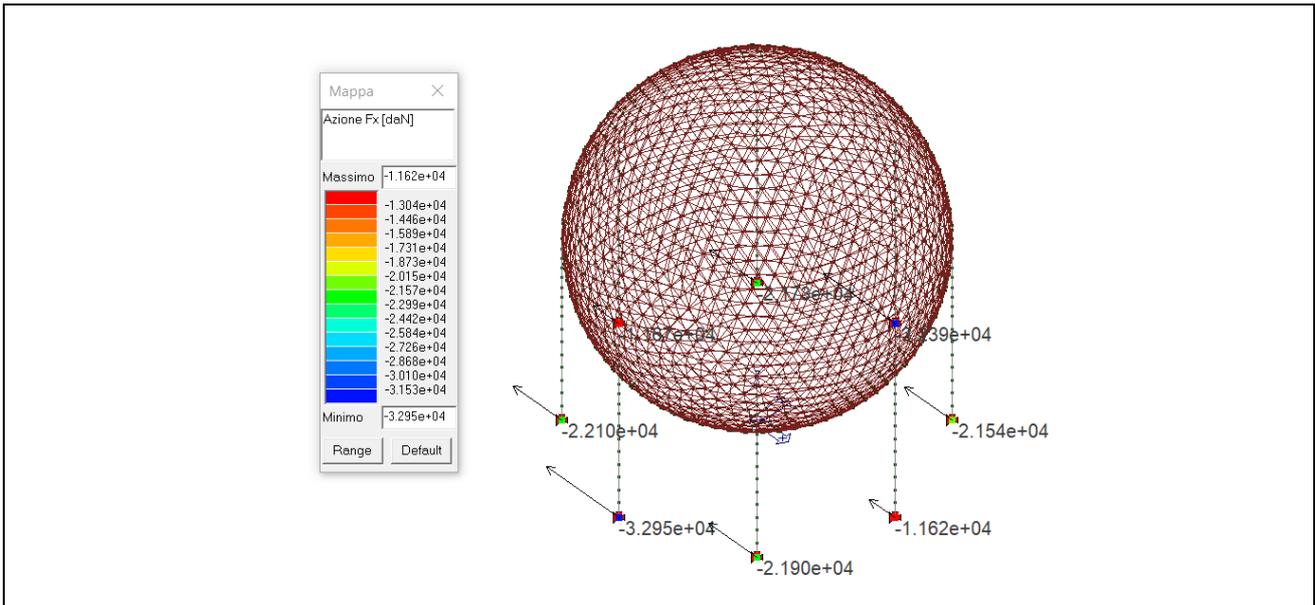


Figura 8. Valori del taglio alla base in condizioni sismiche

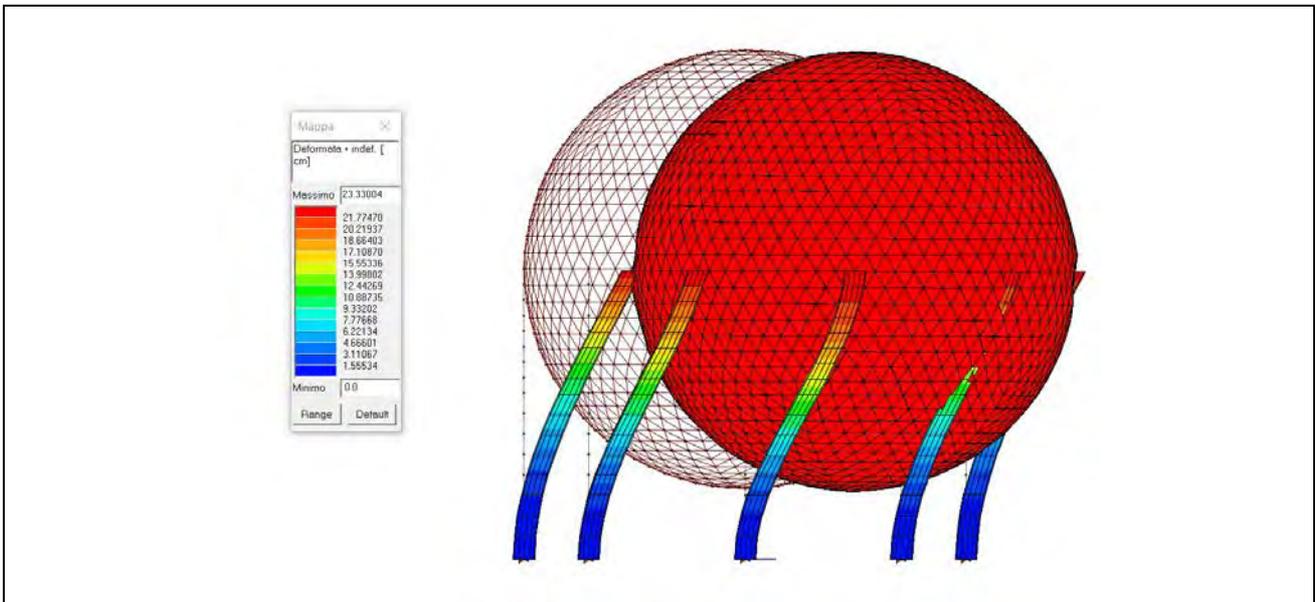


Figura 9. Deformata sotto l'azione del sisma e valori dello spostamento orizzontale

4.2 Interazione Fluido-Struttura mediante approccio Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL)

Per le analisi esplicite di sloshing è stato utilizzato il software ABAQUS della DASSAULT SYSTEMES.

In tal caso, il modello è costituito da n.3 sottomodelli (figura 10):

- Modello Euleriano
- Modello Lagrangiano costituito dalla sfera e le colonne
- Volume iniziale del liquido

Il solido (sfera e colonne) è stato considerato avere comportamento elastico lineare. La struttura è stata eccitata alla base delle colonne mediante un accelerogramma orizzontale in direzione X, ottenuto come descritto in precedenza. Le simulazioni hanno permesso di seguire lo sviluppo e il decorso del fenomeno dello sloshing, come evidente dalla figura 12

(modello in stato di quiete) e dalla figura 13 (deformazione della struttura e distribuzione del fluido in un generico istante dell'analisi dinamica).

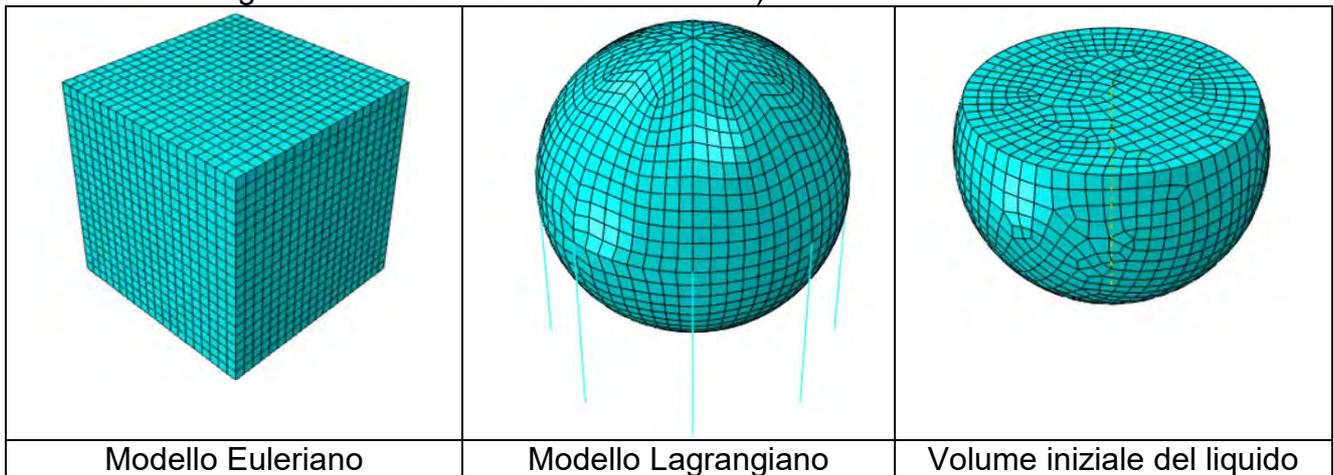


Figura 10. Mesh dei sottomodelli utilizzati nella FSI

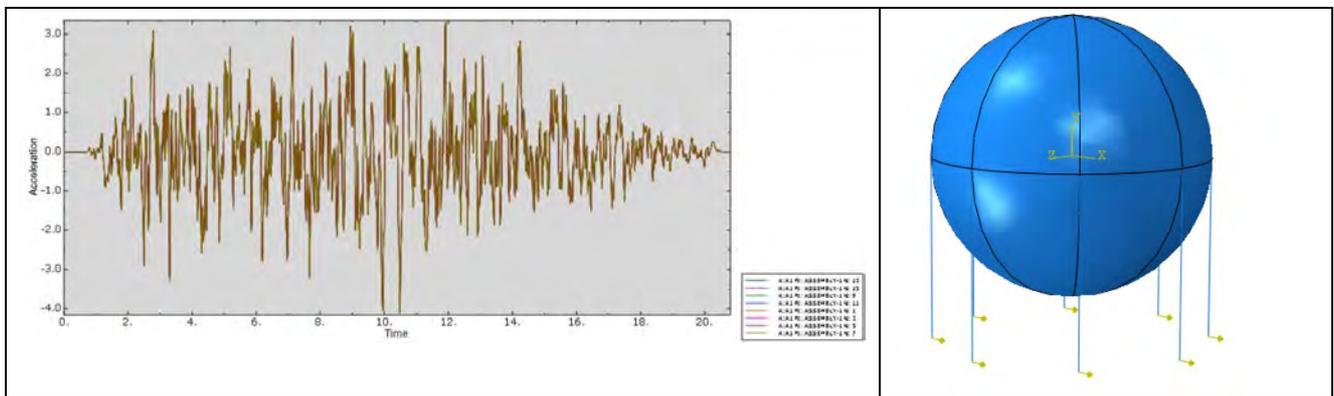


Figura 11. Accelerazione orizzontale applicata alla base delle colonne in dir. X

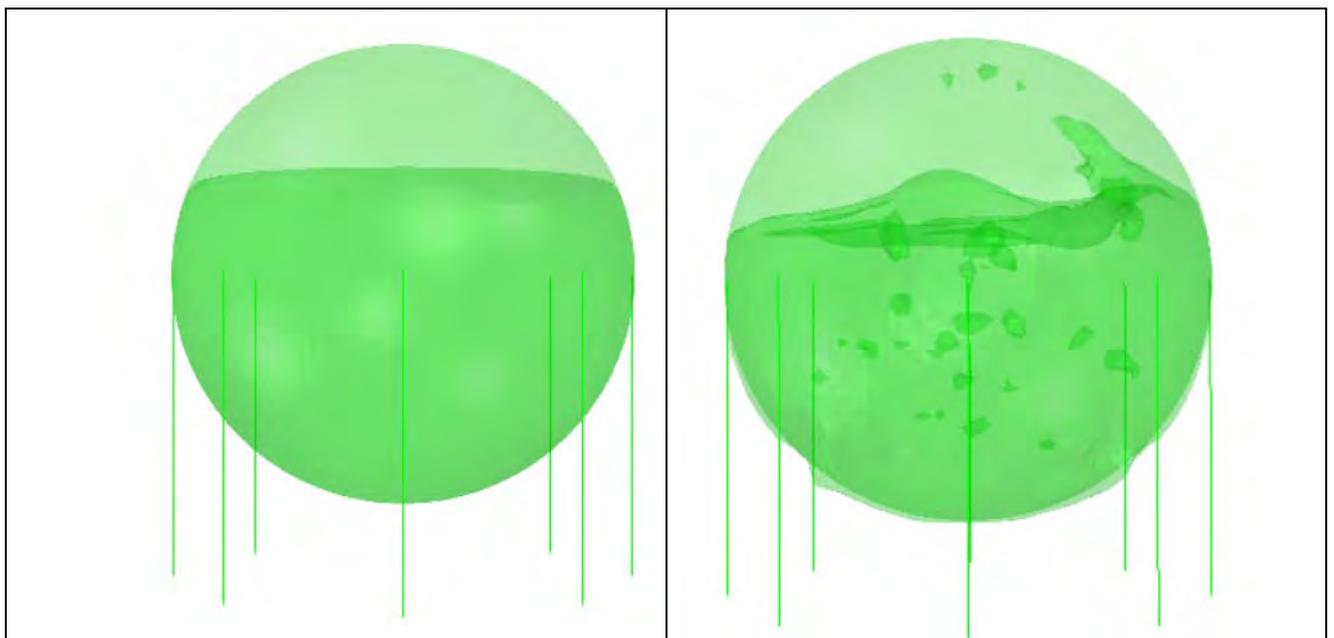


Figura 12. Modello completo indeformato

Figura 13. Fenomeno dello sloshing

La figura 14 riporta le time-history delle reazioni orizzontali alla base di tutte le 8 colonne di cui consta il serbatoio; in figura 15 è stata isolata una di tali reazioni, in modo da poterne apprezzare meglio la variazione nel tempo. Infine, in figura 16 è riportata la storia temporale dello spostamento alla sommità della stessa colonna considerata in figura 15.

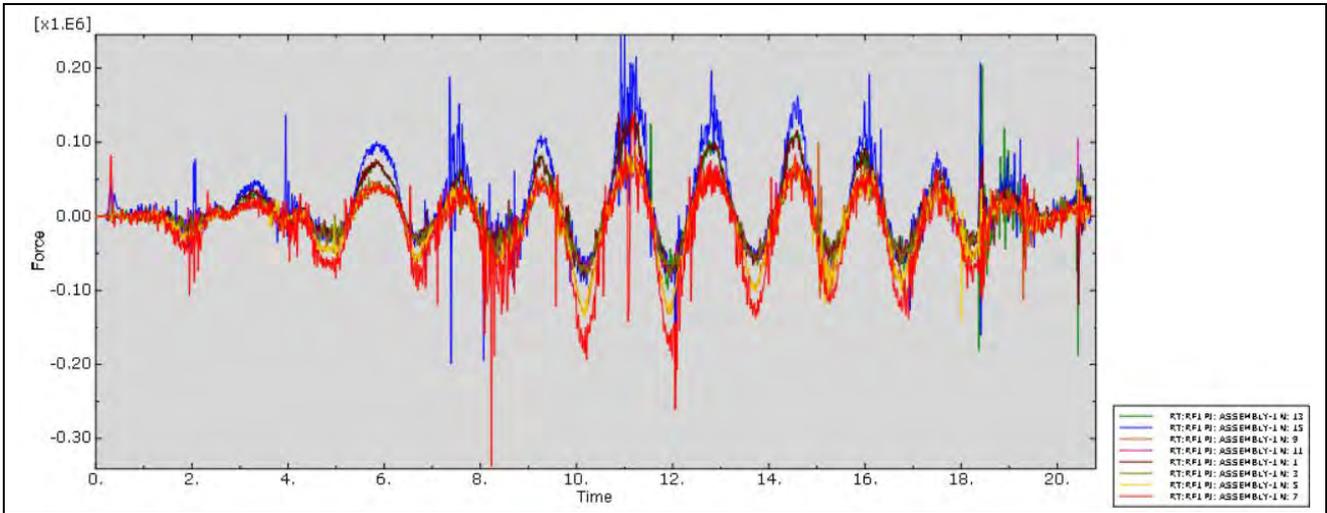


Figura 14. Taglio alla base in dir X (sisma) di tutte le otto colonne

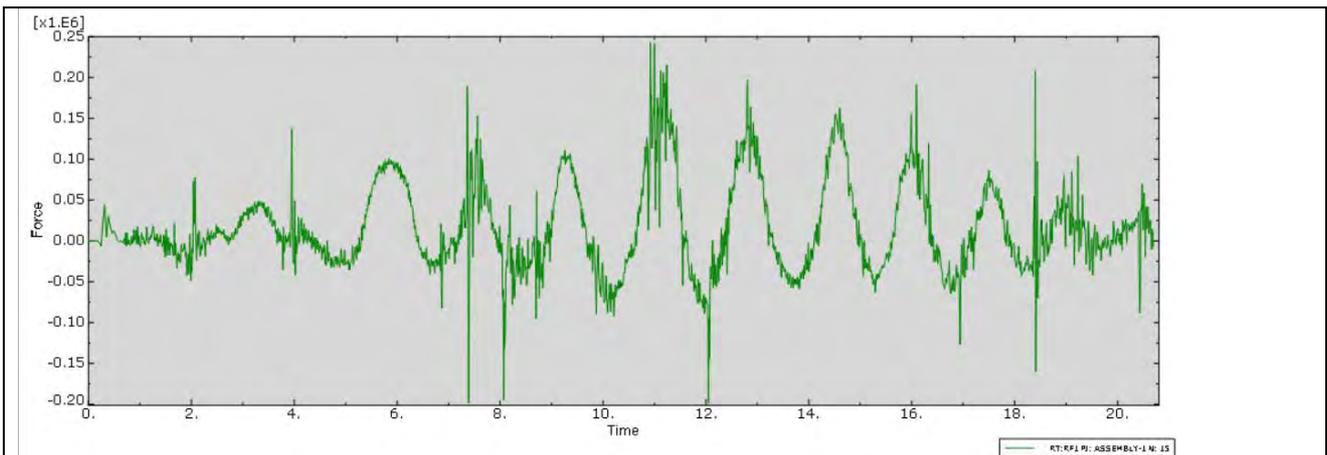


Figura 15. Taglio alla base dir X (sisma) di una singola colonna

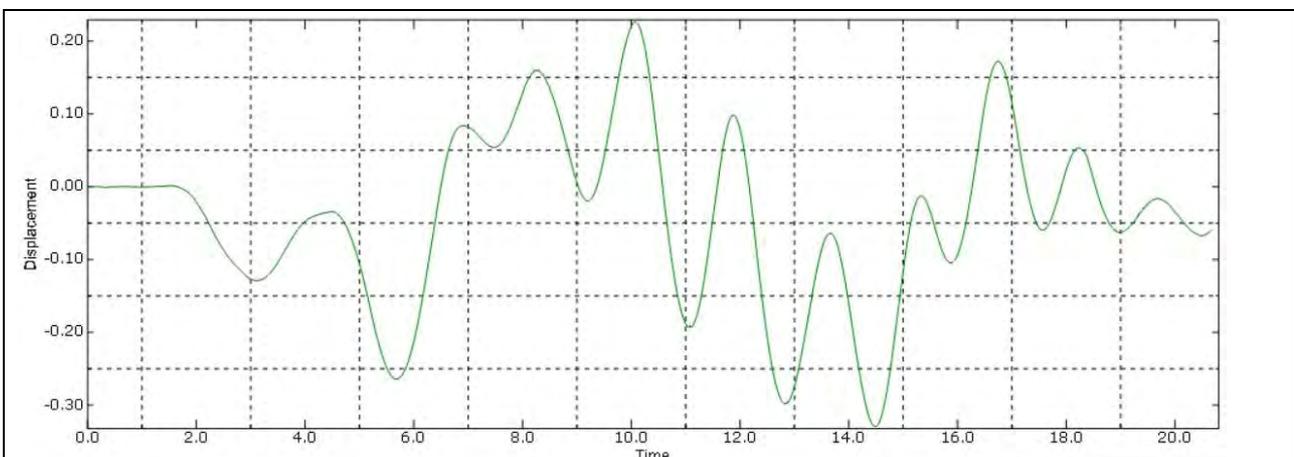


Figura 16. Spostamento orizzontale alla sommità di un pilastro

5. Confronti e conclusioni

Per confronto, nella tabella 1 si riportano i valori massimi e minimi del taglio alla base e lo spostamento massimo in sommità delle colonne per i due modelli analizzati:

Come si evince dalla tabella, in termini di sollecitazione l'analisi di sloshing, eseguita considerando un riempimento del serbatoio pari al 70%, ha dato valori massimi del taglio confrontabili con il taglio massimo ottenuto mediante analisi dinamica lineare con spettro di progetto e fattore di comportamento pari a $q=1,5$. In proposito, va rimarcato che in quest'ultimo caso il serbatoio è stato considerato interamente pieno, e quindi con una massa ben superiore. Per quanto riguarda gli spostamenti, invece, l'analisi di interazione esplicita fluido-struttura porta a stimare spostamenti maggiori del 39% rispetto a quelli dell'analisi lineare.

Tipi di analisi	Taglio alla base min/max (daN)	Spostamento orizzontale massimo (cm)
Modello lineare senza sloshing	11620/32950	23
Modello FSI con sloshing	25000/34000	32

Tabella 1. Confronti tra i due modelli analizzati

Si noti che entrambi i modelli non hanno tenuto conto della presenza di tiranti con disposizione a croce di S'Andrea tra le colonne, normalmente impiegati in queste strutture. Si osservi però che tali tiranti sono aste molto snelle e pertanto attive sostanzialmente solo nel caso di sforzi di trazione: ciò li rende difficili da analizzare con modelli lineari come l'analisi modale.

L'analisi proposta rappresenta un primo approccio, semplificato, alla rappresentazione degli effetti dello sloshing. Nell'immediato futuro si provvederà a tenere in conto anche il comportamento elastoplastico dei materiali costituenti le colonne: ciò è opportuno in considerazione degli elevati spostamenti ottenuti dal calcolo elastico. Emerge, inoltre, soprattutto nel caso dei serbatoi esistenti, il problema di progettare idonei sistemi di protezione antisismica come ad esempio sistemi basati sull'uso dei dissipatori viscosi, che possano essere efficaci anche ai fini della riduzione degli spostamenti.

6. Bibliografia

- [1] M. Souli, D. J. Benson. *Arbitrary Lagrangian-Eulerian and Fluid-Structure Interaction*. Wiley, 2010
- [2] D. Violeau. *Fluid Mechanics and the SPH Method*. Oxford University Press, 2012
- [3] Z. Ozdemir, M. Moatamedi, Y.M. Fahjan and M. Souli. *ALE and Fluid Structure Interaction for Sloshing Analysis*. *Int. Jnl. of Multiphysics*. 2009; Volume 3; pagg. 307-336
- [4] Conversa N. *Adeguamento sismico di un serbatoio sferico metallico (sfera Horton)*. Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Civile – Indirizzo Strutture - Politecnico di Bari. A.A. 2015/2016.
- [5] V. Annoscia, N. Pecere, A. Altieri. *La valutazione del rischio sismico nella progettazione delle attrezzature a pressione*. Convegno SAFAP 2010 (ISBN 978-88-7484-230-8).
- [6] V. Annoscia, N. Pecere, A. Altieri. *Progettazione sismica degli apparecchi a pressione e dei tanks con la presenza di liquido*. Convegno SAFAP 2012 (ISBN 978-88-7484-230-8).
- [7] V. Annoscia, N. Pecere, A. Altieri. *Utilizzo di norme nazionali in ambito PED*. Convegno SAFAP 2014 (ISBN 978-88-7484-418-0).

[8] M. D. Piccioni, A. Fraddosio, A. Altieri, V. Annoscia, N. Conversa, N. Pecere. Lo studio di vulnerabilità sismica e metodi per il miglioramento e/o adeguamento sismico dei serbatoi sferici di GPL tipo Horton in Stabilimenti soggetti a Rischio di Incidente Rilevante. Convegno SAFAP 2016 (ISBN 978-88-7484-520-0).

[9] A. Castellano, A. Fraddosio, N. Pecere, M. D. Piccioni. Seismic Behavior and Retrofitting of Horton Sphere Liquid Storage Tanks. ISDEE International Symposium on Durrës Earthquakes and Eurocodes. September 21st to 22nd, 2020.

Rischio NaTech da sisma per stabilimenti con pericolo di incidente rilevante, un caso studio: serbatoi atmosferici a tetto galleggiante

M. Salimbeni¹, M. De Angelis¹, M. Ciucci²

¹ Università degli Studi di Roma La Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica.

² Inail – Dit

Sommario

Eventi recenti hanno messo in luce come l'interazione tra rischi naturali e rischio industriale (eventi NaTech) possa dar luogo ad incidenti rilevanti. In termini di sicurezza il riferimento normativo per stabilimenti con Pericolo di Incidente Rilevante (PIR) è il D.Lgs. n.105/2015, che prevede esplicitamente l'analisi dei rischi NaTech, nell'ambito dei quali il sisma è uno dei più significativi. Per tali impianti, i codici normativi e le linee guida risultano essere non sempre adeguati allo svolgimento di un'analisi completa del rischio sismico, che richiede un approccio multidisciplinare, data l'elevata complessità del problema e le numerose tipologie di apparecchiature. Inoltre, le verifiche di sicurezza proposte dalle normative si concentrano perlopiù sugli elementi strutturali. Scopo di questo lavoro è fornire indicazioni circa la valutazione del rischio sismico attraverso l'analisi di un caso studio, considerando aspetti strutturali e non strutturali di un serbatoio atmosferico a tetto galleggiante, componente altamente vulnerabile e largamente diffuso per lo stoccaggio di sostanze pericolose. Infatti, danni strutturali e non strutturali ad un serbatoio possono provocare il rilascio di sostanze pericolose. È stata approfondita, quindi, l'interazione fluido-tetto, viste le criticità legate alla componente convettiva del moto del fluido innescato dal terremoto. Le analisi dinamiche, svolte sulla base di modelli analitici semplificati relativi allo studio del comportamento dei serbatoi, hanno messo in evidenza come per una adeguata e completa valutazione del rischio sismico sia necessario considerare la presenza del tetto galleggiante. Infatti, eccessive deformazioni dello stesso possono provocare la crisi del sistema di tenuta e, di conseguenza, il rilascio di sostanze pericolose.

1 Introduzione

Negli ultimi decenni diverse catastrofi naturali, i terremoti di Kobe (Giappone, 1995), Izmit (Kocaeli, Turchia, 1999), Gujarat (India, 2001), Tokachi-Oki (Giappone, 2003), il tornado Katrina nella costa orientale degli Stati Uniti (2005), hanno evidenziato che i disastri di origine naturale sono in grado di provocare importanti danni agli stabilimenti industriali, provocando spesso il rilascio di sostanze pericolose [1]. Tali disastri vengono definiti eventi NaTech (Natural Hazard Triggering Technological Disasters), nascono dall'interazione tra rischi naturali e rischio industriale e possono dar luogo ad incidenti rilevanti, nei quali sono coinvolte sostanze pericolose. Tra gli eventi NaTech, il sisma è uno dei più significativi, poiché investe contemporaneamente l'intero stabilimento e può causare danni simultanei alle apparecchiature. La vulnerabilità degli stabilimenti industriali deriva, soprattutto, dalla complessità del layout e dalla possibilità che si formino catene incidentali, con eventuale effetto domino, che possono provocare esplosioni, incendi e rilasci di sostanze pericolose stoccate e impiegate nei processi industriali [2].

In termini di sicurezza, il riferimento normativo per stabilimenti con Pericolo di Incidente Rilevante (PIR) è il D.Lgs. n.105/2015, che prevede esplicitamente l'analisi dei rischi NaTech. Attualmente però, i codici normativi e le linee guida in materia risultano essere non sempre adeguati allo svolgimento di un'analisi completa del rischio sismico. Infatti, le

verifiche di sicurezza si concentrano perlopiù sugli aspetti strutturali delle diverse componenti, trascurando la possibilità di crisi degli elementi non strutturali che pure possono essere coinvolti- se non addirittura causare- un incidente rilevante.

Nel presente lavoro vengono applicate le indicazioni normative in ambito di valutazione del rischio sismico in stabilimenti PIR, attraverso l'analisi di un caso studio, un serbatoio atmosferico a tetto galleggiante, considerando anche l'interazione fluido-tetto galleggiante, viste le criticità legate alla componente convettiva del moto del fluido innescato dal terremoto.

2 Serbatoi atmosferici a tetto galleggiante

I serbatoi atmosferici a tetto galleggiante [3][4] (Fig. 2.1) sono impiegati nello stoccaggio di sostanze che formano una notevole quantità di vapori. Il tetto galleggiante è sempre a contatto con il liquido, in modo da seguirne le variazioni di livello ed eliminare la camera superiore di gas, evitando così la formazione di miscele infiammabili e/o esplosive e riducendo le perdite per evaporazione del prodotto. Principalmente sono due i modelli di tetto galleggiante:

- a singolo pontone, costituito da un unico strato di lastre metalliche saldate al bordo del quale vi sono una serie di galleggianti (Fig. 2.1a);
- a doppio pontone, costituito da due lastre sovrapposte con intercapedine ed irrigidimenti di profilati in acciaio o tralicci (Fig. 2.1b).

La tenuta del tetto galleggiante è garantita da un sistema deformabile installato tra tetto e mantello, che consente lo spostamento verticale del tetto nelle fasi di immissione/scarico del fluido contenuto.

Per il funzionamento del serbatoio sono necessari alcuni elementi, come i sistemi di tubazioni, uno scarico di fondo, una scala, il sistema di drenaggio delle acque meteoriche, i sensori di controllo.

Per la prevenzione degli incidenti, i serbatoi sono dotati di sistemi di allarme e blocco automatico per altissimo livello di riempimento, sistemi di allarme per inclinazione anomala del tetto, sistemi di rilevazione incendio, sistemi di continuità elettrica tra tetto e pareti del serbatoio messo a terra. Inoltre, sono presenti sistemi di protezione, quali sistemi di raffreddamento alle pareti e di immissione schiuma con mezzi fissi e/o mobili per lo spegnimento degli incendi.

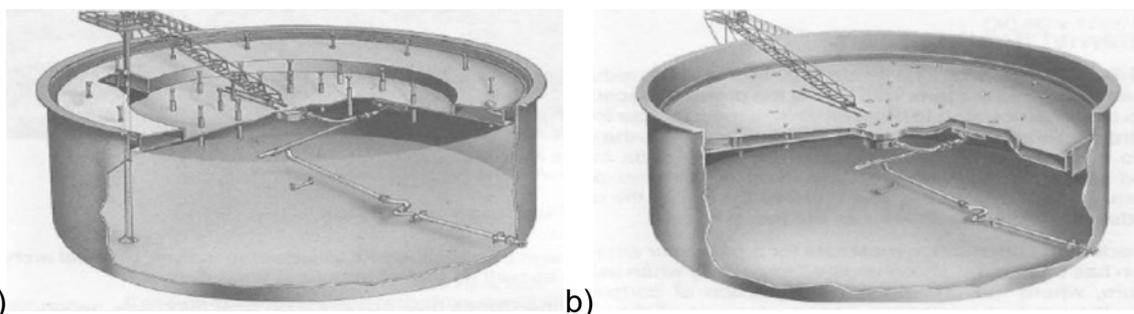


Figura 2.1: a) Serbatoio atmosferico con tetto galleggiante a singolo pontone b) Serbatoio atmosferico con tetto galleggiante a doppio pontone [4]

2.1 Comportamento dinamico

Il comportamento dinamico di un serbatoio atmosferico è essenzialmente riconducibile alla dinamica del fluido contenuto indotta dal terremoto.

Dato un serbatoio atmosferico cilindrico ad asse verticale soggetto ad una accelerazione orizzontale alla base, infatti, il fluido in moto esercita una sovrappressione idrodinamica sul serbatoio che può essere convenientemente suddivisa in tre componenti:

- pressione idrodinamica dovuta all'accelerazione del suolo considerando rigide le pareti del serbatoio, detta "impulsiva";
- pressione idrodinamica dovuta al moto oscillatorio della superficie del fluido, detta "di sloshing" o "convettiva";
- pressione idrodinamica dovuta alla flessibilità delle pareti del serbatoio, detta "flessibile".

I serbatoi si caratterizzano geometricamente tramite il rapporto di forma $s = H/R$, dove H è l'altezza di riempimento e R il raggio del serbatoio; in particolare, i modi convettivi- masse e frequenze modali- dipendono esclusivamente dalla geometria del serbatoio (Fig. 2.2).

I serbatoi atmosferici a tetto galleggiante sono considerati strutture tozze, con s compreso tra 0,3 e 1,5 circa. Per tali valori di s , la componente flessibile della sovrappressione idrodinamica non è significativa, mentre la componente convettiva non può essere trascurata, come dimostrano i rapporti tra massa convettiva m_{ci} (con $i = 1,2,3$) e massa liquida totale m_L , che risultano confrontabili con il rapporto m_i/m_L , dove m_i rappresenta la massa impulsiva (Fig. 2.2a).

Housner [5] propone per primo un modello semplificato equivalente a due masse concentrate per il calcolo degli effetti idrodinamici su un serbatoio rigido (Fig. 2.3): la massa impulsiva M_0 , posta ad una altezza h_0 , si muove solidalmente con il serbatoio aumentando l'inerzia della struttura, mentre la massa convettiva M_1 è connessa al serbatoio tramite una molla all'altezza h_1 , dove M_1 è la massa corrispondente al primo modo di vibrare del fluido.

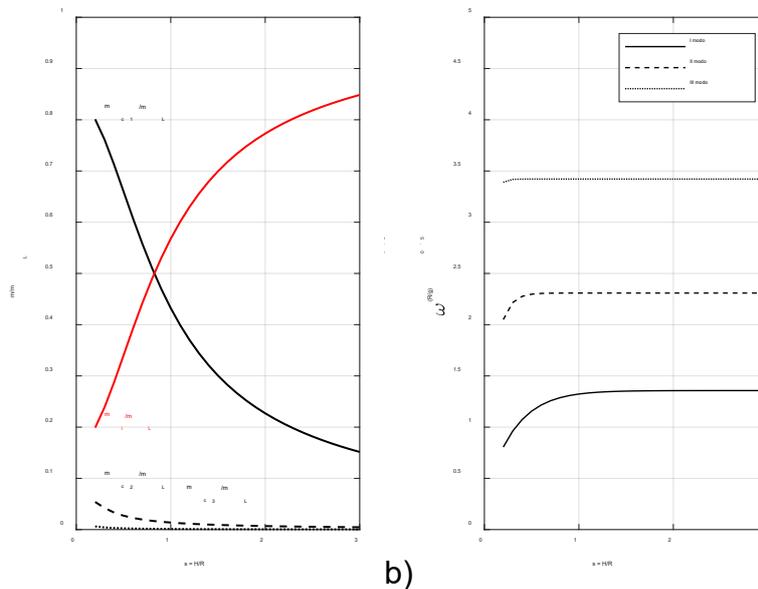


Figura 2.2: a) Rapporti di massa convettivi e impulsivo, b) Frequenze convettive adimensionalizzate

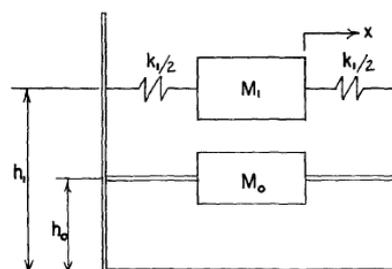


Figura 2.3: Modello meccanico a masse concentrate [5]

Mantenendo l'approccio a masse concentrate, altri autori hanno sviluppato modelli per serbatoi flessibili [6]–[8], ovvero tenendo in conto la flessibilità delle pareti del serbatoio.

2.2 Tipologie di danneggiamento

Le tipologie di danneggiamento di un serbatoio atmosferico a tetto galleggiante, a seguito di un terremoto, sono varie e dipendono dalle componenti impulsiva e convettiva del moto del fluido contenuto.

I danni riconducibili alla componente impulsiva coinvolgono principalmente gli elementi strutturali:

- Instabilità plastica del mantello, o deformazione a zampa d'elefante. Le tensioni circonferenziali, unitamente a quelle verticali di compressione, crescono fino a che, in prossimità del fondo, non si produce una instabilità locale.
- Instabilità elastica del mantello, o deformazione a diamante. La tensione verticale supera il valore critico dello sforzo verticale.
- Sollevamento del fondo e sue conseguenze, quali rottura del cordone di saldatura tra il fondo ed il mantello in serbatoi non ancorati, rottura in corrispondenza dell'ingresso/uscita di tubazioni.

La componente convettiva, invece, è responsabile dei danni alla parte superiore del mantello e al tetto del serbatoio, quali deformazioni eccessive, inclinazione e affondamento del tetto. In particolare, la crisi del tetto galleggiante e, soprattutto, degli elementi non strutturali ad esso connessi (es.: sistema di tenuta del tetto, sistemi di smaltimento delle acque meteoriche, sistemi di sicurezza), può provocare perdita di sostanze pericolose-inquinanti ed infiammabili- con possibile innesco di incendi ed esplosioni; oltre che per la combustione di sostanze sversate, un incendio può innescarsi a partire dagli urti ripetuti tra tetto galleggiante e mantello.

Pertanto, i danni connessi alla componente convettiva del moto del fluido sono quelli maggiormente coinvolti in incidenti che possono divenire rilevanti. Secondo uno studio [9] relativo agli incidenti avvenuti negli anni 1981-1995 nei serbatoi di stoccaggio atmosferici a tetto galleggiante di grande capacità (diametro ≥ 40 m), le criticità riscontrate hanno riguardato rilasci di idrocarburi liquidi sul tetto e nel bacino di contenimento, affondamento del tetto galleggiante e incendi in corrispondenza della tenuta del tetto, sul tetto e nel bacino di contenimento. Tali incidenti, che si possono verificare anche in assenza di terremoto- per sovra riempimento, guasti al drenaggio acqua piovana, pioggia intensa, guasti ai cassoni di galleggiamento, fulmini, elettricità statica, hanno maggiore probabilità di accadimento in presenza di sisma, a causa del moto del fluido e del tetto galleggiante.



Figura 2.4: Incendio e affondamento del tetto galleggiante

3 Normativa di riferimento

Per gli stabilimenti industriali, in Italia si applicano le disposizioni contenute nel D.M. del 17.01.2018 “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, la cui Circolare del 21.01.2019 individua i componenti non strutturali che richiedono una valutazione sismica. In generale, si richiede una maggiore priorità di adeguamento sismico per i sistemi che presentano un’elevata vulnerabilità, una grande importanza, un basso costo di adeguamento sismico e una limitata interruzione dei servizi necessaria per portare a termine l’adeguamento (Tabella C8.7.6.3.I).

La progettazione dei serbatoi in Italia fa riferimento alle NTC 2018 ed anche agli Eurocodici. Per i serbatoi di stoccaggio le verifiche possono essere eseguite secondo l’EC 8-4 o secondo le API Std 650. Altre norme degne di nota e utilizzate a livello internazionale sono le indiane IITK-GSDMA “Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks”, e le neozelandesi “New Zealand Recommendations Seismic Design of Storage Tanks”.

In questo lavoro sono approfonditi i modelli proposti dalle API Std 650 e dall’EC8-4.

L’EC8-4 propone un modello meccanico a masse concentrate che tiene conto sia della componente impulsiva che convettiva del moto del fluido, ed anche di una componente di interazione fluido-struttura nel caso di serbatoio a pareti flessibili. La norma fornisce sia le espressioni analitiche per il calcolo della pressione idrodinamica agente sul mantello e sulla base, sia il modello semplificato proposto in [8] per il calcolo del taglio alla base e del momento ribaltante, valido nel caso di serbatoio a pareti flessibili. Infine, la norma prevede anche la modifica delle caratteristiche dinamiche dovuta all’interazione suolo-struttura, ovvero aumento del periodo di vibrare impulsivo e dello smorzamento totale della struttura. Le verifiche di sicurezza riguardano l’instabilità del mantello, lo scorrimento e il sollevamento del fondo e il franco libero, che deve essere superiore alla massima altezza dell’onda di sloshing.

Gli Standards API 650, nell’Appendice E, propongono una procedura semplificata per la progettazione dei serbatoi basata sul metodo delle tensioni ammissibili: la procedura prevede l’applicazione di forze statiche equivalenti al sisma di progetto ad un modello meccanico a masse concentrate. L’azione impulsiva presenta smorzamenti dell’ordine del 5%, l’azione convettiva ha smorzamento ridotto allo 0,5%. Per ciascuna delle due componenti vengono fornite direttamente le espressioni per il calcolo del taglio alla base, del momento ribaltante e delle tensioni sul mantello. In questo caso, le verifiche di sicurezza riguardano trazione e compressione massima agenti sul mantello, sollevamento del fondo e franco libero.

Le prescrizioni antisismiche dei codici normativi riguardano la sicurezza del mantello e del fondo, legata prevalentemente alla dinamica impulsiva del fluido; il moto convettivo è esplicitamente considerato solamente in termini di massima altezza dell’onda di sloshing. Sono assenti indicazioni progettuali e di verifica per sisma sia per tetto galleggiante che per gli elementi non strutturali ed i sistemi di sicurezza.

3.1 Applicazione al caso studio

Dato il serbatoio di stoccaggio olio a tetto galleggiante, la cui geometria è riportata in tab. 3.1, sono state svolte le verifiche di sicurezza così come indicato dai codici EC8-4 e API 650, utilizzando gli spettri di risposta in Fig. 3.1.

raggio	22.50 m
altezza mantello	14.72 m
capacità utile serbatoio	20000 m ³
spessore medio mantello	14.96 mm
spessore lamiera di fondo	9.35 mm
modulo elastico acciaio	200 GPa
tensione di snervamento acciaio	275 MPa
peso specifico acciaio	7860 kg/m ³
peso specifico liquido	778 kg/m ³
peso proprio copertura	1495.3 kN
peso proprio mantello	1962.1 kN

Tabella 3.1: Geometria serbatoio (O) per le componenti impulsiva ($\xi=5\%$) e convettiva ($\xi=0.5\%$)

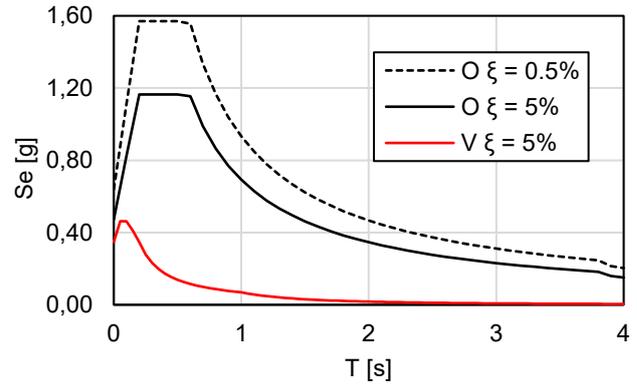


Figura 3.1: Spettro di risposta orizzontale (O) per le componenti impulsiva ($\xi=5\%$) e convettiva ($\xi=0.5\%$) e spettro di risposta verticale (V)

Le API Std 650 forniscono delle espressioni per il calcolo delle tensioni di parallelo e meridiano del mantello, l'EC8-4, invece, propone la formulazione analitica delle pressioni idrodinamiche dovute alle componenti impulsiva e convettive del liquido stoccato. Le tensioni di parallelo e meridiano secondo il modello dell'EC8-4, pertanto, sono state valutate applicando tali pressioni ad un modello agli elementi finiti: in particolare, è stato necessario valutare la sollecitazione di compressione massima nei meridiani (Fig. 3.2a) e di trazione massima dei paralleli (Fig. 3.2b).

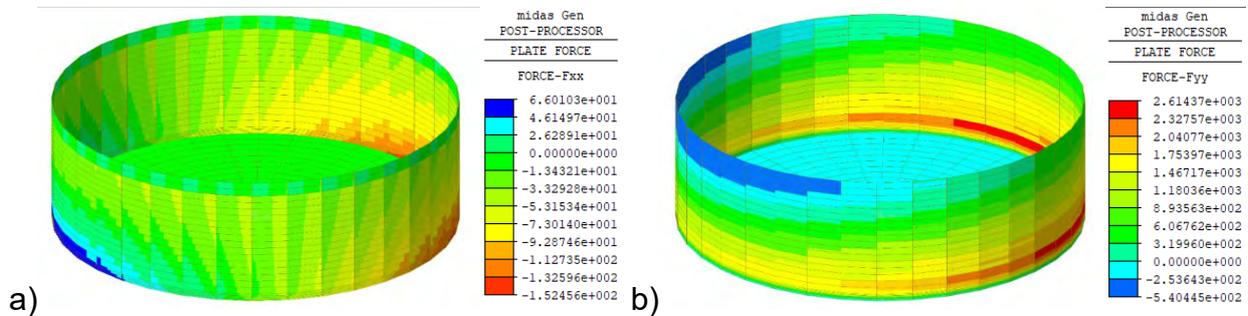


Figura 3.2: a) Sollecitazioni di compressione di meridiano b) Sollecitazioni di trazione di parallelo

Dal confronto tra i valori di taglio e momento sollecitanti alla base ottenuti applicando i due codici normativi (Tab. 3.2), emerge una notevole differenza, che dipende dalle accelerazioni associate alle componenti impulsiva e convettiva, nonché dai metodi di combinazione di tali componenti, SRSS per le API 650, somma diretta per l'EC8-4.

Come è evidente dai risultati riportati in Tab 3.2, è necessario operare una scelta consapevole del fattore di comportamento: la norma europea non consente l'utilizzo di fattori superiori al valore di 1,5, mentre le API Std 650 assegnano un fattore 3,5. Per tale motivo, l'EC8-4 risulta essere a favore di sicurezza, mantenendo il comportamento del componente in campo elastico.

Le verifiche sul mantello, riportate in Tab. 3.3 sottoforma di rapporti capacità/domanda, sebbene risultino ampiamente soddisfatte secondo entrambe le normative, non sono direttamente confrontabili per via della diversa formulazione dell'espressione da verificare.

fattore di comportamento	API 650		EC8-4	
	impulsivo	convettivo	impulsivo	convettivo
	3.5	2	1.5	1
accelerazione O (g)	0.449	0.100*	1.047	0.100*
accelerazione V (g)	0.316		0.313	
taglio (kN)	25955.7		68703.0	
momento (kNm)	136996.9		382484.3	

Tabella 3.2: Confronto tra le azioni sollecitanti (*l'accelerazione orizzontale associata alla componente convettiva non può essere inferiore a 0.1 g)

	API Std 650	EC8-4
instabilità elasto-plastica	-	10.1
instabilità elastica	-	7.7
compressione massima	6.0	-
trazione massima	4.9	-

Tabella 3.3: Rapporti di verifica capacità/domanda

4 Interazione fluido-tetto galleggiante

Prima degli anni '50, il tetto galleggiante veniva considerato come elemento non strutturale ed il suo contributo alla risposta si limitava ad un incremento dello smorzamento; tutta la progettazione si basava sulle teorie proposte da Jacobsen [10] e Senda e Nakagawa [11] per serbatoi cilindrici. In Nakagawa [12] il tetto viene modellato come una piastra rigida priva di massa e viene applicata la teoria del potenziale lineare per risolvere il problema di interazione fluido-tetto. Successivamente, in Sakai et al [13] il tetto viene modellato con una piastra elastica con massa, rimanendo ancora nell'ambito della teoria del potenziale elastico. Altri autori si sono poi occupati degli aspetti non lineari del problema [13][14].

In Matsui [16] il tetto galleggiante a doppio pontone è modellato con una piastra elastica isotropa con massa e rigidezza uniformi. In Matsui [17] il tetto galleggiante a singolo pontone è modellato con una piastra isotropa elastica a massa e rigidezza costanti nella zona centrale e una trave al bordo di rigidezza più elevata. Entrambe le formulazioni proposte in [15][16] si inquadrano nella teoria del potenziale lineare.

4.1 Applicazione al caso studio

Dato il serbatoio presentato al paragrafo 3.1, sono state ipotizzate le tre configurazioni presentate in Fig. 4.1 e, con le ipotesi di pareti rigide del serbatoio, fluido non viscoso, incomprimibile e irrotazionale, sono stati applicate le formulazioni proposte in [15][16].

Dati i periodi di vibrare convettivi del fluido e del sistema fluido-tetto (Fig. 4.2a), è noto che la presenza del tetto non altera il primo modo convettivo del fluido, indipendentemente dalla rigidezza; pertanto, è ragionevole trascurare la presenza del tetto galleggiante in problemi che coinvolgono prevalentemente aspetti strutturali del serbatoio. I periodi di vibrare superiori al primo, invece, dipendono principalmente dalla rigidezza del tetto galleggiante.

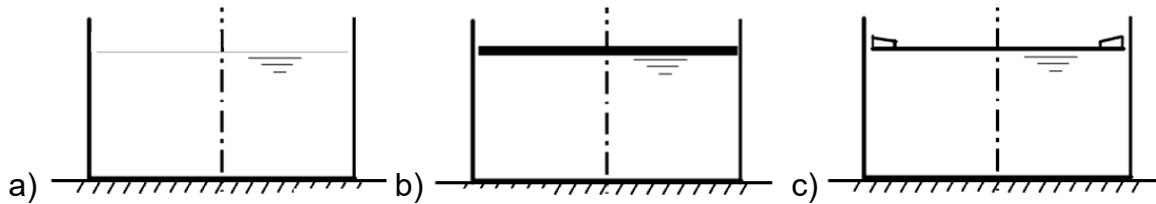


Figura 4.1: a) Serbatoio a superficie libera, b) Serbatoio con tetto galleggiante a doppio pontone c) Serbatoio con tetto galleggiante a singolo pontone

Assegnato l'accelerogramma alla base corrispondente al terremoto dell'Irpinia del 1980 in direzione orizzontale, gli spostamenti e le sollecitazioni del tetto galleggiante nelle due configurazioni sono riportate in Fig. 4.2.

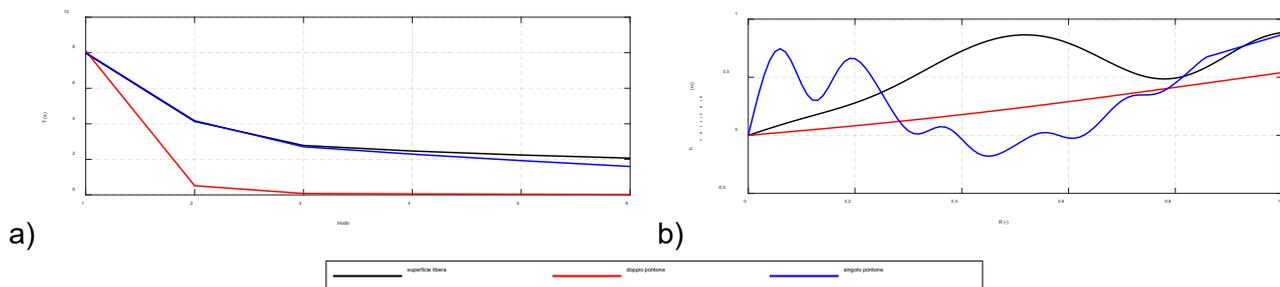


Figura 4.2: a) Periodi dei modi di vibrare, b) Spostamenti verticali

Per quanto riguarda lo spostamento convettivo massimo al bordo, non si evidenziano significative differenze fra i tre casi (Fig. 4.2b), ad eccezione del tetto a doppio pontone che, data la sua rigidità, mitiga la massima altezza dell'onda di sloshing.

Nel caso di tetti flessibili, come il tetto a singolo pontone in Fig 4.2b, si possono verificare, però, grandi deformazioni, con la conseguente crisi del pontone stesso e degli elementi non strutturali ad esso connessi, primi fra tutti il sistema di tenuta e i dispositivi di sicurezza.

A conferma dei risultati ottenuti, alcuni autori si sono occupati di questo aspetto: in Goudarzi et al [15] il secondo modo di sloshing induce deformazioni verticali fuori piano della piastra interna di un tetto a singolo pontone, che comporta una contrazione del tetto stesso in direzione orizzontale, causando deformazioni ellittiche del pontone; in Yamauchi et al [14] si considerano il comportamento non lineare del primo modo di sloshing e le grandi deformazioni del tetto a singolo pontone dovute secondo modo.

5 Sistemi di gestione e mitigazione del rischio sismico

La riduzione del rischio sismico si può ottenere mediante adeguamento/miglioramento secondo normativa e/o tramite monitoraggio strutturale [18]. Nel primo caso, possono essere svolti interventi tradizionali o innovativi di protezione sismica passiva. Gli interventi di tipo innovativo si sono dimostrati nel tempo utili ed efficaci per diversi tipi di costruzioni civili (edifici, grattacieli, ponti ecc.), e negli ultimi anni sono stati applicati anche in campo industriale, a seguito di studi condotti sul tema [2][19]–[21].

Nei casi in cui l'adeguamento o il miglioramento non consentano di raggiungere il livello minimo di sicurezza richiesto (costi elevati, impossibilità di interruzione di attività, realizzazione complessa), è opportuno realizzare il monitoraggio degli elementi critici. Il monitoraggio strutturale ha come obiettivo il "controllo dello stato di salute" della costruzione, tramite la registrazione in tempo reale di grandezze che caratterizzano la struttura; si avvale di strumenti di misura, come trasduttori di spostamento, estensimetri, inclinometri, accelerometri, sensori per la fuoriuscita di sostanza, misuratori del livello di riempimento [22].

Generalmente, già in condizioni di esercizio le componenti industriali sono monitorate; pertanto, arricchendo la rete sensoristica presente con strumenti SMART [23], sia contactless che installati direttamente sulla struttura in punti di interesse, è possibile realizzare un monitoraggio della risposta strutturale anche in caso di sisma.

Tale sistema di monitoraggio del rischio sismico, se integrato con sistemi automatici di segnalazione del pericolo nel caso in cui una o più grandezze di controllo superino determinate soglie di sicurezza, consente la realizzazione in sito di un Earthquake Early Warning System (EWW). A partire dall'avviso di pericolo emanato grazie al "sistema di allertamento precoce", è possibile avviare le procedure previste per la gestione e la mitigazione delle conseguenze degli incidenti, come l'interruzione delle attività, la chiusura delle valvole, l'attivazione dei dispositivi di sicurezza o dei sistemi di controllo attivo se presenti.

6 Conclusioni

Come sottolineato nel D.Lgs. n.105/2015, il rischio NaTech da sisma non può essere trascurato durante lo svolgimento di una analisi dei rischi per stabilimenti PIR. In particolare, i serbatoi atmosferici a tetto galleggiante, impiegati per lo stoccaggio di sostanze pericolose ed inquinanti, risultano essere vulnerabili ai terremoti. Le tipologie di danneggiamento che possono dar luogo ad incidenti rilevanti, quali sversamento di sostanza pericolosa, innesco di incendi od esplosione, coinvolgono prevalentemente il tetto galleggiante e gli elementi non strutturali ad esso connessi, ovvero i sistemi di tenuta, di smaltimento delle acque meteoriche e di sicurezza. Le verifiche di sicurezza proposte dai codici normativi per la valutazione della vulnerabilità sismica di componenti industriali si concentrano sugli aspetti prevalentemente strutturali. Dall'applicazione di modelli di Letteratura per serbatoi atmosferici a tetto galleggiante, però, emerge la possibilità che il tetto subisca grandi deformazioni in presenza di terremoto, per via dell'interazione fluido-struttura tra la componente convettiva del moto del fluido, il tetto galleggiante ed il mantello. Al fine di ottenere la mitigazione del rischio sismico, è possibile sia svolgere interventi di miglioramento/adequamento che installare sistemi di monitoraggio strutturale per il controllo delle componenti critiche. Gli EEW, che si avvalgono di una rete di sensori opportunamente realizzata per il monitoraggio strutturale ad hoc per il sisma, permettono di emanare un avviso di pericolo nel caso in cui una o più grandezze di controllo superino determinate soglie di sicurezza, e, se necessario, di procedere con l'attivazione delle misure di gestione e mitigazione di incidenti rilevanti.

7 Bibliografia

- [1] M. Campedel, "Analysis of major industrial accidents triggered by natural events reported in the principal available chemical accident databases," *JRC Sci. Tech. Reports*, 2008.
- [2] F. Paolacci, R. Giannini, M. De Angelis, and M. Ciucci, "Seismic vulnerability of major-hazard industrial plants and applicability of innovative seismic protection systems for its reduction," 2009.
- [3] M. Philip E., *Aboveground storage tanks*. McGraw-Hill Education, 1997.
- [4] B. Long and B. Gardner, *Guide to Storage Tanks and Equipment*. Wiley, 2004.
- [5] G. W. Housner, "The dynamic behavior of water tanks," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 53, no. 2, pp. 381–387, 1963.
- [6] A. S. Veletsos and Y. Tang, "Rocking response of liquid storage tanks," *J. Eng. Mech.*, vol. 113, no. 11, pp. 1774–1792, 1987.

- [7] A. S. Veletsos, "Seismic effects in flexible liquid storage tanks," 1974.
- [8] P. K. Malhotra, T. Wenk, and M. Wieland, "Simple procedure for seismic analysis of liquid-storage tanks," *Struct. Eng. Int.*, vol. 10, no. 3, pp. 197–201, 2000.
- [9] "Large Atmospheric Storage Tank Fire Project: LASTFIRE Project Analysis of incident frequency survey.", 1997-2005.
- [10] B. L. S. Jacobsen, "Impulsive hydrodynamics of fluid inside a cylindrical tank and of fluid surrounding a cylindrical pier," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 39, pp. 189–204, 1949.
- [11] K. Senda, "On the Vibration of an Elevated Water-Tank I," *Tech. Rep. Osaka Univ.*, vol. 117, pp. 247–264, 1954..
- [12] K. Nakagawa, "On the vibration of an elevated water tank II," *Tech. Reports Osaka Univ.*, vol. 5, no. 170, 1955.
- [13] F. Sakai, M. Nishimura, and H. Ogawa, "Sloshing behavior of floating-roof oil storage tanks," *Comput. Struct.*, vol. 19, no. 1–2, pp. 183–192, 1984.
- [14] Y. Yamauchi, A. Kamei, S. Zama, and Y. Uchida, "Seismic design of floating roof of oil storage tanks under liquid sloshing," 2006.
- [15] M. A. Goudarzi, "Seismic behavior of a single deck floating roof due to second sloshing mode," *J. Press. Vessel Technol. Trans. ASME*, vol. 135, no. 1, pp. 1–6, 2013.
- [16] T. Matsui, "Sloshing in a cylindrical liquid storage tank with a floating roof under seismic excitation," *J. Press. Vessel Technol. Trans. ASME*, vol. 129, no. 4, pp. 557–566, 2007.
- [17] T. Matsui, "Sloshing in a cylindrical liquid storage tank with a single-deck type floating roof under seismic excitation," *J. Press. Vessel Technol. Trans. ASME*, vol. 131, no. 2, 2009.
- [18] G. Fabbrocino, I. Iervolino, G. Manfredi, and E. Salzano, "Seismic early warning systems: Some insights for the process industry," *Struct. Heal. Monit. Intell. Infrastruct. - Proc. 2nd Int. Conf. Struct. Heal. Monit. Intell. Infrastructure, SHMII 2005*, vol. 1, pp. 687–692, 2006.
- [19] F. Paolacci, R. Giannini, and M. De Angelis, "Seismic response mitigation of chemical plant components by passive control techniques," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 26, no. 5, pp. 924–935, 2013.
- [20] M. De Angelis, R. Giannini, and F. Paolacci, "Experimental investigation on the seismic response of a steel liquid storage tank equipped with floating roof by shaking table tests," no. August 2009, pp. 377–396, 2010.
- [21] F. Paolacci, R. Giannini, M. De Angelis, and M. Ciucci, "Experimental investigation on the seismic behaviour of base-isolated steel storage tank," 2009.
- [22] C. R. Farrar and K. Worden, "An introduction to structural health monitoring," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 365, no. 1851, pp. 303–315, 2007.
- [23] A. Marino, M. Ciucci, and F. Paolacci, "Smart technologies for integrated natural risk management: Innovative methodologies and remote sensing," *Am. Soc. Mech. Eng. Press. Vessel. Pip. Div. PVP*, vol. 8, pp. 1–7, 2017.

Serbatoi di stoccaggio con tetto galleggiante a doppio pontone. Un dispositivo per limitare le emissioni e contenere eventuali fuoriuscite accidentali di prodotto.

A. Falla¹, R. Nicosia¹, R. Acerboni², F. Boella², A. De Palma², P. Morucchio², V. Prete³

¹ VED - Vetroresina Engineering Development

² Inail - Uot di Venezia

³ Inail - Uot di Alessandria

Sommario

Per rimuovere l'acqua piovana dal tetto galleggiante a doppio pontone di un serbatoio di stoccaggio, viene utilizzata una condotta articolata che scarica all'esterno del serbatoio stesso.

Qualora, la condotta non riuscisse ad eliminare l'acqua si potrebbero arrecare dei danni al tetto galleggiante ed al serbatoio stesso: per ovviare a tale evenienza sono previsti uno o più dreni d'emergenza che attraversano il tetto e scaricano direttamente all'interno del serbatoio.

Il dreno di emergenza più diffuso è costituito da un tronchetto di tubo che sporge oltre il foro di passaggio del tetto.

Essendo i dreni di emergenza comunicanti con l'atmosfera, sono fonti di emissione continua di eventuali vapori del prodotto stoccato nel serbatoio e talvolta veicolano spruzzi del prodotto stesso non stabilizzato sul tetto del serbatoio.

Per risolvere tali problematiche è stato studiato un dispositivo che offre le stesse funzionalità del dreno di emergenza classico, pari efficacia e, a garanzia dell'affidabilità, non presenta alcun meccanismo; contrastando anche l'emissione dei vapori in atmosfera, tramite una forte riduzione della sezione libera di passaggio e nel contempo impedisce lo spargimento degli spruzzi attraverso il foro stesso.

1. Introduzione

Il sistema maggiormente diffuso per lo stoccaggio di prodotti petroliferi, del greggio e dei suoi derivati, sono i serbatoi cilindrici atmosferici fuori terra.

L'appendice "C" delle API 650 riporta i requisiti minimi che devono avere i serbatoi di stoccaggio con tetto galleggiante a singolo e a doppio pontone esterno (*pontoon-type and double-deck-type external floating roofs* (figura 1). La capacità di stoccaggio di questi serbatoi può arrivare a 200.000 m³ e il loro diametro superare anche i 100 m.

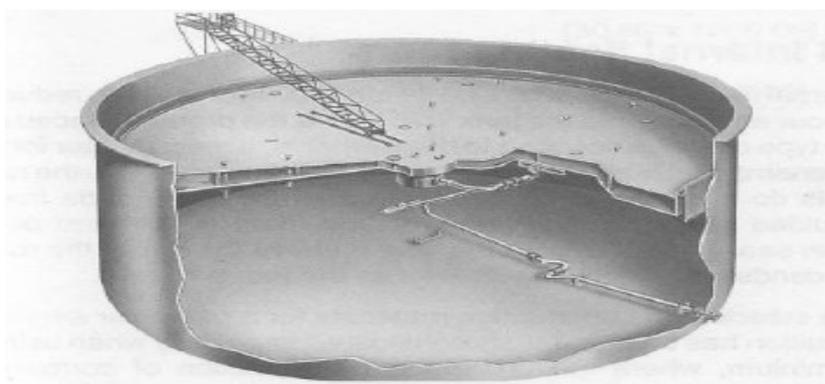


Figura 1. Double Deck Type Floating Roof [Bob. L & Bob. G, n.d, p.155]

Il presente studio riguarda solamente i serbatoi a tetto galleggiante a doppio pontone. La superficie orizzontale di un tetto galleggiante può superare anche il valore di 8000 m²; da questo ne consegue che, nel caso di precipitazione atmosferica, la quantità di acqua piovana che finisce sul tetto è elevata e non dovrà per nessun motivo rimanere su di esso, ma dovrà essere drenata.

Lo scarico dell'acqua piovana avviene tramite il dreno centrale collegato al braccio articolato che la scarica fuori dal tetto (figura 1).

Il tetto galleggiante a doppio pontone è inoltre corredato di tanti altri accessori per assicurare la funzionalità e garantire l'integrità durante il normale esercizio.

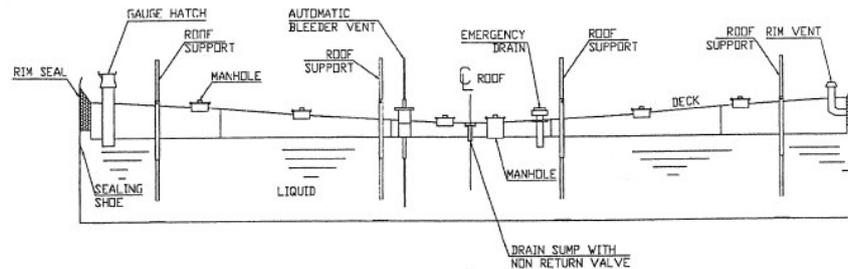


Figura 2. Double Deck Floating Roof Tank [EEMUA 2003, vol.1, p.15]

In figura 2 sono riportati i principali accessori a corredo del tetto e tra questi il “dreno di emergenza” o “troppo pieno”.

Il sistema di scarico dell'acqua piovana dal dreno collegato al braccio articolato del tetto è progettato per smaltire l'acqua in modo da non sovraccaricarlo in funzione della massima intensità delle precipitazioni prevedibili. L'acqua piovana fluisce verso il centro del tetto e il dreno è in grado di smaltirla senza che in prossimità di esso si raggiungano livelli apprezzabili, ma solo di pochi millimetri.

Nel caso in cui la condotta articolata non funzioni o risulti insufficiente a smaltire l'acqua piovana, il livello dell'acqua si innalzerebbe oltre misura e si potrebbero causare gravi danni al tetto flottante ed a tutto il serbatoio. Motivo di malfunzionamento del dreno potrebbe essere, ad esempio, l'occlusione totale o parziale di esso per il depositarsi di foglie portate dal vento e/o fucelli portati da volatili.

2. Lo stato attuale

Per prevenire tale evenienza, sul tetto del serbatoio sono praticati uno o più troppo pieno, che attraversano il tetto e scaricano direttamente all'interno del serbatoio l'acqua piovana, che quindi si andrà a miscelare con il liquido contenuto in esso. Tale pratica è ancora considerata efficace e sicura; il livello di troppo pieno viene fissato dal progettista e lo si realizza praticando attorno al foro di troppo pieno una barriera che una volta superata dal livello dell'acqua, eventualmente accumulatasi, si riversa nel serbatoio attraverso il foro di comunicazione (figure 3 e 5). Il sistema di troppo pieno più diffuso è un tronchetto di tubo che sporge oltre il foro di passaggio del tetto (figure 5 e 6). A completare il troppo pieno c'è una copertura (cappello) e una rete anti-nido (figure 3 e 5). Il livello del bordo del troppo pieno dovrà sempre essere più basso della quota che raggiunge il tetto galleggiante nella parte periferica più esterna.



Figura 3

Figura 4. (sezione della Fig.3)



Figura 5

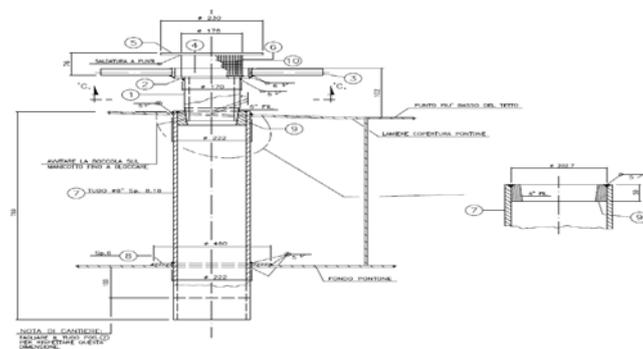


Figura 6. (sezione della Fig.5)

La differenza sostanziale tra le due soluzioni, (rispettivamente figure 3 e 4 e figure 5 e 6) consiste nel fatto che nelle prime la diga è saldata al tetto mentre nelle seconde vi è un collegamento filettato.

Essendo i troppo pieno comunicanti con l'atmosfera, questi sono fonti di emissione continua dei vapori che si producono all'interno del serbatoio e talvolta attraverso essi vengono emessi degli schizzi di liquido contenuto nel serbatoio sporcando la superficie del tetto; il fenomeno degli spruzzi sopra indicato è ricorrente nel caso di contenuto non stabilizzato e/o a seguito delle operazioni di riempimento del serbatoio.

Le API 650 prescrivono che sui tetti a doppio pontone devono essere presenti almeno tre dreni di emergenza con sezione di 4" e spessore schedula 80.

3. Contenimento delle emissioni dai dreni di emergenza

Per contrastare le emissioni in atmosfera è stato studiato un dispositivo che offre la stessa efficacia di funzionamento del "troppo pieno" come richiesto dalle API 650 ma che contrasta l'emissione dei vapori e impedisce lo spargimento del fluido attraverso il foro di "troppo pieno".

4. Descrizione del dispositivo

Il dispositivo è costituito da una sfera metallica cava, in grado di galleggiare nell'acqua e di peso noto, che poggia su un seggio anch'esso metallico. Il seggio è realizzato su una base metallica (flangia) che viene fissata sul tetto. L'asse del seggio coinciderà con l'asse del foro di "troppo pieno". Dalla flangia si dipartono un minimo di tre elementi verticali, angolarmente equi-spaziati, che hanno il compito di fare da gabbia alla sfera, consentendo solo piccoli movimenti laterali e una significativa corsa per le fluttuazioni verticali. Sulla base metallica, solitamente circolare, è applicata per saldatura la diga di troppo pieno, di altezza prestabilita. Il fissaggio al tetto potrà essere operato con, guarnizione, stucchi molecolari o, con raccordo filettato. La figura 7 mostra tutto quanto sopra descritto; le varianti di fissaggio offrono la possibilità dell'installazione anche su tetti esistenti.

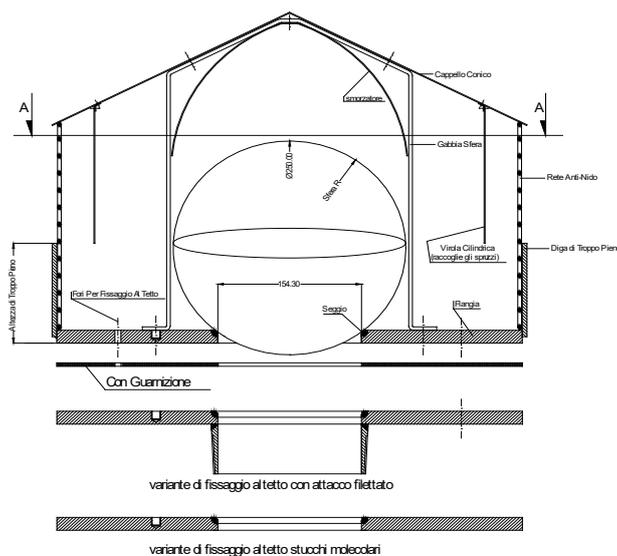


Figura 7

Fintantoché il livello dell'acqua non supera quello della diga di troppo pieno, la sfera, per gravità, poggia sul seggio e contrasta la fuori-uscita di vapori (emissioni) e fa da scudo ad eventuali schizzi provenienti dall'interno del serbatoio; il tipo di contatto tra sfera e seggio non è tale da assicurare una chiusura ermetica ma solo una fortissima riduzione della sezione libera di emissione verso l'atmosfera. Nel caso in cui il livello dell'acqua piovana sul tetto superasse quello della diga di troppo pieno, la sfera comincerebbe a galleggiare e l'acqua si riverserebbe direttamente all'interno del serbatoio. (figura 8)

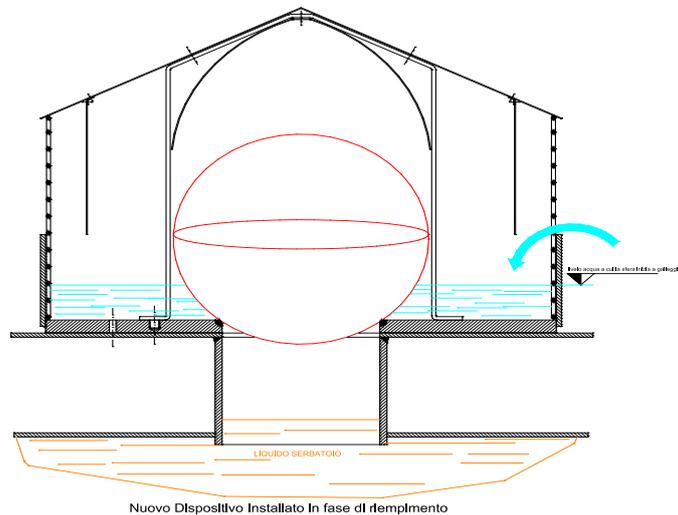


Figura 8

Nel momento in cui il troppo pieno non è più alimentato, la sfera torna ad adagiarsi sul seggio impedendo l'emissione dei vapori in atmosfera.

Per evitare che il fluido eventualmente schizzato vada sul tetto, il dispositivo è dotato di un cappello conico e di una virola ad esso fissata, geometricamente dimensionati per far ricadere il fluido schizzato all'interno della stessa diga e quindi riversarsi nel serbatoio attraverso il medesimo passaggio (figura 7). Per impedire che la sfera urti contro la struttura del cappello conico a seguito della proiezione di schizzi di fluido particolarmente energetici, il dispositivo è dotato di un ammortizzatore metallico funzionante per strisciamento e deformazione elastica (figura 7). A completamento del dispositivo viene installata una rete anti-nido (figure 7 e 9).

Per la progettazione del dispositivo è necessario conoscere una serie di parametri fisici e geometrici e più precisamente: diametro della sfera, peso della sfera, diametro del seggio al contatto con la sfera e altezza di troppo pieno.

L'assenza di meccanismi assicura il regolare funzionamento del dispositivo in quanto è eliminata ogni possibilità di blocco; si consiglia comunque la verifica periodica dello stato di conservazione della sfera. Nella configurazione più ricorrente la sfera ed il seggio sono in acciaio inox, ma è possibile anche l'impiego di altri materiali. Il dispositivo può essere installato agevolmente sui serbatoi esistenti con semplici operazioni a freddo.



Figura 9

5. Prove di galleggiamento e ripetitività eseguite

Sono state eseguite una lunga serie di prove per verificare il galleggiamento della sfera, l'inizio di esso e la ripetitività del funzionamento. L'inizio del galleggiamento è avvenuto con regolarità prima del riempimento della diga. Si è constatato il regolare funzionamento e non si sono trovati elementi che possano rendere non sicuro il funzionamento del dispositivo.

6. Prove di funzionamento con idrocarburi e rilievo emissioni

Per quanto la riduzione delle emissioni con un dreno di emergenza come quello studiato, rispetto al classico dreno a tubo libero, appare ovvia, a conforto di tale ipotesi sono state eseguite una serie di prove con diversi fluidi contenenti più o meno sostanze volatili, con l'intento di poter quantizzare in assoluto le emissioni da un serbatoio che contiene prodotti petroliferi.

I fluidi impiegati per le prove sono stati, separatamente, gasolio, benzina e greggio.

Per le prove è stato costruito un apparato metallico "serbatoio" (figura 10), sul quale è stato praticato un dreno di simulazione, riempiendolo del prodotto da esaminare ad una quota di -550 mm dal bordo esterno. Il dispositivo è stato realizzato per la valutazione con dreno normale e con il dreno di studio.

Per il rilievo e la quantizzazione delle emissioni si è fatto ricorso alla tecnica della camera di accumulo basata sulla misura, tramite un opportuno analizzatore (FID - Flame Ionization Detector), della variazione di concentrazione dell'emissione all'interno della camera stessa (fig. 10).

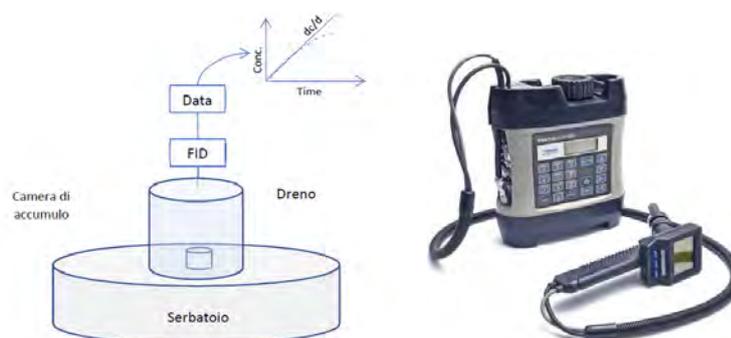


Figura 10

L'emissione dal dreno tende ad accumularsi all'interno della camera determinando un incremento della concentrazione dc/dt proporzionale al flusso di emissione Q . Tale proporzione dipende dal volume della camera, in particolare si potrà calcolare il flusso tramite la seguente equazione:

$$Q = A \times dc/dt$$

Dove:

Q = flusso di emissione in mg/s

A = Volume della camera di accumulo in m^3

dc/dt = velocità d'incremento della concentrazione all'interno della camera, espresso in $mg/m^3/s$

Il flusso di emissione Q è stato successivamente convertito in T/anno considerando un servizio convenzionale di 8.760 ore di esercizio.

Lo strumento utilizzato per misurare la concentrazione e determinare il dc/dt un analizzatore (FID - Flame Ionization Detector).

La misura di dc/dt viene ritenuta valida se sussistono le seguenti condizioni:

- i valori di concentrazione hanno un trend positivo (crescente);
- il valore di R^2 della retta calcolata mediante regressione lineare ha un valore maggiore di 0,8;
- sono stati registrati almeno 10 punti.

Per semplicità si riportano solamente i diagrammi ottenuti nella prova delle emissioni da greggio. (fig. 11 con dreno oggetto di studio) (fig.12 con dreno classico).

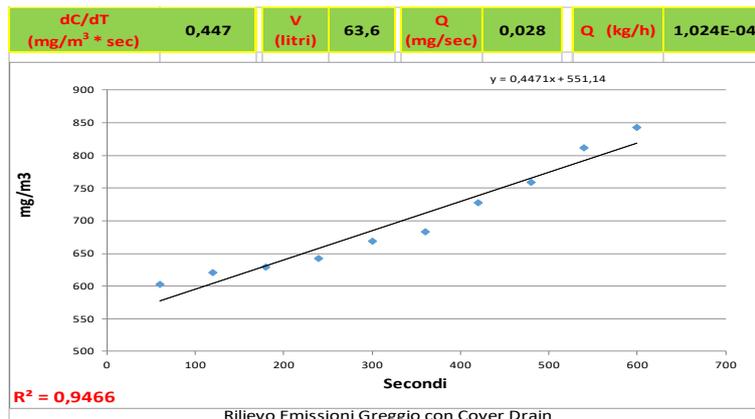


Figura 11

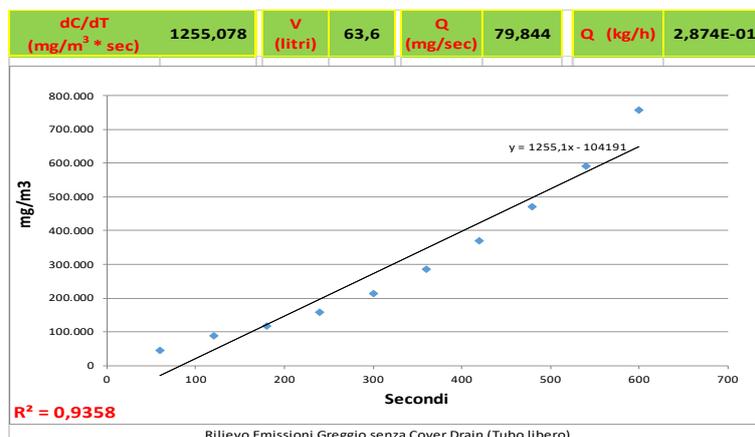


Figura 12

In tabella 1 vengono comunque riportati i risultati anche per gli altri prodotti; si rileva che per tutti i prodotti esaminati, impiegando il dreno in studio, l'abbattimento supera sempre il valore del 99%.

I valori ottenuti si riferiscono ad un dreno di sezione di 4", il minimo prescritto dalle API 650. In un serbatoio a tetto galleggiante a doppio pontone normalmente si trovano almeno tre dreni di emergenza con un passaggio corrispondente ad una sezione di 6".

Essendo la sezione di passaggio di un tubo di 6" all'incirca il doppio di quella di un tubo da 4", il valore evidenziato in rosso nella Tabella 1 va raddoppiato nel caso di dreno da 6". Pertanto, se si considera un serbatoio contenente greggio del tipo esaminato, e con tre dreni di emergenza da 6", l'emissione totale risulterebbe di circa 15 T/anno.

Dalle risultanze dei test eseguiti, utilizzando il "dreno di emergenza" oggetto di studio, l'emissione annua diventa praticamente trascurabile rispetto ai valori di un normale "dreno di emergenza".

Test N°	Fluido	Battente [cm]	Data	T [°C]	Cover Drain	dC/dT [mg/m ³ * sec]	Emissione [kg/h]	Emissione [ton/anno]	Abbattimento [%]
1	Gasolio	40	19/03/2021	20	NO	16,19478	0,004	0,0325	99,07%
2	Gasolio	40	19/03/2021	20	SI	0,150069	0,000	0,0003	
3	Greggio	40	29/03/2021	18	NO	1255,078	0,287	2,5180	99,96%
4	Greggio	40	29/03/2021	18	SI	0,447051	0,000	0,0009	
5	Benzina	40	22/04/2021	18	NO	459,9591	0,189	1,6549	99,94%
6	Benzina	40	22/04/2021	18	SI	0,468737	0,000	0,0009	

Tabella 1

7. Conclusioni

I dati storici indicano che si verificano incendi del bordo del serbatoio a una frequenza di circa 1-10 per 1000 anni di vita dei serbatoi [4]. In sostanza, in una azienda con 100 serbatoi, si possono prevedere da 1 a 10 incendi del bordo in un periodo di 10 anni.

L'associazione internazionale dei produttori Oil & Gas (International Association of Oil & Gas Producers - IOGP) ha studiato la frequenza degli incidenti dei serbatoi con tetto flottante [5] e ha concluso che ogni anno:

- 1 su 625 ha versamenti di liquido sul tetto flottante;
- 1 su 900 affonderà;
- 1 su 8300 svilupperà un incendio sull'intera sua superficie.

Le cause principali di questi incidenti sono:

- inclinazione del tetto;
- altezza di galleggiamento superiore alla norma;
- altezza di galleggiamento inferiore alla norma;
- alto livello di liquido nel pozzetto di drenaggio;
- idrocarburi nel pozzetto di drenaggio o sul tetto e malfunzionamento dello scarico del tetto con presenza di sostanze nel tetto.

Si ricorda che, i serbatoi di stoccaggio con tetto galleggiante a doppio pontone, sono per la maggior parte, installati in siti produttivi in attività a rischio incidente rilevante D.Lgs. 105/2015.

Pertanto un "dreno di emergenza" efficiente permette di garantire il funzionamento in sicurezza dei serbatoi a tetto flottante, risultando quindi fondamentale per migliorare la sicurezza e l'efficienza delle strutture di stoccaggio del petrolio

Il "dreno di emergenza" come quello in studio, rispetto ad un normale "dreno di emergenza", abbatte quasi completamente l'emissione annua dai serbatoi di stoccaggio.

Ringraziamenti:

Ing. Paolo Bragatto Inail Dit.

Ing. Nicola Altamura Inail Uo di Bari

8. Bibliografia

[1] API 650: Welded Steel Tanks for Oil Storage

[2] EEMUA 2003, vol.1, p.15

[3] Bob. L & Bob. G, n.d, p.155

[4] Risk Engineering Position Paper -01, Atmospheric Storage Tanks. Marsh & McLennan Companies, 2015.

[5] OGP Risk Assessment Data Directory, Report No. 434-3, Storage incident frequencies. International Association of Oil & Gas Producers, 2010.

Valutazione del rischio NaTech da alluvioni nelle attività RIR

G. Grillone¹, V. Nastasi¹

¹ Inail – Uot di Palermo

Sommario

Le catastrofi naturali normalmente comportano un rischio per la sicurezza dei cittadini e per le infrastrutture civili ed industriali. Gli impianti industriali, che necessitano un livello di attenzione superiore alla norma, sono gli stabilimenti a rischio di incidente rilevante (RIR), in quanto le conseguenze di eventi calamitosi per gli stessi possono coinvolgere le infrastrutture e le popolazioni circostanti.

I rischi di origine naturale per la sicurezza degli stabilimenti RIR è una delle principali novità introdotte dalla Direttiva Europea “Seveso III” [1], recepita in Italia dal D.Lgs. 105/2015 [2].

Alla luce della esperienza degli autori, uno dei rischi di origine naturale ad oggi poco trattato dai gestori di impianti RIR è il rischio da alluvione in quanto, nei Rapporti di Sicurezza redatti per gli stabilimenti RIR, spesso vengono fatte solo semplici descrizioni di tipo qualitativo.

Per tali ragioni, gli autori nel presente lavoro propongono un’analisi preliminare con una metodologia semplificata ad indice (IEC 31010:2019 Gestione del Rischio – Tecniche di valutazione del Rischio, [3]) per la valutazione del rischio da alluvione per unità critiche presenti nelle attività a rischio di incidente rilevante (serbatoi atmosferici e in pressione, tubazioni), che consenta l’individuazione delle unità critiche dello stabilimento ed individuando possibili livelli di approfondimento, così come previsto nel Decreto Legislativo n. 105/2015 (Allegato C, punto C4 “Analisi degli eventi incidentali”) [2].

1. Introduzione

Le inondazioni sono fenomeni naturali che causano perdite di vite umane e perdite economiche alle società di tutto il mondo. Oggigiorno i danni a persone e cose sono amplificati dalle modifiche dell’uso del suolo dovuto all’attività umana (costruzione di agglomerati urbani o industriali nelle pianure alluvionali e i cambiamenti dell’uso del suolo) e dalle modifiche climatiche dovute alle attività industriali degli ultimi due secoli.

Nelle attività RIR, il rischio alluvione può comportare il rilascio di ingenti quantità di sostanze pericolose, con conseguenti eventi incidentali rilevanti concomitanti (eventi Natech) quali: incendi, esplosioni, dispersioni tossiche, inquinamento di corpi idrici superficiali e falde acquifere.

La gravità di tali incidenti è amplificata dalla possibile contemporanea messa fuori servizio di sistemi ausiliari di mitigazione preposti al contenimento degli eventi stessi (i.e. impianti antincendio, etc. etc.), nonché al cedimento contemporaneo di più apparecchiature contenute negli impianti RIR.

Il D.Lgs. 105/2015 [2], recepimento della direttiva Seveso Europea III [1], è un Testo Unico a cui riferirsi per la prevenzione e gestione dei rischi di incidenti rilevanti, aumentando nel contempo il raccordo con le altre norme sulla sicurezza del lavoro, come il D.Lgs. 81/08 [4].

Nel D.Lgs. 105/2015 [2], gli stabilimenti RIR sono suddivisi in stabilimenti di “soglia inferiore” (SI) o di “soglia superiore” (SS), in funzione del tipo e della quantità di sostanze pericolose elencate negli allegati del decreto stesso.

Nel D.Lgs. 105/2015 [2], per “presenza di sostanze pericolose” si intende la presenza, reale o prevista, nello stabilimento, oppure le sostanze pericolose che è ragionevole

prevedere che possano essere generate in caso di perdita del controllo dei processi, comprese le attività di deposito, in un impianto in seno allo stabilimento, in quantità pari o superiori alle quantità limite previste nella parte 1 o nella parte 2 dell'allegato I del D.Lgs. 105/2015 [4], mentre per "incidente rilevante" si intende un "evento quale un'emissione, un incendio o un'esplosione di grande entità, dovuto a sviluppi incontrollati che si verificano durante l'attività di uno stabilimento soggetto al presente decreto e che dia luogo a un pericolo grave, immediato o differito, per la salute umana o l'ambiente, all'interno o all'esterno dello stabilimento, e in cui intervengano una o più sostanze pericolose".

Nell'Allegato C del D.Lgs. 105/2015 [4] *"Criteri, dati e informazioni per la redazione e la valutazione del Rapporto di Sicurezza e del Rapporto preliminare di sicurezza"* si evidenzia che occorre (punto C.4.1):

- *"individuare, descrivere, analizzare e caratterizzare quantitativamente le sequenze incidentali che possono generare un incidente rilevante e gli scenari ragionevolmente prevedibili che ne possono evolvere, in termini di conseguenze e probabilità. Ognuno degli scenari incidentali individuati dovrà essere corredato da una sintesi degli eventi che possono avere un ruolo nel loro innesco, con cause interne o esterne allo stabilimento: - cause operative, - cause esterne, quali quelle connesse con effetti domino o con siti di attività non rientranti nell'ambito di applicazione del presente decreto o con aree e sviluppi urbanistici/insediamenti situati in prossimità dello stesso, - cause naturali, come terremoti ed inondazioni"*,

ed inoltre che:

- *"Il Gestore effettua la scelta della metodologia di analisi da adottare con riferimento allo stato dell'arte in materia ed alle specifiche caratteristiche del proprio stabilimento e dei suoi rischi intrinseci, ..." e a seguire "In particolare tale analisi è preceduta dall'effettuazione di un'analisi preliminare per l'individuazione delle unità critiche dello stabilimento, finalizzata all'individuazione dei livelli di approfondimento ed alla selezione delle metodologie da impiegare"*.

Appare chiaro pertanto che il legislatore ha voluto richiedere al Gestore degli impianti RIR (così come definito nel D. Lgs. 105/2015 [4]: "qualsiasi persona fisica o giuridica che detiene o gestisce uno stabilimento o un impianto") di considerare gli scenari incidentali causati da cause naturali, ovvero i c.d. rischi NaTech (acronimo di Natural Hazard Triggering Technological Disasters), ossia una classe di eventi naturali (terremoti, alluvioni, ecc.) che innescano poi uno o più disastri di grande entità negli stabilimenti stessi.

Scopo del presente lavoro è sviluppare un'analisi preliminare (Art. 15, Allegato C punto C.4.1, del D.Lgs. 105/2015 [4]) per la valutazione del rischio dovuto alle alluvioni per le attrezzature critiche presenti nello stabilimento RIR (esempio: serbatoi atmosferici e in pressione, tubazioni), con una metodologia semplificata ad indice (IEC 31010:2019 Gestione del Rischio – Tecniche di valutazione del Rischio, [3]), che fornisca così le basi per identificare le unità critiche dello stabilimento e finalizzata all'individuazione dei livelli di approfondimento.

La finalità dell'analisi Natech da alluvioni/inondazioni ha come obiettivo quello di dare indicazioni:

- al Gestore: a) per la redazione di un Piano di Emergenza Interno (PEI); b) per evidenziare le criticità della propria attività RIR; c) per definire degli obiettivi specifici e i programmi di prevenzione e/o protezione; d) per un'adeguata informazione e formazione ai propri dipendenti e alle ditte terze che operano nello stabilimento;
- alle Autorità competenti: a) per la redazione del Piano di Emergenza Esterno (PEE); b) per la Pianificazione territoriale; c) per un'adeguata ed esaustiva informazione alla popolazione che risiede in zone dove sono presenti stabilimenti RIR.

2. Valutazione Rischio NaTech da alluvioni

La UNI ISO 31000:2018 (Gestione del Rischio – Linee Guida, [5]) definisce:

- il “rischio”: effetto di un evento futuro e incerto che può influenzare il raggiungimento degli obiettivi di una organizzazione;
- il “livello del rischio”: la dimensione (misura) di un rischio in termini di combinazione fra conseguenze e probabilità;
- la “valutazione del rischio”: il processo che include l’identificazione, l’analisi e la ponderazione del rischio. La valutazione si basa sul concetto di ponderazione che viene associato al concetto di accettabilità.

Seguendo la UNI ISO 31000:2018 [5] il rischio NaTech da alluvioni per attrezzatura negli stabilimenti RIR “ R_{na} ” può essere espresso come:

$$R_{na} = H \cdot V \cdot E \quad (1)$$

dove:

- H è la Pericolosità idraulica (*Hazard*): probabilità di accadimento di un evento alluvionale in un intervallo temporale fissato e in una certa area;
- V è la vulnerabilità idraulica (*Vulnerability*) che include la *Vulnerabilità fisica* V_f delle diverse unità presenti nello stabilimento RIR (riconducibile alle caratteristiche fisiche e/o tecnologiche dei manufatti, impianti e attrezzature che si trovano nello stabilimento, in seguito ad un evento alluvionale; trattasi di un concetto legato alla “Resistenza”) e la *Vulnerabilità organizzativa* V_o dello stabilimento RIR riconducibile al livello di “Resilienza” organizzativa di un determinato stabilimento RIR;
- E è l’Esposizione (*Exposure*): entità degli elementi a rischio, come persone, beni o proprietà, che possono essere danneggiati quando si verifica un evento alluvionale.

Poiché la formula (1) non è generalmente di facile calcolo, in quanto ciascuno dei tre fattori suddetti risulta a sua volta caratterizzato da diverse variabili la cui determinazione implica un impegno economico e di tempo elevato, si propone l’utilizzo di un metodo ad indice (IEC 31010:2019, [3]) da utilizzare per la stima dell’indice di rischio Natech per le attrezzature critiche presenti in uno stabilimento RIR, “ I_{na} ”:

$$I_{na} = I_H \times I_v \times I_E \quad (2)$$

quale prodotto degli indici I_H , I_v , I_E , rispettivamente indice di pericolosità idraulica, indice di vulnerabilità idraulica e indice di esposizione, la cui proposta di stima è riportata nei paragrafi successivi.

2.1 Stima della dell’indice di pericolosità idraulica “ I_H ” per uno stabilimento RIR

La Direttiva Europea 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni [6] definisce un’alluvione come l’allagamento temporaneo di aree che abitualmente non sono coperte d’acqua.

Poljanšek et al. [7] definiscono i principali tipi di eventi alluvionali in funzione delle cause principali che causano l’evento calamitoso:

- le *inondazioni fluviali*, quando il livello dei fiumi si alza sino a superare gli argini fluviali inondando il terreno circostante. Ciò può verificarsi in risposta ad eventi pluviali con precipitazioni totali e/o intensità superiori al normale, a causa di eventi meteorologici stagionali come i monsoni o temporali invernali o allo scioglimento improvviso della neve in primavera.
- le *piene improvvise*, quando si verificano improvvisamente precipitazioni abbondanti, in particolare nei bacini fluviali montuosi. Le forti precipitazioni localizzate, la rapida formazione di onde di piena e le elevate velocità dell’acqua, possono essere particolarmente minacciose per la popolazione e sono altamente distruttive.
- le *inondazioni generate da guasti di infrastrutture civili* (ad es. rottura di dighe);
- le *inondazioni costiere*, causate da una combinazione di alta marea, mareggiata e tipologia di onde marine. Si fa presente che le inondazioni causate da tsunami sono

generalmente considerate pericoli geofisici e pertanto vengono analizzate con tecniche diverse [7].

Nelle applicazioni pratiche, la pericolosità degli eventi alluvionali viene quantificata fornendo una valutazione spaziale e temporale delle seguenti variabili [6]: *probabilità di accadimento, estensione delle inondazioni, altezza del livello dell'acqua, velocità di flusso, carico di sedimenti, carico inquinante*.

La *probabilità di accadimento* di uno specifico evento alluvionale è solitamente espressa come periodo o tempo di ritorno. Definire un evento alluvionale con un tempo di ritorno di 100 anni vuol dire che lo stesso sarà raggiunto o superato una volta sola in un periodo di 100 anni. *L'estensione dell'inondazione, la profondità dell'acqua e la velocità del flusso* sono generalmente rappresentate con mappe spaziali georeferenziate, come prescritto dalla Direttiva Europea 2007/60/CE [6]. Il *carico di sedimenti* può essere una variabile cruciale laddove le acque alluvionali hanno la possibilità di trasportare rilevanti quantità di sedimenti ad alta velocità, come nel caso di inondazioni improvvise che coinvolgono aree con forti pendenze. Il *carico di inquinanti* è importante in caso di eventi alluvionali che colpiscono infrastrutture come industrie chimiche e impianti di trattamento delle acque reflue.

Nel nostro lavoro, considerato che si tratta di un'analisi preliminare, considereremo come unica variabile il tempo di ritorno (tempo medio in cui un valore di intensità assegnata viene uguagliato o superato almeno una volta), che diviene pertanto un indicatore della pericolosità idraulica del territorio nel quale insiste lo stabilimento RIR in esame.

La pericolosità idraulica del territorio italiano, in funzione del tempo di ritorno di eventi alluvionali, è stata mappata da ISPRA (Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale), in seguito al Decreto Legislativo 23 febbraio 2010 n. 49 [8] (decreto di recepimento della Direttiva Europea 2007/60/CE [6]), che prevede l'elaborazione di mappe di pericolosità e di rischio di alluvione e la predisposizione ed attuazione di piani di gestione del rischio di alluvioni.

In particolare ISPRA (Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale) ha realizzato la mappatura delle aree a pericolosità idraulica sul territorio nazionale secondo tre scenari (Rapporto ISPRA, 287/2018 [9]):

- pericolosità elevata P3, dove il tempo di ritorno è compreso tra 20 e 50 anni (alluvioni frequenti);
- pericolosità media P2, dove il tempo di ritorno è compreso tra 100 e 200 anni (alluvioni poco frequenti);
- pericolosità bassa P1, dove il tempo di ritorno è maggiore di 500 anni, ovvero considerando il massimo storico registrato (scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi).

Pertanto, utilizzando le mappe realizzate da ISPRA ([9]), ovvero idonee mappe di pericolosità idraulica specifiche per il territorio in cui si trova uno specifico stabilimento RIR, siamo in condizioni di sapere se la zona in cui è ubicato lo stabilimento RIR rientra in area di pericolosità idraulica P1, P2 o P3, determinando, di conseguenza, l'indice di pericolosità idraulica "I_H" secondo la proposta degli autori riportata in tabella 3.

Pericolosità idraulica della zona di ubicazione dello stabilimento RIR	I_H
P1 (bassa, tempo di ritorno maggiore di 500 anni o massimo storico registrato)	1
P2 (media, tempo di ritorno = 100-200 anni)	3
P3 (elevata, tempo di ritorno = 20-50 anni)	5

Tabella 1. Valori dell'Indice di pericolosità idraulica dello stabilimento I_H in funzione della pericolosità idraulica della zona di ubicazione dello stabilimento

2.2 Stima dell'indice di vulnerabilità idraulica “ I_V ” per le apparecchiature “critiche”

L'indice di vulnerabilità idraulica I_V per ciascuna apparecchiatura critica è stimato sommando l'indice di vulnerabilità fisica I_{VF} dell'apparecchiatura critica stessa (ricoducibile e riferibile alle caratteristiche fisiche e/o tecnologiche degli impianti e/o attrezzature, che li rendono più o meno propensi a danneggiarsi a seguito della sollecitazione di un evento calamitoso; è quindi un concetto legato alla “resistenza” delle attrezzature stesse) e l'indice di vulnerabilità organizzativa “ I_{VO} ” riconducibile al livello di resilienza dello stabilimento RIR:

$$I_V = I_{VF} + I_{VO} \quad (3)$$

Nel presente paragrafo le apparecchiature “critiche” vengono individuate partendo dagli incidenti innescati da inondazioni ed avvenuti all'interno dei siti industriali, proponendo successivamente una stima di I_{VF} delle attrezzature individuate (Tabella 2).

Le banche dati che riportano informazioni sugli incidenti da alluvioni verificati negli impianti industriali evidenziano che le categorie di apparecchiature maggiormente coinvolte in questo tipo di incidenti sono, in ordine di maggior frequenza: a) Serbatoi verticali atmosferici; b) tubazioni; c) serbatoi in pressione.

Per quanto riguarda i modi di guasto delle attrezzature summenzionate si evidenzia:

- per i serbatoi atmosferici, esistono diversi modi di guasto: a) rottura di flange o connessioni (causa principale di incidente); b) rottura catastrofica del mantello del serbatoio causata dal livello dell'acqua; c) rottura del fasciame del serbatoio in seguito all'impatto con detriti o altre apparecchiature trasportate dalla corrente e l'allagamento dell'apparecchiatura. L'allagamento dei bacini di contenimento dei serbatoi di stoccaggio di combustibili può causare il galleggiamento di questi ultimi con conseguente spostamento e distacco dei sistemi di connessione (tubazioni). Questo tipo di fenomeno è particolarmente critico per i serbatoi vuoti o parzialmente pieni se non adeguatamente ancorati in quanto il loro spostamento può causare collisione con altre installazioni presenti sul sito. Se la potenza del flusso d'acqua dovuto all'alluvione è sufficientemente elevata, può verificarsi il collasso dei serbatoi con conseguente sversamento delle sostanze pericolose in essi contenuti.
- per i serbatoi di stoccaggio in pressione e le tubazioni, sono temuti maggiormente i guasti causati da rotture di flange o connessioni e dalla foratura o tranciamento delle tubazioni. Le tubazioni sono attrezzature a pressione che con maggiore frequenza possono innescare incidenti rilevanti, anche se nel contempo la magnitudo di tali incidenti risulta di solito inferiore (per il limitato contenuto di fluido) rispetto ad altre apparecchiature. Ad oggi non esistono studi e ricerche consolidati per la determinazione della probabilità di guasto di tubazioni per eventi da alluvioni. Si ritiene che i serbatoi in pressione e le tubazioni costruite secondo la direttiva PED [10, 11] siano meno vulnerabili da quelli costruiti ante direttiva di prodotto, in quanto il fabbricante in fase di progettazione e realizzazione deve assicurare determinati requisiti essenziali di sicurezza dovuti a sollecitazioni quali traffico, vento, terremoti.

Una volta che sono state individuate le apparecchiature bersaglio all'interno dello stabilimento RIR, gli scenari incidentali finali al successivo rilascio più ricorrenti sono: dispersione e conseguente contaminazione delle acque sotterranee, del terreno e/o la dispersione in aria. Inoltre, se nell'incidente sono coinvolte quantità significative di sostanze in grado di reagire con acqua, è possibile che i gas infiammabili o tossici sviluppati diano luogo a scenari di incendio o di dispersione, spesso con gravi conseguenze. In particolare, i possibili scenari finali provocati dal rilascio di sostanze pericolose in seguito ad un evento NaTech innescato da una inondazione possono essere costituiti da: a) Pool-fire (tipo di incendio a diffusione dove il combustibile liquido volatile evapora e brucia) non confinato, dovuto alla combustione di sostanze liquide infiammabili distribuite sulla superficie dell'acqua; b) Flash-fire (fiammata intensa causata da combustione di una miscela di aria e sostanze infiammabili), a causa della combustione dei vapori delle sostanze infiammabili rilasciate; c) Dispersione tossica, a causa del rilascio continuo o istantaneo di una sostanza tossica o velenosa.

Tenendo conto di quanto sopra esposto, la tabella 2 riporta i valori della vulnerabilità idraulica fisica da inondazione, I_{VF} , suggeriti dagli autori per ciascuna delle attrezzature "critiche" o "bersaglio" in caso di alluvione.

Attrezzature "critiche" o "bersaglio" in caso di alluvione	I_{VF}
Serbatoi atmosferici poggiati	4-5
Serbatoi atmosferici ancorati	3-4
Serbatoi in pressione costruiti ante-direttiva PED [10, 11]	3-4
Serbatoi in pressione costruiti secondo la direttiva PED [10, 11]	2-3
Tubazioni costruiti ante-direttiva PED [10, 11]	3-4
Tubazioni costruiti secondo la direttiva PED [10, 11]	2-3

Tabella 2. Valori dell'Indice di vulnerabilità idraulica fisica " I_{VF} " in funzione delle attrezzature "critiche" o "bersaglio" in caso di alluvione.

I valori di I_{VF} suggeriti sono compresi, per ciascuna attrezzatura critica, in uno stretto intervallo di valori, per cui la valutazione definitiva di I_{VF} sarà fatta dall'utente finale tenendo conto delle seguenti peculiarità/variabili: a) quantità di sostanze pericolose contenute; b) tipologia di apparecchiatura; c) rispetto o meno di idonee norme tecniche per la realizzazione dell'apparecchiatura; d) stato di manutenzione, controlli e verifiche effettuate sull'attrezzatura; e) valutazione di fenomeni di invecchiamento dell'attrezzatura e/o di impianti (fatica, corrosione, etc. etc.); f) incidenti o anomalie degne di nota nella vita dell'attrezzatura.

Dopo aver stimato I_{VF} , si valuta l'indice di vulnerabilità organizzativa I_{VO} , legato, come già detto, al livello di resilienza di uno stabilimento RIR.

La resilienza, secondo l'approccio della resilience engineering (letteralmente traducibile come "ingegneria della resilienza"), è la capacità di un'organizzazione di rispondere agli eventi, di monitorare quello che accade, di saper prevedere rischi e, infine, di imparare dall'esperienza passata [12]. L'organizzazione resiliente è, quindi, quella in grado di addestrare i propri membri a prevenire i rischi e anticipare i possibili incidenti.

In altre parole, un sistema è resiliente se può adattare il proprio funzionamento prima, durante e in seguito ad eventi; questa capacità di adattamento si basa su 4 componenti: anticipare, monitorare, rispondere e apprendere [12], tendendo pertanto ad anticipare un evento ritenuto critico o dannoso.

Tenuto conto di quanto sopra esposto, l'utente valuterà I_{VO} nel modo seguente:

- $I_{VO} = 0$, se l'attività RIR oggetto dello studio ha una adeguata organizzazione resiliente;
- $I_{VO} = 1$, se l'attività non ha una adeguata organizzazione resiliente.

Dopo aver stimato I_{VF} per un'attrezzatura critica e I_{VO} per lo stabilimento RIR in studio, il valore dell'indice I_V per l'attrezzatura bersaglio è valutata mediante l'espressione (3).

2.3 Stima dell'indice di esposizione " I_E "

L'indice di esposizione I_E di uno stabilimento RIR rappresenta la potenziale perdita di vite umane, i danni ambientali ed economici che si possono avere in caso di incidente rilevante derivanti da alluvione, tenendo in considerazione il tipo e la quantità di sostanze pericolose presenti nello stabilimento, dallo stato fisico delle stesse, dal tipo di lavorazione presente (processo, stoccaggio, etc. etc.) e dal tipo di evento atteso (esplosione, rilascio tossico, incendio, dispersione di fumi tossici a seguito di incendio).

Per la stima di I_E gli autori propongono di dare un attento giudizio qualitativo, attribuendo un valore crescente da 1 a 5 secondo l'importanza della classe d'uso del suolo circostante lo stabilimento RIR (Tabella 3).

Nella tabella 3 si riporta la corrispondenza tra l'indice di esposizione I_E con le classi d'uso del suolo circostante lo stabilimento RIR suggerita dagli autori. I valori più elevati di I_E sono stati attribuiti alle zone residenziali, dando pertanto maggior importanza alla tutela della vita umana, mentre valori minori vengono attribuiti alle attività produttive, privilegiando le attività industriali, dove possono essere presenti alte concentrazioni di lavoratori), rispetto alle attività estensive (agricole).

Uso del suolo	I_E
Zone interessate da suolo incolto	1
Attività estensive (attività agricole)	2
Attività circoscritte in apposite zone industriali	3
Attività produttive e commerciali che comportano una presenza antropica costante	4
Residenze di abitazioni e zone di sicuro impatto (Edifici strategici, sale controllo, sedi di gestione di emergenza, pronto soccorso, rimesse antincendio, etc. etc.).	5

Tabella 3. Valori dell'indice di esposizione I_E con le classi d'uso del suolo

2.4 Stima dell'indice di rischio Natech " I_{na} " per le attrezzature critiche presenti in uno stabilimento RIR.

L'indice I_{na} è valutato mediante la (2) per ciascuna delle attrezzature critiche individuate nello stabilimento RIR, dopo aver stimato gli indici I_H , I_V ed I_E .

I_{na} è diverso per ogni unità critica dell'impianto, ed è funzione dei diversi valori attribuiti a I_{VF} (e di conseguenza di I_V), unico indice che varia al variare dell'attrezzatura bersaglio, in quanto gli altri indici dipendono dall'ubicazione dello stabilimento RIR (I_H ed I_E) e dalla sua "resilienza" (I_{VO}) e pertanto sono eguali per tutte le attrezzature critiche.

Per ciascuna attrezzatura critica:

- se $I_{na} \geq 60$, il rischio per l'attrezzatura è alto e non accettabile, necessitando di urgenti azioni correttive di prevenzione e mitigazione;
- se $15 < I_{na} < 60$, il rischio per l'attrezzatura è medio ed è consigliabile intervenire nel breve/medio periodo per ridurre il livello di rischio con idonee azioni correttive di prevenzione e mitigazione;
- se $I_{na} \leq 15$ il rischio per l'attrezzatura è basso ed accettabile, potendo intervenire nel medio/lungo periodo con azioni correttive di prevenzione e mitigazione da inserire in un ciclo di miglioramento continuo.

La valutazione di I_{na} per ciascuna attrezzatura critica consente di individuare le attrezzature più “carenti” e più a rischio Natech da alluvione, consentendo pertanto di intervenire con più urgenza dove è maggiormente necessario.

Nel paragrafo successivo vengono illustrate le azioni correttive di prevenzione e mitigazione suggerite dagli autori in funzione del range di valori di I_{na} .

3. Azioni correttive di prevenzione e mitigazione per le attrezzature critiche presenti in un impianto RIR

Le azioni correttive di prevenzione e/o mitigazione da potenziali eventi Na-Tech indotti da fenomeni alluvionali, importanti per ridurre eventuali danni economici e limitare o azzerare perdite di vita umana, possono essere distinte in due classi: azioni o interventi permanenti (interventi indicati con la lettera “a”) in tabella 4) ed azioni o interventi temporanei (interventi indicati con la lettera “b”) in tabella 4).

Gli interventi permanenti (indicati con la lettera “a”) in tabella 4), finalizzati ad incrementare la resistenza delle infrastrutture industriali con appropriate scelte di materiali e soluzioni progettuali, sono:

- a1) ancoraggio dei serbatoi di stoccaggio al livello delle fondazioni in modo che essi non galleggino o subiscano fenomeni di ribaltamento;
- a2) costruzione e/o potenziamento di barriere di contenimento o degli argini di protezione dei corsi d’acqua;
- a3) sviluppo e costruzione di un sistema di drenaggio efficace che contrasti l’innalzamento del livello idrometrico;
- a4) stoccaggio e posizionamento strategico delle sostanze pericolose in modo da evitare incompatibilità chimica;
- a5) posizionamento di sistemi di immagazzinamento pressurizzati e/o criogenici al di sopra del massimo livello idrometrico previsto;
- a6) costruzioni di recinzioni di protezione degli equipaggiamenti per macchinari di particolare valore;
- a7) spostamento dei macchinari elettrici, dei sistemi antincendio, dei sistemi informatici, e di distribuzione dell’energia al di sopra del massimo livello idrometrico previsto;
- a8) predisposizione segnalazione delle vie di evacuazione in presenza di alluvioni e inondazioni;
- a9) rinforzo di tubazioni e connessioni;
- a10) connessioni flessibili per le tubazioni.

Gli interventi temporanei sono legati ai tempi con cui le Autorità Pubbliche sono in grado di diffondere mediante avvisi l’allarme per una possibile inondazione (early warning pubblici). L’early warning (allarme rapido) è costituito dall’insieme delle azioni che possono essere attuate tra il momento in cui si ha la ragionevole certezza del verificarsi di un evento NaTech da alluvione in una data località e il momento in cui l’evento avviene (nel caso NaTech collegati ad eventi meteorologici tale intervallo può arrivare a 24/48 ore, diversamente dagli eventi NaTech da sisma dove l’intervallo è generalmente molto breve, arrivando ad essere anche di pochi secondi).

Gli interventi temporanei (indicati con la lettera “b”) in tabella 4) consistono in misure da adottare in caso di imminente pericolo, tra cui le principali sono:

- b1) interruzione e messa in sicurezza dei processi industriali pericolosi (si disattivano parti o sottosistemi dell’impianto, quali valvole di blocco automatico o di shut-off, per prevenire rilasci di sostanze pericolose);
- b2) ancoraggio delle strutture più a rischio e strutturalmente più fragili con cavi in acciaio o simili;
- b3) verifica della tenuta dei serbatoi di stoccaggio, attraverso la sigillatura ermetica dei silos e dei serbatoi di stoccaggio sotterranei;

- b4) de-locazione e stoccaggio delle sostanze chimiche reattive e materiali pericolosi in aree a quote maggiori e più sicure;
- b5) attivazione di produzione autonoma di energia elettrica e/o immagazzinamento di energia, in modo che i sistemi di controllo siano disponibili anche durante l'evento;
- b6) protezione di edifici strategici dello stabilimento (sale comando e controllo, locali per servizi e dotazioni di emergenza, ecc.), mediante interventi di emergenza;
- b7) evacuazione del personale non essenziale per le operazioni di emergenza;
- b8) attivazione dei piani emergenza interna (PEI) dello stabilimento RIR.

In aggiunta alle due classi di interventi permanenti ("a") e temporanei ("b") è oramai imprescindibile aggiungere un punto "c)", che ha come finalità quello di sviluppare la resilienza organizzativa nelle aziende RIR con una apposita ulteriore formazione (che coinvolga tutti gli attori della sicurezza), prevista dall'art 14 "Politica di prevenzione degli incidenti rilevanti" del D.Lgs. 105/2015 [2].

In tabella 4 sono riportati i valori di I_{na} in relazione all'accettabilità del rischio NaTech da alluvione, alla priorità di intervento delle azioni correttive di prevenzione e mitigazione e le azioni correttive di prevenzione e mitigazione stesse (azioni o interventi permanenti indicati con la lettera "a"); azioni o interventi temporanei indicati con la lettera "b"); resilienza organizzativa indicata con la lettera "c)").

I_{na}	Rischio NaTech da alluvione	Priorità di intervento delle azioni correttive	Azioni correttive di prevenzione e mitigazione (*)
$I_{na} \geq 60$	Alto, non accettabile	Alta Priorità di intervento. Azioni Correttive indilazionabili	a) ; b) ; c)
$15 < I_{na} < 60$	Medio, consigliabile abbassare il livello di rischio	Media Priorità di intervento. Azioni correttive nel breve/medio periodo da programmare	a) ; b) ; c)
$I_{na} \leq 15$	Basso, accettabile	Bassa Priorità di intervento. Azioni correttive da inserire in un ciclo di miglioramento continuo	b) ; c)

Tabella 4. Relazione tra I_{na} e accettabilità del rischio NaTech da alluvione per fissata attrezzatura critica, priorità di intervento delle azioni correttive di prevenzione e mitigazione e azioni correttive stesse.

(*) Per le dettagliate azioni correttive di prevenzione e mitigazione vedi l'elenco riportato nel paragrafo 3 per le diverse tipologie.

4. Conclusioni

Il presente lavoro si propone di fornire una metodologia semplificata per la valutazione del rischio NaTech da alluvioni per attrezzature "critiche" (serbatoi, tubazioni), in stabilimenti a rischio di incidente rilevante, al fine di soddisfare quanto richiesto dal D.Lgs. 105/2015. Nel caso che il rischio per una determinata apparecchiatura, secondo quanto riportato dagli autori, non sia considerato accettabile, vengono suggerite idonee azioni correttive di

prevenzione e mitigazione da porre in essere a seguito di ulteriori e appositi livelli di approfondimento.

5. Bibliografia

- [1] Direttiva 2012/18/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 4 Luglio 2012 (cd. "Seveso III") sul controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose, recante modifica e successiva abrogazione della direttiva 96/82/CE del Consiglio Testo rilevante ai fini del SEE. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea n. L197 del 24/7/2012, pp. 1-37.
- [2] Decreto Legislativo 26 Giugno 2015, n. 105, "Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose". Gazzetta Ufficiale Repubblica Italiana, Serie Generale n. 161 del 14 Luglio 2015 – Suppl. Ordinario n. 38.
- [3] UNI CEI EN IEC 31010:2019 Gestione del Rischio – Tecniche di valutazione del Rischio (2^a Edizione) (2019). Commissione Elettronica Internazionale.
- [4] Decreto Legislativo 9 Aprile 2008, n. 81, integrato e modificato dal Decreto Legislativo 3 Agosto 2009, n. 109. Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. Gazzetta Ufficiale Repubblica Italiana, Serie Generale n. 101 del 30 Aprile 2008 - Suppl. Ordinario n. 108; D. Lgs. n.109/2009: Gazzetta Ufficiale Repubblica Italiana Serie Generale n. 180 del 05 Agosto 2009 - Suppl. Ordinario n. 142/L.
- [5] UNI ISO 31000:2018 Gestione del Rischio – Linee Guida (2^a Edizione, 16 pp.) (2018). Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione.
- [6] Direttiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 ottobre 2007 relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni. Gazzetta Ufficiale Unione Europea del 06/11/2007, n. L. 288, pp. 27-34.
- [7] Poljanšek, K., Marin Ferrer, M., DeGroeve, T., Clark, I. (2017). Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less. EUR28034EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, JCR number: JCR102482. ISBN 978-92-79-60679-3. Doi: 10.2788/842809.
- [8] Decreto Legislativo 23 Febbraio 2010, n. 49, "Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni". Gazzetta Ufficiale Repubblica Italiana, Serie Generale n. 77 del 2 Aprile 2010.
- [9] Trigila A., Iadanza C., Bussetini M., Lastoria B. (2018). Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio. Edizione 2018. ISPRA, Rapporto 287/2018 (ISBN 978-88-448-0901-0).
- [10] Direttiva 97/23/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 29 maggio 1997, per il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri in materia di attrezzature a pressione. Gazzetta Ufficiale delle Comunità Europee n. L181 del 9/7/1997.
- [11] Direttiva 2014/68/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 15 maggio 2014, concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea n. L189 del 27/6/2014, pp. 164-259.
- [12] Agnello P., Bracco F., Brunel C., Masini M., Piccinno T.F., Sedaoui A., Tazi D. (2017). Promuovere la sicurezza nelle organizzazioni attraverso manager resilienti. Editore: INAIL, Quaderni di ricerca, numero 14, 2017. ISBN 978-88-7484-572-9.

Rischio NaTech da sisma negli stabilimenti con Pericolo di Incidente Rilevante: metodologie di valutazione e gestione

M. Ciucci, L. Barbieri Vita, A. Marino

Inail - Dit

Sommario

La valutazione del rischio sismico negli stabilimenti industriali soggetti al D.Lgs. n. 105 del 26 giugno 2015 assume una notevole importanza anche nell'ambito della prevenzione e della gestione di potenziali eventi NaTech. L'obiettivo di questo lavoro è fornire alcune indicazioni e chiarimenti in merito all'iter metodologico da seguire per la valutazione e la gestione del rischio sismico negli stabilimenti PIR, confrontando i vari riferimenti normativi che regolano questo aspetto ed illustrando le possibili soluzioni da adottare. La vulnerabilità delle opere e delle apparecchiature di processo critiche, ed i potenziali fattori di rischio, principalmente correlati alla presenza ed al trattamento di sostanze pericolose, devono essere identificati mediante adeguati criteri e metodologie.

In Italia, la valutazione della sicurezza sismica, nel caso di stabilimenti PIR, deve essere eseguita sulla base di quanto prescritto dal D.M. 17 gennaio 2018 (NTC 2018) e dalla Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019 C.S.LL.PP. mentre l'analisi del rischio va effettuata secondo quanto previsto dal D.Lgs.105/2015. Sulla base dei risultati ottenuti, il Gestore potrà attuare le più adeguate ed efficaci misure di prevenzione, gestione e mitigazione del rischio e delle conseguenze derivanti dagli scenari incidentali analizzati.

1. Introduzione

La valutazione del rischio sismico nelle attività con pericolo di incidente rilevante (PIR) è molto complessa, anche perché l'interazione tra l'evento naturale e l'impianto industriale può determinare, considerando che il sisma investe tutto lo stabilimento, danni simultanei che possono originare più rilasci di sostanze pericolose, con la possibilità di produrre catene di eventi interagenti tra loro che possono incrementare le conseguenze sulla popolazione, sui beni e sull'ambiente. Il rischio sismico, pertanto, è uno dei più significativi nell'ambito degli eventi NaTech (Natural Hazard Triggering a Technological Disaster).

Ai fini di una corretta valutazione di tutti i potenziali rischi, cui lo stabilimento industriale è esposto, è quindi necessario procedere alla valutazione della sicurezza ed all'analisi del rischio delle opere e delle apparecchiature critiche presenti nelle attività PIR.

L'obbligo di valutazione della sicurezza nel caso di stabilimenti industriali PIR viene introdotto dall'O.P.C.M. n. 3274 del 20 marzo 2003 (art. 2, comma 3) [4] e dalle relative Disposizioni attuative [5].

Inoltre, si ricorda che la valutazione della sicurezza deve effettuarsi quando ricorra anche una sola delle situazioni, indicate al § 8.3 delle NTC 2018[1].

Sulla base dell'esito della valutazione della sicurezza (NTC 2018) e dell'analisi del rischio (D.Lgs. 105/2015) il gestore dello stabilimento potrà attuare interventi necessari per la mitigazione e gestione del rischio sismico.

2. Determinazione dell'azione sismica

Ai fini della determinazione dell'azione sismica, in prima istanza va definita la pericolosità sismica di base, funzione dell'accelerazione orizzontale massima attesa al sito in condizione

di campo libero, sottosuolo rigido e pianeggiante, ovvero ricadente in categoria A e condizione topografica T1. Entrando con le coordinate del sito nell'Allegato B delle NTC 2008 (Allegato a cui rimandano le NTC 2018 [1]), si ottengono i parametri fondamentali per i vari periodi di ritorno: l'accelerazione orizzontale massima attesa a_g , il valore massimo del fattore di amplificazione F_0 , il periodo di inizio del tratto a velocità costante T^*c .

Questo consente di individuare i dati di input necessari per il calcolo dello spettro elastico di risposta in accelerazione agli Stati Limite.

Nel caso di impianti industriali si assume una vita nominale V_N con valore minimo di 50 anni considerando il "tempo di missione" di tali opere. Infatti, si tratta di una categoria di attività che per il loro elevato contenuto tecnologico sono soggette a frequente manutenzione e rinnovamento, così da far fronte a fenomeni di usura e di obsolescenza.

Le attività PIR ricadono nella Classe d'uso IV in quanto definite come "industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente". Inoltre, in relazione alle conseguenze sull'ambiente e sulla pubblica incolumità determinate dal raggiungimento degli Stati Limite, la Circolare stabilisce di utilizzare cautelativamente un coefficiente associato alla Classe d'uso IV, $C_U=2,50$ quando risultano essere presenti scenari incidentali con impatto all'esterno dell'attività [2] e un $C_U=2,00$ quando sonopresenti scenari incidentali con impatto all'interno dell'attività stessa.

Si determina il periodo di riferimento V_R come prodotto di V_N e C_U e si calcola il Tempo di ritorno T_R in funzione dei valori di probabilità di superamento P_{V_R} dei quattro Stati Limite pari rispettivamente a 81%, 63%, 10% e 5%.

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto all'interno del sito in cui ricade lo stabilimento, il gestore è tenuto ad effettuare una caratterizzazione stratigrafica e geotecnica dei terreni mediante specifiche indagini in situ e prove in laboratorio, descritti nel § 6.2.2 delle NTC 2018 e § C6.2.2 della relativa Circolare.

Qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie di sottosuolo, definite nella tab. 3.2.II del § 3.2.2 e conformi al § 7.11.2 delle NTC 2018, si può fare riferimento a un approccio semplificato per definire lo spettro elastico di risposta in accelerazione di progetto. L'approccio semplificato si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio $V_{s,eq}$ (m/s). Tali valori sono parte integrante della caratterizzazione geologica e geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo di cui al § 6.2.2 delle NTC 2018.

Se il gestore dispone di dati idonei risultanti da indagini pregresse che hanno fornito una caratterizzazione geologica e modellazione geotecnica per lo stesso sito, esso può attingere da questi. Qualora disponibili, il gestore può altresì consultare studi di microzonazione sismica, che possono fornire indicazioni orientative circa l'eventuale presenza di amplificazione dello scuotimento.

Nel caso in cui non ci si possa ricondurre al metodo semplificato (tab. 3.2.II del § 3.2 delle NTC 2018), si devono effettuare analisi numeriche con specifiche procedure indicate nel § 7.11.3 delle NTC2018 e § C7.11.3 della Circolare.

3. Valutazione della sicurezza sismica

La valutazione della sicurezza degli impianti PIR ai sensi delle NTC 2018 interessa principalmente gli aspetti strutturali delle apparecchiature critiche (serbatoi verticali ancorati e non, serbatoi orizzontali, tubazioni, colonne, torri, reattori, camini, filtri e decantatori, pompe e compressori); delle opere di supporto, quali ad esempio racks; delle opere di importanza strategica all'interno dell'attività, quali sale di manovra e di controllo; dei fabbricati o magazzini entro cui si lavorano o si depositano sostanze pericolose.

La valutazione della sicurezza si realizza mediante un procedimento quantitativo il cui obiettivo è la definizione del livello di sicurezza ζ_E della struttura allo stato di fatto [9]. Il livello di sicurezza ζ_E è definito come il rapporto tra l'azione sismica massima sopportabile

dall'opera esistente e l'azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto di un'opera ex novo sul medesimo sito e con le medesime caratteristiche.

Qualora il livello di sicurezza ζ_E dovesse risultare inferiore all'unità, la verifica non è soddisfatta. Nel caso di strutture esistenti la norma consente, però, di adottare un livello di sicurezza pari a $\zeta_E=0,80$. Nel caso di inadeguatezza della verifica, le NTC considerano la possibilità di valutare eventuali progetti di interventi al fine di migliorare la condizione dello stato di fatto. L'obiettivo è quello di incrementare il livello di sicurezza ζ_E dell'opera in funzione delle indicazioni previste dai § 8.4.1, § 8.4.2, § 8.4.3 delle NTC.

Nel caso di inadeguatezza delle verifiche ed a seconda delle vulnerabilità riscontrate, il gestore dovrà predisporre una serie di azioni. In questa fase, potrebbe essere utile tener conto di un parametro indicatore relativa all'ordine di priorità degli interventi da programmare e da realizzare: la vita nominale residua V_{RES} .

Noti il livello di sicurezza ζ_E e il tempo di ritorno associato alla capacità della struttura esistente $T_{R,C}$, utilizzando le formule per la definizione dell'azione sismica, si ricava la vita residua.

$$T_{R,C} = \frac{-V_R}{\ln(1-P_{VR})} = \frac{-V_N \times C_U}{\ln(1-P_{VR})} \quad (1) \qquad V_{RES} = \frac{-T_{R,C}}{C_U} \ln(1 - P_{VR}) \quad (2)$$

La programmazione, e la tempistica degli interventi da realizzare espressa in termini di vita residua, sono funzione del livello di inadeguatezza delle verifiche; maggiore è il livello di inadeguatezza (quindi per valori di ζ_E progressivamente più vicini allo zero), minore sarà la vita residua dell'opera.

Si sottolinea che se la vita residua è V_{RES} è inferiore alla vita nominale V_N di progetto, il livello prestazionali dell'opera e di conseguenza il livello di sicurezza è inferiore a quello previsto per l'opera stessa.

Questo è evidente se si confrontano il livello di sicurezza e la vita residua dell'opera. Tale confronto fornisce utili elementi di valutazione per la programmazione e la realizzazione degli interventi:

- per valori di $\zeta_E \geq 0,80$, la vita residua dell'opera $V_{RES} \geq 30$ anni quindi non è necessaria un'immediata programmazione degli interventi che potranno essere realizzati in occasione di manutenzioni di carattere generale o quando il gestore, in base all'analisi di una pluralità di fattori, ritenga di voler migliorare il livello di sicurezza dell'impianto.
- per valori compresi fra $0,80 > \zeta_E \geq 0,60$, la vita residua dell'opera è compresa fra $30 > V_{RES} \geq 10$ anni. Una vita residua di 10 anni è propria delle opere provvisoriale e quindi non idonea per gli impianti PIR. In questa condizione ($V_{RES}=10$), considerando l'inadeguatezza più elevata, il gestore dovrà programmare gli opportuni interventi e soprattutto assicurare che gli stessi vengano realizzati in un arco temporale breve. Nelle more del completamento di tali interventi il gestore dovrà adottare sistemi tecnici e gestionali, verificandone l'efficacia, per la mitigazione delle conseguenze legate ad un evento sismico.
- per valori di $\zeta_E < 0,60$, la vita residua dell'opera $V_{RES} < 10$ anni. In questo caso sono necessari interventi di adeguamento/miglioramento, da adottare nel minor tempo possibile.

In caso di grave inadeguatezza, che comporti un elevato livello di rischio, vanno prese in considerazione, in attesa della realizzazione degli interventi, anche eventuali limitazioni operative di esercizio, per riportare il rischio ad un livello accettabile.

4. Analisi degli scenari incidentali indotti dal sisma

4.1 Analisi del rischio

L'identificazione degli scenari incidentali, ragionevolmente prevedibili in termini di probabilità, avviene mediante l'analisi del rischio basata su un approccio probabilistico. L'analisi del rischio può essere di tipo qualitativo o quantitativo e può essere eseguita mediante diverse metodologie di calcolo presenti nella letteratura scientifica.

L'analisi del rischio di tipo qualitativo rappresenta un metodo di stima preliminare che consente in via speditiva di rispondere ad un duplice obiettivo: escludere le unità ritenute non critiche presenti all'interno dello stabilimento; creare una gerarchia delle criticità rilevate nelle opere non escluse all'interno dello stabilimento, in quanto ritenute vulnerabili a causa della presenza di sostanza pericolosa.

L'analisi del rischio di tipo quantitativo, Quantitative Risk Analysis, è una procedura più raffinata volta determinare la frequenza media annua di superamento di uno stato limite di riferimento di un certo evento incidentale. Infatti, la QRA deve fornire una conoscenza molto ampia delle vulnerabilità degli asset e dei rischi potenziali cui essi sono esposti, tenendo in considerazione le criticità delle componenti strutturali e non strutturali, ed in particolare dei rischi derivanti dalla presenza di sostanze pericolose all'interno dello stabilimento [6].

Nella stima delle frequenze degli scenari incidentali dovuti a eventi NaTech da sisma si deve tenere in considerazione il fatto che il sisma colpisce contemporaneamente tutto lo stabilimento, con possibile incremento di tali frequenze. Dovranno essere considerati tutti i possibili scenari incidentali prevedibili e credibili derivanti dall'interazione sisma-struttura-sostanza pericolosa.

4.1.1 Applicazione del metodo Hazus per la costruzione di curve di fragilità

Di seguito, si riportano alcune elaborazioni circa la costruzione delle curve di fragilità con il metodo Hazus [7]. In tale metodologia ciascuna curva di fragilità è caratterizzata da due parametri: la media e la deviazione standard del parametro sismico in corrispondenza del quale si realizza un certo livello di danno. Secondo la procedura Hazus, la curva di fragilità per un'opera di una determinata tipologia, può essere quindi espressa come una funzione cumulativa log-normale rispetto l'accelerazione spettrale:

$$P \left(ds \geq \frac{ds_i}{PGA} \right) = \phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \log \left(\frac{PGA}{\overline{PGA}_{ds_i}} \right) \right] \quad (3)$$

Dove:

- $P \left(ds \geq \frac{ds_i}{PGA} \right)$ è la densità di probabilità cumulativa di eccedere un particolare livello di danno ds_i per una certa PGA;
- \overline{PGA}_{ds_i} è il valore medio dell'intensità sismica, per esempio l'accelerazione di picco alla base, o lo spostamento, in corrispondenza alla quale si raggiunge lo stato di danno ds_i ;
- β_{ds} è la deviazione standard totale del logaritmo naturale. La stima della deviazione standard β_{ds} , che rappresenta la variabilità della curva fragilità, è ottenuta attraverso una convoluzione tra tre tipi di incertezze: incertezza sulla definizione dello stato danno; incertezza sulla risposta strutturale dell'elemento (si considera la deviazione standard per la variabilità della capacità strutturale); incertezza sulla domanda sismica (si considera la deviazione standard per la variabilità della domanda sismica; in altri termini, si considera lo spettro di risposta);
- ϕ è la funzione continua di distribuzione cumulativa normale.

In funzione dell'opera da analizzare, si sceglie una opportuna e specifica tipologia costruttiva come da classificazione indicata dal metodo Hazus. Sono elencati 36 tipi di strutture

specifiche basate sul sistema di classificazione di FEMA 178, NEHRP Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings (FEMA, 1992). Il sistema di classificazione di FEMA 178 considera anche i tipi di componenti non strutturali (architettonici, meccanici, elettrici, impiantistici) e di forniture (arredi, scaffalature, attrezzature di lavoro, macchinari e apparecchiature) che possono rappresentare primaria e secondaria causa di danno.

Ad ogni tipologia costruttiva corrispondono la descrizione del sistema strutturale e relativi stati di danno. Nell'ambito della simulazione riportata nel presente lavoro, è stata considerata la tipologia costruttiva S3 Steel Light Frame, in quanto ritenuta quella più vicina al sistema strutturale di opere e apparecchiature presenti negli stabilimenti industriali.

Per questa tipologia specifica i livelli di danno strutturale, o Performance Level, sono definiti come riportato di seguito:

- Danni leggeri: alcuni rinforzi d'acciaio delle controventature possono cedere, a partire dalle staffe; possono manifestarsi lievi cricche alle connessioni saldate o lievi deformazioni alle connessioni bullonate dei telai.
- Danni moderati: la maggior parte dei controventi in d'acciaio ha ceduto; alcuni collegamenti potrebbero essere interrotti; alcune connessioni saldate potrebbero presentare fessurazioni.
- Danni estesi: sono presenti deformazioni laterali permanenti e significative della struttura a causa di barre di rinforzo danneggiate, bulloni di ancoraggio allungati e deformazioni permanenti in corrispondenza di alcune membrature del telaio; alcuni attacchi a vite o saldati del raccordo del tetto e delle pareti al telaio in acciaio potrebbe essere danneggiati; alcuni collegamenti tra arcarecci e traverse potrebbero essere interrotti.
- Danno completo: la struttura è crollata o è in imminente pericolo di crollo.

Il metodo Hazus fornisce i parametri per la costruzione delle curve di fragilità in relazione a 4 classi di design sismico delle strutture:

- Pre-code: opere costruite prima di una adeguata normativa sismica;
- Low-code: opere costruite secondo le normative pre-1980;
- Moderate-code: opere costruite secondo le normative post-1980 e con un ragionevole dettaglio di progettazione degli elementi sismo-resistenti;
- High-code: opere con un maggiore livello di progettazione antisismica costruiti secondo la nuova generazione di codici.

Il metodo Hazus fornisce i valori da associare ad alcuni parametri per ogni categoria di tipologia costruttiva e per ogni Spectral Displacement. Nella tabella 1 sono stati estrapolati i valori dei parametri median e beta per la classe di opere considerata nella simulazione, ovvero la S3.

	Lieve DS1		Moderato DS2		Esteso DS3		Completo DS4	
	μ	β	μ	β	μ	β	μ	β
Pre-code	0,43	1,06	0,69	1,03	1,73	1,07	4,73	0,88
Low-code	0,54	0,99	0,87	0,99	2,17	1,01	5,91	0,91
Moderate-code	0,54	0,88	0,94	0,93	2,52	0,97	7,09	0,89
High-code	0,54	0,81	1,08	0,83	3,24	0,91	9,45	0,90

Tabella 1. Parametri di calcolo per opere di categoria S3

Una volta definiti gli stati di danno, o Performance Level, ed il livello di design sismico è possibile andare a tracciare le curve di fragilità per ciascuno di questi.

Per la simulazione proposta nel presente lavoro, sono state considerate due classi di progettazione, vale a dire il livello di progettazione "Pre-code" e il livello di progettazione "High-code", in funzione dei quali sono state calcolate le rispettive curve di fragilità per opere industriali ricadenti nella categoria tipologica S3 e distinte per ogni stato di danno.

A parità di PGA e di livello di danno si ottiene, ovviamente, una probabilità più elevata per le opere realizzate secondo il livello di progettazione “Pre-code” a differenza delle opere realizzate secondo il livello di progettazione “High-code”.

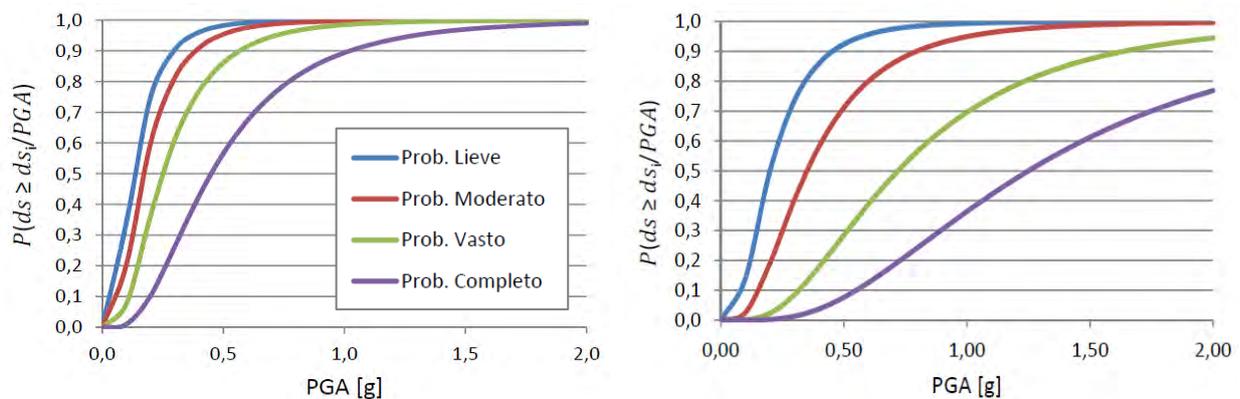


Figura 1. Confronto tra curve di fragilità per opere S3 con design Pre-code e High-code

Dalle elaborazioni riportate si possono trarre le seguenti considerazioni. Indipendentemente dal metodo di analisi scelto, che sia di tipo qualitativo o quantitativo, è fondamentale adattare la curva di fragilità al contesto e, dunque, alla pericolosità del sito, nonché alle vulnerabilità della struttura oggetto di analisi e ai risultati delle verifiche sismiche. Da qui, deriva la necessità di valutare anche in una fase preliminare gli aspetti propri dell'opera, quali la tipologia costruttiva ed i corrispondenti stati di danno, il periodo di realizzazione, lo stato di degrado dei materiali, la presenza di componenti non strutturali, in modo che la curva di fragilità rappresenti il più possibile le condizioni di fatto dell'opera da analizzare, anche se in via speditiva.

4.2 Analisi delle conseguenze

Nella valutazione della credibilità dello scenario incidentale si dovrà tenere in considerazione anche l'esposizione [8], a partire dalla valutazione della vulnerabilità del territorio e dell'ambiente circostante lo stabilimento, secondo quanto previsto dal D.M. 09 maggio 2001 [15].

La valutazione della vulnerabilità del territorio attorno ad uno stabilimento va effettuata mediante una categorizzazione delle aree circostanti in base al valore dell'indice di edificazione e all'individuazione degli specifici elementi vulnerabili di natura puntuale in esse presenti. Occorre inoltre tenere conto delle infrastrutture di trasporto e tecnologiche lineari e puntuali. Qualora tali infrastrutture rientrino nelle aree di danno individuate, dovranno essere predisposti idonei interventi atti a ridurre l'entità delle conseguenze. Un analogo approccio va adottato nei confronti dei beni culturali individuati in base alla normativa nazionale e regionale o in base alle disposizioni di tutela e salvaguardia contenute nella pianificazione territoriale, urbanistica e di settore.

A seguito dell'identificazione degli elementi territoriali ed ambientali vulnerabili, si procede con la determinazione delle aree di danno. La modellazione delle conseguenze relative ad uno scenario incidentale può essere definita mediante opportuni strumenti di simulazione e, qualora necessario, può essere integrata dalla valutazione delle conseguenze ambientali.

4.3 Valutazione degli scenari incidentali in fase di operatività d'impianto

Il terremoto può provocare sia il collasso della struttura, quale conseguenza diretta all'azione sismica, che danneggiamenti vari anche di componenti critici non strutturali che possono implicare la perdita di tenuta delle apparecchiature, e quindi il rilascio di sostanze pericolose

che può portare all'innescò di scenari incidentali (incendi, esplosioni, ecc.). Pertanto, il danneggiamento di componenti non strutturali, che svolgono un ruolo importante per la sicurezza dell'impianto, deve essere opportunamente valutato in quanto il loro fallimento può provocare conseguenze significative.

La valutazione del rischio sismico associato ai componenti non strutturali dello stabilimento è determinata, in primo luogo, dalle verifiche degli elementi non strutturali (NS) e degli impianti (IM). Le NTC 2018 specificano che le verifiche vanno condotte in termini di funzionamento (FUN) e stabilità (STA) definite a seconda della Classe d'Uso (Cu).

Infatti, anche in condizioni di normale operatività, il componente non strutturale può presentare un pericolo intrinseco;

In condizione di esercizio la valutazione degli scenari incidentali può essere effettuata basandosi su vari metodi riportati in letteratura nell'ambito del risk assessment [10]. Tra gli strumenti più diffusi si ricordano il Bow Tie, l'Albero dei Guasti e l'Albero degli Eventi.

A prescindere dal metodo scelto, il criterio generale è quello di individuare le cause (threats) che possono determinare una deviazione o una perdita di controllo sul pericolo legato alla normale operatività dell'impianto, dell'attrezzatura, della specifica attività considerata.

Tali cause, se non mitigate correttamente, rappresentano i fattori che potrebbero provocare un top event (ad esempio la perdita di contenimento, la perdita di controllo di un'apparecchiatura o di una macchina). Si analizzano, quindi, le conseguenze di un potenziale evento risultante dalla perdita di controllo su un pericolo.

Infine, dalla convoluzione dei ratei di guasto, si stabilisce se l'evento è credibile o meno.

L'obiettivo dei metodi del risk management [10] è incentrato sul controllo e la gestione del rischio. Ciò avviene attuando misure di controllo per prevenire o mitigare eventi incidentali, una volta determinata la relativa frequenza di accadimento.

5. Misure di prevenzione/mitigazione tecniche e gestionali

L'iter metodologico per la valutazione del rischio sismico di stabilimenti industriali soggetti al D. Lgs. 105/2015 è finalizzato alla scelta di efficaci misure di prevenzione e di mitigazione di tipo tecnico e gestionale. Infatti, in funzione dell'inadeguatezza delle verifiche sismiche e delle analisi precedentemente illustrate, il gestore dovrà valutare la necessità di realizzare interventi di miglioramento e di adeguamento, su strutture ed elementi di impianto critici, di tipo tradizionale (interventi volti ad incrementare la rigidità e la resistenza della struttura) o innovativi (isolamento sismico e dissipazione di energia) [13].

Il gestore può anche predisporre adeguate misure di mitigazione del rischio per contenere i danni derivanti dall'evento sismico sull'uomo e sull'ambiente, adottando sistemi tecnici/gestionali mediante il posizionamento e l'installazione di sensori e dispositivi di allerta precoce, come i Local (oltre ai Regional) e gli Structural Earthquake Early Warning Systems [9] [12] [14]; di sensori per il rilevamento di deformazioni e spostamenti [12] [14], per il rilevamento del rilascio di sostanze pericolose [12] [14].

Tali sensori consentono l'attivazione tempestiva di allarmi e, mediante attuatori, di sistemi di protezione attiva come ad esempio i sistemi antincendio automatici, e permettono, coordinando in maniera "smart" la funzionalità dell'impianto, di migliorarne il livello di sicurezza [12] [14].

I sensori attualmente disponibili sul mercato e utilmente impiegabili a tale scopo possono essere così suddivisi: sensori per la misura delle deformazioni; sensori per la misura delle accelerazioni; sensori per la misura della temperatura; sensori per il rilevamento di rilascio di sostanze [9].

Al primo gruppo appartengono i sensori più tradizionali in grado di misurare, anche in tempo reale la deformazione in un punto della struttura. Essi sono di natura resistiva e hanno in genere una elevata sensibilità di misura. Hanno di contro lo svantaggio di dover essere posti

in punti specifici della struttura nei quali si prevede lo sviluppo delle deformazioni maggiori e necessitano, quindi, di uno studio preliminare della risposta sismica.



Figura 2. Strain Gauges e Shutdown valves

A tale famiglia appartengono gli Strain Gauges (figura 2), i potenziometri lineari classici (figura 3) o a filo (trasduttori di estensione, così come gli inclinometri lineari (figura 3). Queste tipologie di sensori necessitano in genere di un sistema di acquisizione permanente in situ in grado di leggere le deformazioni di continuo.

Gli Strain Gauges misurano il livello di deformazione locale in punti critici dell'impianto (ad esempio gomiti di tubazioni o serbatoi) nei quali si prevedono particolari concentrazioni di tensione. In tal caso, potrebbero essere utilizzati come riferimento per l'attivazione di sistemi di mitigazione come ad esempio la chiusura di una valvola (shutdown valves, figura 2) o attivazione automatica dell'impianto antincendio.

Potenzimetri lineari e a filo sono in grado di monitorare a distanza, se dotati di trasmissione wireless, la posizione relativa tra due punti fissi.

Gli inclinometri lineari, invece, forniscono in output un angolo di inclinazione. Essi possono essere utilizzati sia per la misura di spostamenti che rotazioni.



Figura 3. Potenzimetro lineare e Inclinometro lineare

6. Conclusioni

Sulla base di quanto esposto nel presente contributo, le eventuali vulnerabilità delle opere e delle apparecchiature di processo ricadenti negli stabilimenti PIR ed i potenziali fattori di rischio legati principalmente alla presenza ed alla lavorazione di sostanze pericolose, devono essere individuati mediante opportuna valutazione della sicurezza secondo le prescrizioni delle NTC 2018[1] [2] e sulla base dell'analisi del rischio, D. Lgs.105/2015 [3]. L'iter metodologico illustrato circa la valutazione della sicurezza e l'analisi di rischio nei confronti degli eventi sismici e la successiva scelta di opportune ed efficaci misure di mitigazione basate anche su tecnologie Smart, rappresentano aspetti complementari che si collocano perfettamente in un'ottica di prevenzione, intesa come insieme di strategie atte a contribuire alla resilienza di un sistema. Resilienza intesa come la capacità intrinseca di un sistema complesso di adattare il proprio funzionamento prima, durante e in seguito ad un cambiamento o ad una perturbazione, in modo da poter continuare in sicurezza le attività necessarie sia in condizioni previste che in condizioni impreviste.

Ringraziamenti

Si ringrazia la dott.ssa Anna Carmela Lio per il prezioso contributo fornito per la realizzazione di questo lavoro, principalmente per gli aspetti normativi ed editoriali.

Bibliografia

- [1] Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018. *Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni*.
- [2] Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019 C.S.LL.PP.
- [3] Decreto Legislativo n. 105 del 26 giugno 2015. *Attuazione della Direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose*.
- [4] Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003.
- [5] Decreto del 21 ottobre 2003. *Disposizioni attuative dell'art. 2, commi 2, 3 e 4, dell'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003*.
- [6] M. Rota, A. Penna, C.L. Strobbia. *Processing Italian damage data to derive typological fragility curves*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(10):933–947, 2008.
- [7] AA.VV. Hazus - Technical report, Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2020.
- [8] Andreas J. Kappos, Georgios Panagopoulos. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6:1-2, 39-53, 2010.
- [9] A. Marino, M. Ciucci, L. Barbieri Vita, G. Quinci, 2019. *Seismic risk assessment and management in major hazard industrial plants*, XVIII Convegno ANIDIS, L'ingegneria sismica in Italia.
- [10] L. Fiorentini, R. Sicari. *Analisi valutazione e gestione operativa del rischio. Bow-Tie, Root Cause Analysis ed altri strumenti conformi alla ISO 31000 per la gestione sistemica del rischio nelle organizzazioni*. EPC Editore. 2020.
- [11] F. I. Khan, T. Husain, and S. A. Abbasi, *Safety Weighted Hazard Index (SWeHI): A New, User-friendly Tool for Swift yet Comprehensive Hazard Identification and Safety Evaluation in Chemical Process Industries*, *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 79, no. 2, pp. 65–80, 2001.
- [12] Marino A., Ciucci M., “Smart approach to integrated natural risks management for Industry 4.0”, (2019 SPIE Smart Structures + Nondestructive Evaluation 2019, 3-7 marzo, 2019 Denver (CO, USA). Proc. SPIE 10973, Smart Structures and NDE for Energy Systems and Industry 4.0, 1097306 (18 March 2019); doi: 10.1117/12.2513764
- [13] Ciucci M., Marino A., Lio A. (2018) “Approcci metodologici innovativi per la gestione del rischio sismico in impianti industriali a rischio di incidente rilevante.” Convegno SAFAP, Bologna 28-29 novembre 2018. ISBN 978-88-7484-139-4
- [14] Ciucci, M., Marino, A., Paolacci, F., Bursi O.S., (2019),” Integrated smart seismic risks management”. I PVP 2019 14-19 luglio, 2019, San Antonio (TX, USA). Proceedings American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division. PVP, ASME PVP 2019 Conference, Vol. 8, DOI: 10.1115/PVP2019-94027
- [15] Decreto 9 maggio 2001 *Requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione urbanistica e territoriale per le zone interessate da stabilimenti a rischio di incidente rilevante*.

Individuazione/localizzazione delle perdite di fluidi per degrado o evento NaTech e monitoraggio strutturale su tubazioni, serbatoi, cisterne e flange di raccordo con sistemi di misura basati su sensori in fibra ottica a tecnologia FBG certificati ATEX

V. Vezzari¹, L. Barbieri Vita¹, M. Ciucci²

¹ Global Sensing Srl

² Inail – Dit

Sommario

Per l'industria chimica, petrolifera e del gas, le conseguenze delle perdite di fluidi da condotte, serbatoi e dispositivi di raccordo possono essere estremamente gravi. Perdite di questi prodotti possono causare incendi, esplosioni e contaminazioni, nonché danni al personale addetto, al pubblico e danni irreversibili alle infrastrutture, agli impianti e all'ambiente. Con l'espansione delle infrastrutture di produzione, distribuzione, trasporto e stoccaggio di questi prodotti in tutto il mondo le tecnologie di rilevamento delle perdite, dovute al degrado dei materiali, all'obsolescenza delle apparecchiature e a problematiche strutturali e non strutturali causate da eventi naturali, sommate ad un quadro normativo sempre più rigoroso, stanno contribuendo sia alla riduzione degli eventi legati alle perdite che alla loro immediata individuazione.

Il lavoro presentato propone un'applicazione specifica nel settore petrolchimico, dove un sistema basato su trasduttori in fibra ottica a tecnologia FBG (Fiber Bragg Gratings) letti a distanza da una piattaforma hardware di lettura ed elaborazione dati certificata ATEX, è in grado di individuare e localizzare perdite di fluidi da un serbatoio e contemporaneamente monitorarne le condizioni strutturali in esercizio. L'immediata fruibilità dei dati derivanti dalle due tipologie di monitoraggio con sensori in fibra ottica FBG consente di mettere in atto svariate operazioni, come ad esempio Early Warning, Health Monitoring e Predictive Maintenance in remoto e in locale, con evidenti vantaggi in termini di tempi di reazione e correttezza delle azioni da intraprendere.

1. Introduzione

Sia il degrado dei materiali che l'impatto di un disastro naturale su uno stabilimento industriale con pericolo di incidente rilevante (PIR) può comportare il rilascio di sostanze pericolose con possibili gravi conseguenze. Gli incidenti innescati da un pericolo naturale sono comunemente indicati come eventi NaTech [9]. Un evento NaTech scaturisce dall'interazione tra un disastro naturale e un incidente tecnologico, da cui possono verificarsi simultanei rilasci di sostanze pericolose, incendi ed esplosioni in quanto l'evento naturale investe tutto lo stabilimento. Questo aspetto implica maggiori sforzi per la gestione di tale situazione, in quanto i sistemi di sicurezza esistenti potrebbero non essere operativi, a causa di danneggiamenti provocati dall'evento di matrice naturale. Il verificarsi rilasci di sostanze pericolose da una o più fonti può determinare sia più catene incidentali nello stesso stabilimento che interazioni con stabilimenti limitrofi. Ciò richiede un tempestivo intervento da parte delle risorse coinvolte nella gestione dell'emergenza; tali risorse potrebbero essere impegnate nella risposta al disastro naturale anche in altre situazioni [3].

Nonostante una riconosciuta crescita delle attività di ricerca, che si traduce in proposte normative che richiedono requisiti prestazionali maggiori ed in soluzioni tecniche più efficaci

per la progettazione delle attività industriali, gli incidenti NaTech rimangono comunque una minaccia emergente [10]. La Direttiva 2012/18/UE del Parlamento Europeo, recepita dagli stati membri europei, ha riconosciuto la rilevanza degli eventi NaTech.

Per la gestione di tali eventi, l'utilizzo di una tecnologia basata su sensori intelligenti integrata con i sistemi di sicurezza generalmente presenti negli stabilimenti PIR, può rappresentare un'interessante strategia di mitigazione. In particolare, per ridurre il rischio in caso di incidenti e controllare sia le conseguenze di eventi NaTech da sisma che quelle derivanti dal degrado dei materiali, possono essere considerati sistemi di monitoraggio e controllo ad-hoc [13] mediante sensoristica smart che permette l'attivazione tempestiva, anche mediante attuatori, dei sistemi di sicurezza presenti nello stabilimento [7].

Nel presente lavoro, verrà illustrato il principio di funzionamento ed i corrispondenti campi di applicazione negli stabilimenti PIR di specifici dispositivi in fibra ottica FBG per il rilevamento delle perdite di sostanze pericolose e per il monitoraggio strutturale.

2. La tecnologia FBG

I sensori in fibra ottica FBG, sono trasduttori multifunzione in grado di rilevare ad alta frequenza, con grande accuratezza e a lunga distanza, vibrazioni, deformazioni, temperature, variazioni di lunghezza, pressioni dinamiche, variazioni di geometria e accelerazioni, lungo una fibra ottica monomodale incollata o annegata nella struttura o sul componente da monitorare.

2.1 Principio di funzionamento dei sensori in fibra ottica a tecnologia FBG

Un sensore in fibra ottica a reticolo di Bragg (FBG) è rappresentato da un reticolo diffrattivo fotoinciso con un laser UV lungo una fibra ottica monomodale da 125 micron di diametro, la cui proprietà è quella di riflettere una ben determinata lunghezza d'onda luminosa ad esso associata, generata da una sorgente laser o SLED. Quando la fibra ottica viene attraversata dalla luce emessa da una sorgente laser o da un led superluminescente (SLED), ogni reticolo di Bragg fotoinciso al suo interno riflette la luce con una ben determinata lunghezza d'onda ad esso associata espressa in nm (nanometri), che varia in funzione della lunghezza del reticolo sottoposto a trazione o compressione indotti da stress termico o meccanico.

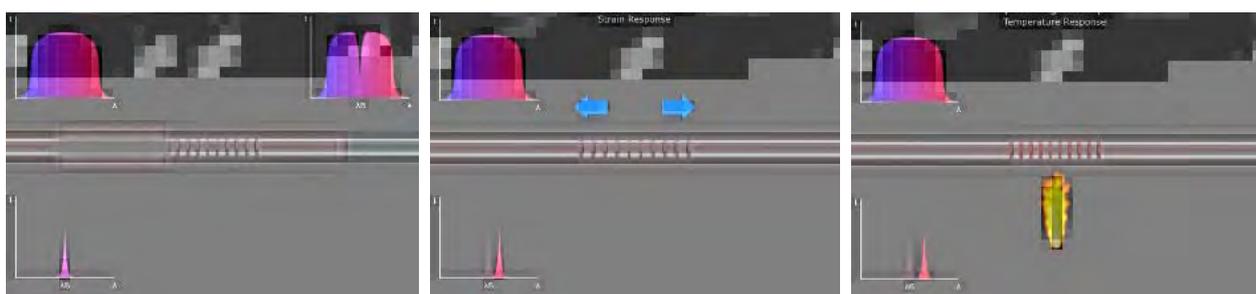


Figura 1. A sinistra: spettro della luce all'interno della fibra ottica trasmesso dalla sorgente luminosa interna all'interrogatore FBG. Al centro e a destra: variazione della lunghezza d'onda (nm) della luce riflessa dal reticolo in relazione ad una sollecitazione meccanica e termica.

Ogni variazione di lunghezza d'onda associata ad ogni singolo sensore FBG viene rilevata e convertita in tempo reale in temperatura, deformazione, vibrazione, pressione o variazione di geometria da una centralina optoelettronica dedicata, nota come interrogatore FBG. Inscrivendo quindi lungo una fibra ottica monomodale un certo numero di reticoli FBG aventi ognuno una propria lunghezza d'onda nominale, quindi univocamente identificabili, si ottiene una dorsale in fibra ottica FBG in grado di misurare, in quei punti dove sono presenti

i reticoli diffrattivi FBG, temperatura, deformazione, vibrazione, pressione o variazione di geometria.

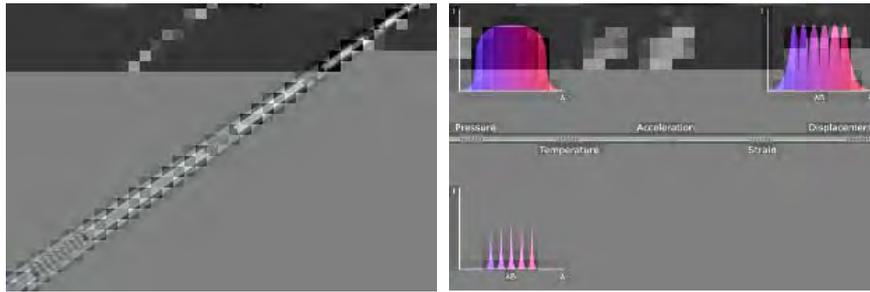


Figura 2. A sinistra: installazione dei sensori in serie e lungo un'unica fibra. A destra: uso dei sensori FBG per campionare deformazioni, vibrazioni, pressioni, temperature, accelerazioni, variazioni di lunghezza.

2.2 Peculiarità e vantaggi dei sensori in fibra ottica a tecnologia FBG

In generale, l'impiego delle tecnologie FBG trova ampia applicazione in diversi campi grazie a numerosi vantaggi che contraddistinguono questa tecnologia. Infatti, i sensori a fibra ottica a tecnologia FBG risultano totalmente immuni alle interferenze elettromagnetiche, non richiedono alimentazione elettrica, sono sistemi di misura non invasivi, in quanto presentano peso e dimensioni contenuti. Essi sono chimicamente inerti: risultano insensibili a fenomeni ossidativi ed erosivi garantendo un corretto funzionamento in condizioni ambientali anche se immersi in un liquido. Permettono la trasmissione dei dati di misura sulle lunghe distanze con una bassa perdita di segnale. Possono essere facilmente strutturate catene di misura lunghe chilometri, con cablaggi elementari e hardware di controllo estremamente snello. Sono dispositivi ideali per la misura di deformazioni e variazioni di temperatura su macchine ed elementi rotanti. Tali dispositivi presentano un'elevata sensibilità di misura: $\pm 1 \mu\epsilon$ per le deformazioni; $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ per le temperature. Sono installabili all'interno di particolari e strutture in materiale composito direttamente in fase di laminazione. I sensori FBG standard possono lavorare immersi in un liquido e in ambienti con temperature comprese tra -180°C e 400°C . Infine, si tiene conto del fatto che tali tecnologie non richiedono tarature e sono certificati per durare fino a 25 anni senza la necessità di ricalibrazione.

3. Gamma di sensori GS4X

Di seguito si riporta una breve descrizione della gamma di sensori GS4X dedicati all'individuazione e localizzazione di perdite di fluidi, monitoraggio strutturale, vibrazionale e di assetto di elementi e strutture di impianti.

3.1 Sensori GS4LD-HCW

I sensori GS4LD-HCW [For Leakage Detection – HydroCarbon/Water (Patent Pending)] per l'individuazione e localizzazione distribuita delle perdite di fluidi da tubazioni, serbatoi, cisterne fisse e mobili, sono costituiti da trasduttori IP69 realizzati in un compound sensibile alla presenza di fluidi, opportunamente strumentati con dorsali in fibra ottica mono-modali a tecnologia FSI (Fiber Segment Interferometry).

I sensori GS4LD-HCW possono essere collegati in serie e in parallelo, in funzione del layout dell'impianto, della pipeline o della tank farm da controllare, ad una o più centraline optoelettroniche di interrogazione per sensori in fibra ottica FSI in grado di ricevere dai sensori GS4LD-HCW i segnali relativi alla presenza e alla posizione delle perdite di fluidi e visualizzarli su PC e dispositivi mobili, sottoforma di allarme georeferenziato grafico, acustico e visivo.

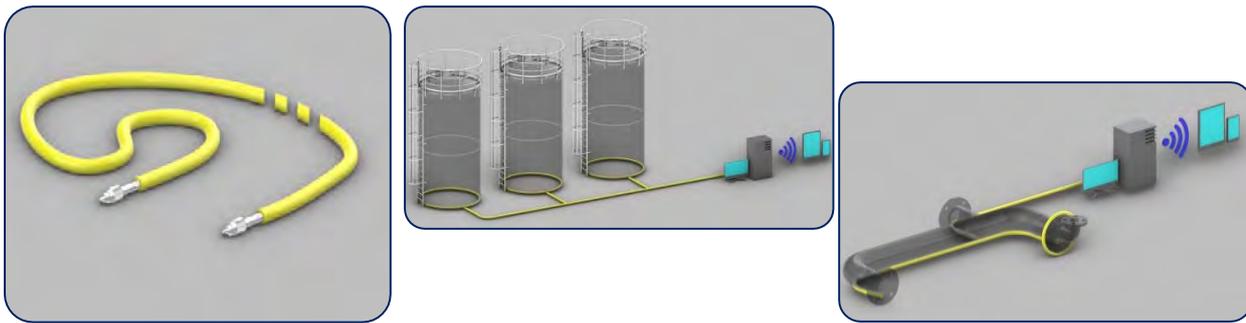


Figura 3. A sinistra: sensore GS4LD-HC configurabile in diversi diametri da 10 mm a 50 mm e lunghezze variabili da 100 mm fino a 100 m. Al centro: sensori GS4LD-HC ATEX installati alla base di serbatoi verticali per lo stoccaggio di idrocarburi e collegati a distanza al server cloud tramite dorsale in fibra ottica. A destra: sensori GS4LD-HC ATEX installati lungo tubazioni e su flange di accoppiamento tubi.

Sensori GS4LD-HCW – caratteristiche operative

Lunghezze disponibili	da 100 mm a 100 m
Temperatura di esercizio	-45°C ÷ 100°C

3.2 Sensori GS4LD-F

I sensori GS4LD-F [For Leakage Detection - Flanges (Patent Pending)] per l'individuazione e la localizzazione delle perdite di liquidi da flange, sono costituiti da uno speciale trasduttore anulare strumentato con sensori in fibra ottica applicabile attorno ai collari di due flange accoppiate.

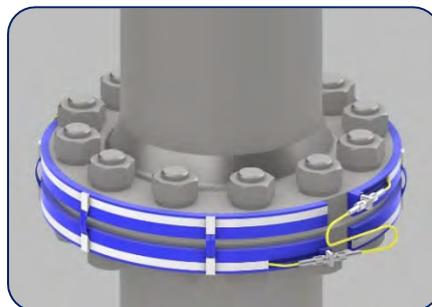


Figura 4. Sensori GS4LD-F installati sui collari di una flangia di collegamento di un tubo diametro interno 200 mm.

Il sensore GS4LD-F è in grado di rilevare la perdita di liquido da una flangia su cui è installato attraverso un monitoraggio a doppio controllo di tipo meccanico e idraulico, che consente di rilevare l'apertura della flangia oltre il valore consentito e in contemporanea l'eventuale fuoriuscita di liquido. La localizzazione della flangia che perde fluido o che presenta un'apertura dei collari fuori norma non necessariamente con conseguente fuoriuscita del fluido, è possibile grazie all'identificativo univoco basato sulla lunghezza d'onda centrale dei sensori in fibra ottica che identificano ogni GS4LD-F installato: ad ogni sensore GS4LD-F corrisponde una e una sola flangia la cui posizione all'interno dell'impianto è nota.

Sensori GS4LD-F – caratteristiche operative

Diametri disponibili	Nessun limite dimensionale. Realizzabili su misura
Temperatura di esercizio	-45°C ÷ 100°C

3.3 Sensori GS4SM

I sensori di tipo GS4SM sono costituiti da dorsali in fibra ottica monomodale da 125 micron di diametro strumentate con trasduttori patch realizzati in metallo o materiale composito, a seconda dell'ambiente dove sono impiegati, in grado di campionare in tempo reale, a grande distanza e ad alta frequenza di campionamento, deformazioni, variazioni geometriche 2D/3D e vibrazioni degli elementi e delle strutture su cui sono installati. Le patch possono essere collegate all'elemento da monitorare tramite incollaggio, rivettatura o saldatura a punti. In caso di strutture in materiale composito, laddove richiesto per esigenze funzionali e operative, i sensori GS4M possono essere inseriti all'interno dell'elemento da monitorare durante la laminazione e collegabili con le centraline di controllo tramite connettori per fibre ottiche APC/FC resistenti alle alte temperature.



Figura 5. Sensori GS4SM in doppia configurazione.

Sensori GS4SM – caratteristiche operative

Lunghezza min-max dorsali fibra ottica FBG	100 mm ÷ 5 km
Range di misura deformazione singolo sensore FBG	+/- 3.000 microstrain
Temperatura di esercizio singolo sensore FBG	-150 °C ÷ 400 °C

3.4 Sensori GS4AM

I sensori GS4AM [For Attitude Monitoring (Patent Pending)] sono degli inclinometri assiali e biassiali basati su sensori in fibra ottica a tecnologia FBG.



Figura 6. Inclinometri monoassiali GS4AM posizionati a 90° l'uno rispetto all'altro per poter campionare indipendentemente l'inclinazione attorno all'asse X e attorno all'asse Y.

Grazie ad uno speciale trasduttore opto-meccanico è possibile misurare in modalità statica e dinamica l'inclinazione del piano su cui è installato il sensore GS4AM con un'accuratezza di +/- 0.25% sul fondo scala per un range di misura di 20° ($\pm 10^\circ$). L'inclinometro GS4AM ha un grado di protezione IP68 e può operare totalmente immerso in un liquido, a contatto con gas infiammabili e idrocarburi, ed anche in ambienti a rischio esplosione.

Sensori GS4AM monoassiale – caratteristiche operative

Range di misura	20° (-10° ÷ +10°)
Temperatura di esercizio	-20 °C ÷ 80 °C
Grado di protezione	IP66-IP68 (su richiesta)
Dimensioni	110 mm X 110 mm X 50 mm

4. Applicazioni della tecnologia FGB nell'industria di processo

4.1 Apparecchiature snelle

Una tipologia di apparecchiatura largamente diffusa negli impianti industriali è quella delle colonne di distillazione o separazione costituite da contenitori cilindrici verticali in acciaio posti su pilastri e fondazioni in cemento armato.

Per questa tipologia strutturale, le osservazioni relative all'analisi storica dei danni causati da terremoti, ha mostrato come le zone più sensibili siano quelle delle giunzioni tra la colonna e le tubature collegate alle varie altezze così come la tubazione posta in sommità della colonna e possibili danni al collegamento con le fondazioni o in casi più rari il collasso della fondazione spesso costituita da una platea di piccole dimensioni. Il meccanismo da monitorare è quello relativo alla rotazione del sistema colonna-tubatura. Anche in questo caso, attraverso l'installazione di opportuni inclinometri (sensori GS4AM come in figura 7 punto A, B e C) è possibile monitorare il valore della rotazione relativa tubazione-colonna nei punti poco accessibili, intervenendo con la conseguente chiusura della valvola di sicurezza, qualora tale valore risulti essere maggiore della soglia limite prestabilita. È anche possibile installare degli specifici sensori per la rilevazione della perdita di tenuta delle tubazioni e del conseguente rilascio di sostanze pericolose. Un altro aspetto importante da monitorare per tali apparecchiature è la rotazione globale dell'apparecchiatura che può fornire indicazioni sulla tenuta sia del collegamento con le fondazioni che delle fondazioni stesse.

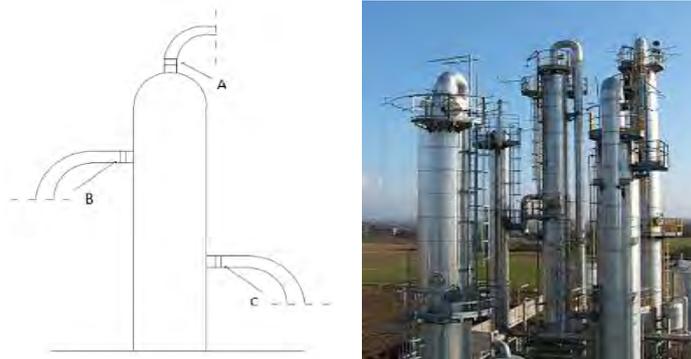


Figura 7. Monitoraggio della giunzione colonna-tubazioni (a) posizionamento dei sensori inclinometri, (b) colonna di distillazione.

Anche nel caso di serbatoi verticali e/o separatori olio/gas, può essere utile monitorare sia lo spostamento relativo tra il serbatoio e le tubazioni collegate ad esso che il meccanismo di rotazione relativa del giunto di collegamento. Per il rilevamento di eventuali perdite di sostanze pericolose in tubazioni e/o giunti flangiati possono essere utilizzati i sensori GS4LD-F. Inoltre, installando i sensori GS4SM è possibile monitorare, sotto l'effetto del sisma, lo spostamento e la rotazione relativi dei giunti tubo/serbatoio ritenuti più sensibili (punti A, B e C della figura 7). In alternativa, dato che l'eccessiva rotazione relativa dei giunti flangiati tubo/serbatoio è il meccanismo di danno più frequente, può essere monitorato attraverso GS4AM. Per scongiurare conseguenze gravi a seguito del collasso strutturale, è sempre possibile utilizzare GS4AM per misurare lo spostamento relativo struttura terreno da confrontare con i valori limite prima identificati e attivare, se necessario, azioni di shutdown di una parte dell'impianto.

4.2 Apparecchiature tozze poggianti direttamente a terra

Le apparecchiature tozze che scaricano direttamente a terra sono delle strutture con le tre dimensioni principali confrontabili tra loro, contraddistinte da un'elevata concentrazione di

massa che viene scaricata in maniera uniformemente distribuita sul sistema di fondazione senza generazione di momenti di vincolo.

In questa categoria ricadono tipologie di impianti e di unità tecniche, tra cui i serbatoi di stoccaggio di grandi dimensioni con basso rapporto altezza/diametro (tra 2/1 a 0,2/1), semplicemente appoggiati su una fondazione continua o in alcuni casi ancorati in maniera fissa alla base sottostante. Superiormente, possono essere chiusi da un tetto fisso o galleggiante. Possono lavorare a pressione atmosferica ed a pieno carico presentano una elevata concentrazione di massa.

Per queste tipologie di apparecchiature, i danneggiamenti più frequenti sono riconducibili alle seguenti problematiche:

- Oscillazione della massa di liquido (forze elevate sulle pareti del serbatoio, onda di “sloshing” nella parte superiore con versamento);
- Danno alla base, per cedimento della saldatura tra il fondo e le pareti;
- Instabilità elasto-plastica delle pareti alla base (“elephants foot buckling”);
- Danneggiamento tetti a cono per depressione interna (rapido svuotamento, non compensato dalle valvole);
- Danni alle tubazioni uscenti dai serbatoi per cedimenti del terreno;
- Incendio di vapori per attrito tra il tetto galleggiante e parete.



Figura 8. Danneggiamenti alle tubazioni di attacco ai serbatoi e distacco dei giunti flangiati.

Nell’ottica di una efficace manutenzione predittiva finalizzata alla prevenzione ed alla gestione dei rischi Na-Tech associati alle opere dell’industria di processo, in funzione delle principali criticità riscontrate, si propone l’impiego di sensori in fibra ottica a tecnologia FBG, quali i trasduttori classificati: GS4LD-HC per l’individuazione e localizzazione di perdite di fluidi da condotte e serbatoi e GS4LD-F per l’individuazione di perdite di fluidi da flange.

4.3 Apparecchiature tozze poggianti su elementi snelli discreti

Le apparecchiature tozze, oltre a scaricare direttamente a terra tramite il sistema di fondazione, possono essere sostenute in elevazione da elementi snelli discreti. In questa categoria, rientrano sia strutture adibite allo stoccaggio che al processo, quali per esempio:

- Recipienti sferici destinati a lavorare sotto pressione, nella maggior parte dei casi utilizzati per lo stoccaggio di gas liquefatti. Questi sono caratterizzati da una struttura di sostegno realizzata da una successione circonferenziale di pilastri metallici saldati al mantello, irrigiditi con controventi diagonali e fondati su singoli plinti in CLS;
- Recipienti cilindrici ad asse verticale destinati a lavorare a pressione, per gas liquefatti a bassa temperatura; le pareti sono formate con un guscio doppio, con un’intercapedine di materiale isolante, distanziati dal suolo da corti piedistalli;
- Forni di processo e caldaie. Queste unità dell’industria petrolifera e petrolchimica hanno una configurazione semplice e compatta “a cattedrale” o “cilindrica”, con dimensioni e masse significative che inoltre devono essere tenute sollevate da terra per permettere il passaggio e la manutenzione delle tubazioni sottostanti.

- Serbatoi per gas naturale liquefatto (GNL) i quali lavorano a pressione quasi atmosferica e a bassa temperatura. Presentano dimensioni paragonabili a quelle dei serbatoi a tetto galleggiante per prodotti petroliferi.

Per queste tipologie di apparecchiature, i danneggiamenti più frequenti sono riconducibili alle seguenti problematiche:

- Danni serbatoi sferici a seguito collasso pilastri basamento;
- Danni ai forni a cattedrale per collasso ciminiera;
- Il collasso catastrofico dei forni può causare il danneggiamento o la distruzione di altre apparecchiature o linee di tubazioni;
- Perdita di appoggio delle tubazioni interne (coils) che potrebbero collassare all'interno del forno causando la fuoriuscita di sostanze infiammabili;
- Distacco del refrattario che potrebbe lasciare parti del mantello d'acciaio non protette, con possibile forte aumento localizzato della temperatura e conseguente perdita delle caratteristiche meccaniche;
- Danni alle giunzioni flangiate delle tubazioni esterne in ingresso e in uscita dai forni comportamento soft-storey al piede della struttura, con possibile collasso per flessione e taglio dei pilastri di supporto.



Figura 9. A sinistra: collasso dei supporti di un serbatoio a sfera. A destra: serbatoi orizzontali su selle

Nell'ottica di una efficace manutenzione predittiva finalizzata alla prevenzione ed alla gestione dei rischi Na-Tech associati alle opere dell'industria di processo, in funzione delle principali criticità riscontrate, si propone l'impiego di sensori in fibra ottica a tecnologia FBG, quali i trasduttori classificati: GS4LD-HC per l'individuazione e localizzazione di perdite di fluidi da condotte e serbatoi e GS4LD-F individuazione di perdite di fluidi da flange. Nel caso specifico dei serbatoi su sella, tali sensori potranno essere installati in corrispondenza del punto più vulnerabile quale la valvola di ingresso e di uscita del fluido.

4.4 Apparecchiature meccaniche rotanti

In questa categoria di apparecchiature meccaniche rientrano sia le attive (pompe, ventilatori, compressori, valvole azionate da sistema pneumatico e motorizzato, generatori diesel, generatori di turbine a vapore), sia le passive (boilers, riscaldatori dell'acqua di alimentazione, filtri, schermi, demineralizzatori). Per queste tipologie di apparecchiature, i danneggiamenti più frequenti sono riconducibili principalmente a fenomeni di vibrazione, le fonti possono essere molteplici (alberi piegati, squilibri, disallineamenti, forze di reazione e contatto tra i componenti). Tutti questi problemi possono essere dannosi per l'affidabilità e il funzionamento delle apparecchiature rotanti. Infatti, un incremento delle vibrazioni può comportare: movimento eccessivo dell'albero che alla fine danneggia le guarnizioni; deformazioni permanenti nei cuscinetti; aumento dei giochi di boccole e anelli di usura; danneggiamento delle componenti a causa di fenomeni di fatica; correlazione tra monitoraggio delle vibrazioni della macchina con la pressione e la temperatura di processo.

A volte, i guasti della macchina possono derivare da variazioni di pressione da cui poi dipendono i fenomeni vibratorii. Disomogeneità nelle caratteristiche del fluido, cambiamenti nella velocità o nella direzione del fluido, intasamenti sullo scarico o sull'aspirazione e componenti interni usurati possono tutti causare cambiamenti nella pressione della macchina rotante.

Per il rilevamento e la conseguente allerta precoce delle criticità che più di frequente potrebbero manifestarsi durante il funzionamento delle apparecchiature meccaniche rotanti, si propone l'impiego di sensori in fibra ottica a tecnologia FBG, quali i trasduttori classificati GS4SM appositamente predisposti per il monitoraggio strutturale e vibrazionale di elementi e strutture di impianti.



Figura 10. Pompe e compressori ad uso industriale.

4.5 Sistemi complessi con diverse apparecchiature su strutture di sostegno

Nel caso di sistemi complessi [1] [14] come in figura 11, l'utilizzo dei sensori a tecnologia FBG consente di monitorare sia gli aspetti strutturali della struttura di sostegno che gli elementi su di essa installati, attraverso il monitoraggio combinato di deformazione e vibrazione con sensori GS4SM e di assetto pre e post evento NaTech con gli inclinometri GS4AM, sia gli eventuali rilasci di sostanze pericolose da tubazioni e/o giunti flangiati causati da fenomeni di degrado, eventi sismici, manomissioni, cedimenti strutturali, esplosioni.

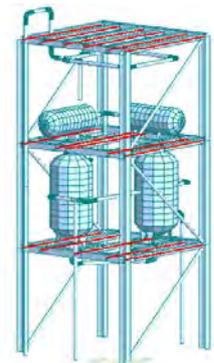


Figura 11. Esempio di sistema complesso [1] [14] con diverse apparecchiature su strutture di sostegno

5. Conclusioni

Nel presente lavoro è stato illustrato come le fibre ottiche possono essere utilizzate sia per il rilevamento di eventuali perdite di contenimento nelle apparecchiature di processo e nelle tubazioni e/o giunti flangiati destinate al trasporto di sostanze pericolose, che per il monitoraggio strutturale [6] [11]. Tra l'altro, ai numerosi vantaggi sopraesposti derivanti dalle applicazioni FBG, si aggiunge la seguente considerazione: poiché questi sistemi sono generalmente continui, non è sempre necessario determinare in anticipo una posizione di LoC (perdita di contenimento) specifica, ma è sufficiente installare in maniera opportuna dei sensori in fibra ottica FBG lungo l'intera linea da monitorare [5]. L'utilizzo delle fibre ottiche FBG è stato ampiamente riconosciuto come efficace nel monitoraggio di strutture industriali soggette ad azioni sismiche ed a fenomeni di degrado, grazie al versatile impiego di tali sistemi sia in configurazioni strutturali distribuite che localizzate.

Tuttavia, anche se le applicazioni nell'industria petrolifera e del gas sono in rapida crescita, l'impiego dei sensori FBG per il monitoraggio delle condizioni pericolose negli stabilimenti PIR è ancora poco diffuso. Data la versatilità, l'efficacia e il basso costo dei sensori FBG se ne auspica un maggiore utilizzo nell'ambito industriale.

Bibliografia

- [1] Butenweg, C., Paolacci, F., Bursi, O. S., Lanese I., Rizzo Parisi E., Pavese A., Marinković, M., Ciucci M., Quinci, G., Nardin, C., (2020), Seismic performance of multi-component systems in special risk industrial facilities - Technical report on SERA Transnational Access activities TA1-TA10 M36.
- [2] Bursi O.S., Paolacci F, Shahin R., Alessandri S., Tondini N., (2016), Seismic Assessment of Petrochemical Piping Systems Using a Performance-Based Approach, *Journal of Pressure Vessel and Technology*, Vol. 138:3 - DOI: 10.1115/1.4032111.
- [3] Caputo A. C., Paolacci F., Bursi O.S., Giannini. R., (2019), Problems and perspectives in seismic QRA of chemical process plants for decision making, submitted to *Journal of Pressure Vessel and Technology*. Volume 141 | Issue 1, DOI: 10.1115/1.4040804.
- [4] Ciucci, M., Marino, A., Paolacci, F., Bursi O.S., (2019), Integrated smart seismic risks management (2019) American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division PVP, ASME PVP 2019 Conference, Vol. 8, DOI: 10.1115/PVP2019-94027
- [5] Hou, Q., Jiao, W., Ren, L., Cao, H., Song, G., (2014), Experimental study of leakage detection of natural gas pipeline using FBG based strain sensor and least square support vector machine, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 32, 144-151.
- [6] Inaudi D., Walder R., (2013), Automated test system for monitoring the efficacy and reliability of leakage detection systems in pipelines, *Rio Pipeline Conference & Exposition 2013*, Sept. 24-26.
- [7] Jia, Z., Ho, S-C, Li, Y., Kong, B., Hou, Q., (2019), Multipoint hoop strain measurement based pipeline leakage localization with an optimized support vector regression approach, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 62.
- [8] Karamanos S, Bursi, OS, Reza MS et al., “Structural Safety of Industrial Steel Tanks, Pressure Vessels and Piping Systems Under Seismic Loading”, Final Report, INDUSE Project, July 2009 – December 2012, Contr. No: RFSR-CT-2009-00022, Research Fund for Coal and Steel. DOI: 10.2777/49423.
- [9] Krausmann E., Cruz A., Salzano E., (2017), *Natech Risk Assessment and Management Reducing the Risk of Natural-Hazard Impact on Hazardous Installations*, Elsevier Ed. ISBN: 978-0-12-803807-9.
- [10] Krausmann, E, Cozzani, V, Salzano, E, Renni, E., (2011), Industrial Accidents Triggered by Natural Hazards: An Emerging Risk Issue, *Nat. Hazard Earth Sys.*, 11(3), pp. 921–929.
- [11] Lua H., Iseley T., Behbahani S., Fu L., Leakage detection techniques for oil and gas pipelines: State-of-the-art, *Tunnelling and Underground Space Technology* Volume 98, April 2020, 103249.
- [12] Marić, (2005), The Joule–Thomson effect in natural gas flow-rate measurements, *Flow Measurement and Instrumentation* Volume 16, Issue 6, December, Pages 387-395.
- [13] Marino, A., Ciucci, M., Paolacci, F., (2017), Smart technologies for integrated natural risk management: Innovative methodologies and remote sensing American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division PVP, ASME PVP 2017 Conference, Vol. 8, DOI: 10.1115/PVP2017-66198.
- [14] Paolacci, F., Quinci, G., Nardin, C., Vezzari, V. Marino, A., Ciucci, M., Bolted flange joints equipped with FBG sensors in industrial piping systems subjected to seismic loads, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 72, September 2021, 104576.

Gestione del Rischio Natech: il ruolo dei sistemi di sicurezza

V. Cozzani, A. Misuri, F. Ricci, V. Caratozzolo, E. Salzano

LISES - Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali,
Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

Sommario

Le mutazioni climatiche e la crescente attenzione agli aspetti di sicurezza e di tutela dell'ambiente rendono sempre più evidente l'importanza della gestione del rischio Natech (*Natural events triggering technological accidents*: incidenti tecnologici causati dall'impatto di eventi naturali su impianti e sistemi industriali in cui siano presenti quantità rilevanti di sostanze pericolose).

Il presente contributo, partendo dall'analisi dettagliata di alcuni eventi incidentali e da un'analisi statistica di un database di oltre 8000 eventi Natech, evidenzia il ruolo del mancato funzionamento di sistemi di sicurezza o servizi di stabilimento sull'evoluzione degli scenari Natech e sulle conseguenze finali di questi eventi incidentali. La performance attesa delle barriere di sicurezza è analizzata utilizzando una "expert survey" e sono individuati criteri per valutare la riduzione della protezione attesa in eventi Natech. Sono inoltre state elaborate *checklists*, potenzialmente utilizzabili anche in caso di ispezione, per identificare barriere critiche nel caso di eventi Natech dal punto di vista della vulnerabilità e della potenziale perdita di funzionalità in caso di eventi naturali.

1. Introduzione

Gli incidenti industriali (rilasci tossici, incendi, esplosioni) causati dall'impatto di eventi naturali severi (terremoti, alluvioni, allagamenti, tsunami, tempeste, etc.) su impianti industriali che manipolano quantità rilevanti di sostanze pericolose si sono affermati quali una delle tipologie di scenari incidentali più gravi che possono investire questa tipologia di stabilimenti [1]. L'incremento atteso dei tempi di ritorno di fenomeni meteorologici estremi causato dalle alterazioni climatiche in prospettiva potrà rendere ancora più frequenti alcune categorie di eventi Natech [2]. La Direttiva "Seveso-III" (2012/18/UE), recepita in Italia con il D.Lgs. 105/2015, ha richiesto l'inclusione di questi scenari nel Rapporto di Sicurezza che deve essere preparato per gli stabilimenti soggetti agli obblighi della Direttiva.

La gestione del rischio di incidente rilevante è da sempre basata sull'implementazione di sistemi di sicurezza. In questo senso, anche nella valutazione e gestione del rischio derivante dagli eventi Natech il ruolo dei sistemi di sicurezza e dei servizi di impianto (potenza elettrica, aria strumenti, acqua di raffreddamento, etc.) è fondamentale [3,4]. Tuttavia, mentre la crescente percezione del rischio Natech, in particolare rispetto ad eventi sismici, ha portato ad una progressiva attenzione alla protezione degli elementi strutturali dell'impianto, quali serbatoi e apparecchiature, dagli eventi naturali, ad oggi l'analisi dell'integrità e della funzionalità di sistemi di sicurezza e servizi durante o immediatamente dopo l'impatto di eventi naturali ha ricevuto poca attenzione.

Nel seguito, a partire da un esame della natura e delle caratteristiche degli eventi Natech registrati in un database che include oltre 8000 eventi Natech, verrà specificamente indagato il ruolo che l'impatto degli eventi naturali può avere sui sistemi di sicurezza e sulle barriere di protezione normalmente presenti, indirizzando anche l'aspetto relativo alle ispezioni.

2. Eventi incidentali Natech registrati in impianti di chimici e di processo

Le continue mutazioni climatiche e il crescente numero di disastri naturali che si stanno verificando negli ultimi decenni ha reso di fondamentale importanza l'analisi degli eventi naturali come causa di incidente. Lo studio degli incidenti avvenuti in passato rappresenta una delle maggiori fonti di informazione per questa tipologia di incidenti. Per questo motivo è stato costruito un database che raccoglie le caratteristiche di eventi Natech registrati in tutto il mondo.

Il popolamento del database è stato effettuato consultando diverse fonti, principalmente costituite da altri database riportanti eventi industriali, non specificamente relativi ad eventi Natech: eMARS, MHIDAS, TAD IChemE, ARIA, NRC e CONCAWE. La ricerca dei record incidentali è stata svolta utilizzando i nomi degli eventi naturali (*flood, earthquake, lightning, etc.*) come parole chiave. Successivamente è stato necessario stabilire criteri per decidere se includere record o no nel database. I criteri di inclusione scelti sono: (i) il record deve essere un incidente provocato da un evento naturale, (ii) l'incidente deve essere avvenuto nel settore dell'industria chimica e di processo, nel trasporto di materiali pericolosi, nell'industria di produzione di energia (a esclusione del nucleare) o in industrie di trattamento dei rifiuti o delle acque. La struttura del database è stata pensata per contenere tutte le informazioni utili a caratterizzare l'incidente e a ricostruirne la dinamica incidentale. Il database contiene oltre 8000 record incidentali a diversi livelli di dettaglio, in funzione della fonte dal quale il record è stato ricavato [1].

La Figura 1 mostra l'andamento annuale per il periodo 2000-2017 degli incidenti Natech in Europa normalizzato rispetto al numero di siti industriali. Come si può notare dalla linea di tendenza rappresentata in rosso in figura, l'andamento degli incidenti è mediamente crescente nonostante le oscillazioni che si sono verificate in alcuni anni. Questo dimostra che la probabilità con cui un sito industriale viene colpito da un evento naturale provocando un incidente è aumentata nel corso degli ultimi decenni.

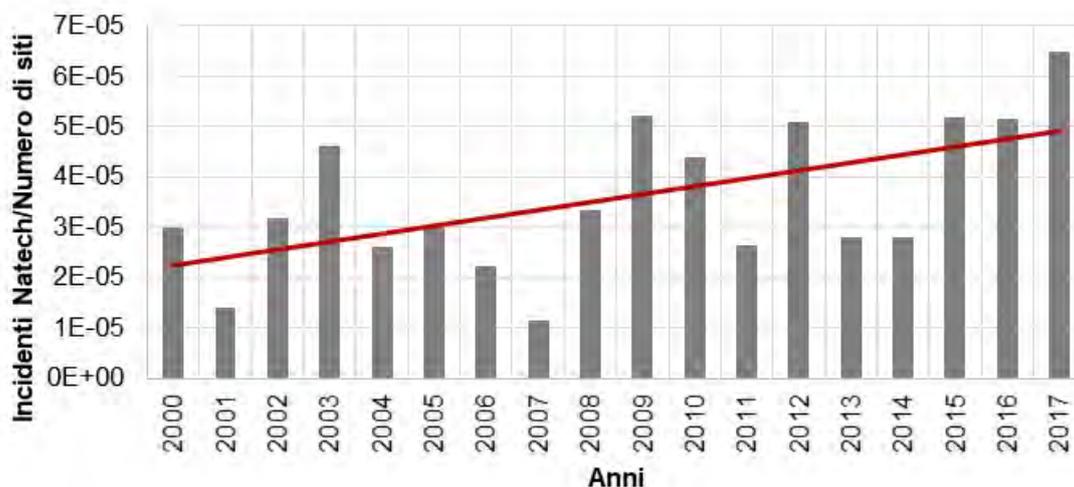


Figura 1. Andamento annuale degli incidenti Natech in Europa normalizzato rispetto al numero di siti industriali. Barre: numero di incidenti Natech su numero di siti industriali nell'anno di riferimento. Linea: linea di tendenza [1].

La Figura 2 mostra la distribuzione degli eventi naturali che hanno causato gli incidenti Natech raccolti nel database (pannello a) e la distribuzione degli scenari finali che si sono verificati (pannello b). Come si può notare da Figura 2-a, temporali, tempeste tropicali e temperature estreme sono responsabili di oltre il 74% degli eventi Natech analizzati. Nonostante la maggior parte dell'attenzione negli studi precedenti sia stata dedicata agli

incidenti innescati da fulmini, inondazioni e terremoti [2,3], questi eventi naturali hanno causato solo circa il 25% di gli incidenti Natech registrati [1]. Nello specifico, i fulmini hanno causato circa il 12% degli incidenti, mentre le inondazioni e i terremoti rispettivamente circa il 9% e il 2%. D'altro lato, però, gli incidenti Natech derivanti da questi eventi naturali sono solitamente caratterizzati da conseguenze gravi e dall'accadimento di eventi a cascata.

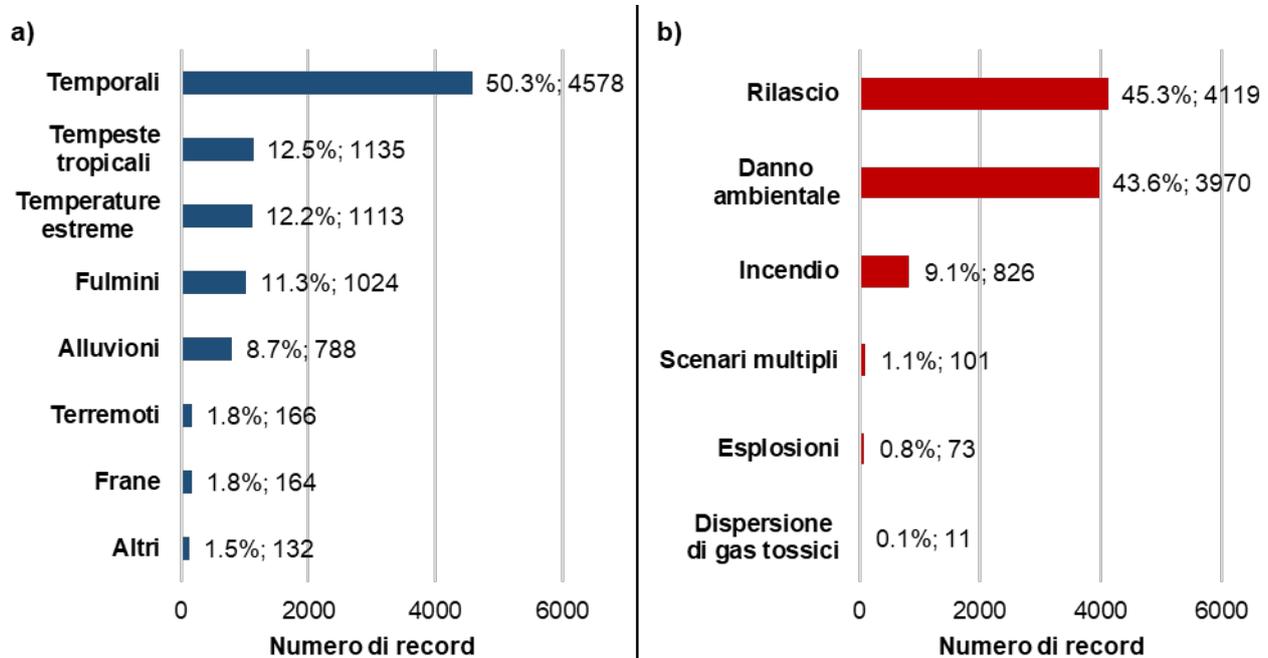


Figura 2. Distribuzione del (a) numero di eventi Natech causati da ciascuna categoria di eventi naturali e (b) scenari finali che si sono verificati negli incidenti Natech raccolti nel database.

La categoria "Altri" include eventi relativi ad attività vulcanica, tsunami, nebbia, incendi forestali e attività delle onde in mare aperto.

Per quanto riguarda invece gli scenari finali (come mostrato in Figura 2-b), in oltre il 45 % dei casi si è registrato il rilascio di sostanze pericolose senza ulteriori conseguenze a breve termine. Circa il 44 % degli eventi ha determinato una contaminazione ambientale come conseguenza del rilascio di quantità rilevanti di sostanze ecotossiche. Tutti gli altri scenari tecnologici considerati rappresentano l'11 % degli eventi registrati. Gli incendi si sono verificati nel 9% dei casi, mentre solo in un numero limitato di eventi sono state segnalate esplosioni (0,8%) e la dispersione di gas tossici (0,1%). Infine, gli scenari multipli si sono verificati in circa l'1% degli eventi registrati (101 casi). Tra tutti i possibili scenari multipli, la combinazione più frequente è l'esplosione combinata con l'incendio (80 eventi).

3. Approccio alla valutazione del rischio Natech

L'analisi dei dati disponibili nel database sviluppato permette quindi di dimostrare che la problematica del rischio Natech è in crescita. D'altro canto, è stato possibile identificare numerosi incidenti Natech che dimostrano come le caratteristiche tali eventi possano essere anche molto diverse rispetto a quelle di incidenti causati da fattori interni. In particolare, un numero rilevante di casistiche dimostra come si possano innescare dinamiche incidentali peculiari a seguito dell'impatto dell'evento naturale sui sistemi di sicurezza implementati e servizi di sito [4].

Esempi rilevanti di recenti incidenti che mostrano tali caratteristiche sono il noto disastro nucleare di Fukushima, causato dal terremoto e tsunami del Tohoku (2011) [5], e il grave incidente di Arkema, causato dall'impatto dell'uragano Harvey (2017) [6]. In entrambe le

situazioni infatti, gli scenari incidentali sono stati causati la contemporanea indisponibilità dei servizi di sito e dei sistemi di sicurezza su cui gli impianti facevano affidamento a causa dell'evento naturale. Come mostrato in Figura 3-a, nel caso di incidenti Natech tre fattori legati all'impatto dell'evento naturale possono portare allo sviluppo di scenari tecnologici, ossia il cedimento strutturale di apparecchiature ("Progressione incidentale diretta"), il fallimento di servizi essenziali ("Progressione incidentale indiretta") e l'indisponibilità di sistemi di sicurezza implementati (che può portare ad un'escalation incidentale tramite "Effetto domino" o impedire la mitigazione degli scenari primari). Una valutazione realistica del rischio Natech deve quindi tenere di conto di questi tre fattori per quanto possibile, rendendo necessario un approccio sistematico al problema, su modello della procedura mostrata in Figura 3-b.

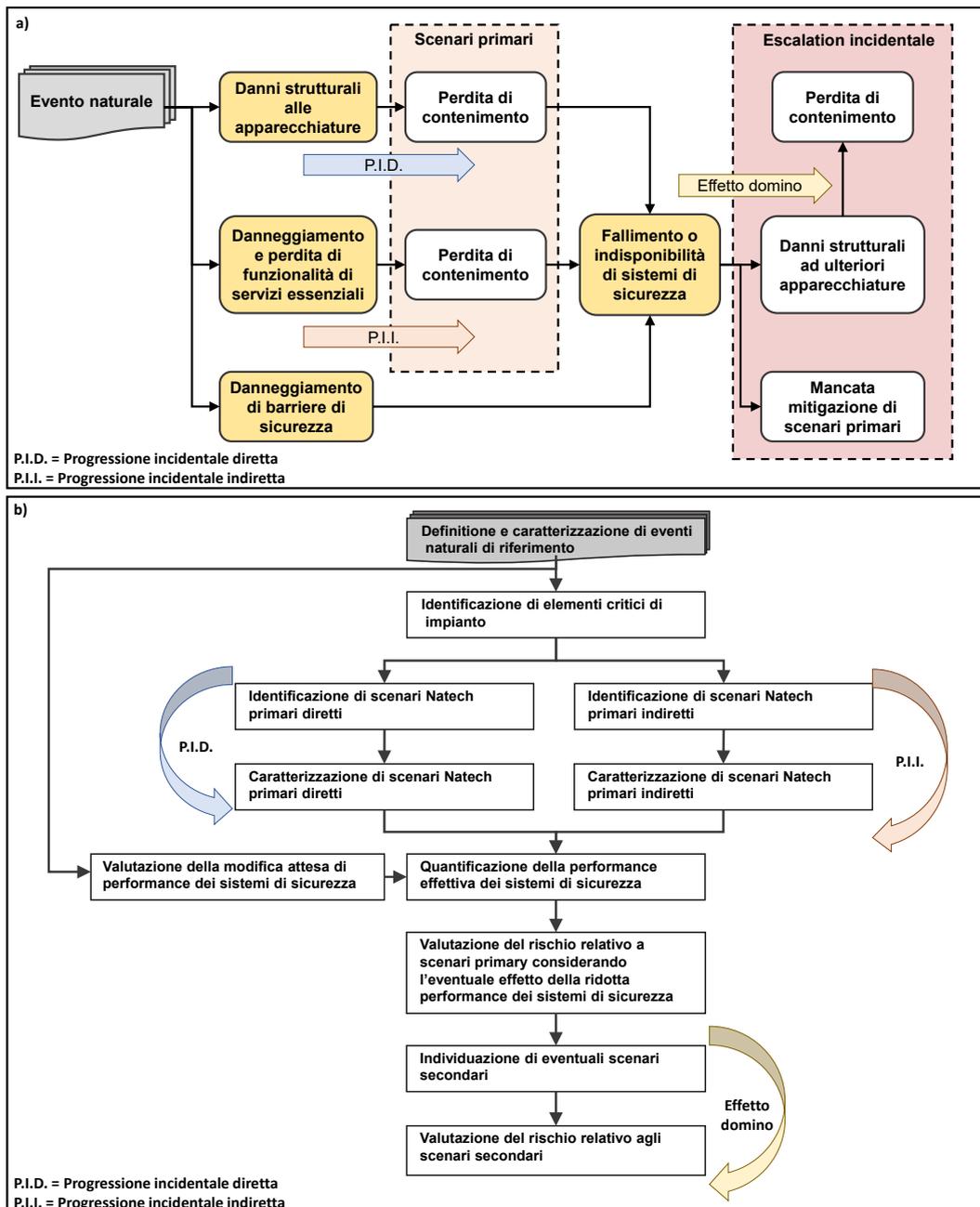


Figura 3. Modello incidentale per eventi Natech con focus sul ruolo di sistemi di sicurezza e servizi di sito (pannello a). Implementazione di una procedura di quantificazione del rischio Natech comprensiva degli eventuali effetti di indisponibilità (o ridotta performance) dei sistemi di sicurezza e servizi di sito [4].

Per quanto riguarda la valutazione di scenari primari a seguito del cedimento strutturale di apparecchiature, sono disponibili in letteratura molteplici modelli di vulnerabilità [7–10], e consolidate procedure di quantificazione del rischio relativo a tali scenari [11–14]. La possibilità di una progressione incidentale indiretta invece deve essere valutata principalmente in situazioni in cui siano presenti in impianto specifiche sostanze che richiedono in funzionamento di servizi critici per il mantenimento di condizioni di sicurezza (es. perossidi organici, sostanze piroforiche) [4]. La valutazione della possibilità di variazione di performance delle barriere di sicurezza si rende invece necessaria in ogni situazione, in quanto è stato recentemente dimostrato come questo aspetto possa determinare un sostanziale incremento della probabilità di *escalation* incidentale [15].

4. Ruolo delle barriere di sicurezza

Come evidenziato in Figura 3, la riduzione delle performance dei sistemi di sicurezza e la loro conseguente indisponibilità può portare in primis ad un aumento della severità degli scenari Natech primari a causa dell'impossibilità di mitigazione, e ad una propagazione dell'incidente ad apparecchiature limitrofe tramite effetti domino. In Tabella 1 sono mostrati dei fattori di modifica delle *performance* (ϕ_n) dei un set di barriere particolarmente rilevanti nel contesto dell'industria chimica e di processo [16]. Tali fattori sono stati ricavati per alluvioni e terremoti e sono basati sui risultati ottenuti da una "expert survey" condotta a livello internazionale dal LISES [16].

Si noti che l'indisponibilità della barriera durante eventi Natech può essere dovuta sia a cause interne (ad esempio rotture *random*) oppure all'impatto dell'evento naturale. Di conseguenza, la *performance* attesa di una generica barriera durante un evento Natech (PFD_n), espressa come una probabilità di fallimento a richiesta (*Probability of Failure on Demand*), può essere stimata tramite la quantificazione della sua probabilità di fallimento a richiesta nominale (PFD) calcolata tramite tecniche affidabilistiche o reperita nella letteratura tecnica [17–20], e tramite la successiva applicazione di un appropriato fattore ϕ_n legato al contributo dell'evento naturale all'indisponibilità del sistema, in accordo con:

$$PFD_n = 1 + (\phi_n - 1)(1 - PFD) \quad (1)$$

Come si può notare dalla tabella inoltre, sono state sottoposte a consultazione degli esperti barriere con caratteristiche generali, quindi un'ampia gamma di soluzioni tecniche implementate negli impianti può esservi ricondotta.

In caso ciò non sia possibile, è comunque possibile utilizzare la checklist presentata in Tabella 2 per identificare barriere che durante eventi Natech possono essere critiche dal punto di vista della vulnerabilità e della potenziale perdita di funzionalità.

Si può quindi stimare il fattore ϕ_n come segue:

$$\phi_n = 0.1 + \frac{0.8}{5} * \sum_i S_i \quad (2)$$

Dove S_i è il punteggio ottenuto nella *i*-esima risposta della checklist proposta in Tabella 2. Il fattore ϕ_n così calcolato può essere implementato poi nell'Eq. (1) per ottenere un valore aggiornato di indisponibilità da implementare in procedure di quantificazione del rischio Natech. Inoltre, la checklist permette l'individuazione di eventuali caratteristiche della barriera che possano comprometterne il funzionamento durante l'evento naturale (es. necessità di servizi critici).

Barriera	Descrizione	Terremoti	Alluvioni
Sistemi di inertizzazione	Sistemi per la polmonazione e inertizzazione di serbatoi di stoccaggio di materiali infiammabili	0.625	0.5
Sistemi di spegnimento incendi perimetrali per serbatoi a tetto galleggiante	Sistemi automatici presenti sul tetto galleggiante di stoccaggi di sostanze infiammabili per l'invio rapido di schiume nell'area di sigillo perimetrale	0.5	0.15
Sistemi antincendio a schiume e ad acqua	Sistemi di spegnimento di incendi all'interno di serbatoi di stoccaggio di sostanze infiammabili	0.5	0.375
Sistemi sprinkler e sistemi di protezione antincendio a diluvio	Sistemi di spruzzatori ad acqua per spegnimento di incendi e sistemi di protezione ad acqua implementati in apparecchiature critiche (serbatoi di GPL)	0.75	0.375
Idranti	Collegamenti in sito per collegamento manichette antincendio	0.5	0.5
Valvole attivate a calore	Valvole ad attivazione automatica in caso di calore	0.375	0.5
Fire & Gas detectors	Sensori di rilevamento in campo di fiamme, calore o gas	0.5	0.5
Valvole relative al sistema di shut down d'emergenza	Valvole comandate dal sistema di spegnimento d'emergenza atte all'isolamento di sezioni di impianto	0.5	0.25
Valvole atte alla depressurizzazione di emergenza	Valvole comandate dal sistema di spegnimento d'emergenza atte alla depressurizzazione di sezioni di impianto	0.25	0.25
Barriere fisiche antincendio	Barriere fisiche collocate per ostacolare la propagazione di un incendio in una preposta area di impianto (firewalls)	0.5	0.2
Barriere fisiche antiesplorazione	Barriere fisiche per l'assorbimento di energia rilasciata a seguito di esplosioni collocate a protezione di una preposta area di impianto	0.25	0.15
Rivestimenti ignifughi per serbatoi	Materiali di coating intumescenti e/o ignifughi implementati in serbatoi per ridurre il carico termico incidente nell'apparecchiatura	0.25	0.15
Bacini di contenimento sversamenti	Delimitazioni collocate attorno a serbatoi di stoccaggio per limitare lo spargimento di liquidi pericolosi in caso di rilascio	0.5	0.75
Connessioni tra torcia e tubature di depressurizzazione	Linee di collegamento alla sezione di smaltimento in torcia impiegate durante depressurizzazioni d'emergenza	0.5	0.25
Tumulazione serbatoi sopra suolo	Copertura di serbatoi mediante materiale schermante come misura di riduzione del rischio di scenari da incendio esterno	0.25	0.25
Tumulazione serbatoi sotto suolo	Interramento di serbatoi in pressione come misura di riduzione del rischio di scenari da incendio esterno	0.25	0.15

Tabella 1. Fattori di modifica delle performance (ϕ_n) per un set di barriere [16].

ID	Domande	Risposte	Score S_t
1	La barriera è stata progettata secondo standard tecnici che considerano l'evento naturale di riferimento? In caso di procedure: sono state sviluppate e testate considerando l'evento naturale di riferimento?	Si	0
		No	1
2	È necessario l'intervento di personale in campo per operare la barriera?	No	0
		Si	1
3	La barriera è operativa solamente previa disponibilità di servizi critici come elettricità, aria strumentale, acqua antincendio, acqua di raffreddamento?	No	0
		Si	1
4	L'attivazione della funzione di sicurezza della barriera può essere ritardata o inibita dall'evento naturale? (es. i gas detectors in campo possono essere sommersi durante eventi alluvionali)	No	0
		Si	1
5	Nel caso in cui per usufruire della funzione di sicurezza sia necessario l'utilizzo di mezzi (es. mezzi antincendio), sono questi collocati in luoghi che possono essere resi non raggiungibili a seguito dell'evento naturale (es. rimesse allagate)?	No o non necessari	0
		Si	1

Tabella 2. Questionario per barriere per cui non è disponibile un fattore di modifica delle performance (ϕ_n) [16].

5. Conclusioni

L'approccio sviluppato permette di integrare la valutazione convenzionale effettuata per gli eventi Natech, relativa all'integrità strutturale dei singoli elementi di impianto rispetto alle forzanti generate dagli eventi naturali, con una valutazione specifica relativa alla integrità e funzionalità delle barriere di sicurezza, il cui mancato funzionamento potrebbe provocare un'*escalation* delle conseguenze dell'evento incidentale o la sua propagazione ad unità limitrofe. Gli strumenti resi disponibili per la valutazione dell'integrità delle barriere sono utili, in prospettiva, anche per supportare l'approfondimento di questo aspetto attraverso ispezioni in campo.

Riferimenti

- [1] F. Ricci, V. Casson Moreno, V. Cozzani, A comprehensive analysis of the occurrence of Natech events in the process industry, *Process Saf. Environ. Prot.* 147 (2021) 703–713. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.031>.
- [2] E. Krausmann, E. Renni, M. Campedel, V. Cozzani, Industrial accidents triggered by earthquakes, floods and lightning: Lessons learned from a database analysis, *Nat. Hazards.* 59 (2011) 285–300. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9754-3>.
- [3] E. Krausmann, A.M. Cruz, E. Salzano, *Natech Risk Assessment and Management: Reducing the Risk of Natural-Hazard Impact on Hazardous Installations*, Elsevier Inc., Amsterdam, The Netherlands, 2017.
- [4] A. Misuri, V. Cozzani, A paradigm shift in the assessment of Natech scenarios in chemical and process facilities, *Process Saf. Environ. Prot.* 152 (2021) 338–351.

<https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.018>.

- [5] Tokyo Electric Power Company Inc., Fukushima nuclear accident analysis report, Press Corp. Ltd. (2012) 487.
- [6] U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, Organic Peroxide Decomposition, Release, and Fire at Arkema Crosby Following Hurricane Harvey Flooding, Crosby, TX, 2018. www.csb.gov.
- [7] G. Landucci, G. Antonioni, A. Tugnoli, V. Cozzani, Release of hazardous substances in flood events: Damage model for atmospheric storage tanks, *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 106 (2012) 200–216.
- [8] G. Landucci, A. Necci, G. Antonioni, A. Tugnoli, V. Cozzani, Release of hazardous substances in flood events: Damage model for horizontal cylindrical vessels, *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 132 (2014) 125–145. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.07.016>.
- [9] E. Salzano, I. Iervolino, G. Fabbrocino, Seismic risk of atmospheric storage tanks in the framework of quantitative risk analysis, *J. Loss Prev. Process Ind.* 16 (2003) 403–409. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(03\)00052-4](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(03)00052-4).
- [10] A. Necci, G. Antonioni, V. Cozzani, E. Krausmann, A. Borghetti, C. Alberto Nucci, A model for process equipment damage probability assessment due to lightning, *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 115 (2013) 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.02.018>.
- [11] A. Necci, G. Antonioni, S. Bonvicini, V. Cozzani, Quantitative assessment of risk due to major accidents triggered by lightning, *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 154 (2016) 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.05.009>.
- [12] G. Antonioni, G. Landucci, A. Necci, D. Gheorghiu, V. Cozzani, Quantitative assessment of risk due to NaTech scenarios caused by floods, *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 142 (2015) 334–345. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.05.020>.
- [13] G. Fabbrocino, I. Iervolino, F. Orlando, E. Salzano, Quantitative risk analysis of oil storage facilities in seismic areas, *J. Hazard. Mater.* 123 (2005) 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.04.015>.
- [14] M. Campedel, V. Cozzani, A. Garcia-Agreda, E. Salzano, Extending the quantitative assessment of industrial risks to earthquake effects, *Risk Anal.* 28 (2008) 1231–1246. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01092.x>.
- [15] A. Misuri, G. Landucci, V. Cozzani, Assessment of safety barrier performance in the mitigation of domino scenarios caused by Natech events, *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 205 (2021) 107278. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107278>.
- [16] A. Misuri, G. Landucci, V. Cozzani, Assessment of safety barrier performance in Natech scenarios, *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 193 (2020) 106597. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106597>.
- [17] H.B. Andersen, J. Casal, A. Dandrieux, B. Debray, V. De Dianous, N.J. Duijm, C. Delvosalle, C. Fievez, L.H.J. Goossens, R.T. Gowland, A.R.J. Hale, D. Hourtoulou, B. Mazzarotta, A. Pipart, E. Planas, F. Prats, O. Salvi, J. Tixier, D. Hourtoulou, B. Mazzarotta, A. Pipart, E. Planas, F. Prats, O. Salvi, J. Tixier, ARAMIS User Guide. Technical Report EVG1 - CT - 2001 - 00036, Bruxelles, 2004. http://safetybarriermanager.com/files/aramis/ARAMIS_FINAL_USER_GUIDE.pdf.
- [18] CCPS - Center of Chemical Process Safety, Layer of protection analysis: simplified process risk assessment, American Institute of Chemical Engineers - Center of Chemical Process Safety, New York, NY, 2001.

- [19] DNV - Det Norske Veritas, Offshore Reliability Data OREDA, DNV, Høvik, NO, 1997.
- [20] S. Mannan, Lees' Loss Prevention in the process industries, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford (UK), 2005.

Il sistema di gestione della qualità e la certificazione per prodotti destinati a zone con presenza di atmosfere potenzialmente esplosive

F. Pera, G.L. Amicucci, E. Del Prete

Inail - Dit

Sommario

Gli ambienti a rischio di esplosione per la presenza di atmosfere potenzialmente esplosive, dovute a gas e polveri infiammabili in condizioni atmosferiche di pressione e temperatura, richiedono al loro interno l'impiego di apparecchi, componenti e sistemi di protezione che garantiscano un adeguato livello di protezione a seguito del tipo di malfunzionamenti a cui possono essere soggetti e della zona in cui si trovano. Di conseguenza anche le attrezzature in pressione per le loro caratteristiche costruttive e per l'impiego a cui sono destinate possono essere interessate dall'applicazione di requisiti che tutelino l'utilizzatore contro il rischio di esplosione. L'impiego di un sistema di gestione della qualità per tali prodotti, nello stabilire requisiti per l'organizzazione, le risorse, le attività, la valutazione delle prestazioni e il miglioramento, contribuisce a garantire, una volta efficacemente impostato, la conformità del prodotto ai requisiti tecnici di sicurezza richiesti dallo stato dell'arte e dalla normativa applicabile, come quella ISO o IEC in ambito internazionale, e facilita l'applicazione della direttiva ATEX in ambito europeo. In tal senso un sistema di gestione della qualità può essere impiegato per la certificazione di prodotti in ambito internazionale IECEx, ma si presta anche per essere utilizzato in ambito europeo dalla direttiva ATEX. In particolare la direttiva ATEX prevede per certe tipologie di prodotti l'applicazione di due distinte procedure di garanzia della qualità che si accompagnano all'esame di tipo per la valutazione globale. In tale contesto è stata recentemente (2020) recepita a livello europeo la revisione della norma EN ISO/IEC 80079-34 che contiene indicazioni e requisiti per impostare e mantenere un sistema di gestione per la qualità per la fabbricazione di prodotti Ex.

Il presente lavoro partendo dalla struttura e dall'approccio metodologico indicato nella norma si propone di individuare e illustrare le correlazioni con la norma generale ISO 9001 e di esaminare anche il contesto applicativo nella certificazione ATEX e IECEx.

1. Introduzione

I prodotti (apparecchi, sistemi di protezione, componenti e loro combinazioni) destinati ad essere impiegati in presenza di atmosfere potenzialmente esplosive sono sempre stati oggetto di particolare attenzione da parte della normativa tecnica e di legge in ragione dell'importanza del rischio dovuto a loro possibili malfunzionamenti e alle successive conseguenze. Infatti già Direttive Ex europee del vecchio approccio emesse prima del 1985 regolamentavano specifici requisiti tecnici permettendo la certificazione di conformità delle cosiddette generazioni A, B, C ed E e la libera circolazione dei prodotti nella comunità. Con il nuovo approccio le Direttive sono diventate uno strumento di armonizzazione tecnica attraverso i requisiti essenziali di sicurezza e salute che devono essere soddisfatti dai prodotti ricadenti nel loro campo di applicazione e rispettati dalle norme considerate ad esse «armonizzate». Nel campo delle atmosfere esplosive le vecchie direttive sono state sostituite da un solo documento, la direttiva 94/9/CE, conosciuta con l'acronimo ATEX, revisionata con la direttiva 2014/34/UE [1]. Tale direttiva introduce diverse procedure di certificazione in funzione del tipo di prodotto e del livello di protezione da raggiungere. La presenza di un sistema di qualità del fabbricante è prevista in associazione all'esame di tipo per prodotti in categoria M1 (miniere) e 1 e per apparecchi elettrici e motori a combustione

interna in categoria M2 (miniere) e 2 (Fig. 1). Si tratta di due distinte procedure di garanzia della qualità, la prima per la produzione la seconda per i prodotti, descritte rispettivamente nell'Allegato IV e nell'Allegato VII della Direttiva ATEX [1]. La categoria M1/1 deve garantire un livello di protezione molto elevato mentre la categoria M2/2 un livello elevato.

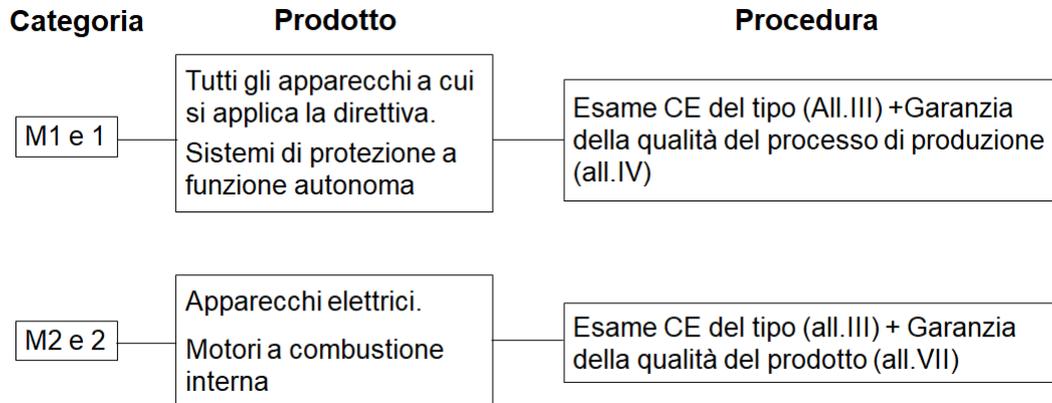


Figura 1. Schema di certificazione ATEX

La certificazione IEC si basa sulla conformità ai documenti normativi internazionali IEC, rilasciata da organismi di certificazione (CB) accreditati secondo uno specifico schema IECEX. Al contrario nella certificazione ATEX la conformità alle norme non è indispensabile ma semplifica le procedure. Esistono tre schemi di certificazione IECEX, rispettivamente per prodotti (equipment), competenza del personale (certified persons) e servizi (service facilities). Per quanto riguarda i prodotti la procedura per ottenere una certificazione di conformità (CoC) IECEX richiede che il prodotto sia sottoposto a test per verificare il possesso dei requisiti tecnici richiesti e l'implementazione di un sistema di qualità conforme alla norma ISO/IEC 80079-34 [3] (Fig. 2). Per quanto riguarda il sistema qualità può essere sufficiente il sistema ISO 9001 [4] purché - siano anche rispettati i requisiti aggiuntivi della norma ISO/IEC 80079-34 [3]. I test oltre che da un Ex CB possono anche essere effettuati da un laboratorio accreditato (ExTL). Il rispetto dei requisiti tecnici viene asseverato con un test report (ExTR).

Allo stesso modo il possesso di un sistema qualità rispondente ai requisiti richiesti è attestato con un report (ExQAR). Sia l'ExTR che l'ExQAR ed il certificato emesso (CoC) sono pubblicati su un database internazionale accessibile per la consultazione.

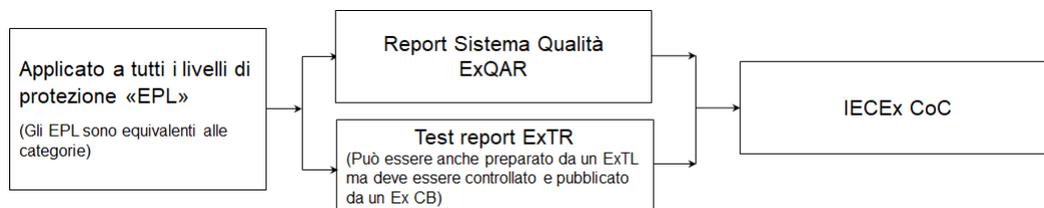


Figura 2. Schema di certificazione IECEX per prodotti

Questo schema di certificazione può essere applicato a tutti i prodotti per qualsiasi livello di protezione EPL (Equipment protection level). In ambito internazionale il termine categoria è sostituito da EPL e sono perfettamente equivalenti.

Sia la procedura dell'Allegato IV e dell'Allegato VII dell'ATEX che quella IECEX per il Sistema di garanzia della Qualità richiedono un'attività di sorveglianza che coinvolge l'organismo di certificazione.

La certificazione IECEx è stata istituita per facilitare la circolazione dei prodotti a livello internazionale con un adeguato livello di sicurezza ed è applicata e riconosciuta da 36 paesi. Per la certificazione IECEx l'applicazione della norma ISO/IEC 80079-34 [3] è cogente o almeno devono essere rispettati i requisiti aggiuntivi se si è già in possesso di certificazione di qualità ISO 9001 [4]. La certificazione IECEx permette di ottenere anche la certificazione ATEX ma non è vero il contrario, però il possesso di un SGQ conforme alla norma ISO/IEC 80079-34 [3] facilita chiaramente l'ottenimento della certificazione IECEx. Ad ogni modo la tendenza corrente fra i costruttori è quella di possedere entrambe le certificazioni e per tale motivo l'applicazione della norma ISO/IEC 80079-34 [3] è essenziale.

2. Il Sistema Garanzia della Qualità in ATEX

Come già anticipato lo scopo dell'implementazione di un sistema della Garanzia della Qualità in ATEX è quello di garantire la conformità del prodotto al Tipo certificato e il suo mantenimento nel tempo. La direttiva non prevede la conformità dello stesso a un modello o una norma specifica (es. ISO 9001 [4] o ISO/IEC 80079-34 [3]) ma richiede che siano soddisfatti i requisiti contenuti nell'Allegato IV per il Sistema di Garanzia della Qualità del Processo di Produzione e dell'Allegato VII per il Sistema di Garanzia della Qualità del Prodotto. È richiesta anche un'attività di Sorveglianza per il mantenimento del Sistema Qualità effettuata sotto la responsabilità dell'Organismo Notificato (NB).

2.1. Il Sistema Garanzia della Qualità del Processo/Prodotto

L'Allegato IV e l'Allegato VII richiedono che sia prodotta una dettagliata documentazione che contenga per il sistema di qualità, rispettivamente della produzione e del prodotto, una descrizione di:

- Obiettivi (per la qualità, l'organizzazione, le responsabilità)
- Processi (fabbricazione, controllo, misure di intervento)
- Test, compresi quelli di routine
- Rapporti ispettivi, dati di prova, taratura della strumentazione, competenza del personale e quanto è di interesse per la qualità
- Attività di audit e verifica dell'efficacia del sistema

Il sistema qualità deve essere valutato e approvato da un organismo notificato e nella commissione esaminatrice deve essere presente almeno un esperto nella tecnologia di produzione in esame. La rispondenza del sistema qualità a una norma armonizzata alla direttiva ATEX garantisce la presunzione di conformità. La norma ISO/IEC 80079-34 [3], una volta pubblicata nell'elenco delle norme armonizzate, diventerà definitivamente uno strumento efficace per il costruttore per il raggiungimento degli obiettivi di qualità di produzione/prodotto (si ricorda che la versione precedente applicabile fino al 2023 è armonizzata).

L'attività di sorveglianza di cui è responsabile l'organismo notificato prevede:

- L'accesso del NB alle strutture del fabbricante ai fini ispettivi e a tutta la documentazione
- Verifiche ispettive periodiche
- Verifiche senza preavviso

3. La norma ISO/IEC 80079-34

La norma ISO/IEC 80079-34:2018 [3] sostituisce la prima edizione, di cui costituisce una revisione tecnica. I cambiamenti sono comunque minori rispetto all'edizione precedente. La modifica più rilevante ha riguardato la struttura, che è stata uniformata a quella della norma ISO 9001:2015 [4], cosiddetta ad Alto Livello (HLS), come le recenti revisioni di altre norme riguardanti differenti Sistemi di Gestione, in modo da consentire la mutua integrazione. Per aiutare il lettore, le parti della norma ISO 9001:2015 [4] che si applicano sono state riportate all'interno di box rettangolari (nella tab. 1 sono stati riportati i paragrafi della ISO 9001:2015 [4] che si applicano senza aggiunte e quelli che si applicano con aggiunte).

Paragrafi ISO 9001:2015 che si applicano integralmente	Paragrafi ISO 9001:2015 che si applicano con aggiunte	Paragrafi ISO/IEC 80079-34:2018 diversi da ISO 9001
<ul style="list-style-type: none"> - 4 Contesto - 4.2 Comprendere le esigenze... - 4.3 Determinare il campo di - 5 Leadership - 5.1 Leadership e impegno - 5.2 Politica - 6 Pianificazione - 7 Supporto <ul style="list-style-type: none"> - 7.1 Risorse <ul style="list-style-type: none"> - 7.1.1 Generalità - 7.1.2 Personale - 7.1.3 Infrastruttura - 7.1.4 Ambiente per il ... - 7.1.6 Conoscenza organizzativa - 7.3 Consapevolezza - 7.5 Informazioni documentate <ul style="list-style-type: none"> - 7.5.2 Creazione e ... - 8 Attività operative <ul style="list-style-type: none"> - 8.2 Requisiti per i prodotti e i... <ul style="list-style-type: none"> - 8.2.1 Comunicazione con il... - 8.2.2 Determinazione dei... - 8.5 Produzione ed erogazione... <ul style="list-style-type: none"> - 8.5.4 Preservazione - 8.5.5 Attività post consegna - 9 Valutazione delle prestazioni <ul style="list-style-type: none"> - 9.1 Monitoraggio, misurazione... - 9.3 Riesame di direzione <ul style="list-style-type: none"> - 9.3.2 Input al riesame di... - 9.3.3 Output del riesame di... - 10 Miglioramento 	<ul style="list-style-type: none"> - 4 Contesto <ul style="list-style-type: none"> - 4.1 Comprendere l'organizzazione. - 4.4 Sistema di gestione... - 5 Leadership <ul style="list-style-type: none"> - 5.3 Ruoli, Responsabilità e... - 7 Supporto <ul style="list-style-type: none"> - 7.1 Risorse <ul style="list-style-type: none"> - 7.1.5 Risorse per il ... - 7.2 Competenza - 7.4 Comunicazione - 7.5 Informazioni documentate <ul style="list-style-type: none"> - 7.5.1 Generalità - 7.5.3 Controllo delle ... - 8 Attività operative <ul style="list-style-type: none"> - 8.1 Pianificazione e controllo... - 8.2 Requisiti per i prodotti e i... <ul style="list-style-type: none"> - 8.2.3 Riesame dei requisiti... - 8.2.4 Modifiche ai requisiti... - 8.3 Progettazione e sviluppo... <ul style="list-style-type: none"> - 8.3.6 Modifiche della... - 8.4 Controllo dei processi, ... - 8.5 Produzione ed erogazione... <ul style="list-style-type: none"> - 8.5.1 Controllo della... - 8.5.2 Identificazione e... - 8.5.3 Proprietà che... - 8.5.6 Controllo delle modifiche - 8.6 Rilascio di prodotti e servizi - 8.7 Controllo degli output... - 9 Valutazione delle prestazioni <ul style="list-style-type: none"> - 9.2 Audit interno - 9.3 Riesame di direzione <ul style="list-style-type: none"> - 9.3.1 Generalità 	<ul style="list-style-type: none"> - 1 Scopo - 2 Riferimenti normativi - 3 Termini e definizioni
<p>I seguenti paragrafi della ISO 9001:2015 <u>non rientrano</u> nello scopo della ISO/IEC 80079-34:2018:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 8.3.1 Generalità - 8.3.2 Pianificazione della progettazione e sviluppo - 8.3.3 Input alla progettazione e sviluppo - 8.3.4 Controlli della progettazione e sviluppo - 8.3.5 Output della progettazione e sviluppo <p>Nota: in grassetto sono evidenziati i paragrafi che corrispondono ai contenuti della colonna di appartenenza, quelli non evidenziati in grassetto hanno la funzione di far comprendere più rapidamente il contesto.</p>		

Tabella 1. Paragrafi della ISO 9001:2015 [4] che si applicano senza aggiunte e con aggiunte

Come la ISO 9001:2015 [4], la norma ISO/IEC 80079-34:2018 [3] si basa su un approccio per processi e sul miglioramento continuo per garantire la conformità del prodotto al tipo certificato e ai requisiti della direttiva ATEX. L'efficacia e l'efficienza dei processi costruttivi vengono perseguite controllando interrelazioni, prestazioni, dati e informazioni.

Gli argomenti trattati sono i seguenti: Contesto del fabbricante; Ruolo della dirigenza (politica, organizzazione, responsabilità); Pianificazione (strategie e obiettivi); Supporto (risorse e conoscenza); Attività operative (prodotti e servizi); Valutazione delle prestazioni (monitoraggio, audit, riesame); Miglioramento.

La norma è applicabile ai sistemi di protezione, ai dispositivi di sicurezza e ai componenti Ex, o a loro combinazioni, elettrici e non elettrici.

La norma specifica i requisiti minimi dei sistemi di gestione della qualità che possono essere adottati dai fabbricanti di prodotti Ex. Può essere utilizzata anche dagli organismi di certificazione per valutare la capacità dei fabbricanti di rispettare la conformità ai requisiti normativi e ai regolamenti applicabili. L'uso di sistemi di gestione della qualità diversi da quelli indicati nella norma non è precluso, purché siano compatibili con gli obiettivi della norma ISO 9001:2015 [4] e portino a risultati equivalenti.

Contesto del fabbricante

Il fabbricante deve adottare un sistema di gestione della qualità dotato della necessaria capacità di raggiungere i risultati voluti, in modo da perseguire gli obiettivi interni ed esterni compatibili con gli scopi della direzione strategica.

Il fabbricante deve assicurare che ogni prodotto Ex sia conforme al proprio certificato e alla documentazione tecnica.

Poiché il fabbricante deve fornire prodotti e servizi che soddisfino i bisogni e le attese dei clienti e delle altre parti interessate, deve individuare quali tra questi clienti e parti interessate siano rilevanti per il sistema di gestione della qualità e quali requisiti possano richiedere.

Il fabbricante deve determinare i limiti e lo scopo del sistema di gestione della qualità, considerando i propri prodotti e i servizi accanto agli obiettivi interni ed esterni e ai requisiti richiesti dai clienti e dalle altre parti interessate.

Lo scopo del sistema di gestione della qualità deve essere documentato e reso disponibile. Deve contenere il tipo di prodotti e servizi forniti e deve contenere una giustificazione per ciascun requisito della norma ISO/IEC 80079-34:2018 [3] che si è ritenuto non applicabile. Questi ultimi requisiti non devono influenzare la capacità del fabbricante di assicurare la conformità dei suoi prodotti e servizi e soddisfare le richieste dei clienti.

Il sistema di gestione della qualità deve essere realizzato, mantenuto e continuamente migliorato, insieme ai processi necessari e alle loro interazioni. In particolare devono essere determinati: gli input richiesti e gli output attesi da questi processi; la loro sequenza e le loro interazioni; i criteri e i metodi necessari per assicurare il loro funzionamento e il loro controllo; le risorse necessarie per questi processi, in modo che siano disponibili; le responsabilità di questi processi; i rischi e le opportunità; le modifiche necessarie perché questi processi siano in grado di raggiungere risultati attesi; i miglioramenti dei processi e del sistema di gestione della qualità.

Il sistema di gestione della qualità deve fare in modo che i prodotti Ex siano conformi al tipo descritto nel certificato e nella documentazione tecnica.

Ruolo della dirigenza

La dirigenza deve dimostrarsi impegnata rispetto al sistema di gestione della qualità:

- prendendo a cuore l'effettività del sistema di gestione della qualità;
- stabilendo una politica della qualità e obiettivi per il sistema di gestione della qualità che siano compatibili con il contesto e con la direzione strategica;
- assicurando l'integrazione dei requisiti del sistema di gestione della qualità all'interno dei propri processi;

- promuovendo l'uso dell'approccio a processi e delle valutazioni di rischio;
- facendo in modo che le risorse necessarie al sistema di gestione della qualità siano disponibili;
- comunicando l'importanza di un sistema di gestione della qualità che sia effettivo e di conformarsi alle sue richieste ed ai suoi requisiti;
- assicurandosi che il sistema di gestione della qualità raggiunga gli obiettivi attesi;
- assumendo e supportando direttamente personale che contribuisca all'effettività del sistema di gestione della qualità;
- promuovendo i miglioramenti;
- supportando altri ruoli di gestione rilevanti per la qualità.

La dirigenza deve mettere a fuoco le richieste dei clienti, partendo dai requisiti richiesti (che devono essere determinati, compresi e soddisfatti), e raggiungendo la capacità di soddisfarli (valutando il loro impatto sui prodotti e servizi offerti). Tale capacità deve essere mantenuta nel tempo.

La politica della qualità deve essere appropriata agli scopi e al contesto del fabbricante e deve supportare la direzione strategica. Deve fornire un ambiente all'interno del quale sia possibile stabilire degli obiettivi di qualità, includendo l'impegno a soddisfarne i requisiti e al continuo miglioramento del sistema di gestione della qualità. Tale politica deve essere resa disponibile al proprio personale e alle parti interessate, comunicandola, facendola comprendere, e applicandola.

La dirigenza deve fare in modo che i ruoli e le loro responsabilità siano assegnati, comunicati e compresi, in modo che:

- il sistema di gestione della qualità sia conforme alla norma ISO/IEC 80079-34:2018 [3];
- gli output dei processi siano quelli attesi;
- vi siano rapporti per la dirigenza sulle prestazioni del sistema di gestione della qualità e sulle opportunità di miglioramento;
- sia promossa l'attenzione verso le richieste dei clienti;
- sia mantenuta l'integrità del sistema di gestione della qualità anche a seguito di cambiamenti;
- il personale in possesso di autorizzazione Ex abbia responsabilità definite e documentate, in modo da assicurare:
 - l'effettivo coordinamento delle attività relative ai prodotti Ex;
 - i collegamenti con chi ha emesso il certificato (se non emesso dal fabbricante), per le modifiche del progetto e della documentazione tecnica;
 - i collegamenti con gli organismi responsabili di verificare l'aggiornamento del sistema di gestione della qualità, soprattutto riguardo agli aggiornamenti che possano avere conseguenze sui prodotti Ex;
 - l'autorizzazione per l'approvazione iniziale e le modifiche di disegni;
 - l'autorizzazione di concessioni sui prodotti Ex (non sono permesse quelle che portano il prodotto Ex al di fuori del progetto definito nel certificato e nella documentazione tecnica);
 - l'accuratezza delle informazioni rilevanti, fornite ai clienti, riguardanti i prodotti Ex (un prodotto Ex il cui numero di certificato abbia un suffisso "X" ha condizioni d'uso specifiche; se il suffisso è "U", allora vi è una serie di limitazioni);
 - l'effettivo coordinamento dei processi di produzione dei prodotti Ex, con l'inclusione di quei prodotti approvvigionati dall'esterno (in particolare ogni sito di produzione deve avere un responsabile dei prodotti Ex).

Pianificazione

Durante la pianificazione del sistema di gestione della qualità devono essere considerati gli obiettivi interni ed esterni e le richieste dei clienti, individuando i rischi e le opportunità in modo da: assicurare che il sistema di gestione della qualità possa raggiungere i risultati attesi; amplificare gli effetti desiderati; prevenire o ridurre gli effetti indesiderati; raggiungere il miglioramento.

Le azioni messe in atto a tal fine dovranno essere integrate all'interno del sistema di gestione della qualità ed essere proporzionate al potenziale impatto sui prodotti e servizi.

Gli obiettivi della qualità devono essere pianificati in modo da: essere consistenti con la politica della qualità; essere misurabili, monitorabili, comunicabili, aggiornabili; prendere in considerazione i requisiti applicabili; essere rilevanti per la conformità di prodotti e servizi, al fine di soddisfare le richieste dei clienti.

Nel pianificare come ottenere gli obiettivi di qualità si deve determinare: cosa deve essere fatto; quali risorse sono necessarie; chi deve essere responsabile; quali sono i tempi necessari per completare i compiti; come devono essere valutati i risultati ottenuti.

Quando devono essere pianificate modifiche devono essere considerati: i motivi di queste e le potenziali conseguenze della loro messa in atto; l'integrità del sistema di gestione della qualità; la disponibilità delle risorse; l'allocazione o la riallocazione delle responsabilità.

Supporto

Devono essere determinate le risorse necessarie per realizzare, mantenere e migliorare continuamente il sistema di gestione della qualità. In particolare, si devono valutare le capacità e i limiti delle risorse interne e ciò che può essere ottenuto da fornitori esterni.

Devono essere determinati e messi a disposizione il personale per il funzionamento del sistema di gestione della qualità e per il controllo dei suoi processi.

Devono essere determinate e messe a disposizione le infrastrutture (edifici, attrezzature, trasporti, informazioni) necessarie per le operazioni e per il raggiungimento della conformità di prodotti e servizi.

Deve essere determinato e messo a disposizione l'ambiente necessario (inteso come fattori fisici, sociali psicologici) per il funzionamento dei processi e per il raggiungimento della conformità di prodotti e servizi.

Devono essere determinate e messe a disposizione le risorse necessarie per assicurare misure o monitoraggi validi ed affidabili per verificare la conformità di prodotti e servizi.

Quando la tracciabilità delle misure è un requisito o è considerata parte essenziale per la confidenza nelle misure effettuate, gli strumenti devono essere calibrati o verificati a intervalli regolari, secondo standard di misura nazionali o internazionali. Se tali standard non esistono, le calibrazioni e le verifiche devono essere almeno documentate. Gli strumenti devono essere identificati e devono essere protetti da danni o deterioramenti che potrebbero invalidare lo stato di calibrazione e le misure.

In particolare, per le misure su prodotti Ex, deve esistere un certificato di calibrazione valido, rilasciato da un laboratorio che operi secondo standard internazionali, accreditato presso un'autorità nazionale, in alternativa il certificato deve contenere tutte le informazioni che permettano la tracciabilità delle misure, altrimenti il fabbricante deve dimostrare la tracciabilità delle misure in altro modo.

Le conoscenze utili per il funzionamento dei processi e per il raggiungimento della conformità di prodotti e servizi devono essere determinate e rese disponibili (per quanto

necessario). Le competenze del personale che possano influenzare le prestazioni del sistema di gestione della qualità devono essere determinate. Il personale deve essere reso competente per mezzo di educazione, addestramento o esperienza. Se necessario, la competenza deve essere valutata. Il possesso delle competenze deve essere documentato. Quanto riguarda le competenze deve valere in modo particolare per il personale che può influire sul processo di conformità dei prodotti Ex.

Il personale deve essere consapevole della politica e degli obiettivi rilevanti della qualità, partecipando a rendere effettivo il sistema di gestione della qualità.

Le comunicazioni interne ed esterne rilevanti per il sistema di gestione della qualità devono essere regolamentate. In particolare, devono essere regolamentate le comunicazioni relative ai prodotti Ex.

Le informazioni relative al sistema di gestione della qualità devono essere documentate, in particolare quelle relative alla conformità di prodotti Ex, dei loro certificati e della documentazione tecnica.

La documentazione tecnica e la documentazione del costruttore deve essere controllata (identificata la versione, preservata, mantenuta aggiornata, distribuita, controllato l'accesso). La documentazione del costruttore e quella tecnica non devono essere in contrasto. Nessun fattore tra quelli contenuti nel certificato o nella documentazione tecnica deve poter essere modificabile se non da o con il permesso di chi ha emesso il certificato.

Il sistema di documentazione deve essere in grado di gestire situazioni come quelle derivanti dalla modifica di un disegno comune a più certificati. Disegni di prodotti non Ex devono essere chiaramente identificati. Quando documentazione tecnica o documentazione del costruttore è passata a una terza parte ciò deve avvenire in modo che non si generino incomprensioni. Il costruttore deve avere un processo che consenta di controllare la validità dei certificati dei prodotti Ex, delle norme e di altre specifiche esterne. Il costruttore deve conservare i rapporti di qualità che dimostrano la conformità dei prodotti Ex per un minimo di 10 anni dopo che il lotto di quel prodotto è stato immesso sul mercato.

Attività operative

Il fabbricante deve pianificare, realizzare e controllare i processi necessari per la fornitura di prodotti e servizi. Devono essere determinati i requisiti e i criteri di accettazione di prodotti e servizi, insieme alle risorse necessarie per ottenere la loro conformità. Il documento contenente la pianificazione deve essere sufficiente per le attività operative.

La comunicazione con i clienti è parte integrante delle attività operative. Quando il fabbricante si impegna a fornire prodotti e servizi deve sottoporre a revisione i loro requisiti prima di impegnarsi con il cliente. Durante la revisione deve verificare che le richieste del cliente siano compatibili con il certificato dei prodotti Ex. Qualsiasi cambiamento deve essere documentato, e i cambiamenti dei prodotti Ex devono essere valutati dal personale in possesso di autorizzazione Ex.

Deve essere attivato un processo di "progettazione e sviluppo". Se tale processo identifica modifiche da apportare al progetto di un prodotto Ex, queste devono essere valutate coinvolgendo personale in possesso di autorizzazione Ex.

Per i prodotti e servizi approvvigionati dall'esterno si applica quanto previsto dalla ISO 9001:2015 [4], tuttavia la responsabilità per la certificazione del prodotto finale è del fabbricante e non dei sub-contrattenti, per questo, per i prodotti Ex, deve essere svolta una valutazione del fornitore per garantire che sia in grado di fornire prodotti e servizi con

requisiti conformi a quanto specificato. La valutazione va ripetuta ogni anno o in occasione di un ordine di acquisto.

La realizzazione di prodotti e la fornitura di servizi deve essere sottoposta a controllo di produzione. Il fabbricante deve operare con procedure, attrezzature, ambienti di lavoro e ispezioni/test in modo da assicurare il rispetto della conformità dei prodotti Ex.

Il fabbricante deve stabilire e mantenere procedure per l'identificazione (tracciabilità) dei prodotti Ex, durante tutte le fasi di produzione, test, ispezione finale e messa sul mercato.

Se durante la produzione sono effettuate modifiche a un prodotto Ex, queste devono essere valutate coinvolgendo personale in possesso di autorizzazione Ex.

I test di prodotti Ex devono essere svolti come specificato. Metodi statistici non sono permessi se non specificamente previsto dal certificato e dalla documentazione tecnica.

I prodotti Ex sono rilasciati solo se l'ispezione finale è stata completata in modo soddisfacente.

Le non conformità sono gestite secondo la ISO 9001:2015 [4], inoltre il fabbricante deve poter identificare i clienti se dovessero presentarsi prodotti Ex non conformi al certificato, in modo da mettere in atto azioni adeguate al rischio e avvisare il cliente e l'ente certificatore.

Valutazione delle prestazioni

Per quanto riguarda la valutazione delle performance del sistema di gestione della qualità le aggiunte ai requisiti già previsti dalla ISO 9001:2015 [4] riguardano gli audit interni e l'attività di revisione svolta dalla direzione. La norma ISO 9001:2015 [4] prevede che l'organizzazione, al fine di valutare il sistema di gestione della qualità e la sua applicazione, pianifichi audit interni programmati condotti da personale selezionato e che i risultati degli audit siano riportati alla direzione e applicate le misure correttive documentando ogni attività. La norma ISO 80079-34:2018 [3] richiede in aggiunta che la frequenza di questi audit, volti ad accertare la corrispondenza del prodotto Ex al tipo certificato, sia non superiore a 14 mesi. Inoltre suggerisce audit di tipo verticale in cui il valutatore esamina tutti gli aspetti del sistema associato alla produzione di un prodotto Ex, già pronto per la spedizione, con l'ottica della certificazione. Nel caso si usi come strumento una checklist questa deve includere i requisiti indicati dalla norma e i risultati devono essere registrati. Sono possibili metodi alternativi purché di pari efficacia.

La direzione deve revisionare il sistema di gestione della qualità a intervalli pianificati per garantirne l'adeguatezza e l'efficacia (ISO 9001:2015 [4]). Anche in questo caso la norma ISO 80079-34:2018 [3] richiede in aggiunta che la frequenza della revisione sia non superiore a 14 mesi, che sia presieduta dalla direzione e che vi partecipino le persone Ex autorizzate responsabili delle attività. La revisione deve valutare l'efficacia del sistema qualità per i prodotti Ex e contenere i risultati degli audit interni ed esterni. Perfettamente in linea con la norma ISO 9001:2015 [4] sono invece gli input e gli output da considerare per il riesame e la loro documentazione.

Altri aspetti in comune con la norma ISO 9001:2015 [4] per valutare le prestazioni e l'efficacia del sistema qualità riguardano:

- il monitoraggio della soddisfazione del cliente;
- l'analisi e la valutazione di tutte le informazioni e di tutti dati ritenuti necessari

Miglioramento

I requisiti per la fase di miglioramento coincidono con quelli della norma ISO 9001:2015 [4]. L'organizzazione deve cogliere le opportunità che le permettono di soddisfare il cliente

migliorando i prodotti, i servizi, le prestazioni per esempio con l'innovazione, con azioni correttive e se necessario anche con cambiamenti radicali.

Questo comporta un'immediata reazione alle non conformità valutando le azioni correttive necessarie e la loro efficacia in modo che tali non conformità non si possano ripetere e documentando ogni cosa. Per un risultato efficace possono essere necessari cambiamenti nel sistema qualità e una rivalutazione di rischi e opportunità in fase di pianificazione.

Le revisioni e le analisi effettuate devono mirare al miglioramento continuo del sistema di gestione della qualità considerando sempre nuovi bisogni e opportunità.

4. Gli allegati della EN ISO/IEC 80079-34

L'allegato ZB (europeo, sviluppato in ambito CEN edizione 2020) è particolarmente importante in quanto contiene informazioni e riferimenti a requisiti specifici (ma non esaustivi) contenuti in norme armonizzate alla Direttiva ATEX, sviluppate in Europa, alcune delle quali sono state poi trasposte a livello ISO, altre sono state ritirate ma potrebbero esistere sul mercato prodotti ad esse conformi (es. *EN 13463-3, Non-electrical equipment for use in potentially explosive atmospheres – Part 3: Protection by flameproof enclosure 'd'*). Tali documenti possono essere di aiuto per i costruttori per verificare se nel sistema qualità, sono stati presi in considerazione e affrontati con procedure adeguate quegli aspetti che sono rilevanti per la sicurezza. Inoltre possono essere utilizzati dai valutatori nelle attività di audit esterno ed interno. Le norme in questione sono fondamentalmente quelle di tipo non elettrico (es. *EN 14986, Design of fans working in potentially explosive atmospheres*) e quelle riguardanti i sistemi di protezione (es. *EN 16447, Explosion isolation flap valves*).

L'allegato A (internazionale, riferibile all'edizione ISO/IEC 2018) è l'analogo dell'allegato europeo ma fa riferimento a normativa internazionale IEC (es. la serie *IEC 60079*) e ISO (es. *ISO 80079-36, Explosive atmospheres – Part 36: Non-electrical equipment for explosive atmospheres – Basic method and requirements*). Al suo interno sono realizzati esempi che indicano come soddisfare i requisiti della norma.

L'allegato B (internazionale) introduce a livello informativo criteri per la verifica di elementi che hanno seguito un percorso (costruttivo) non misurabile e che fanno parte integrante di un tipo di protezione (es. materiali sinterizzati).

Infine l'Allegato C è un esempio di dichiarazione di conformità da parte di un fornitore di processi, prodotti o servizi. Questo consente al costruttore che si serve di uno o più fornitori di garantire la conformità dei prodotti realizzati.

5. Conclusioni

Le attrezzature in pressione per le loro caratteristiche costruttive e per l'uso a cui sono destinate possono impiegare sistemi di protezione, apparecchiature, componenti, sistemi di monitoraggio e controllo, per la tutela dell'utilizzatore contro il rischio dovuto alla presenza di atmosfere esplosive. L'impiego di un sistema di gestione della qualità per tali prodotti, nello stabilire requisiti per l'organizzazione, le risorse, le attività, la valutazione delle prestazioni e il miglioramento, contribuisce a garantire la conformità ai requisiti tecnici di sicurezza richiesti dalla normativa applicabile. Un sistema di gestione della qualità basato sulla ISO/IEC 80079-34:2018, come illustrato dal presente lavoro, si presta a essere impiegato per la certificazione di prodotti in ambito internazionale IECEx, nonché per la certificazione richiesta in ambito europeo dalla direttiva ATEX nell'applicare i moduli Garanzia Qualità Produzione (All. IV) o Garanzia Qualità Prodotti (All. VII). Inoltre, il possesso di un SGQ basato sulla ISO/IEC 80079-34 può facilitare l'ottenimento della certificazione IECEx, semplificando la circolazione dei prodotti a livello internazionale.

6. Riferimenti

- [1] ATEX 2014/34/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres (recast).
- [2] ATEX 2014/34/EU Guidelines (2nd Edition – 2017).
- [3] ISO/IEC 80079-34:2018, Explosive atmospheres – Part 34: Application of quality management systems for Ex product manufacture.
- [4] ISO 9001:2015, Quality management systems – Requirements.

La sicurezza antincendio nei siti aeroportuali. L'esperienza operativa sui "Dragon" dei Vigili del Fuoco

C. Piccolo¹, F. Di Tosto², M.M. La Veglia³

¹ Inail – Uot di Avellino

² Inail – Uot di Roma

³ Direzione Regionale Vigili del Fuoco Campania

Sommario

Scopo del presente lavoro è di mettere in evidenza l'importanza delle attività di verifica e di manutenzione sulle apparecchiature a pressione al fine di garantire l'efficienza di un automezzo di soccorso a servizio delle piste aeroportuali italiane.

Saranno in particolare illustrate le caratteristiche funzionali delle attrezzature a pressione installate a bordo dei mezzi antincendio Dragon e Super Dragon maggiormente in uso nei siti aeroportuali. La tipologia di attrezzature in uso permette infatti di classificare le piste aeroportuali, generalmente di tipo civile, in relazione alle tipologie ed al numero dei mezzi operativi, anche secondo quanto previsto da specifici regolamenti.

Viene evidenziata la sinergia istituzionale messa in campo tra Inail, attraverso le esperienze operative dei tecnici delle UU.OO.TT. di Roma e di Avellino con le verifiche svolte sugli automezzi aeroportuali, e Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, con il personale tecnico preposto alla manutenzione e alla verifica, al fine di garantire la sicurezza antincendio nel rispetto delle indicazioni normative nazionali ed internazionali.



Figura 1. Il Dragon X6 in azione

1. Premessa

La gestione dell'intervento antincendio per attività di spegnimento su un aeromobile è di gran lunga il più delicato intervento che un Vigile del Fuoco possa affrontare.

Le criticità della situazione è dovuta ai seguenti fattori:

- l'alto numero di persone contemporaneamente coinvolte e difficoltà di rapida evacuazione

- l'elevato "carico di incendio" e rapidità di sviluppo dell'incendio
- la limitata resistenza al fuoco dei materiali che costituiscono l'aeromobile
- le possibili difficoltà di accesso all'area
- l'impossibilità di portare soccorso finché l'aeromobile non è fermo a terra (fermo restando quanto può essere fatto in volo dall'equipaggio).
- Il numero elevato di persone presenti sull'aeromobile, legato ai ristretti spazi all'interno impone di eliminare quanto prima possibile ogni minaccia alle condizioni di sopravvivenza all'interno dell'aeromobile stesso.

Un intervento di spegnimento che coinvolga l'intero aeromobile ha di fatto ben poche possibilità teoriche di esito positivo, ovvero di garantire il salvataggio delle vite umane. Pertanto, risulta di estrema importanza garantire negli aeroporti le condizioni a contorno e il rispetto massimo di minimizzazione del rischio incendio.

Un incidente ad un aeromobile può essere assimilato ad un incidente tra un autobus e un'autocisterna di carburante. Una delle ragioni per le quali, negli aeromobili di grosse dimensioni, prima di effettuare un atterraggio in emergenza, il comandante scarica il carburante "in aria" è quella di ridurre la dimensione di un eventuale incendio, una volta giunti a terra.

Quando si verifica un evento con incendio, il personale antincendio e i mezzi aeroportuali dovranno essere in grado di concentrare in pochi minuti la massima velocità di trasporto, la strategia vincente di intervento e la capacità massima delle sostanze estinguenti.

Gli automezzi di cui si tratterà in questo articolo dovranno pertanto garantire contemporaneamente la massima efficienza in termini di velocità del mezzo, pressione della gittata, e volume disponibile dell'estinguente.



Figura 2. Scenario di incendio aeromobile con ampio margine di "gestibilità"

2. La classificazione delle piste aeroportuali

Il servizio antincendio nei principali aeroporti italiani per la salvaguardia della vita di coloro che utilizzano il mezzo aereo è regolamentato dalla legge 23/12/1980 n. 930, che ha stabilito che il riferimento sia il Ministero dell'Interno, tramite il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco (di seguito C.N.VV.F.)

Il servizio è regolamentato dalle normative nazionali (emanate da Ministero dell'Interno e dall' ENAC) e da quelle dell'Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile, ovvero *International Civil Aviation Organization* (di seguito I.C.A.O.).

L'I.C.A.O. dal 1944 svolge attività di tipo informativo e normativo; in particolare prescrive le norme per regolamentare tutti gli aspetti della navigazione aerea in 19 allegati alla Convenzione di Chicago, chiamati *Annessi*. In Italia le norme I.C.A.O. con i contenuti tecnici dei *Annessi* vengono recepite dall' ENAC.

Alla luce delle suddette indicazioni e raccomandazioni fornite dagli enti sopra indicati al C.N.VV.F spetta un ruolo di primaria importanza nella pianificazione e gestione delle emergenze. E proprio per far fronte a tale richiesta ed in particolare per garantire la sicurezza antincendio aeroportuale sono impiegati per le attività nel settore aeroportuale circa 3.000 uomini e 300 veicoli di diversa tipologia.

CLASSE ANTINCENDI	CATEGORIA ICAO	AEROPORTI
1 [^]	IX	Roma-Fiumicino, Milano Malpensa, Gorizia, Torino
2 [^]	VIII	Milano-Linate, Roma-Ciampino, Palermo, Genova, Catania, Venezia, Ancona, Verona, Brescia, Pisa, Napoli, Rimini, Bari, Bergamo, Bologna, Brindisi, Cagliari, Catanzaro, Pescara
3 [^]	VII	Sassari-Alghero, Sassari-Olbia, Reggio Calabria, Parma, Forlì, Treviso
4 [^]	VI	Lampedusa, Pantelleria, Trapani-Birgi, Firenze, Cuneo, Crotone
5 [^]	V	Savona, Taranto, Perugia

Tabella 1. Classificazione degli aeroporti italiani secondo la classe antincendi e la categoria ICAO



Figura 3. Mezzi antincendio all'aeroporto di Fiumicino

3. Possibili scenari di incendio

Nell'organizzazione delle operazioni di soccorso vengono previsti dagli esperti di pianificazione di emergenza dei Vigili del Fuoco una serie di eventi possibili, dovuti ad errori o negligenze, che si possono verificare nelle varie fasi di lavoro o operative ed altrettanti fattori che possono influenzare in maniera determinante le operazioni di spegnimento.

Tali fattori sono determinanti nella individuazione e nella scelta dei mezzi antincendio come più avanti descritti.

1. Fattori di rischio antincendio nella fase di manovra e parcheggio aeromobili

- presenza di passeggeri a bordo;
- carburante (soprattutto in partenza);
- possibili collisioni con altri vettori in movimento e/o fermi;
- i getti di gas delle turbine possono investire oggetti/persone;
- spostamenti accidentali degli aeromobili parcheggiati causati dal maltempo e/o errore umano (raffiche di vento, sovraccarichi nevosi, ecc.)

2. Fattori di rischio antincendio nella fase di imbarco/sbarco passeggeri

- movimenti bus-navetta scarsa visibilità delle ali degli aeromobili e sagome inusuali;
- passeggeri portatori di handicap;
- condizioni meteo sfavorevoli;
- elevato numero di passeggeri in movimento con relative problematiche ed presenza di mezzi "estranei" (in caso di grande traffico)

3. Fattori di rischio antincendio nella fase di carico/scarico merci

- guasti agli elevatori di carico;
- urti tra i vettori terrestri;
- danneggiamento del carico con problematiche particolari e con carichi pericolosi/radioattivi, ecc.
- ingombro delle aree riservate ad altri servizi (uscite mezzi vigili del fuoco, ostacolo e limitazione di aree destinate alla circolazione, ecc.);
- avvicinamento e/o posizionamento in aree interdette (sotto l'ala, vicino a punti pericolosi, davanti ai pontili di imbarco ecc.)

4. Fattori di rischio antincendio nella fase di manutenzione e controllo aeromobili (tipici dei lavori di officina)

- i rischi, ben noti relativi ai lavori di officina, hanno una magnitudo enormemente maggiore in quanto dal punto di vista antincendio i lavori vengono eseguiti in prossimità di serbatoi pieni di carburante o vicino a strutture dell'aeromobile combustibili e attraversate da linee di fluidi idraulici;
- elevati punti di possibile innesco per utilizzazione di apparecchiature UHF, apparati radar, gruppi ausiliari, ecc.

Tutti i fattori sopra elencati risultano pertanto determinanti nella individuazione dei mezzi antincendio in dotazione alle piste aeroportuali.

4. Il Dragon ed il Super Dragon

In relazione alle esigenze che vengono a determinarsi nel caso di un incidente aereo con persone a bordo, l'intervento dei Vigili del Fuoco deve essere il più efficace possibile.

Si deve tener presente, infatti, che buona parte degli aerei di linea ha notevoli dimensioni, imbarca grandi quantitativi di carburante, può trasportare alcune centinaia di passeggeri e che i tempi di sopravvivenza, in caso di incendio, sono limitatissimi.

In considerazione di tali esigenze, si richiede che gli automezzi antincendio aeroportuali abbiano le seguenti caratteristiche: velocità, facilità di manovra, automatismi, grande capacità di spegnimento.

Il parco veicoli aeroportuali, dal 1998 ad oggi, ha subito un processo di potenziamento e rinnovo che ha portato all'acquisizione di automezzi di nuova generazione ed elevata tecnologia che hanno totalmente rinnovato il settore.

È indispensabile porre l'accento sul fatto che i mezzi antincendio aeroportuali sono diversi dai veicoli antincendio ordinari, sia per caratteristiche e prestazioni meccaniche, sia per i maggiori quantitativi di agenti estinguenti trasportati.

Il parco veicoli aeroportuali, in dotazione ai Vigili del Fuoco, comprende essenzialmente due diverse tipologie di automezzi, oltre ai veicoli di supporto:

a) **veicoli antincendio**: di tipo *Idroschiuma (AIS)* ed *Idroschiuma Polvere (AISP)*. Sono veicoli di intervento appositamente allestiti per lo spegnimento degli incendi di aeromobile.

b) **veicoli di soccorso**: *Automezzi di Soccorso Aeroportuale (ASA)*. Sono veicoli che trasportano tutte le attrezzature necessarie per il soccorso delle persone presenti all'interno degli aeromobili incidentati.

c) **veicoli aeroportuali di supporto**: completano il parco alcune tipologie di veicoli dedicati ad utilizzi specifici, quali: veicoli per il rifornimento idrico in pista e veicoli attrezzati per interventi di tipo non convenzionale NBCR in ambito aeroportuale.

4.1 I veicoli antincendio aeroportuali

Sono automezzi di intervento utilizzati per lo spegnimento di incendi di aeromobili.

I veicoli di nuova generazione abbinano elevate prestazioni meccaniche al trasporto di notevoli quantitativi di agenti estinguenti e pertanto dispongono di serbatoi di grandi capacità e di pompe con elevata portata.

Dal punto di vista degli agenti in caricamento si distinguono due tipologie:

- **veicoli di tipo idroschiuma (AIS)**: dotati di acqua e liquido schiumogeno;
- **veicoli di tipo idroschiuma polvere (AISP)**: dotati di acqua, liquido schiumogeno e polvere.

In termini generali, i veicoli antincendio aeroportuali hanno una massa totale a terra che può superare le 40 tonnellate, accelerazioni da 0-80 km/h in meno di 25 secondi e velocità superiori a 110 km/h.

Per quanto riguarda l'operatività, tali veicoli dispongono di computer di bordo e di strumentazioni tecnologicamente evolute, che permettono di effettuare rapidamente le operazioni di spegnimento, ma che richiedono uno specifico addestramento da parte del personale addetto.

Tali automatismi consentono di ridurre al minimo il numero di operatori a bordo.

In generale l'equipaggio è costituito da un autista ed un operatore; comunque anche il solo autista può contemporaneamente guidare il mezzo e manovrare l'impianto antincendio.

Gli automezzi antincendio aeroportuali sono in generale fuori sagoma perché la loro dimensione di ingombro supera quella limite prevista dal Codice della Strada. Tenuto conto che l'aereo incidentato può fermarsi fuori pista o precipitare all'esterno dell'aeroporto è necessario che tali automezzi abbiano tutti la trazione integrale.

4.1.1. Automezzo Idroschiuma Polvere: A.I.S.P. IVECO Superdragon x 8

L'automezzo idroschiuma polvere aeroportuale denominato "SUPERDRAGON x8", allestito dalla IVECO mezzi Speciali su autotelaio FRESIA, presenta notevoli capacità meccaniche ed antincendio ed è utilizzato dai Vigili del Fuoco per il servizio antincendio aeroportuale.

La potenza del motore consente di raggiungere una velocità massima di oltre 115 Km/h ed una accelerazione da 0 a 80 Km/h in meno di 25 secondi.

Tali prestazioni meccaniche permettono ai Vigili del Fuoco di intervenire, in caso di incidente aereo, in due minuti dalla chiamata in ogni punto dell'aeroporto, con tempistiche inferiori a quelle previste dalle norme internazionali.

L'impianto antincendi utilizza tre tipologie di agenti estinguenti: acqua, schiuma, polvere, contenuti in serbatoi di capacità rispettivamente pari a 11.600 lt (acqua), 1.450 lt (liquido schiumogeno), 600 kg (polvere).

L'impianto di erogazione comprende un monitore principale a doppia canna, situato sul tetto della cabina di guida, un cannoncino frontale, due naspi laterali.

Il monitore principale è in grado di proiettare, dalla canna inferiore, acqua o schiuma con portate selezionabili di 5.600 lt/1' e 4.500 lt/1', raggiungendo una distanza di oltre 85 metri dal fronte del veicolo e dalla canna superiore polvere estinguente alla distanza di 25 metri.

Il cannoncino situato sulla parte frontale della cabina di guida, consente di erogare 900 lt/1' d'acqua o schiuma fino ad una distanza di oltre 45 metri ed è prevalentemente utilizzato per incendi sotto le ali degli aerei. I due naspi laterali, ad uso manuale, erogano acqua/schiuma o polvere.

Il veicolo può essere gestito, oltre che manualmente da un solo operatore, attraverso un sistema computerizzato di comando e controllo, tecnologicamente avanzato, che consente di effettuare automaticamente tutte le operazioni relative all'utilizzo dell'impianto antincendio; inoltre, attraverso un modulatore/demodulatore satellitare è possibile il rilevamento a distanza dei guasti, nonché il controllo delle manutenzioni. Il sistema computerizzato consente la rilevazione dei guasti e, attraverso dei disegni digitali, anche le indicazioni per la riparazione degli stessi.

IMPIANTO ANTINCEDIO			
CAPACITA' Serbatoio IDRICO		11.600 lt.	Per intervento
CAPACITA' Serbatoio PROTEZIONE		390 lt.	Per autoprotezione
CAPACITA' Serbatoio SCHIUMOGENO		1.450 lt.	la capacità del serbatoio è tale da miscelarsi con un quantitativo di acqua doppio di quella in caricamento
CAPACITA' Serbatoio POLVERE		600 kg.	= n. 2 serbatoi x 300 kg cadauno
GITTATA Acqua	82 m con portata di 4.500 lt/min	GITTATA Schiuma	75 m con portata di 4.500 lt/min
	86 m con portata di 5.600 lt/min		79 m con portata di 5.600 lt/min
GITTATA Polvere		25 m con portata di 5 kg./sec.	
Gruppo pompa M.P.		7.000 lt./min. a 16 bar	

4.1.2. Automezzo Idroschiuma Polvere: A.I.S.P. IVECO Dragon x 6

L'automezzo idroschiuma polvere aeroportuale, denominato "DRAGON x6 DP" è stato allestito dalla società IVECO Mezzi Speciali di Brescia su autotelaio Fresia.

Il potente motore Isotta Fraschini consente di raggiungere una velocità massima di oltre 115 Km/h ed una accelerazione da 0 a 80 Km/h in meno di 25 secondi.

Tali prestazioni meccaniche permettono ai Vigili del Fuoco di intervenire, in caso di incendio aereo, in due minuti dalla chiamata in ogni punto dell'aeroporto, con tempistiche inferiori a quelle previste dalle norme internazionali.

L'impianto antincendio utilizza tre tipologie di agenti estinguenti: acqua, schiuma polvere, contenuti in serbatoi di capacità rispettivamente pari a 8.700 lt (acqua), 1.100 lt (liquido schiumogeno), 600 kg (polvere).

L'impianto di erogazione comprende un monitor principale a doppia canna, situato sul tetto della cabina di guida, un cannoncino frontale, due naspi laterali.

Il monitor principale è in grado di proiettare, dalla canna inferiore, acqua o schiuma con portate selezionabili di 3.750 lt/1' e 4.800 lt/1', raggiungendo una distanza di oltre 84 metri dal fronte del veicolo e dalla canna superiore polvere estinguente alla distanza di 18 mt.

Il cannoncino situato sulla parte frontale della cabina di guida, consente di erogare circa 900 lt/1' d'acqua o schiuma fino ad una distanza di oltre 45 m ed è prevalentemente utilizzato per incendi sotto le ali degli aerei.

I due naspi laterali, ad uso manuale, erogano acqua/schiuma o polvere.

Il veicolo può essere gestito, oltre che manualmente da un solo operatore, attraverso un sistema computerizzato di comando e controllo, tecnologicamente avanzato, che consente di effettuare automaticamente tutte le operazioni relative all'utilizzo dell'impianto antincendi.

IMPIANTO ANTINCEDIO			
CAPACITA' Serbatoio IDRICO		8.700 lt	8.300 lt per intervento e 400 lt per autoprotezione
CAPACITA' Serbatoio SCHIUMOGENO		1.100 lt	la capacità del serbatoio è tale da miscelarsi con un quantitativo di acqua doppio di quella in caricamento.
CAPACITA' Serbatoio POLVERE		600 kg	= n. 2 serbatoi x 300 kg cadauno
GITTATA Acqua	80 m con portata di 3.750 lt/min	GITTATA Schiuma	70 m con portata di 3.750 lt/min
	84 m con portata di 4.800 lt/min		74 m con portata di 4.800 lt/min
GITTATA Polvere		18 m con portata di 5 kg./sec.	
Gruppo pompa M.P.		Mod. MB 610 -6.000 lt./min.a 16 bar	

5. Descrizione dell'impianto a pressione a bordo dei Dragon

Come si evince dalla figura 4, la parte soggetta a pressione è installata sul retro del Dragon ed è composta come di seguito:

- **Doppio serbatoio con polvere**

Si tratta di un recipiente pressione contenente la polvere estinguente

- **Bombole aria compressa**

Si tratta di bombole di aria compressa.

Su ogni mezzo sono presenti doppi sistemi indipendenti A e B in grado di funzionare in contemporanea o singolarmente e gestiti dall'operatore all'interno del mezzo.

Il serbatoio contenente la polvere estinguente è alimentato dalle bombole di aria compressa riempite ad una pressione di almeno 200 bar e collegate ad un riduttore di pressione.



Figura 4. Serbatoio estinguente e bombola di alimentazione – Serbatoi A e B

L'operatore può prevedere un utilizzo contemporaneo o separato dei 2 impianti.

Le fasi operative per il funzionamento sono le seguenti:

1. L'operatore apre la bombola
2. L'aria compressa fluisce attraverso il riduttore di pressione e si immette verso la valvola di pressurizzazione del recipiente
3. La pressione delle bombole diminuisce sensibilmente.
4. La massima pressione di funzionamento la si ottiene dopo circa 15 sec. (tempo di pressurizzazione)
5. La pressione all'interno del recipiente raggiunge i 12-14 bar dopo di che l'alimentazione viene a cessare e riprenderà soltanto quando la pressione diminuisce

Il funzionamento dell'impianto nel suo insieme avviene tramite valvole automatiche che permettono di gestire dall'interno dell'automezzo le mandate al Naspo e/o al Monitor presenti sul tetto dell'automezzo.

Su ciascun serbatoio è presente anche una valvola automatica di sgasatura che permette di depressurizzare il sistema e metterlo in sicurezza.

Sui mezzi è presente una connessione che consente di alimentare il sistema direttamente da una eventuale rete di aria compressa

Caratteristiche dell'impianto

Gli impianti di nuova generazione sono certificati secondo la Direttiva 2014/68/UE come "insiemi". Nella descrizione "tipo" dell'insieme, di seguito riportata, vengono elencati i componenti dell'impianto.

**DICHIARAZIONE DI CONFORMITA'
DECLARATION DE CONFORMITE'
CONFORMITY DECLARATION**

(ai sensi dell'Allegato VII della Direttiva Europea 2014/68/EU)

Descrizione dell'insieme a pressione costruita:
Description de l'outillage/appareil
Description of equipment/pressure vessel

A.					
Definizione / Definition / Description					
GRUPPO POLVERE ANTINCENDIO / DRY CHEMICAL POWDER UNIT Lt.280 / Kg.250					
Numero di Fabbrica Nombre d'usine Shop number		Numero Progetto o Disegno Nombre de project ou dessin Design number or drawing		Famiglia Groupe Group	Tipo Approvato Approved TypeType
PWD/26/19/8083 PWD/27/19/8083 PWD/28/19/8083 PWD/29/19/8083 PWD/30/19/8083		8083- 1 Flow Diagram 8083- 2 Overall Dimension		IV	280C Rev.1
B.					
Dry Chemical Powder System Assembly – Lt 280/ 250Kg		Pressione max di esercizio Max Working Pressure	Temperatura min e max d'esercizio Min/max working temperature	Fluido contenuto Fluid contenu Stored fluid	Valutazione/Conformita' Conformity evaluation
N.	Descrizione Description				
1	Serbatoio / Vessel	14 Bar	-20 + 80°C	Nitrogen + Powder	B 3.1
2	Valvole di sicurezza / PSV	14 Bar	-60 + 150°C	Nitrogen + Powder	B+D
3	Lt.40 Nitrogen cylinder	200 Bar	-20 + 50°C	Nitrogen	B+F
4	Quick flushing valve	200 Bar	-20 + 60°C	Nitrogen	A
5	Pressure gauge 0/400 Bar	400 Bar	-25 + 65°C	Nitrogen	A
6	Piping	14 Bar	-20 + 80°C	Nitrogen	Art.4 Comma 3
7	Pressure reducer K&F 1011	200 Bar	-15 + 60°C	Nitrogen	Art.4 Comma 3

Figura 5. Fac-simile Dichiarazione di conformità dell'Insieme

Gli impianti più vecchi sono provvisti per il serbatoio estinguente o di libretto matricolare ISPEL o Dichiarazione di conformità dell'attrezzatura ai sensi della Direttiva 97/23/CE. Generalmente sono di costruzione ASA Protection, SES ASA Protection (almeno nei casi esaminati nel presente studio) e presentano un volume di da 320 a 440 lt con una pressione di 14/15 bar.



Figura 6. Targa serbatoio estinguente

Le bombole di aria compressa sono generalmente provviste di Dichiarazione di conformità dell'attrezzatura ai sensi della Direttiva 2010/35/UE (TPED) e per quelli più vecchi con la Direttiva 1999/36/CE o con Certificati di approvazione ISPEL/Ministero

dei Trasporti. Generalmente di costruzione Faber Industrie s.p.a. o Worthington, presentano un volume da 40 a 55 lt con una pressione di 200 bar.



Figura 7. Particolare bombola aria compressa con serbatoio afferente

L'impianto prevede la presenza di 2 riduttori di pressione con range operativo 200/14. L'impianto si completa con una valvola di sicurezza installata su ogni singolo serbatoio estinguente tarata a 14 o 15 bar generalmente di costruzione Rubinetterie Paracchini, Nuova COI o Nuova General Instruments.

6. Conclusioni

Nell'ambito di una sinergia interistituzionale tra INAIL e Ministero dell'Interno, è stata di grande interesse l'esperienza operativa acquisita dai tecnici delle UU.OO.TT. di Avellino e di Roma nello svolgimento delle verifiche di messe in servizio ai sensi dell'art. 4 del DM 329/2004.

Di rilievo le criticità nella tipologia di attrezzature per la fase procedurale delle attività di verifica, non tanto per la tipologia dei recipienti in relazione ai volumi e pressioni in gioco, ma quanto alla affidabilità degli automezzi di soccorso. Essi risultano essenziali per garantire la sicurezza e la funzionalità degli scali aeroportuali in relazione alle caratteristiche funzionali e operative richieste: velocità del mezzo, pressione della gittata, volume dell'estinguente.

La condivisione di obiettivi con gli operatori del C.N.VV.F nella medesima attività di verifica della funzionalità di attrezzature e sistemi di sicurezza presenti nei mezzi oggetti dello studio si è rivelata fondamentale.

Non risulti superfluo sottolineare come tutte le attività siano state svolte in situ presso le piste degli aeroporti di Fiumicino (RM) e Ciampino (RM) al fine di evitare il "blocco" delle attività di volo sugli aeroporti in questione. Analoghe attività che erano già state attuate per le verifiche presso l'aeroporto di Capodichino a Napoli e nelle attività svolte sugli stessi mezzi come tipologia presso gli aeroporti militari di Pratica di Mare (RM).

L'attività descritta nel lavoro ha confermato l'elevato livello di attenzione alle attività di manutenzione rivolto ai suddetti mezzi al fine di garantirne una tempestiva ed efficace operatività nei tempi dettati dai Regolamenti Internazionali.

7. Bibliografia

- [1] C. Piccolo, M.M. La Veglia et al. Analisi di casi di esplosioni anomale. Criticità nella progettazione e nella manutenzione. *Atti convegno SAFAP 2018*
- [2] M.M. La Veglia, C. Piccolo. *Corso di Retraining ed aggiornamento dei Caposquadra dei Vigili del Fuoco*. Dalle lezioni in veste di docenti al Corso di Formazione, Polo Didattico di Napoli, Anno 2005 (dispense non pubblicate ad esclusivo uso didattico interno).
- [3] M.M. La Veglia *Manovre e tecniche di addestramento pompieristico di base per interventi in aeroporto*. Dalle lezioni in veste di Direttore del Corso di Formazione, Polo didattico di Napoli, Anno 2017 (dispense non pubblicate ad esclusivo uso didattico interno)
- [4] F. Di Tosto La Direttiva 94/9/CE in materia di atmosfere esplosive ed il suo impatto nel settore delle attrezzature in pressione *Atti Convegno SAFAP 2004*.
- [5] F. Di Tosto. Il rischio esplosione e le direttive ATEX. Collana. Il Sole 24 Ore, 2008

La compliance delle attrezzature in pressione: un caso di successo

A. O. Iamele¹, M. Taralli¹, A. Ferraro², O. Borgia³, M. Colavita⁴

¹Leonardo Company S.p.A. – Divisione Aerostrutture

²TÜV Austria Italia S.r.l.

³SAIPEX S.r.l.

⁴Techne Solutions S.r.l.

1. Introduzione al progetto

Nella maggior parte dell'industria italiana, che può essere definita per lo più manifatturiera, le attrezzature e gli impianti in pressione sono spesso considerati alla stregua di un semplice macchinario o se non addirittura inferiori. Questo tipo di sensibilità è dovuta principalmente al fatto che tali attrezzature non trattano solitamente il "prodotto" vero e proprio realizzato nell'industria, ma sono a servizio delle macchine che lo realizzano o dell'intero stabilimento produttivo. Proprio questa visione semplicemente "funzionale" ha relegato le attrezzature in pressione nel mondo delle attrezzature di servizio che comunemente risultano essere quelle oggetto di minor attenzione.

D'altra parte i continui sviluppi ed evoluzioni normative hanno creato un quadro legislativo particolarmente composito che scoraggia e mette in difficoltà le aziende nell'affrontare con sistematicità l'espletamento degli obblighi di legge previsto per l'esercizio di queste attrezzature di lavoro.

Questo articolo si propone di illustrare un caso di studio relativo ad un'importante azienda metalmeccanica: la Leonardo Company S.p.A., che a partire dal 2018 ha messo in campo un significativo sforzo per lo sviluppo di un progetto pilota nello stabilimento di Foggia, afferente alla Divisione Aerostrutture, finalizzato alla messa a punto di un piano dei controlli delle attrezzature a pressione presenti nel sito produttivo.



Figura 1. Immagine di repertorio, tratta dal web, dell'ingresso dello stabilimento di Foggia di Leonardo Company S.p.A.

Il progetto nasce da una evoluzione della visione del management interno che, nel corso del tempo ha sviluppato la necessaria sensibilità verso questo aspetto della sicurezza sui luoghi di lavoro, ciò ha permesso di avviare importanti investimenti volti prima a recuperare la piena compliance e poi a garantirne il mantenimento nel corso del tempo.

2. Il contesto operativo

Nello stabilimento di Foggia, la Divisione Aerostrutture della Leonardo Company S.p.A., realizza gli impennaggi verticali e i deflettori in materiale composito per velivoli di tipo commerciale.



Figura 2. Immagine di repertorio, tratta dal web, della produzione nei fabbricati all'interno del sito di Foggia

Lo stabilimento e i fabbricati si presentano essenzialmente come quelli di un'industria di tipo metalmeccanico dove però gli impianti in pressione ricoprono un ruolo molto particolare. Infatti, oltre ai classici impianti di supporto alla produzione, denominati "impianti generali" o "impianti di servizio", sono presenti importanti attrezzature in pressione che fanno parte del vero e proprio ciclo produttivo.

Ci riferiamo in particolare n°8 impianti per il trattamento termico dei componenti in materiale composito, costituiti ciascuno da un'autoclave in pressione con relativo impianto di generazione e stoccaggio azoto.

Tali impianti sono caratterizzati da attrezzature con importanti e significativi volumi e dimensioni mentre per i livelli di pressione ci si mantiene a dei valori piuttosto bassi.

Per le autoclavi parliamo di volumi che vanno da 5.000 litri fino a 470.000 litri, mentre i serbatoi di stoccaggio sono tutti nel range 70.000-100.000 litri.



Figura 3. Immagine di repertorio, tratta dal web, di una autoclave per trattamenti termici

In totale nello stabilimento sono presenti più di un centinaio di attrezzature in pressione di cui circa il 70% è afferente agli impianti autoclavi che rappresentano un asset strategico per la produzione sviluppata nel sito.

Pertanto gli impianti in pressione sono un importante fonte di criticità dal punto di vista della cosiddetta *Business Continuity* aziendale.

Appare evidente inoltre come tali impianti, facendo parte del processo produttivo, siano soggetti alla pianificazione della produzione e pertanto la loro disponibilità per le necessarie attività di manutenzione e adeguamento sia sempre oggetto di importanti riflessioni e considerazioni tra gli stakeholder aziendali interni, quali: produzione, manutenzione e sicurezza.

3. Obiettivi specifici

Nel corso degli anni, a causa di diverse ragioni, lo stabilimento è ha incontrato sempre maggiori difficoltà nella gestione degli adempimenti in materia di esercizio degli impianti in pressione.

Le ragioni di questo fenomeno, che colpisce molte realtà dell'industria italiana, sono riassunte brevemente di seguito:

- continua evoluzione dei sistemi produttivi che richiedono modifiche degli impianti esistenti o alla realizzazione di nuovi;
- l'avvicendamento di diversi tecnici e operatori nella gestione di tali attrezzature, spesso con carenza nel processo di passaggio di consegna;
- una legislazione in continua evoluzione che specialmente negli ultimi due decenni è stata oggetto di importanti novità e trasformazioni;
- la necessità di mettere sul piatto importanti investimenti per poter adeguare e mantenere gli impianti specialmente nel caso di attrezzature di questa dimensione e importanza.

Pertanto l'obiettivo primario del progetto, fissato dalla direzione aziendale, è stato quello di migliorare la gestione del piano dei controlli delle attrezzature a pressione.

Consci che fosse necessario intraprendere un percorso graduale che tenesse conto sia delle esigenze produttive ma anche della necessità di essere disponibili ad importanti investimenti.

Pertanto il piano di intervento ha previsto sin dalla partenza cinque fasi fondamentali:

1. Esecuzione di una Gap Analysis che per ciascun impianto e attrezzatura in pressione permettesse di individuare:
 - a. Gli adempimenti previsti;
 - b. Lo stato di soddisfacimento di tali adempimenti;
 - c. Le carenze documentali;
 - d. Le carenze impiantistiche o hardware come adeguamenti, tarature, prove in pressione, controlli non distruttivi, ecc.
2. Prioritizzazione degli interventi in funzione del livello di rischio associabili a ciascun impianto o attrezzatura.
3. Pianificazione degli interventi suddivisi in due step:
 - a. Pianificazione di primo livello o di dettaglio per le attività da fare nel breve termine (entro 3/6 mesi);
 - b. Pianificazione di secondo livello per le attività da fare nel medio termine (entro 12/18 mesi).
4. Esecuzione del piano di interventi tramite le attività operative che hanno visto coinvolti importanti funzioni aziendali come la sicurezza e la manutenzione, nonché fornitori esterni che con il loro contributi in termini di competenze, forza lavoro ed esperienza fossero in grado di supportare adeguatamente l'utilizzatore.
5. Incontri periodici per la verifica dello stato di avanzamento del piano di intervento e qualora fossero presenti scostamenti, la ripianificazione delle attività.

6. Approccio sviluppato

Dopo circa 36 mesi dall'inizio delle attività, nonostante i ritardi e le difficoltà dovuti ai 18 mesi di pandemia per il COVID-19, è stata svolta un'analisi da tutti gli attori coinvolti prima di tutto per verificare il livello di compliance raggiunto ma soprattutto per identificare quali sono stati i fattori e gli elementi che hanno permesso di raggiungere i risultati descritti nel successivo paragrafo.

I principali fattori vincenti che hanno caratterizzato il raggiungimento degli obiettivi possono essere riassunti nei seguenti punti.

6.1 Il commitment aziendale

Al primo posto c'è stato il forte commitment da parte dei referenti aziendali, nei settori della sicurezza (EHS) e della manutenzione di stabilimento, che hanno sempre spinto e sostenuto le attività non solo da un punto di vista economico ma soprattutto da un punto di vista di mentalità e di approccio alla tematica delle attrezzature in pressione.

Questo elemento risulta di fondamentale importanza in quanto rappresenta una forte spinta motivazionale per tutti i tecnici che svolgono attività operativa, spingendogli a portare avanti il progetto nei tempi e modi stabiliti.

L'attenzione e il monitoraggio del piano di intervento da parte della dirigenza è una leva fondamentale, oltre al fatto che con il progredire delle attività e con il giungere dei primi risultati positivi si instaura un circolo virtuoso determinante per il proseguo del progetto.

Laddove questo elemento è mancato, l'esperienza ci dice che spesso c'è un decadimento delle prestazioni dei tecnici e fornitori coinvolti e conseguentemente dei risultati in termini di compliance.

6.2 La disponibilità di tutti gli stakeholder coinvolti

Alla forte spinta aziendale si è poi unita la grande disponibilità e competenza di tutti gli attori coinvolti per lo svolgimento delle verifiche: a partire dagli operatori di manutenzione, ai professionisti esterni di supporto alle attività di ingegneria, compresi anche i tecnici degli enti di controllo coinvolti nelle verifiche.

Questo approccio ha permesso all'utilizzatore di avere a disposizione in team di persone attento alle proprie esigenze, pronto ad assicurare il proprio supporto tecnico nell'ottica della sicurezza.

Nonostante l'importante carico di lavoro si è fatta esperienza di un supporto costante e attento anche in momenti delicati quali il periodo estivo o i giorni festivi; permettendo così di ridurre l'impatto sulla produzione delle attività di collaudo più pesanti.

6.3 Tecnologia utilizzata: metodo NDT dell'Emissione Acustica EA

Fondamentale è stata poi la metodologia adottata per lo svolgimento dei collaudi previsti dalle verifiche di integrità dei principali sistemi in pressione dello stabilimento, che sono rappresentati da n°8 impianti autoclavi di importanti e significativa dimensione e di diversi serbatoi di stoccaggio aria/azoto. L'adozione della tecnica delle emissioni acustiche EA, associata alle prove in pressione, ha permesso infatti sia di svolgere i collaudi in pressione garantendo elevati standard di sicurezza grazie all'approccio diagnostico ad elevato valore aggiunto che di analizzare il 100 % della superficie metallica dell'oggetto sottoposto al collaudo (saldature e bocchelli compresi).

I Rapporti di Sicurezza redatti a supporto dell'articolo 15 del D.Lgs. 105/2015 si fondano sull'importanza della capacità previsionale di incidenti con potenziale impatto sia sull'ambiente che sulla salute e sicurezza dell'uomo. Ecco perché, a tal proposito, viene posta una notevole attenzione sulla tematica dell'integrità strutturale delle attrezzature in pressione presenti negli stabilimenti produttivi coinvolti: autoclavi, tubazioni, serbatoi di struttura complessa, semplici contenitori di stoccaggio, reattori, colonne, scambiatori di calore, etc.

A differenza del precedente D.Lgs. 334/99, il D.Lgs. n. 105/2015, in attuazione della Direttiva 2012/18/UE, mette maggiormente in risalto l'attenzione sulla qualità delle verifiche periodiche da svolgere.

In quest'ottica, diventa fondamentale l'utilizzo di soluzioni sempre più all'avanguardia dal punto di vista tecnico ma, nello stesso tempo, in grado di soddisfare **le esigenze di produzione ed esercizio richieste in tutti i settori, specialmente quelle degli stabilimenti in cui ci sono impianti a ciclo continuo.**

Le ispezioni previste dall'art 12 del D.M. 329/04 in occasione dell'integrità decennale sulle attrezzature in pressione, cosiddette tradizionali, consistono in:

- Esame visivo interno ed esterno;
- Esame spessimetrico delle membrane;
- Eventuali ulteriori controlli si rendessero necessari a fronte di situazioni evidenti di danno;
- In caso di non ispezionabilità interna od esterna, integrazione del suddetto piano con prova idraulica a 1.125 volte la pressione di progetto o prova pneumatica a 1.10 volte la pressione di progetto (previa predisposizione di necessarie misure di sicurezza).

La non completa ispezionabilità può essere conseguente alla presenza, su parti rappresentative del recipiente, di masse interne o rivestimenti interni o esterni inamovibili, anche parzialmente, o la cui rimozione risulti pregiudizievole per l'integrità delle membrane o dei rivestimenti o delle masse stesse. La prova di pressione idraulica può essere sostituita in caso di necessità e previa predisposizione da parte dell'utente di opportuni provvedimenti di cautela con una prova di pressione con gas (aria o gas inerte) ad un valore di 1,1 volte la «pressione massima ammissibile» (PS). In tale caso dovranno essere prese tutte le misure previste dal decreto legislativo n. 81/2008 per tale tipo di prova la stessa deve avere una durata minima di due ore durante le quali deve essere verificata l'assenza della caduta di pressione. Pertanto, come chiaramente indicato nella normativa, qualora l'attrezzatura non risulti completamente ispezionabile, anche nei riguardi della sicurezza (cfr. rischio dell'ispezione visiva interna in ambienti confinati e con carenza di ossigeno) e/o possieda rivestimenti interni o esterni inamovibili o che la cui rimozione possa comportare rischi per l'integrità delle membrane (autoclavi con paratia interna, oppure serbatoio tumulato/interrato o provvisto di rivestimento in materiale fire-proofing), l'utilizzatore / proprietario può integrare i controlli previsti e precedentemente riportati con una prova di pressione idraulica o pneumatica. La prova di pressione pneumatica è effettuabile previa predisposizione da parte dell'utilizzatore / proprietario di opportuni e complessi ma doverosi provvedimenti di cautela ai sensi del D.Lgs 81/08.

Risulta chiaro che tale piano di ispezione è, spesso, di difficile attuazione - specie per recipienti di notevole dimensioni o comunque complessi - nonché particolarmente invasivo in termini operativi da parte dell'utente/proprietario dell'attrezzature da collaudare; infatti, per poter eseguire le ispezioni previste per legge sulle attrezzature in pressione, bisognerebbe necessariamente eseguire le seguenti attività:

- Svuotamento e rimozione completa del prodotto in esso contenuto;
- Eventuale bonifica con acqua e relativo smaltimento;
- Visita interna (con conseguente necessità di costruire ponteggi interni in spazi angusti o confinati);
- Rimozione dell'eventuale materiale di coibentazione;
- Visita esterna e spessimetria;
- Riempimento con acqua per preparare il recipiente alla prova idraulica (alternativa alla visita interna o esterna);
- Prova idraulica con successivo svuotamento e smaltimento;
- Realizzazione della prova pneumatica con alti rischi connessi alla pressurizzazione non monitorata (alternativa alla visita interna o esterna o idraulica);
- Riposizionamento del materiale di coibentazione;
- Riempimento e ripristino delle condizioni di esercizio.



Figura 4. Immagini Autoclavi

Ad esempio, considerando quanto prescritto dall'art. 12 del D.M. n° 329 del 01/12/2004) e analizzando le caratteristiche strutturali delle autoclavi, è risultato impossibile eseguire l'esame visivo interno:

- **esame visivo esterno**
- **esame spessimetrico**
- **esame visivo interno** (previa rimozione eventuali pareti interne, coibentazioni esterne, eventuale certificato gas free, preparazione lavori in spazi confinati, etc.)

In sostituzione della visita interna è stato impraticabile (per diverse ragioni e date le caratteristiche dell'attrezzatura stessa) anche eseguire una prova idraulica (1,125 x

Pprogetto)

Dal confronto con i responsabili della sicurezza della Leonardo Spa, è risultato difficile anche la valutazione dell'esecuzione di una semplice prova pneumatica non monitorata (1,1 x

Pprogetto) in quanto bisognava necessariamente pensare all'implementazione di misure di sicurezza molto onerose per mitigare i rischi connessi (POF: e probability of failure e COF: conseguenze of failure) con le pressurizzazioni non monitorate.

Allo stesso modo, considerando sempre quanto prescritto dall'art. 12 del D.M. n° 329 del 01/12/2004) e analizzando le caratteristiche strutturali dei serbatoi di stoccaggio aria/azoto, è risultato complicato con la Leonardo Spa considerare di eseguire un esame visivo interno in quanto si sarebbe dovuto realizzare un ponteggio operando in spazi confinati, operazioni molto complicate dal punto di vista operativo:

- **esame visivo esterno**
- **esame spessimetrico**
- **esame visivo interno** (previa rimozione eventuali pareti interne, coibentazioni esterne, eventuale certificato gas free, preparazione lavori in spazi confinati, etc.)

In sostituzione della visita interna, in tal caso, avremmo potuto eseguire una prova idraulica

(1,125 x Pprogetto) valutata, anche in questo caso, di difficile realizzazione (problema del peso dell'acqua, necessità di asciugare l'acqua prima del riavvio dell'attrezzatura, etc.) e si è scartata, in ultima istanza e come per le autoclavi, l'ipotesi di una semplice prova

pneumatica non monitorata (1,1 x Pprogetto) in quanto bisognava sempre e comunque necessariamente pensare all'implementazione di misure di sicurezza molto onerose per mitigare i rischi connessi (POF: e probability of failure e COF: conseguenze of failure) con le pressurizzazioni non monitorate.

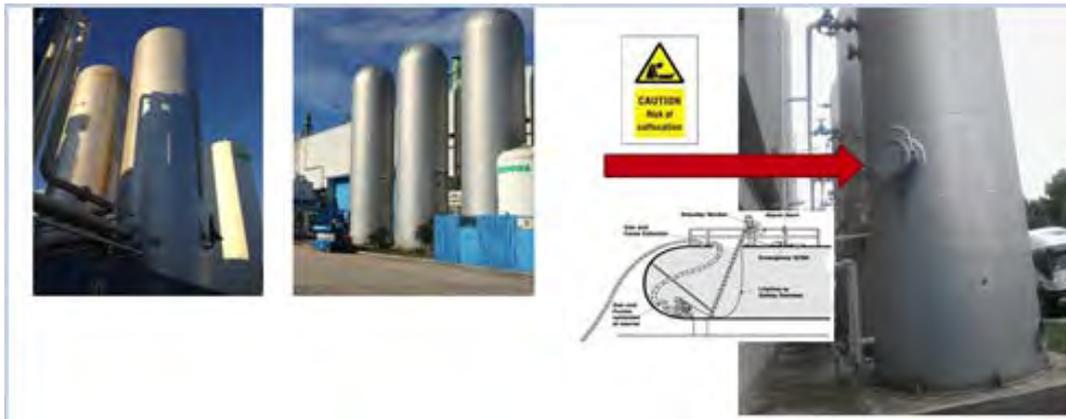


Figura 5. Serbatoi di stoccaggio

TÜV AUSTRIA Italia, in forza dei numerosi test EA nonché dell'esperienza acquisita nel mondo nello svolgimento dei collaudi di integrità sulle attrezzature in pressione con metodologia EA, propone di integrare il suddetto piano di controlli con una prova di pressione pneumatica monitorata con Emissione Acustica fino al raggiungimento una pressione massima pari a 1,1 volte la pressione di progetto. Il controllo con Emissione Acustica (EA), associato alla prova pneumatica, è un metodo di valutazione e monitoraggio non invasivo che permette di individuare e localizzare in anticipo i punti deboli in macchine, recipienti a pressione e atmosferici.

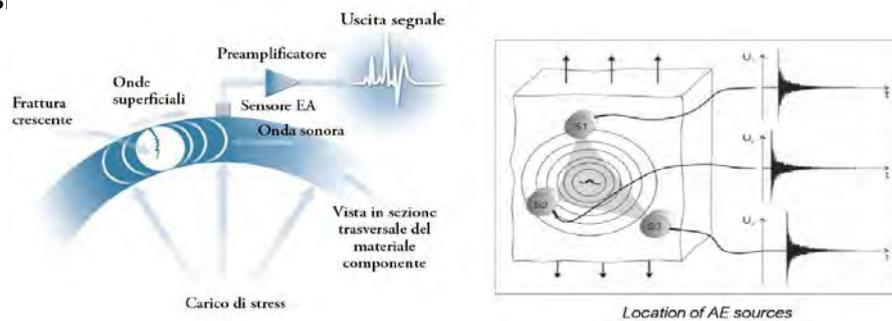


Figura 6. Il metodo dell'emissione acustica EA

Il metodo dell'Emissione Acustica si basa sull'acquisizione, analisi e valutazione dei segnali proveniente dalla membratura della struttura metallica testata durante una fase di pressurizzazione controllata tale da garantire una sollecitazione lenta e continuativa, nonché un tempo di reazione dell'operatore adeguato all'attività registrata sulla struttura analizzata. I sensori EA, scelti in base alle caratteristiche della struttura da analizzare (diametro, lunghezza e tipologia di rivestimento) vengono applicati sulla superficie a distanze prefissate, sulla base del profilo di attenuazione del segnale. Il controllo con Emissione Acustica fornisce un'analisi istantanea completa sulla struttura e sull'integrità dell'oggetto testato. Per l'individuazione e la localizzazione di eventuali danneggiamenti, il controllo con Emissione Acustica ricorre a un principio fisico classico (onde elastiche generate dal materiale sottoposto a sollecitazione) che consiste nell'acquisizione ed elaborazione dei dati attraverso un sofisticato modello tecnologico.

Emissione Acustica EA: una soluzione innovativa

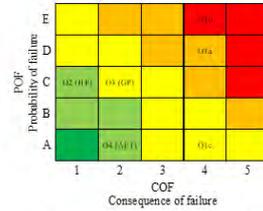
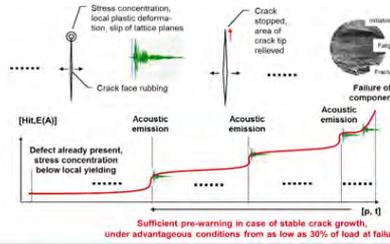
Metodi tradizionali (art. 12 del D.M. n° 329 del 01/12/2004):

- Prova Pneumatica (1,1 x Pp) → assistita da collaudo con EA
- Ispezione visiva esterna
- Controllo spessimetrico



VALORE AGGIUNTO EA:

- Riduzione del rischio connesso allo svolgimento delle prove pneumatiche
- Esecuzione di pressurizzazioni in grado di analizzare dinamicamente lo stato di integrità del materiale di cui sono composte le attrezzature da collaudare.



Risk matrix showing different options for the tests.

- Option 1: "No pressure test or AE-T performed only internal visual inspection and localized NDT"
- Option 2: "Hydraulic pressure test"
- Option 3: "Gas pressure test"
- Option 4: "Acoustic Emission Test"



Figura 7. Implementazione del metodo dell'emissione acustica EA

Normative di riferimento	Tipologia di installazione dell'oggetto di collaudo
<ul style="list-style-type: none"> • D.M. 329/04 • UNI EN 12819:2010 • UNI EN 14584:2013 • UNI EN 13554 • UNI EN 473 • Art. 71 del D.Lgs. 81/08 	Recipienti / Strutture metalliche fuori terra

- Prova Pneumatica (1,1 x Pp) → assistita da collaudo con EA ✓
- Ispezione visiva esterna ✓
- Controllo spessimetrico ✓

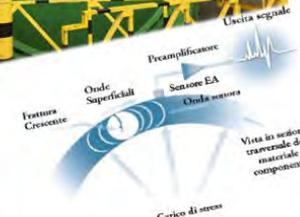
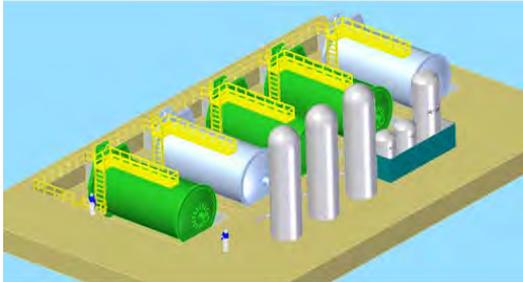


Figura 8. Progettazione del test con metodo dell'emissione acustica EA eseguito su un'autoclave

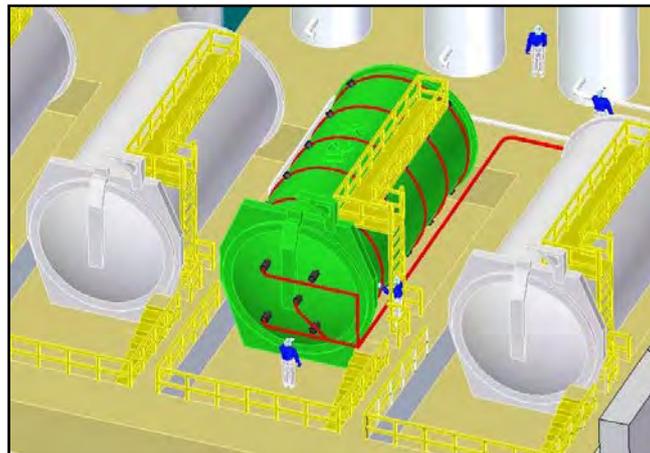


Figura 9. Schema che mostra operatore che applica i sensori EA sulla membratura dell'autoclave

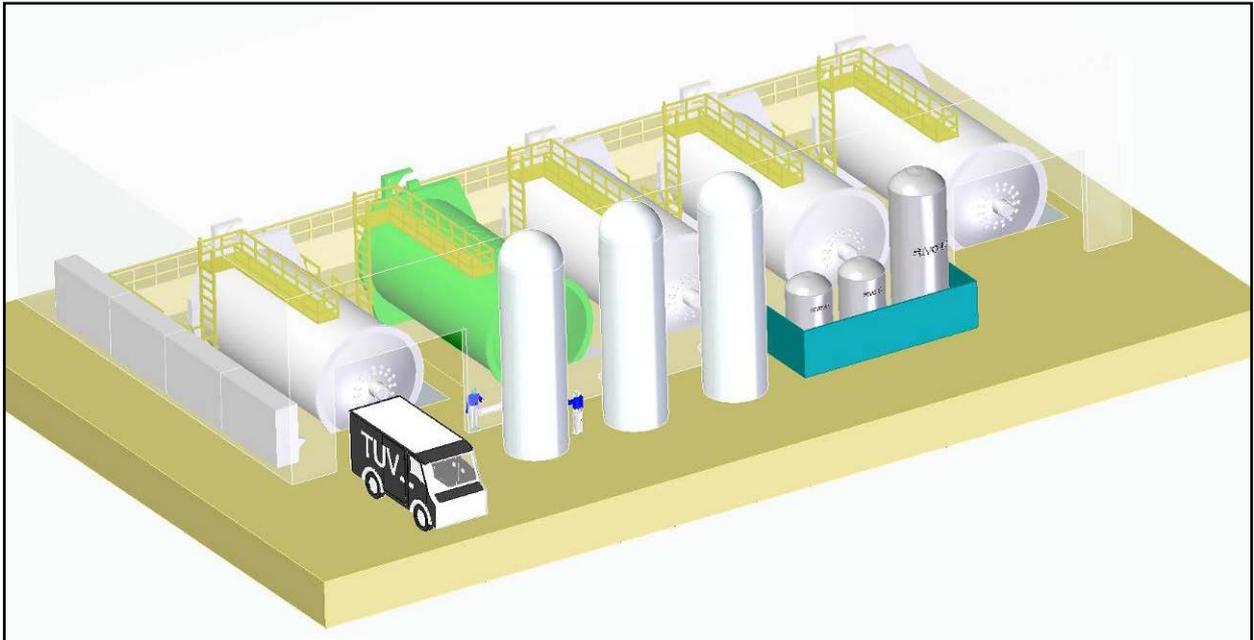


Figura 10. Layout del cantiere con posizionamento laboratorio mobile EA in prossimità dell'autoclave



Figura 11. Esecuzione del test EA sull'autoclave

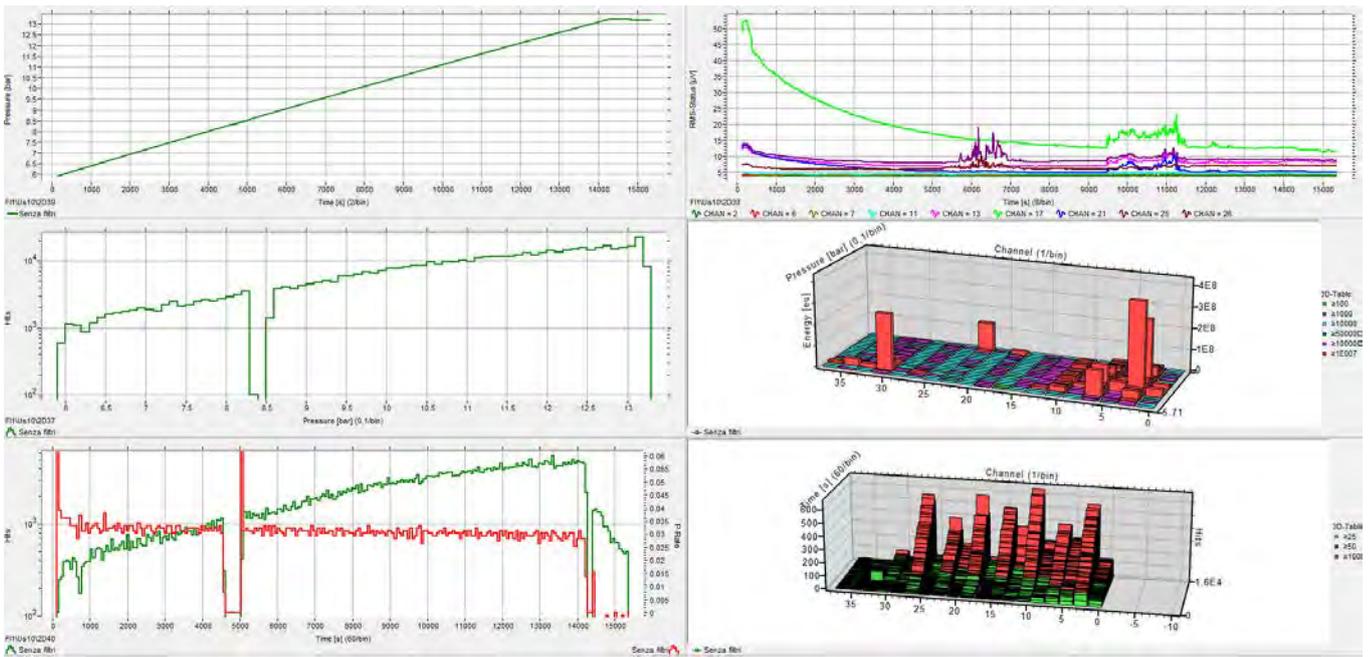


Figura 12. Parametri caratteristici rilevati durante il test EA eseguito sull'autoclave

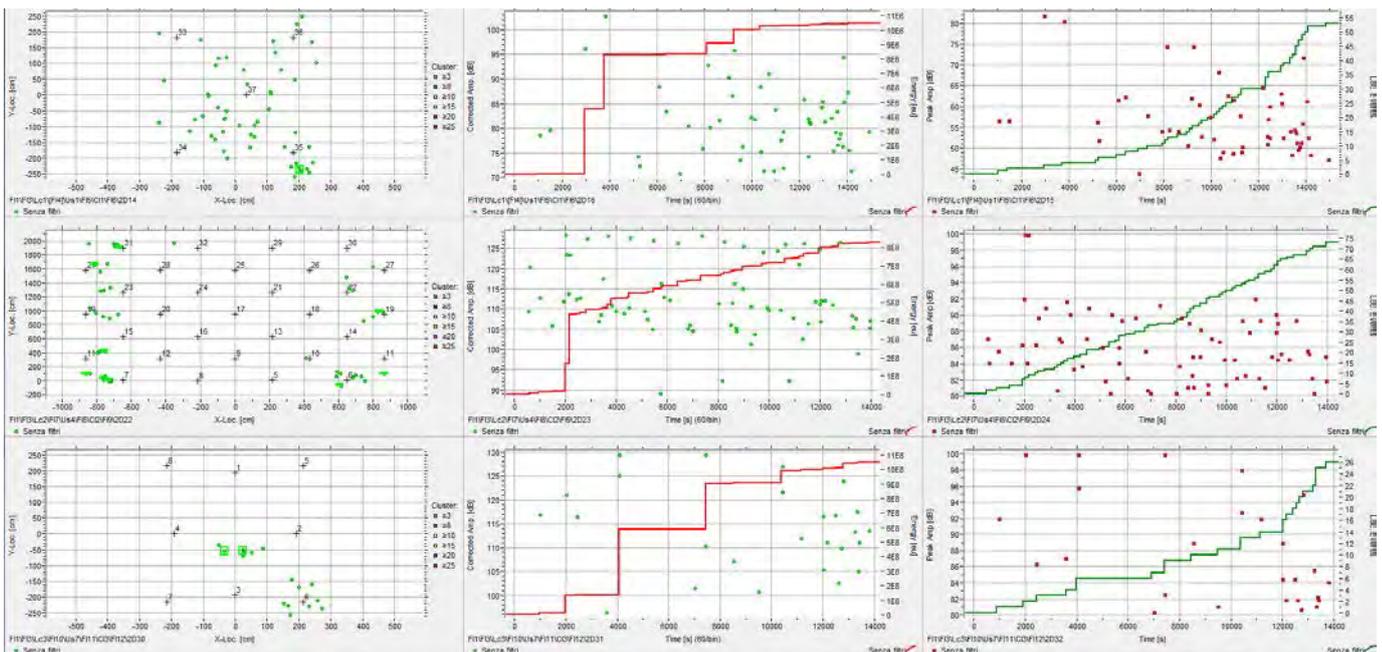


Figura 13. Localizzazione di segnali rilevati durante il test EA eseguito sull'autoclave

I tecnici EA del TÜV AUSTRIA Italia, con livello AT3 e AT2 (in accordo alla norma UNI EN ISO 9712), hanno analizzato istante per istante l'andamento della prova EA e hanno effettuato un'attenta analisi delle indicazioni rilevate: follow-up Inspection on-site - follow-up Inspection off-line.

L'operatore addetto alla pressurizzazione ha garantito al tecnico EA il gradiente di pressione richiesto e ha costantemente monitorato il funzionamento e la sicurezza del sistema di pressurizzazione.

L'esecuzione del Test EA è stata presieduta anche da un Tecnico qualificato dell'Ente Preposto "Soggetto Abilitato" scelto da Leonardo Spa al fine dell'ottenimento del verbale di verifica periodica. Quest'ultimo ha garantito l'esatto svolgimento del collaudo nel pieno

rispetto della norma UNI EN 14584:2013 e ai sensi del D.M. 329/04; di concerto con il tecnico EA - sia prima dell'inizio della pressurizzazione che durante l'esecuzione della stessa - si è altresì accertato dell'esistenza e della funzionalità di tutti i dispositivi di controllo e sicurezza a corredo dello specifico impianto (manometro, valvole di sicurezza ecc. ecc) e, a fine ispezione, ha emesso i relativi verbali di verifica di integrità e di funzionamento della specifica attrezzatura in pressione.

La pressione massima raggiunta durante il test EA (pressione di fine Test EA) è risultata strettamente correlata sia alla pressione di progetto che alla temperatura di progetto della struttura in pressione analizzata.

Tutte le lavorazioni innanzi descritte sono state realizzate da ditte specializzate nel settore e in ottemperanza a tutte le norme e disposizioni vigenti in materia di sicurezza nei luoghi di lavoro. Le autoclavi sono state collaudate in giornate differenti seguendo un cronoprogramma dettagliato fornito alla committente che ha garantito la continuità dell'esercizio delle attrezzature interessate (minimo se non quasi nullo fermo impianto operando quando era più congeniale nel rispetto dei cicli produttivi), garantito l'individuazione, l'analisi e la valutazione dei rischi, e le conseguenti procedure, gli apprestamenti e le attrezzature atti a garantire, per tutta la durata dei lavori, il rispetto delle norme per la prevenzione degli infortuni e la tutela della salute dei lavoratori. La Leonarda Spa ha altresì fatto in modo da rispettare tutte le misure di prevenzione dei rischi risultanti dalla presenza simultanea o successiva di più imprese o dei lavoratori autonomi.

Sin dal 1980, in Europa, una tra le prime applicazioni del metodo dell'Emissione Acustica è stato il collaudo di serbatoi GPL. Da quel tempo in poi sono state sviluppate e pubblicate diverse procedure di ispezione in tutto il territorio Europeo. Infatti in Europa, come in altri continenti, gruppi di lavoro competenti hanno a loro volta sviluppato, sulla base delle evidenze applicative osservate, norme tecniche generali e di prodotto, applicabili al settore del GPL ma anche ad altri settori.

In Italia, dal 2004 è stata recepita mediante un decreto ministeriale, la norma europea EN 12818 permettendo a partire dal 2005 l'esecuzione delle verifiche di integrità con Emissione Acustica per i soli serbatoi GPL interrati di capacità fino a 13 m³. Per tutte le altre tipologie di serbatoi, specie quelli con capacità maggiore di 13 m³, deve esser applicato il D.M. 329/04 e il piano di ispezioni previsto dal suo art. 12 precedentemente analizzato; piano di ispezioni che, come previsto dallo stesso articolo 12, può essere integrato da altre tecniche NDT come l'emissione acustica.

Le norme europee **UNI EN 12819:2010** - Ispezione e riqualificazione serbatoi interrati per GPL di capacità maggiore di 13 m³ – e la **UNI EN 14584:2013** - Prove non distruttive , Prova di emissione acustica , Ispezione di attrezzature a pressione metalliche durante la prova di accettazione , Localizzazione planare delle sorgenti di EA - consentono di utilizzare validi criteri di valutazione dello stato dei recipienti in pressione basati su segnali originati da sorgenti EA che sono localizzati sulla membratura in esame mediante processi di localizzazione lineare o planare e raggruppati in specifiche aree (cluster) di dimensione definita.

Le caratteristiche del controllo basato sul metodo delle Emissioni Acustiche EA, consentono di realizzare pressurizzazioni controllate (con conseguente riduzione del rischio connesso alle pressurizzazioni stesse) assistite da un valido e avanzato criterio di valutazione dello stato dei recipienti (in pressione e non); il test EA risulta essere non invasivo, consente di analizzare lo stato di conservazione di aree molto estese in modo dinamico e permette di avere una precisa localizzazione delle indicazioni (potenziali difetti) per un rapido e opportuno follow-up.

Inoltre, importante sottolineare che l'INAIL, con riferimento all'articolo 64-bis, comma 3, del decreto-legge 16 luglio 2020, n. 76 recante "Misure urgenti per la semplificazione e l'innovazione digitale" convertito, con modificazioni, dalla legge 11 settembre 2020, n. 120,

ha pubblicato la procedura per lo svolgimento dei controlli dei serbatoi per GPL interrati, tumulati (o ricoperti) e fuori terra di capacità superiore a 13 m³ mediante metodo di Emissione Acustica EA ai fini della verifica di integrità.

L'utilizzo del metodo delle Emissioni Acustiche (EA) è caratterizzato da un elevato grado di sicurezza intrinseco degli operatori i quali non devono più entrare all'interno dei recipienti e operare in condizioni non sempre ottimali (spazi confinati o angusti, recipienti sporchi all'interno, scarsa visibilità, etc).

6.4 L'innovazione dei processi

Ultimo fattore, ma non per importanza, è stato lo sviluppo del progetto adottando i criteri dell'industria 4.0 in ottica di efficacia ed efficienza delle azioni intraprese.

L'utilizzatore, per il coordinamento e la gestione del progetto, si è affidato alla piattaforma PELM (Pressure Equipment Life Cycle Management) che rappresenta un importante strumento di integrazione e gestione delle informazioni nato e sviluppato appositamente per la gestione del rischio delle attrezzature in pressione.

Tale piattaforma, associata ai relativi servizi di ingegneria e consulenza, presenta oltre ai contenuti base dei comuni sistemi informativi (anagrafica, gestione documentale tramite digitalizzazione, scadenziario, ecc), importanti innovazioni in termini di geolocalizzazione e identificazione delle attrezzature, implementazione di specifici strumenti di analisi dei rischi, ma soprattutto una reale integrazione con i mobile device più comuni.

Si riportano di seguito le principali fasi del progetto andando ad identificare le innovazioni introdotte:

- Durante l'attività di Gap Analysis è stato eseguito in parallelo l'identificazione e mappatura di tutte le attrezzature in pressione presenti nello stabilimento. La mappatura ha visto anche l'introduzione di due importanti novità tecnologiche riguardo le attrezzature in pressione: la georeferenziazione su mappa satellitare e l'apposizione di un QRCode per l'identificazione locale tramite dispositivo mobile. Avendo deciso di svolgere il progetto in questa veste, tali attività sono state portate avanti parallelamente beneficiando un importante efficientamento sia in termini di tempi che costi.



Figura 14. Immagine di repertorio della piattaforma PELM per la georeferenziazione delle attrezzature in pressione

- Raccolta documentale e implementazione della piattaforma di gestione delle attrezzature. Tale strumento rappresenta il repository di tutte le informazioni e dati relativi alle attrezzature in pressione: libretto, dichiarazioni di conformità, disegni, report controlli non distruttivi, report ispettivi, verbali, ecc. Questo strumento è di immediata consultazione sia tramite computer che grazie a qualsiasi dispositivo mobile. Pertanto non è più stato necessario stampare ed archiviare la documentazione cartacea ma grazie all'utilizzo del QRCode se si è in campo o direttamente dalla propria postazione desktop è possibile consultare tutte le informazioni necessarie per la gestione delle attrezzature.

- Monitoraggio dell'avanzamento del progetto e dei risultati in tempo reale tramite un'apposita sezione della piattaforma.
- Pianificazione delle attività eseguita tramite lo scadenziario presente nella piattaforma che permette di valutare sovrapposizioni ed eventuali precedenza legate alla struttura degli impianti.

Questo strumento che rappresenta una significativa innovazione tecnologica nel panorama di gestione delle attrezzature e di impianti in pressione, associata all'attività di assistenza tecnica del fornitore ha reso possibile raggiungere gli obiettivi designati del progetto in maniera efficiente ed efficace.

7. Risultati ottenuti

I fattori descritti nel paragrafo precedente sono da considerarsi a tutti gli effetti gli elementi determinanti che hanno permesso lo sviluppo di un progetto che, nell'arco di 24 mesi, è stato in grado di raggiungere la piena compliance delle attrezzature e impianti in pressione dello stabilimento con un approccio che ne favorirà il mantenimento nel corso del tempo.

Quello appena descritto rappresenta il risultato principale nonché obiettivo della direzione aziendale, oltre a questo però è stato possibile:

- innanzitutto sviluppare maggiore consapevolezza negli operatori della manutenzione in merito agli obblighi di legge in materia di sicurezza e salute degli impianti in pressione;
- inoltre, visto proprio l'ottimo riscontro in termini di risultati nel corso degli ultimi mesi, si è deciso di prolungare il progetto per ulteriori 36 mesi estendendolo anche alle attrezzature di sollevamento.

Quest'ultima scelta garantirà un'omogeneità di approccio nella gestione della sicurezza di esercizio di queste attrezzature di lavoro.

8. Conclusioni

L'esperienza appena descritto mette in evidenza come anche in contesti difficili laddove tutti gli attori interessati collaborano con obiettivi comuni, si riescono a raggiungere risultati particolarmente sfidanti.

Il caso di studio dello stabilimento di Foggia vuole inoltre rappresentare un progetto pilota che nei prossimi mesi sarà esteso anche ad altri stabilimenti del gruppo Leonardo, con l'obiettivo di garantire la piena compliance nell'esercizio delle attrezzature ed in impianti in pressione.

9. Bibliografia

[1] D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81 (Testo coordinato con il D.Lgs. 3 agosto 2009, n. 106) -

Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro: Attuazione dell'articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.

[2] D.M. 1 Dicembre 2004, n. 329 - Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.

[3] D.M. 11 aprile 2011 - Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo.

[4] Decreto Legislativo 25 febbraio 2000, n. 93 – In attuazione della Direttiva Europea 97/23/CE in materia di attrezzature in pressione come modificato dal D.Lgs n°26 del 15/02/2016.

- [5] Ahuaja M.K. & Carley K.M. 1999, Network Structure in Virtual Organizations, *Organization Science*, Vol. 10, No. 6.
- [6] Gulati R., Nohria N. & Zaheer A. 2000, Strategic networks, *Strategic Management Journal*, 21, pp. 203-215.
- [7] Bangemann, T., Rebeufet, X., Reboul, D., Schulze, A., Szymanski, J., Thomesse, J.P., Thron, M., and Zerhouni, N. (2006). PROTEUS – Creating distributed maintenance systems through an integration platform. *Computers in Industry*, vol. 57, pp. 539-551.
- [8] Kiritsis, D. (2004). Ubiquitous product lifecycle management using product embedded information devices. *Proceedings of International Conference on Intelligent Maintenance Systems (IMS 2004)*.
- [9] Camarinha-Matos, L. and Afsarmanesh, H. (2004). Collaborative networked organizations: a research agenda for emerging business models. Springer-Verlag, London Berlin Heidelberg.
- [10] Camarinha-Matos, L. and Afsarmanesh, H. (2007). Comprehensive modeling framework for collaborative networked organizations. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 18 (5), pp. 529-542.
- [11] Tucci, M., Rapaccini, M., De Carlo, F., Borgia, O. (2008). New Maintenance Opportunities in Legacy Plants. 9th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems Szczecin, Poland, 9-10.10.2008.
- [12] Rapaccini, M., Visintin, F., Borgia, O., and De Carlo, F., (2008). Providing industrial maintenance services through a virtual enterprise network: the e-Meccanica project. *Proceeding of APMS2008, International Conference on Innovation in Networks*, 14-17 September Espoo, Finland.
- [13] UNI EN 16991:2018 - Quadro di riferimento per le ispezioni basate sul rischio.
- [14] Biancolini M & al. SmartBench: quando la sicurezza negli stabilimenti industriali diventa Smart. *Analisi e Calcolo*. N. 86. Maggio/Giugno 2018.
- [15] Testoni N., Aguzzi C., Arditi V., Zonzini F., De Marchi L., Marzani A., Salmon Cinotti T. (2018). A sensor network with embedded data processing and data-to-cloud capabilities for vibration based real-time SHM (in press *Journal of Sensors* May 2018).
- [16] Vianello C., Milazzo M.F., Guerrini L., Mura A., Maschio G. (2016). A risk-based tool to support the inspection management in chemical plants. *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*, vol. 41, p. 154-168, ISSN: 0950-4230.

Rischi nell'esercizio delle vasche di impregnazione cavi. Esperienze operative di una ditta produttrice.

C. De Toro¹, O. Di Donato¹, G. Galasso², P. Visingardi², D. Salzano³

¹ Inail - Uot di Avellino

² Prysmian Power Link

³ Workin'626

1. Premessa

Il presente studio si propone di analizzare i rischi legati alla fase di "impregnazione" dei cavi elettrici con miscela di oli e resine, che avviene in vasche toroidali rotanti di notevole diametro collegate a sistemi di alimentazione e regolazione, scambiatori, vasi di espansione, impianti di degasaggio, evaporatori e polmoni ad aria compressa. L'analisi viene svolta con particolare riferimento al rischio di superamento sia della pressione massima che della temperatura massima ammissibili di ciascuna attrezzatura componente l'insieme.

2. Introduzione

Negli ultimi anni si è registrato un crescente interesse verso i cavi sottomarini da parte dei principali operatori nel settore della trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica. Questa soluzione, pur essendo probabilmente quella a più alto costo, presenta notevoli vantaggi in quanto consente di superare più facilmente i numerosi vincoli e impedimenti presenti sul territorio.

In Italia, tra il 2008 e il 2010 è stato realizzato, in sostituzione di quello esistente, il nuovo collegamento sottomarino tra il continente e la Sardegna con cavi in corrente continua.

L'incremento delle installazioni di parchi eolici offshore, inoltre, ha comportato una crescente richiesta di cavi sottomarini per il trasferimento dell'energia prodotta alla terra ferma. L'utilizzo di cavi marini non è storia recente; il primo cavo sottomarino al mondo fu posato nel 1848 dai Borboni del regno di Napoli tra l'isola di Ponza ed il promontorio del Circeo, per poi proseguire il collegamento in linea aerea verso la fortezza di Gaeta. Tale cavo, sebbene destinato al servizio telegrafico, deve essere a pieno titolo considerato il precursore dei cavi sottomarini destinati alla trasmissione dell'energia quantomeno per le tecnologie di isolamento adottate.

3. Generalità sui cavi elettrici

Il cavo elettrico è l'insieme di conduttori, isolanti, guaine e armature di protezione o di schermatura, specificatamente costruito per convogliare la corrente elettrica sia ai fini del trasporto dell'energia che della trasmissione dei segnali.

I cavi elettrici possono essere classificati:

- a) in funzione della tensione di esercizio;
- b) in funzione del tipo di isolante impiegato;
- c) in funzione della loro utilizzazione;
- d) in base al numero delle anime;
- e) in base al loro comportamento al fuoco.

3.1 Il cavo isolato con carta impregnata

Prendiamo in considerazione nello specifico i cavi con isolamento in carta impregnata.

La rigidità dielettrica della carta secca è piuttosto scarsa, dell'ordine di pochi kV/mm, per cui, per possedere i requisiti necessari per un buon isolamento, la carta deve essere impregnata con sostanze opportune.

La carta usata nell'isolamento dei cavi deve essere di pura cellulosa per possedere qualità elettriche soddisfacenti e proprietà assorbenti tali da assicurare un perfetto impregnamento. Per diminuire le perdite dell'isolante, la carta viene lavata con acqua demineralizzata e deionizzata, allo scopo di eliminare le eventuali impurezze. Gli impregnanti più usati per la carta sono gli olii; impiegando questo tipo di materiale e utilizzando particolari tecniche di lavorazione (la essiccazione per eliminare l'umidità residua della carta e l'impregnazione sottovuoto per evitare eventuali occlusioni gassose che costituirebbero spazi ionizzabili e quindi provocherebbero una rapida degradazione elettrica del cavo) si ottiene il materiale isolante migliore.

Il processo produttivo del cavo con isolamento in carta impregnata parte dal **travaso** dei componenti elementari del conduttore dalle bobine del fornitore alla macchina della linea cordatrice, in cui si realizza la corda conduttrice attraverso la **cordatura** di due o più conci di rame. L'isolamento del cavo in carta impregnata viene realizzato con la **nastratura**, mediante una fasciatrice, cioè l'applicazione di successivi strati di carta fino a raggiungere con la carta stessa uno spessore di isolante dipendente dalla tensione di esercizio del cavo; seguono quindi l'**essiccamento** della carta e l'**impregnamento** del cavo con olio fluido o miscele olio-resina. A protezione dell'isolante sul cavo impregnato viene estrusa una guaina di piombo, a sua volta protetta da una guaina di politene isolante applicata tramite una trafilatura continua. Infine, viene applicata un'armatura a piattine e/o a fili per la protezione esterna del cavo. A cavo ultimato, si eseguono prove elettriche per verificare l'integrità dell'isolante e la resistenza elettrica del conduttore.

3.2 La fase di impregnazione del cavo

Per l'impregnazione il cavo viene adagiato all'interno di una vasca toroidale (Figura 1), posta fuori terra, su ruote e binari circolari ed azionata da un riduttore a pignone. Alla vasca vengono collegate le tubazioni di tre circuiti, strettamente correlati tra loro, destinati al trattamento della miscela utilizzata per l'impregnazione e il trattamento dei fluidi riscaldanti/refrigeranti circolanti nei serpentine presenti nel corpo della vasca d'impregnazione; questi ultimi rappresentano i veri e propri circuiti a pressione dell'apparecchiatura.



Figura 1. Vasca d'impregnazione

Preliminarmente si procede:

- al riscaldamento del coperchio e delle tubazioni vuote con acqua fino a 150 °C (per evitare condensa vapore acqueo);
- al riscaldamento del conduttore, facendo passare corrente continua al suo interno;
- alla chiusura della vasca;
- alla realizzazione di un vuoto spinto per la disidratazione della carta.

Si passa poi:

- all'immissione nella vasca della miscela impregnante, preventivamente degassata per eliminare dalla miscela i gas e gli incondensabili in essa presenti;
- al riscaldamento della miscela a 120÷140 °C, mantenendola in tali condizioni per un tempo prestabilito;
- al raffreddamento della miscela impregnante, portandola dalla temperatura di 120÷140 °C a temperatura ambiente.

Il riscaldamento ed il raffreddamento della miscela impregnante si ottengono facendo circolare acqua surriscaldata o acqua industriale/acqua refrigerata in una serie di serpentini meccanicamente integrati alla vasca.

L'intero ciclo del processo ha una durata di circa 1÷2 mesi, in funzione della tipologia del cavo in trattamento.

Lo schema di principio delle fasi del processo è schematizzata in Figura 2.

Lo schema fa riferimento alle attività svolte presso l'azienda presso la quale si sono svolte le attività oggetto della presente memoria.

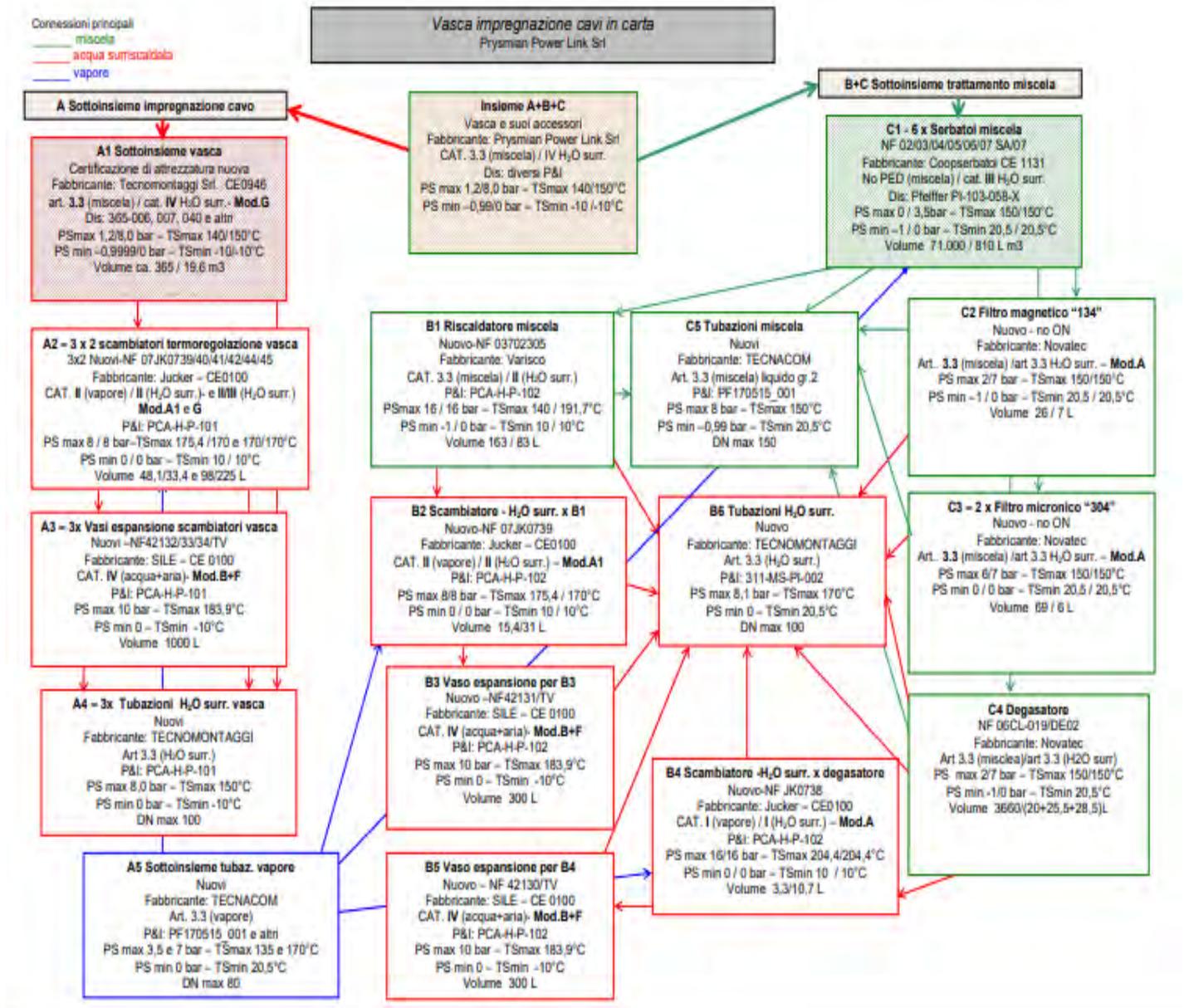


Figura 2. Schema del processo produttivo

4. Analisi dei rischi

L'analisi dei rischi viene svolta con particolare riferimento al rischio di superamento della pressione massima e della temperatura massima ammissibili di ciascuna attrezzatura componente l'insieme.

Si tratta in sostanza di verificare se e quali sicurezze occorra applicare per garantire il mantenimento dei parametri di pressione e temperatura dell'acqua surriscaldata in tutti i circuiti entro i valori massimi delle singole attrezzature.

In particolare il valore di **TSmax** presente nel circuito dell'acqua surriscaldata è di **150 °C** (serpentine vasca, serbatoi e filtri) con un valore di **PS** di **8,0 barg**.

Lo schema termodinamico in una generica condizione di lavoro del ciclo è rappresentato nella successiva Figura 3.

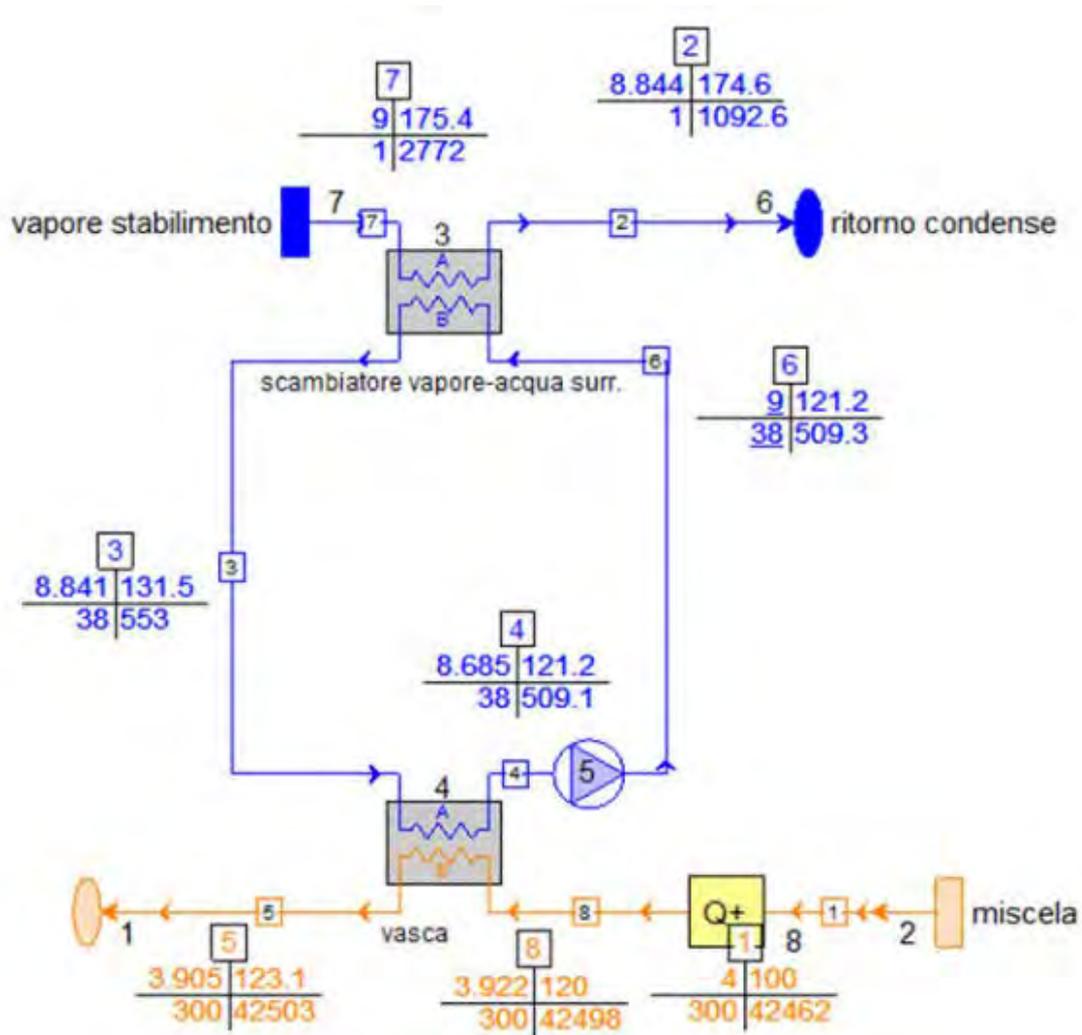


Figura 3. Schema termodinamico della vasca e dei suoi accessori.
Una condizione di progetto.

I valori delle pressioni, di questo e degli schemi successivi, sono da intendersi assoluti. In tale schema lo scambiatore superiore (3) rappresenta lo scambiatore vapore/acqua surriscaldata, mentre lo scambiatore inferiore (4) rappresenta la vasca nella parte inferiore e i serpentine nella parte superiore. Il componente indicato con Q+ serve solo ai fini del calcolo per impostare la temperatura lato parete vasca.

Si tratta di stabilire se in condizioni di stabilizzazione (temperature alle utenze elevate) e di mancato controllo (innalzamento della portata vapore) si possano raggiungere i valori critici.

Gli scambiatori sono dimensionati per le condizioni di lavoro del sistema ed hanno quindi una ben precisa configurazione termodinamica.

La loro capacità di scambio è quindi definita dalla loro superficie e dalle condizioni dei fluidi che si trovano a monte ed a valle degli scambiatori.

In Figura 4 è rappresentata la condizione di raggiungimento della temperatura massima della miscela.

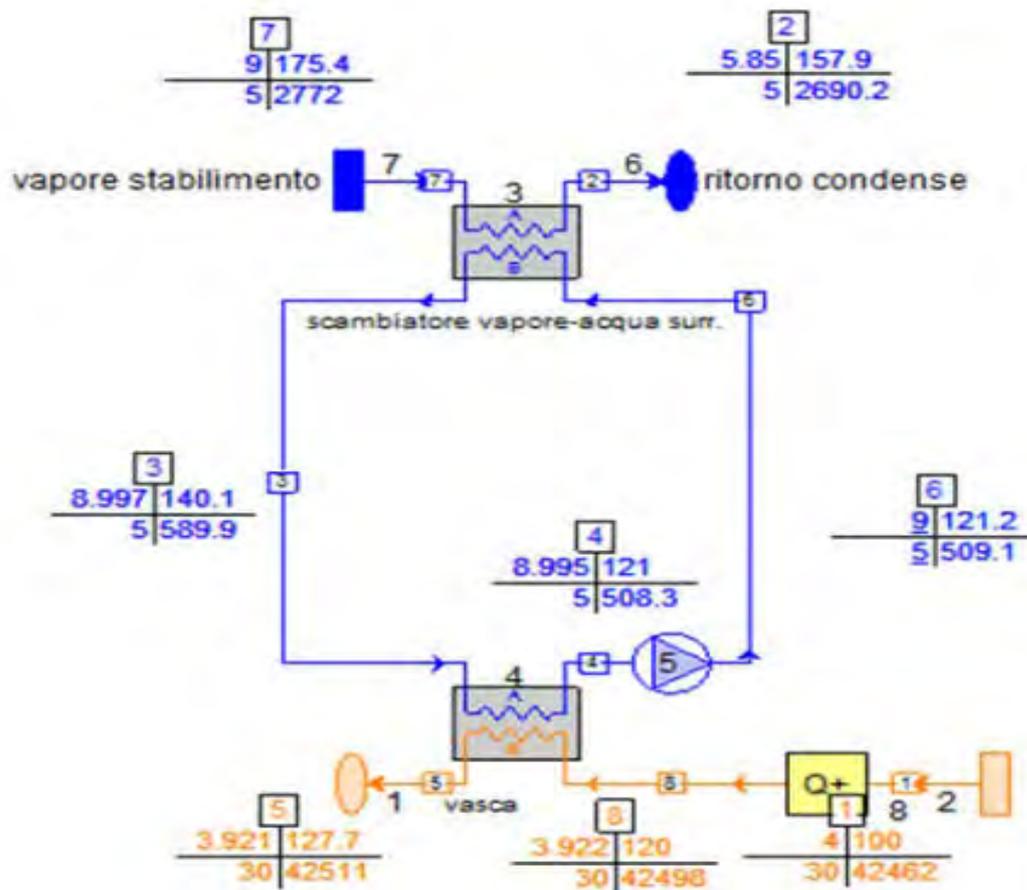


Figura 4. Schema termodinamico della vasca e dei suoi accessori.
Condizione fine riscaldamento.

Si è simulata una riduzione di circolazione dell'acqua surriscaldata che porta ad elevato salto termico nello scambiatore inferiore e una portata di 2 t/h di vapore, superiore al valore di 1 t/h progettuale. Anche in tale situazione la temperatura massima dell'acqua surriscaldata è di 140,1°C.

I grafici di Figura 5 mostrano invece l'andamento della temperatura dell'acqua surriscaldata (in rosso) al variare della portata della stessa e per due differenti temperature della miscela in ingresso allo scambiatore: 100°C nel grafico superiore e 120°C nel grafico inferiore.

Emerge che con portata di vapore superiore a quella progettuale e portate d'acqua surriscaldata decisamente inferiori alla progettuale (38 t/h) non si raggiungono valori critici di temperatura nel circuito acqua surriscaldata.

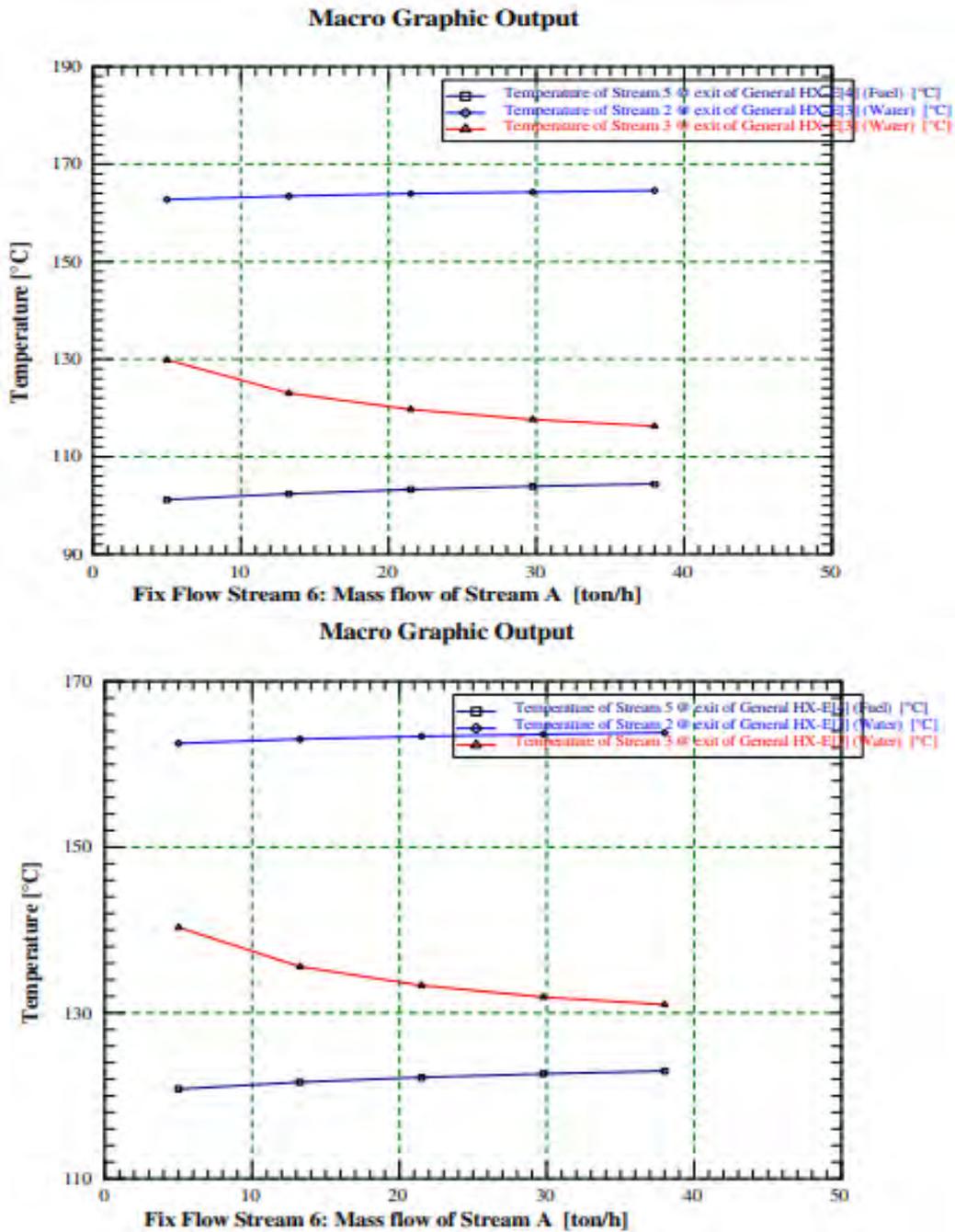


Figura 5. Andamento temperatura acqua surriscaldata al variare della sua portata

Analoga verifica è stata fatta, sempre ad elevata portata di miscela, al variare della portata vapore per le stesse due temperature di miscela.

Dall'analisi della Figura 6 si evince che la temperatura dell'acqua surriscaldata (in rosso) non raggiunge valori critici anche con portate di vapore nell'intervallo da 0,5 a 5 t/h. Il sistema diventa "autostabilizzante" in quanto le maggiori portate vapore portano a difficoltà di condensazione nella superficie, relativamente ridotta, dello scambiatore. Il vapore esce quindi non condensato avendo scambiato poco del suo potenziale.

Infine si è simulata la condizione di raggiunto regime riducendo a 30 t/h la portata di miscela che simula le dispersioni del trattamento.

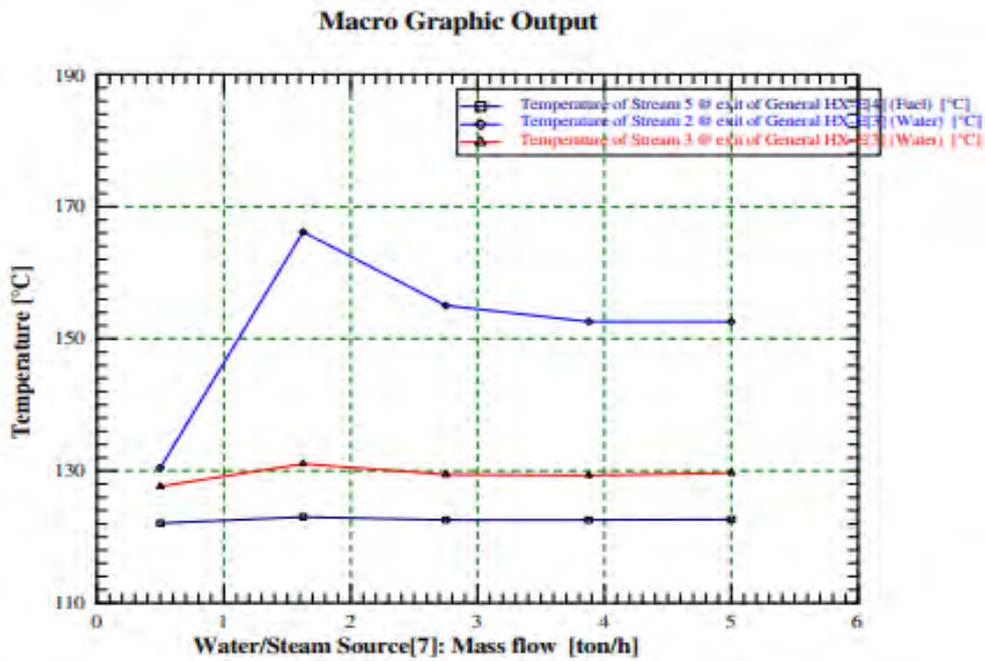
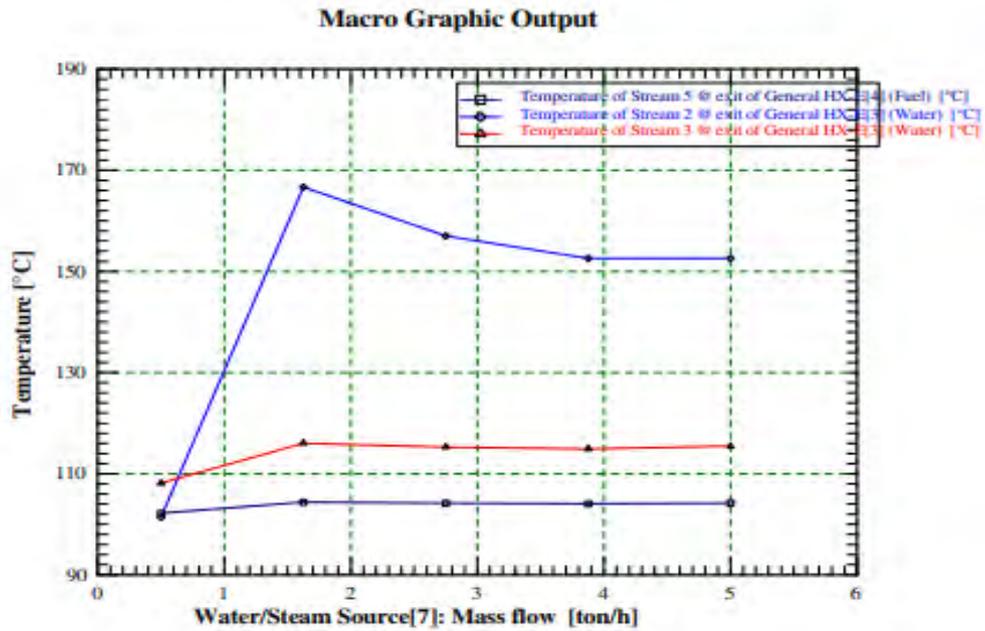


Figura 6. Andamento temperatura acqua surriscaldata al variare della portata vapore.

In Figura 7 è riportato invece l'andamento a portata nominale dell'acqua surriscaldata (38 t/h) e temperatura ridotta della miscela (100 °C).

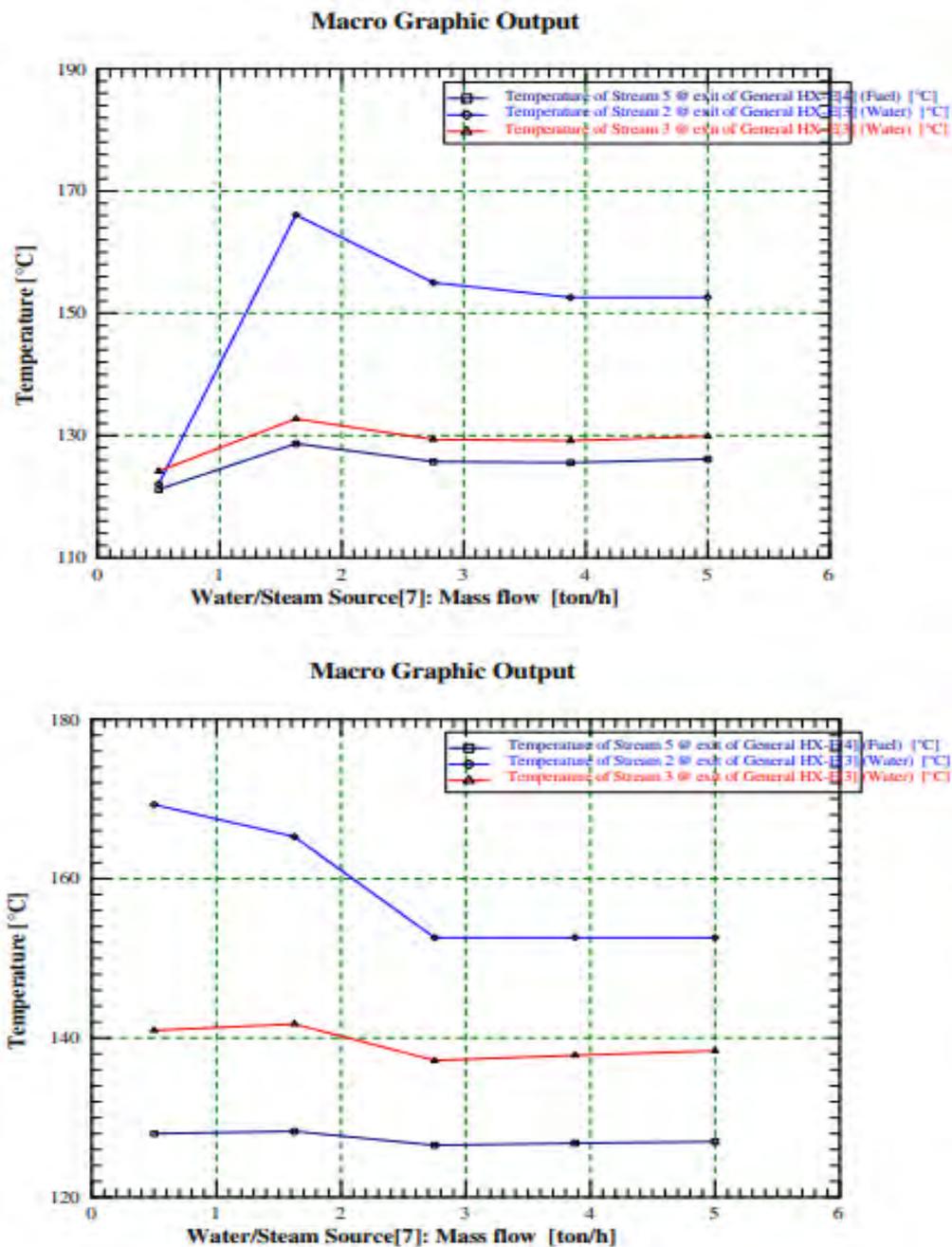


Figura 7. Andamento temperatura acqua surriscaldata al variare della portata vapore

Nella curva inferiore è riportato l'andamento con portata ridotta dell'acqua surriscaldata (5 t/h) e alta temperatura della miscela (120 °C).

Anche in questo caso il circuito acqua surriscaldata non raggiunge valori critici.

Si può pertanto concludere che il sistema è in sicurezza senza bisogno di limitatori di temperatura.

Per quanto riguarda la pressione, poiché quella del circuito a valle è inferiore a quella del circuito a monte e poiché le temperature che si raggiungono (140-145 °C) sono quelle di una saturazione a pressione non superiore a 4,1 barg, si può ritenere che, avendo una PS minima di 8 barg (scambiatore lato vasca), **il circuito risulti in sicurezza anche senza limitatori di pressione.**

Infatti la catena della pressione è:

- vapore di stabilimento con pressione massima 8 barg (da PSV di caldaia)
- fascio tubiero scambiatore caldo 16 barg
- mantello scambiatore caldo 8 barg
- fascio tubiero e mantello scambiatore freddo 8 barg
- vasca lato serpentini 10 barg, ma controllata in temperatura con valori che, alla saturazione, corrispondono a 4,1 barg.

L'insieme è quindi protetto dalle valvole di sicurezza della centrale termica.

I serbatoi hanno i serpentini alimentati direttamente con il vapore di stabilimento, ridotto da opportuno gruppo di riduzione alla pressione di 3,5 barg e protetti da valvola di sicurezza capace di scaricare l'intera portata di vapore prodotto.

5. Conclusioni

Risulta evidente, in base a quanto riportato nel presente studio, che la qualità del prodotto finito ed in particolare delle caratteristiche del cavo sono determinate dal controllo dei valori di portata, temperatura, pressione e condizioni di vuoto nelle diverse fasi operative, come descritte sommariamente.

Parametri il cui controllo e monitoraggio non possono esulare dalla contemporanea necessità di garantire le condizioni di sicurezza degli operatori impegnati nel controllo del ciclo lavorativo e delle altre attività al contorno.

6. Bibliografia

[1] Direttiva 2014/68/UE

[2] D.Lgs. 25 febbraio 2000 nr. 93

[3] DM 329 del 1 dicembre 2004

[4] D.Lgs 9 aprile 2008 nr. 81 e s.m.

[5] Università Mediterranea Reggio Calabria DIIES Materiale Didattico

Adeguamento industria 4.0 di un impianto di multifase gas-liquido per il miglioramento dei livelli di sicurezza e manutenzione

G. Mazzuto¹, M. Orteni¹, F. Di Carlo¹, A. Ferraro², L. Tomassini², M. Pirozzi,² L. Di Donato²

¹ Dipartimento Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche, Università Politecnica delle Marche

² Inail – Dit

Sommario

L'applicazione del paradigma di Industria 4.0 può portare molti benefici in vari settori, dall'efficienza alla sicurezza. Tuttavia, questa transizione comporta l'adozione di tecnologie e macchinari avanzati con un alto livello di digitalizzazione e comunicazione a volte insostenibili per molte aziende. L'adeguamento del vecchio macchinario/impianto può rappresentare una valida alternativa alla sostituzione. In questo lavoro, viene proposto l'adeguamento, in termini di sicurezza e manutenibilità, di un impianto di processo di estrazione di gas o petrolio da un giacimento con pressione interna minore di quella di trasporto, sfruttando un secondo giacimento la cui pressione interna è superiore a quella di trasporto. Si è sfruttato l'approccio Digital Twin e tecniche di Deep Learning per prevedere e rilevare guasti futuri tramite il monitoraggio e controllo dell'impianto per aumentare le condizioni di sicurezza dell'operatore, creando alert e istruzioni operative per avviare/impedire determinati funzioni/movimenti. Sono stati adeguati anche i sensori posti nell'impianto, per la raccolta e l'invio di dati ad una unità centralizzata costituita da una piattaforma software che consente, oltre al controllo del sistema, di simulare scenari futuri per i processi ad alto rischio per gli operatori. Ove possibile ed utile, i sensori sono stati dotati di architetture per l'elaborazione immediata del segnale alleggerendo la piattaforma centrale e rendendo il componente, uno smart sensor.

Nel presente articolo si intende illustrare come, con investimenti limitati, sia possibile la trasformazione di un vecchio impianto in un impianto intelligente in grado di comunicare rapidamente con gli operatori.

1. Introduzione

L'Industria 4.0, nota anche come la quarta rivoluzione industriale, è la naturale conseguenza della terza rivoluzione industriale [1]. Si basa principalmente su due fattori: Internet of Things and Services (IoT) e Cyber-Physical Systems (CPS) [2]. Il paradigma Industria 4.0 mira a garantire alle imprese vantaggi in termini di agilità organizzativa, efficienza ed efficacia organizzativa, redditività, innovazione, produttività, costi di manutenzione [3], sicurezza e qualità dei prodotti, esperienza del cliente e benefici ambientali e sociali [4, 5]. L'implementazione delle tecnologie caratterizzanti l'Industria 4.0 non è semplice e presenta spesso potenziali problemi, in particolare per le Piccole e Medie Imprese (PMI). Tali problemi possono includere disponibilità limitata di risorse finanziarie, conoscenze limitate e scarse competenze tecnologiche [6]. Inoltre, anche se l'utilizzo di tecnologie come IoT e CPS migliorasse la qualità e la sicurezza del prodotto e del processo, potrebbero emergere nuovi rischi legati alla cybersecurity [7]. Le PMI, che costituiscono il 90% delle industrie europee [8], sono quelle che incontrano maggiori difficoltà nell'implementazione di Industria 4.0. Considerando che gli impianti di processo hanno spesso una vita utile che supera i 20 anni, in molti casi può essere sconveniente dal punto di vista economico sostituire il vecchio impianto con un impianto di nuova generazione pensato per Industria 4.0 [9]. A tal proposito sarebbe utile valutare un intervento di retrofitting. Il retrofitting migliora la precisione, il

consumo energetico, il livello di sicurezza, la manutenibilità e la facilità d'uso di un vecchio impianto. Nell'ambito dell'Industria 4.0 si parla di smart retrofitting[10].

Il presente lavoro mira a sviluppare un retrofitting di un vecchio impianto di processo per renderlo pronto per Industria 4.0. Il caso di studio si riferisce a un vecchio impianto di miscelazione bifasico sul quale viene effettuato uno smart retrofitting con il fine di migliorarne le condizioni di sicurezza e manutenibilità. Questo lavoro è focalizzato sugli impianti di processo poiché il numero di guasti e infortuni annuali in questo settore industriale dovrebbe essere molto rilevante a causa dell'usura dei componenti [11]. L'obiettivo del retrofitting è quello di garantire applicazioni di manutenzione predittiva creando un modello virtuale dell'impianto e prevenendo eventi ad alto rischio per gli operatori.

2. Analisi della letteratura

L'analisi della letteratura si focalizza sull'adozione dei paradigmi di Industria 4.0 utilizzando il retrofitting nel contesto degli impianti industriali e di processo. Alcuni autori hanno utilizzato il retrofitting per migliorare le operazioni di manutenzione. Ad esempio, Cattaneo e Macchi [12] hanno retrofittato una vecchia perforatrice realizzando un DT per la stima della vita utile residua; Herwan et al. [13] e Hesser et al. [14] hanno utilizzato reti neurali (ANN – Artificial Neural Network) per rilevare l'usura degli utensili in una macchina CNC dopo il retrofitting; i secondi mostrano come le ANN diano risultati migliori rispetto ai modelli Support Vector Machine (SVM) e k-nearest neighbors (KNN) nella previsione dell'usura degli utensili. Altri lavori mirano a migliorare le prestazioni, come Guerreriro et al. [15] che, attraverso lo smart retrofitting di un processo di perforazione, utilizzando la realtà aumentata, migliorano la qualità e riducono il tempo ciclo del processo. Alcuni autori suggeriscono un approccio mirato alla produzione adattiva; per esempio, Lass e Gronau [16] lo applicano su una rulliera per velocizzare la riconfigurazione. Contreras Pérez [17] ha retrofittato una macchina CNC inserita in una cella di produzione flessibile, dimostrando che l'adozione dei paradigmi di Industria 4.0 non comporta un investimento enorme ma può essere ottenuta aggiornando le apparecchiature esistenti. Anche il retrofitting è un'ottima opportunità per la sostenibilità, come sostenuto da Stock e Slinger [9] i quali propongono un caso di studio su una macchina utensile desktop.

Inoltre, Ayani et al. [18] hanno evidenziato come la tecnologia DT sia economicamente vantaggiosa per la sostenibilità. Un aspetto importante legato ad Industria 4.0, alla sua implementazione e al retrofitting è senza dubbio la sicurezza degli operatori. Burresi et al. [19], nel retrofitting di un'acciaieria mediante la realizzazione di un CPS, oltre agli obiettivi di efficienza, hanno anche perseguito lo scopo di migliorare la sicurezza degli operatori, ottenendo benefici non solo in termini di aumento della produttività ma anche di riduzione dei tempi nella formazione di nuovi operatori.

La maggior parte dei casi discussi in letteratura si riferisce ai processi produttivi, mentre per quanto riguarda gli impianti di processo, è un argomento ancora relativamente inesplorato. Inoltre, per quanto riguarda l'implementazione di modelli digitali, la letteratura riporta diversi esempi di applicazioni DT nella manutenzione; invece, l'implementazione per la sicurezza o la valutazione del rischio è limitata. I pochi lavori identificati sono realizzati da Gabbar et al. [20], i quali hanno proposto la modellazione dinamica dei processi per la valutazione della sicurezza e l'analisi dei rischi. Sebbene il caso studio riguardi un'unità di idro-desolforazione e abbia dimostrato di identificare alcuni scenari specifici ad alto rischio, il modello proposto non ha sviluppato un'analisi sistematica del rischio di processo. Anche Ramzan et al. [21] propongono un modello di simulazione per l'analisi dei rischi su una colonna di distillazione con due prodotti.

L'analisi della letteratura evidenzia, in primo luogo, come le operazioni di retrofitting siano tipiche per gli impianti di produzione e non per gli impianti di processo. In secondo luogo,

sebbene tutti riguardino tecnologie di Industria 4.0, gli articoli proposti si concentrano principalmente sullo sviluppo di un singolo aspetto e non su un sistema integrato. La forza del paradigma Industria 4.0 è riferita proprio all'integrazione di queste tecnologie in un unico sistema capace di connettere tutti gli attori coinvolti nell'esecuzione dell'attività (dal singolo operatore al gestore, dalla prima all'ultima macchina).

Per questo motivo lo strumento presentato in questo articolo vuole mostrare come un'attenta analisi delle tecnologie, rispetto alla realtà in esame, possa consentire di digitalizzare e gestire al meglio un vecchio impianto di processo, contenendo i costi e illustrandone i benefici in termini di sicurezza ed affidabilità. Dagli articoli recensiti si evince l'inaccessibilità (per il momento) a queste tecnologie da parte delle piccole realtà industriali. Per questo motivo, l'approccio proposto vuole cercare di superare questo limite.

3. Retrofitting, approccio alla ricerca

L'approccio proposto per il retrofit di un vecchio impianto di processo può essere suddiviso in quattro fasi principali, come mostrato nella figura 1.

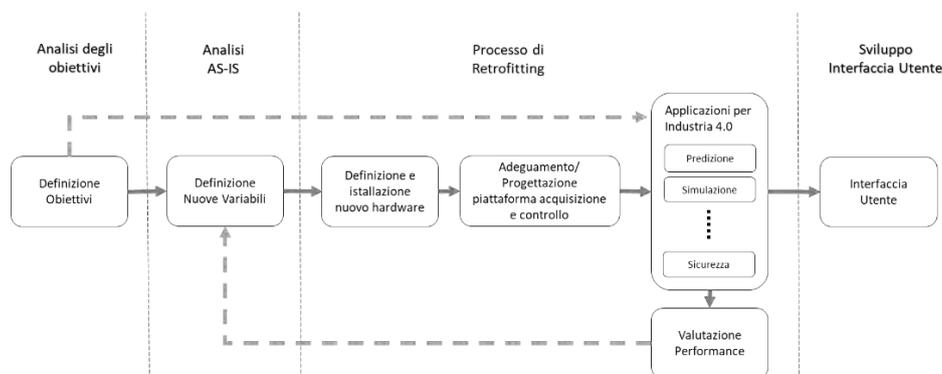


Figura 1. L'approccio adottato per il processo di retrofitting

1. Il punto di partenza è la definizione degli obiettivi. L'adozione dei paradigmi di Industria 4.0 consente di raggiungere obiettivi quali miglioramento delle condizioni di lavoro, della qualità dei processi, della comunicazione, e della collaborazione, aumento della produttività, maggiore efficienza, flessibilità, agilità e riduzione dei costi. Raggiungere tutti questi obiettivi è molto difficile; quindi, prima di progettare il retrofitting, è importante identificare quali sono quelli più strategici.
2. La seconda fase consiste in un'analisi AS-IS. In questa fase viene sviluppata una descrizione dettagliata dell'impianto e del processo per analizzare le principali funzioni dell'impianto, le variabili che entrano in gioco nel processo, le variabili già monitorate e quelle che dovranno essere controllate. In questa fase, infatti, deve essere sviluppata una valutazione dei rischi al fine di identificare e analizzare tutti i possibili eventi che potrebbero portare ad un incidente/infortunio, le loro cause ed i fattori di rischio.
3. La terza fase riguarda i processi di retrofitting. Sono previsti l'installazione di nuovo hardware (strumenti IoT), lo sviluppo di una piattaforma per l'acquisizione dei dati, il controllo dell'impianto e la simulazione di nuovi scenari. I sensori e gli attuatori che agiscono sulle variabili devono comunicare con la piattaforma di acquisizione. Questo passaggio è una delle attività più critiche nel processo di retrofit in quanto i sensori e gli attuatori già presenti potrebbero non comunicare con sistemi di terze parti, richiedendo la loro sostituzione o regolazione.
4. Infine, deve essere sviluppata un'interfaccia utente per rendere le applicazioni sviluppate facili da usare per gli operatori. Sebbene ci si aspetti che gli operatori siano sufficientemente preparati all'utilizzo dell'impianto, l'interfaccia deve essere comunque

progettata in modo che possa essere utilizzata dagli operatori in modo da ridurre al minimo la probabilità di errore.

4. Caso Studio

Il caso studio riguarda un impianto da laboratorio (mostrato in Figura 2) che simula una situazione che si verifica nei processi di estrazione di petrolio; la pressione di un giacimento petrolifero, la cui pressione è superiore alla pressione di trasporto, viene sfruttata per creare un'aspirazione su un giacimento petrolifero la cui pressione non è sufficientemente elevata per il trasporto sulla linea.



Figura 2. Impianto di processo sperimentale

In questo caso il fluido motore, cioè quello a pressione più alta, è un liquido, mentre il secondo fluido, cioè quello aspirato, è un gas. Nel caso reale i fluidi sono greggio e gas, mentre nell'impianto sperimentale in esame sono acqua e aria. L'impianto è costituito da un sistema di pompaggio ad eiettore per il trasporto di fluidi gas-liquidi bifase.

4.1. Obiettivi del retrofitting

L'obiettivo principale del retrofitting è quello di migliorare le condizioni di sicurezza e manutenibilità dell'impianto. Le maggiori criticità del sistema sono legate alla compromissione della parte finale dell'eiettore e alla possibilità di occlusioni nelle tubazioni. La creazione di un DT dell'intero sistema è un processo relativamente costoso in termini di tempo. Quindi, dato che il componente più pericoloso in caso di malfunzionamento è l'eiettore, è più utile creare nella prima fase il DT di questo componente. In questo modo sarà possibile non solo simulare le varie condizioni operative ma anche valutare il comportamento reale del sistema rispetto a quello simulato. Per migliorare le condizioni di manutenibilità, può essere utile implementare un sistema di rilevazione anomalie che permetta di individuare rapidamente l'area dove si intende eseguire l'intervento.

4.2 Analisi AS-IS

La figura 3a mostra lo schema dell'impianto sperimentale. La pompa collegata al serbatoio aperto, aspira una portata di acqua e la invia, ad una certa pressione, all'eiettore. L'eiettore è il componente principale del sistema; ha il compito di scambiare energia tra il fluido ad alta pressione e quello a bassa pressione. Dall'eiettore fuoriesce una miscela dei due fluidi. Questa miscela bifasica confluisce in un serbatoio che funge da separatore verticale. La componente liquida scende per gravità mentre quella gassosa sale. Infine, la componente gassosa viene dispersa nell'atmosfera dal serbatoio mentre quella liquida rifluisce nel serbatoio aperto. L'impianto è inoltre dotato di due elettrovalvole che controllano la portata all'uscita della componente liquida e la portata all'uscita della componente gassosa dal

serbatoio. Attraverso un controllo analogico PID (Proportional–Integral–Derivative), queste valvole mantengono un prefissato livello del liquido e di pressione all'interno del serbatoio.

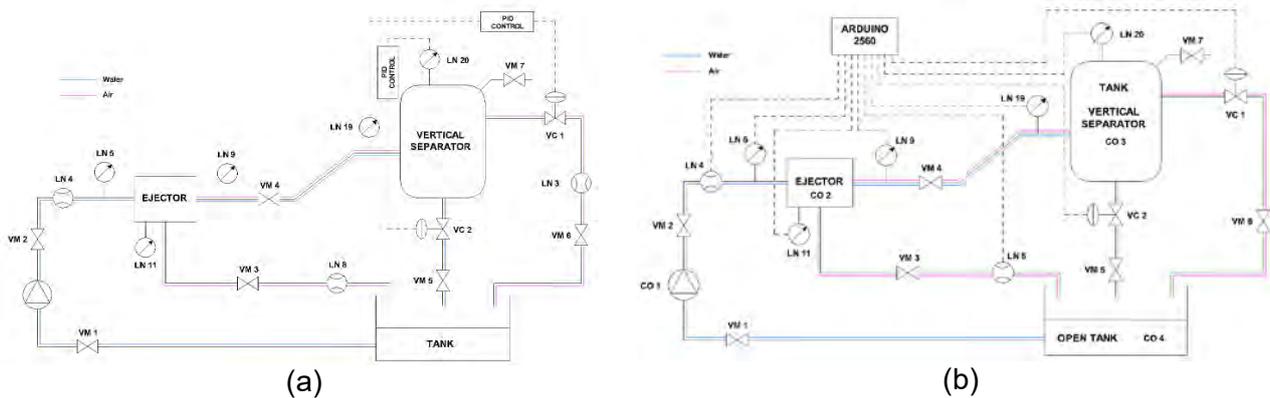


Figura 3. a.Schema originario dell'impianto, b.Schema impianto retrofittato

Il componente più critico è il cono divergente all'uscita dell'eiettore, utilizzato per il recupero della pressione. Questo componente in caso di sovrappressione nella zona interessata potrebbe essere compromesso. Secondo l'analisi di valutazione del rischio, i principali rischi connessi a questo impianto sono:

- esplosione dell'eiettore,
- occlusione delle condutture,
- allagamento conduttura aria,
- esplosione del serbatoio,
- fuoriuscita di vapori nell'aria.

5. Risultati del processo di retrofitting

5.1. Nuove variabili e hardware

È possibile suddividere le variabili di un processo in variabili monitorate, solitamente rappresentate da letture di sensori, e variabili controllate, che tipicamente richiedono la presenza di un attuatore. In questo caso, nella configurazione originale, la pressione e il livello del liquido all'interno del serbatoio erano le variabili monitorate necessarie per il normale funzionamento del processo. Le variabili controllate erano la sezione di uscita del gas e del liquido dal serbatoio, gestite rispettivamente da due elettrovalvole (VC1 e VC2). Dopo aver analizzato il processo dal punto di vista fluidodinamico, le variabili necessarie per assicurare un adeguato monitoraggio dei rischi in ottica Industria 4.0 sono quelle riportate in Tabella 1.

Variabili	Rif	Sensore/Attuatore	Tipo
Pressione prima di eiettore	LN5	Setra 280E	Pressione assoluta
Pressione cassa eiettore	LN11	Setra 280E	Pressione assoluta
Pressione dopo eiettore	LN9	Setra 280E	Pressione assoluta
Pressione serbatoio	LN19	Foxboro 841GM-CI1	Pressione relativa
Livello di liquido serbatoio	LN20	Foxboro IDP-10	Pressione differenziale
Flusso prima di eiettore	LN4	Foxboro Magnetic Flowtransmitter	Flusso
Portata aria in	LN8	Foxboro Vortez DN 50	Flusso volumetrico
Sezione uscita gas serbatoio	VC1	ECKARDT MB6713	Valvola pneumatica
Sezione uscita liquido serbatoio	VC2	ECKARDT MB6713	Valvola pneumatica

Tabella 1. Variabili con i relativi dispositivi associati.

La Figura 3b mostra il layout del sistema con le nuove apparecchiature installate.

5.2. Adeguamento/progettazione piattaforma di acquisizione e controllo

Come è possibile vedere in Figura 3b, rispetto alla configurazione iniziale di Figura 3a, tutti i sensori convergono nella scheda di acquisizione. Inoltre, il controllo delle elettrovalvole, che in precedenza era effettuato con un controllo PID analogico (vedi Figura 3a), è ora completamente gestito dalla stessa scheda di acquisizione. La scheda di acquisizione scelta è Arduino Mega 2560. Arduino invia, tramite il protocollo di comunicazione web socket, le letture dei sensori rilevate ad una piattaforma web, che avrà il compito di analizzare, visualizzare e archiviare tali dati. La comunicazione non è monodirezionale; dalla piattaforma web è possibile, sempre utilizzando il protocollo di comunicazione web socket, inviare comandi all'Arduino, agendo direttamente sugli attuatori del sistema.

Quanto descritto significa solo che il sistema è pensato per essere inserito in un contesto 4.0. Ciò non significa che l'impianto stia sfruttando effettivamente i vantaggi di Industria 4.0. Per sfruttare i vantaggi di Industria 4.0 è necessario sviluppare applicazioni dedicate a svolgere determinate funzioni, come si vedrà nella sezione successiva.

5.3. Sviluppo di applicazioni Industria 4.0

Gli obiettivi strategici sopra definiti sono il miglioramento delle condizioni di sicurezza e manutenibilità; pertanto, le applicazioni che sono state definite sono le seguenti:

- creare un modello DT del processo che si verifica nell'eiettore;
- creare una piattaforma di rilevamento delle anomalie per identificare tempestivamente la causa di un'anomalia.

La prima permette sia di simulare il comportamento dell'eiettore in diversi scenari sia di confrontare in tempo reale lo stato dell'impianto con quello simulato per valutare eventuali malfunzionamenti. La seconda focalizza l'attenzione sul problema dell'occlusione delle tubazioni, consentendo ai tecnici, in caso di occlusione di alcune tubazioni, di individuare rapidamente quale sia la zona su cui intervenire.

5.3.1. Digital Twin dell'Eiettore

Per lo sviluppo del DT dell'eiettore è stato utilizzato un approccio supervisionato perché risultava troppo complesso modellare il comportamento di questo componente tramite equazioni matematiche o software di simulazione CFD (Computational Fluid Dynamics) come Ansys. Inizialmente sono state effettuate una serie di campagne di test che hanno permesso la raccolta di dati in diverse condizioni di lavoro; successivamente, tra gli approcci supervisionati, sono stati valutati algoritmi di Deep Learning e SI.

I migliori risultati per il modello di simulazione dell'eiettore sono stati ottenuti utilizzando algoritmi SI come Fish Colony, Water Cycle e Gray Wolf. Per testare i vari algoritmi, sono state effettuate una serie di simulazioni variando l'algoritmo, la funzione, il numero di iterazioni (tra 30 e 90) e la dimensione dello sciame (tra 30 e 90 agenti).

Confrontando il fattore di inflazione della varianza (VIF) e il tempo di calcolo, il miglior algoritmo di stima per l'eiettore DT è stato il Grey Wolf con dimensioni dello sciame pari a 60 e 60 iterazioni. L'equazione (1) riporta il modello matematico e la Figura 4 mostra il confronto tra comportamenti reali e simulati.

$$LN8^* = -0,0692LN5 - 0,4303LN11 - 0,4303LN19 + 1,0329LN4 \quad (1)$$

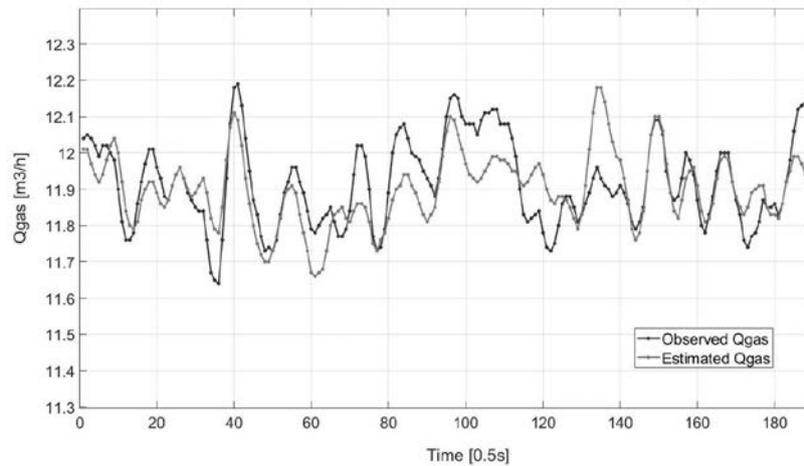


Figura 4. Esempio di tracciamento delle variabili osservate e stimate con l'algoritmo Gray Wolf.

L'errore di stima commesso va da un minimo dello 0,03% ad un massimo del 7,75% su tutti i test considerati.

Lo strumento DT può funzionare sia online che offline. Lo strumento, operando off-line, permette di analizzare scenari what-if, individuando le situazioni delicate per gli operatori senza attivare l'impianto e simulando le procedure di manutenzione.

Quando lo strumento funziona on-line, riceve informazioni dai sensori e ne modifica i parametri consentendo agli utenti di confrontare i dati forniti dai sensori con quelli simulati.

5.3.2. Piattaforma di rilevamento anomalie

Per lo sviluppo della piattaforma di rilevamento delle anomalie è stata condotta una campagna di prove in condizioni operative normali ed anomale. Le valvole manuali, disposte lungo l'impianto, sono state utilizzate per simulare le anomalie. Nello specifico, le valvole VM3, VM4, VM5 e VM6 sono state utilizzate per simulare l'occlusione e la valvola VM7 ha simulato una perdita del serbatoio.

Il problema dell'identificazione delle anomalie è stato suddiviso in due sotto problemi:

- valutare se il sistema è in condizione di guasto o meno;
- se il sistema è in condizione di guasto, classificare il tipo di guasto.

Il primo problema è stato affrontato utilizzando un approccio tradizionale. È stata utilizzata una statistica multivariata per verificare se il sistema fosse in una condizione di controllo o meno, nello specifico è stata utilizzata la statistica T2 Hotelling [22]. Una volta standardizzati i dati, e calcolato il limite di controllo utilizzando i dati di stato stazionario, è stato possibile discriminare i punti fuori controllo nei test che presentavano anomalie e assegnare loro l'anomalia specifica.

La Figura 5 mostra un esempio di dati raccolti dove è chiaramente definita la condizione di lavoro e la condizione di fuori controllo. Una volta che l'anomalia si è generata, il sistema passa da una condizione di controllo ($T < UCL$) a una condizione di fuori controllo ($T > UCL$). Diversi studi [23, 24] hanno dimostrato che quando si hanno a disposizione dati relativi ad anomalie, o si è in grado di simulare anomalie (come in questo caso), gli algoritmi di rilevamento delle anomalie, basati su reti neurali, hanno ottenuto ottimi risultati.

Per questo, il secondo problema è stato affrontato utilizzando una rete neurale. Il set di dati sopra descritto è stato suddiviso in un set di dati di addestramento e un set di dati di test; successivamente è stata condotta una sperimentazione sistematica per valutare la migliore configurazione della rete neurale.

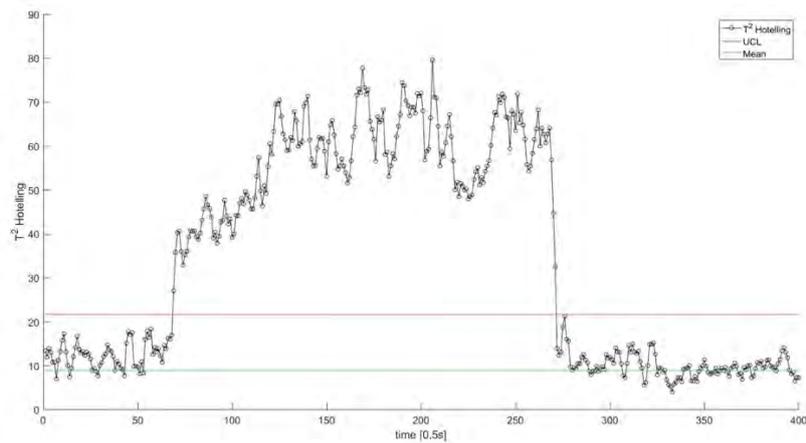


Figura 5. Andamento della statistica multivariata (Hotelling T2) durante un'anomalia A1.

Le letture al tempo t e $(t-1)$ sono state utilizzate come input per la rete neurale. Così, la rete era dotata di una sorta di memoria. Infine, le migliori configurazioni sono state valutate attraverso un test di valutazione k-fold. In termini di accuratezza (circa il 98%), la configurazione migliore è stata quella con 36 neuroni nel primo livello nascosto e 8 nel secondo livello, con un tasso di apprendimento di 0,05 e 300 epoche di allenamento.

5.4. Interfaccia Utente

L'interfaccia della piattaforma è essenziale. Per il caso di studio esaminato è stata realizzata un'interfaccia web. Attraverso questa interfaccia è possibile vedere in tempo reale le letture dei sensori, valutare lo scostamento tra il comportamento reale dell'eiettore e quello simulato e, infine, identificare le anomalie. Per facilitare l'identificazione delle anomalie, l'interfaccia è stata dotata del modello 3D del sistema in cui le anomalie verranno segnalate direttamente. La Figura 6 mostra la pagina principale dell'interfaccia sviluppata.

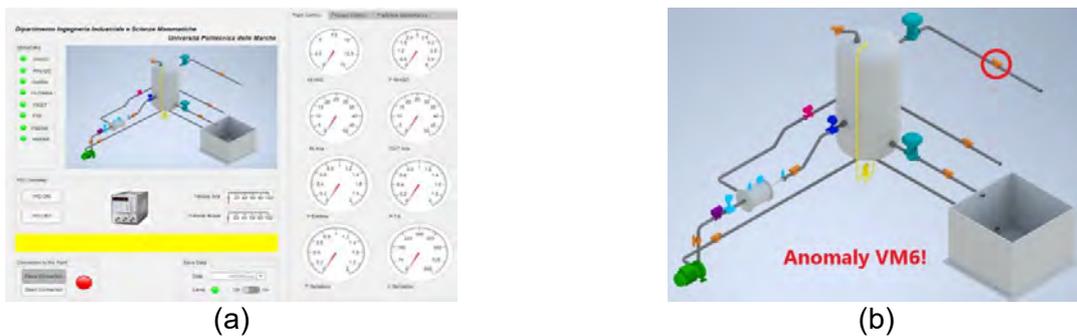


Figura 6 – a. Interfaccia utente – b. Segnalazione anomalia

6. Conclusioni

Il processo di retrofitting ha portato ad un miglioramento delle prestazioni del sistema, ma, allo stesso tempo, ha presentato alcune difficoltà applicative e l'emergere di nuove problematiche legate principalmente alla multidisciplinarietà degli argomenti trattati, e alla definizione delle nuove variabili in quanto si tratta di un'operazione ricorsiva legata alla valutazione delle prestazioni. Ciò può comportare un ritardo rispetto ai tempi previsti in fase di progettazione. Come mostrato in Tabella 2, il sistema retrofitting consente una migliore gestione della manutenzione e della sicurezza dell'operatore grazie alle applicazioni

specifiche per il rilevamento e la simulazione delle anomalie. Inoltre, la piattaforma di nuova concezione consente il monitoraggio e il controllo da remoto tramite un'applicazione web. In questo modo, sia gli operatori che i manager possono avere una visione più ampia del processo. I manager e gli analisti possono inoltre accedere rapidamente al database cloud con i dati storici per effettuare statistiche e previsioni.

	Vecchio Impianto	Impianto Retrofittato
Sicurezza	Livello di rischio molto alto per gli operatori che si trovano vicino all'impianto in caso di malfunzionamenti.	Con il tool di simulazione è possibile evitare situazioni di pericolo intervenendo preventivamente.
Manutenibilità	Per identificare l'area in cui è necessario intervenire in caso di guasto sono richiesti operatori altamente specializzati e tempi lunghi.	Grazie al tool di anomaly detection non sono richiesti operatori specializzati nella manutenzione per dell'area dove è presente il guasto e il tempo necessario è ridotto drasticamente.
Controllo di processo	Il controllo del processo può essere effettuato solo a vista nei pressi dell'impianto, rendendo piuttosto complesso avere una visione globale.	Attraverso la piattaforma sviluppata è possibile monitorare il processo in tempo reale attraverso un applicazione web. Inoltre è possibile combinare diverse letture sensoristiche al fine di ottenere un dato aggregato che posso dare un'idea di massima dello stato del processo.
Accesso ai dati	Non è previsto nessun sistema di acquisizione dati	Grazie al Sistema di acquisizione e stoccaggio in cloud, i dati sono facilmente accessibili sia in locale che da remoto. Questo comporta la necessità di adottare un sistema di protezione da eventuali attacchi informatici

Tabella 2. Analisi qualitativa dei miglioramenti del retrofitting.

La forza di questo approccio è che, con investimenti contenuti e tempi ragionevoli, permette di trasformare un vecchio impianto in un impianto smart in grado di dialogare facilmente con il mondo esterno, il tutto senza modificare completamente la configurazione del sistema. Nel caso di studio presentato, il miglioramento della comunicazione ha consentito il miglioramento degli aspetti legati alla sicurezza e alla manutenibilità.

Il lavoro svolto sull'impianto è un lavoro preliminare che prevede sviluppi futuri. Sicuramente il DT, che è stato realizzato in questa fase solo per l'eiettore, potrà essere proficuamente implementato per l'intero sistema e anche nell'intero ambiente di lavoro tramite telecamere e sistemi RFID. Per quanto riguarda il sistema di rilevamento delle anomalie, dovranno essere sviluppati nuovi sistemi che non richiedano dati preliminari per funzionare; ad esempio, potrebbero essere utilizzati algoritmi di apprendimento automatico non supervisionati. Inoltre, potrebbe essere utile sviluppare un'interfaccia dedicata per dispositivi mobili come smartphone o smartglass.

7. Bibliografia

- [1] Bahrin, M.; Othman, F.; Azli, N.; Talib, M. Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. *J. Teknol.* 2016, 78.
- [2] Pereira, A.C.; Romero, F. A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manuf.* 2017, 13, 1206–1214.
- [3] Fera, M.; Abbate, R.; Caterino, M.; Manco, P.; Macchiaroli, R.; Rinaldi, M. Economic and Environmental Sustainability for Aircrafts Service Life. *Sustainability* 2020, 12, 10120.
- [4] Michael, S. Pros and cons of implementing Industry 4.0 for the organizations: A review and synthesis of evidence. *Prod. Manuf. Res.* 2020, 8, 244–272

- [5] Kusiak, A. Smart manufacturing. *Int. J. Prod. Res.* 2018, *56*, 508–517
- [6] Orzes, G.; Rauch, E.; Bednar, S.; Poklemba, R. Industry 4.0 Implementation Barriers in Small and Medium Sized Enterprises: A Focus Group Study. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Bangkok, Thailand, 16–19 December 2018; pp. 1348–1352.
- [7] Benešová, A.; Hirman, M.; Steiner, F.; Tupa, J. Determination of Changes in Process Management within Industry 4.0. *Procedia Manuf.* 2019, *38*, 1691–1696.
- [8] Publications Office of the European Union. *User Guide to the SME Definition*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2017.
- [9] Stock, T.; Seliger, G. Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP* 2016, *40*, 536–541.
- [10] Al-Maeeni, S.S.H.; Kuhnhen, C.; Engel, B.; Schiller, M. Smart retrofitting of machine tools in the context of industry 4.0. *Procedia CIRP* 2020, *88*, 369–374.
- [11] Ciarapica, F.; Bevilacqua, M.; Antomarioni, S. An approach based on association rules and social network analysis for managing environmental risk: A case study from a process industry. *Process. Saf. Environ. Prot.* 2019, *128*, 50–64.
- [12] Cattaneo, L.; Macchi, M. A Digital Twin Proof of Concept to Support Machine Prognostics with Low Availability of Run-To-Failure Data. *IFAC-PapersOnLine* 2019, *52*, 37–42.
- [13] Herwan, J.; Kano, S.; Ryabov, O.; Sawada, H.; Kasashima, N.; Misaka, T. Retrofitting old CNC turning with an accelerometer at a remote location towards Industry 4.0. *Manuf. Lett.* 2019, *21*, 56–59.
- [14] Hesser, D.F.; Markert, B. Tool wear monitoring of a retrofitted CNC milling machine using artificial neural networks. *Manuf. Lett.* 2019, *19*, 1–4.
- [15] Guerreiro, B.V.; Lins, R.G.; Sun, J.; Schmitt, R. Definition of Smart Retrofitting: First Steps for a Company to Deploy Aspects of Industry 4.0. In *Advances in Manufacturing; Lecture Notes in Mechanical Engineering*; Hamrol, A., Ciszak, O., Legutko, S., Jurczyk, M., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2018; pp. 161–170.
- [16] Lass, S.; Gronau, N. A factory operating system for extending existing factories to Industry 4.0. *Comput. Ind.* 2020, *115*, 103128.
- [17] Contreras Pérez, J.D.; Cano Buitrón, R.E.; García Melo, J.I. Methodology for the Retrofitting of Manufacturing Resources for Migration of SME Towards Industry 4.0. In Proceedings of the International Conference on Applied Informatics, Bogotá, Colombia, 1–3 November 2018; Communications in Computer and Information Science. Florez, H., Diaz, C., Chavarriaga, J., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2018; pp. 337–351.
- [18] Ayani, M.; Ganebäck, M.; Ng, A.H.C. Digital Twin: Applying emulation for machine reconditioning. *Procedia CIRP* 2018, *72*, 243–248.
- [19] Burresti, G.; Ermini, S.; Bernabini, D.; Lorusso, M.; Gelli, F.; Frustace, D.; Rizzo, A. Smart Retrofitting by Design Thinking Applied to an Industry 4.0 Migration Process in a Steel Mill Plant. (MECO), Budva, Montenegro, 8–11 June 2020; pp. 1–6.
- [20] Gabbar, H.A.; Shinohara, S.; Shimada, Y.; Suzuki, K. Experiment on distributed dynamic simulation for safety design of chemical plants. *Simul. Model. Pract. Theory* 2003, *11*, 109–123.

- [21] Ramzan, N.; Compart, F.; Witt, W. Application of extended Hazop and event-tree analysis for investigating operational failures and safety optimization of distillation column unit. *Process. Saf. Prog.* 2007, 26, 248–257.
- [22] Montgomery, D.C. *Introduction to Statistical Quality Control*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2020.
- [23] Heo, S.; Lee, J.H. Fault detection and classification using artificial neural networks. *IFAC-PapersOnLine* 2018, 51, 470–475.
- [24] Bevilacqua, M.; Ciarapica, F.E.; Marcucci, G.; Mazzuto, G. Fuzzy cognitive maps approach for analysing the domino effect of factors affecting supply chain resilience: A fashion industry case study. *Int. J. Prod. Res.* 2020, 58, 6370–6398.

L'esonero dalla conduzione abilitata dei generatori di vapore: i requisiti tecnici tra norme nazionali e norme armonizzate europee

A. Tonti¹, I. Mazzarelli²

¹ Inail - Dit

² Inail - Uot di Milano

Sommario

A seguito dell'approvazione del Decreto 7 agosto 2020, in vigore dal 30 settembre 2021, è stata modificata la materia giuridica relativa al rilascio del patentino di abilitazione alla conduzione dei generatori di vapore e quella dei generatori cosiddetti "esonerati" dalla conduzione abilitata. La memoria si propone di illustrare il regolamento vigente, i requisiti tecnici e le condizioni per l'ottenimento dell'esonero dalla conduzione abilitata, nonché fornire alcuni spunti di riflessione sull'evoluzione della fabbricazione dei generatori di vapore nel passaggio da "attrezzature" ad "insiemi".

In particolare è stato esaminato per confronto lo stato dell'arte della norma nazionale e delle norme armonizzate europee in termini di requisiti tecnici dei sistemi di sicurezza, limitatamente alle dotazioni pertinenti gli esoneri, dando risalto ai punti di contatto tra i due ambiti normativi sopra citati ed all'evoluzione che stanno avendo le norme europee in materia di generatori di vapore a tubi d'acqua e tubi da fumo, limitatamente ai sistemi di sicurezza dedicati ad una conduzione sicura.

1. La disciplina degli esoneri tra vecchio e nuovo quadro normativo

L'art. 27 del Regio Decreto del 12 maggio 1927 n. 824 stabilisce che nessun generatore di vapore, eccetto quelli contemplati negli artt. 3 e 4, può essere posto e mantenuto in esercizio senza la continua assistenza del "conduttore abilitato" cioè persona maggiore di età, con idoneità fisica ed in possesso di certificato di abilitazione per il tipo di generatore. Le norme per l'abilitazione alla conduzione dei generatori di vapore erano state disciplinate fin dal 1937 con diversi decreti ministeriali¹ fino all'emanazione del D.M. 1 marzo 1974 e s.m.i., che in ultimo stabiliva le tipologie di certificati in base alla producibilità del generatore, nonché le regole per il tirocinio e gli esami di abilitazione. L'art. 5 del RD 824/27 stabiliva "l'Istituto dell'esonero totale o parziale" da alcune disposizioni del regolamento, cui si è data attuazione con il Titolo II del Decreto Ministeriale del 21 maggio 1974, in particolare la dichiarazione di esonero era rilasciata dall'ANCC (oggi INAIL) in sede di costruzione o utilizzo, prevedendo per la medesima le modalità di rilascio, diniego, ricorso, decadenza. In base alla tipologia di alcuni generatori di vapore gli artt. 28, 29, 39 e 41 prevedevano, oltre all'esonero da prescrizioni sull'applicazione di alcuni dispositivi di protezione ed accessori di sicurezza, anche quello dall'assistenza del conduttore abilitato, l'art. 43 invece consentiva l'esonero dalla presenza continua del conduttore abilitato. Con i punti 1 e 3 del Titolo I Capo I del D.M. 1 dicembre 1975 si stabiliva che le disposizioni sopra riportate erano applicabili anche ai generatori di acqua surriscaldata. I requisiti tecnici e le condizioni per il rilascio della dichiarazione di esonero nei vari casi sono stati stabiliti con le specificazioni tecniche applicative emanate dall'ISPESL in attuazione del D. M. del 21 maggio 1974 (Raccolta E) e D.M. 1 dicembre 1975 (Raccolta H). Nella Gazzetta Ufficiale n. 242 del 30 settembre 2020 è stato pubblicato il Decreto del Ministero del Lavoro e delle Politiche Sociali del 7 agosto 2020, che abroga espressamente il D.M. 1 marzo 1974 e reca nuove disposizioni per

¹ D.M. 13 agosto 1937, 27 aprile 1940, 16 maggio 1956, 24 gennaio 1966, 10 marzo 1971 e 16 giugno 1972

l'abilitazione alla conduzione di generatori di vapore, relative alla classificazione dei patentini di abilitazione ed i requisiti generali per l'abilitazione, i requisiti di formazione ed i regolamenti per gli esami.

L'allegato III del Decreto 7 agosto 2020 detta nuove disposizioni per il rilascio dell'esonero dalla conduzione abilitata per alcune tipologie di generatori di vapore con caratteristiche definite, che di fatto rispondono a quelli previsti dagli artt. 29, 39 e 41 del dm 21/05/1974 ed al punto 3 del Titolo I Capo I del D.M. 1 dicembre 1975.

Rispetto alla previgente normativa è evidente che sono sottratti alla disciplina attuale dell'esonero i generatori di vapore e acqua surriscaldata di piccola potenzialità (PSxV non superiore a 300 bar**l* e PS non superiore a 10 bar) in quanto già esclusi dal regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione (art. 2 comma 1 lettera g) del D.M. 329/04) ed i generatori a funzionamento automatico (ex art. 43 del D.M. 329/04) in base alle considerazioni riportate nel successivo paragrafo.

2. La Direttiva di prodotto e sue implicazioni sui regolamenti nazionali

Con il Decreto Legislativo 25 febbraio 2000, n. 93 si è data attuazione alla Direttiva 97/23/CE (PED) in materia di messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione ed insiemi, successivamente modificata dalla Direttiva 2014/68/UE, recepita con il Decreto Legislativo 15 febbraio 2016, n. 26.

Il Decreto 1 dicembre 2004 n. 329 ha dato attuazione all'art. 19 del D.Lgs 93/2000 regolamentando la messa in servizio e l'utilizzazione delle attrezzature a pressione.

La lettura delle suddette disposizioni e dei regolamenti citati nel paragrafo 1 conduce a fare alcune rapide riflessioni:

- a) il recepimento della PED di fatto ha abrogato, per le attrezzature contemplate nella stessa, le disposizioni nazionali relative alla fabbricazione e fatto rilevante ha introdotto la definizione di "insieme" assente nella previgente disciplina nazionale;
- b) la PED lascia impregiudicata la facoltà degli stati membri di normare in materia di esercizio delle attrezzature e degli insiemi, fermo restando di non porre requisiti aggiuntivi che non siano già assicurati dai fabbricanti, in particolare per gli insiemi che di fatto *"dovrebbero essere secondo dichiarazione di conformità"* prodotti già integrati e funzionali;
- c) il decreto ministeriale n. 329/04 si applica indistintamente agli insiemi e alle attrezzature marcate CE o fabbricate secondo la previgente disciplina e aspetto rilevante fa espresso riferimento al D.M. 21 maggio 1974;
- d) il Decreto 7 agosto 2020 non abroga il D.M. 21 maggio 1974, di fatto le attuali tipologie di generatori per le quali è possibile ottenere l'esonero sono riconducibili a quelle riportate negli artt. 29, 39 e 41 e punto 3 del Titolo I Capo I del D.M. 1 dicembre 1975;
- e) l'allegato III del Decreto 7 agosto 2020 aggiorna alcune disposizioni del R.D. 824/1927 relative alle modalità di accertamento dei requisiti per l'esonero, nella sostanza resta invariato il concetto che il rilascio dell'esonero avvenga a seguito di una richiesta espressa dell'utilizzatore ed un accertamento tecnico mediante verifica o esame documentale dell'INAIL, attività riconducibili rispettivamente a quelle degli artt. 4 e 6 del D.M. 329/04;
- f) l'esonero ha una durata illimitata (anche quelli già rilasciati ai sensi del R.D. e del D.M. 21 maggio 1974) fintanto che permangono le condizioni sulla base delle quali è stata emessa la dichiarazione di esonero.

Chiarito il quadro giuridico di riferimento occorre fare alcune riflessioni su quello normativo in termini di requisiti tecnici e condizioni per il rilascio della dichiarazione di esonero.

L'art. 3 del D.M. 329/04 e la conseguente emanazione di specifiche tecniche in ambito CTI secondo i dettami della disposizione citata doveva costituire l'aggiornamento delle Raccolte ISPEL E ed H, in particolare le specifiche UNI/TS 11325 parti 3 e 10 erano state elaborate proprio per fornire prescrizioni di carattere tecnico e condizioni per la sorveglianza continua e discontinua dei generatori di vapore. La non completa attuazione dell'art. 3, stante la mancata approvazione delle UNI/TS da parte dei Ministeri competenti, provocava di fatto la difficoltà di consolidare in termini strettamente giuridici la fase di accertamento tecnico dei requisiti per il rilascio dell'esonero.

Tuttavia è da osservare che le specifiche UNI/TS costituiscono uno strumento quanto più aggiornato alle normative EN emanate dal Comitato europeo di normazione ed al progresso tecnologico, pertanto unitamente alla Raccolta E dovrebbero costituire la base di ogni valutazione delle condizioni di sicurezza in materia di esonero.

Fermo restando che la Direttiva PED non può limitare la facoltà dello stato membro di stabilire regole per l'abilitazione del conduttore e deroghe (esonero) alla medesima, un'utile riflessione va fatta sull'impatto che ha avuto la PED riguardo la modalità di conduzione di tipo continuo e discontinuo, aspetto non regolamentato dal Decreto 7 agosto 2020, quindi riconducibile alla previgente disciplina.

È parere degli autori che per i generatori marcati CE come attrezzature (così come per le attrezzature ante-PED), dato che il fabbricante non include nella dichiarazione di conformità il rispetto dei requisiti di funzionalità ed i sistemi di sicurezza, come previsto dalla PED per gli insiemi, in determinate condizioni è possibile fare riferimento alle specifiche tecniche nazionali. Diverso è il caso dei generatori marcati CE laddove il fabbricante abbia già previsto una modalità di conduzione specifica, che evidentemente non può essere regolamentata diversamente a livello nazionale, eccezion fatta per il possesso dell'abilitazione prevista.

A tal proposito è utile richiamare la circolare del Ministero del Lavoro e Politiche Sociali n. 1 del 29 gennaio 2009 nella quale si afferma che, in conseguenza del recepimento delle Direttive di prodotto, la previgente disciplina non è applicabile quando vi siano i seguenti presupposti:

- i requisiti essenziali di sicurezza stabiliti all'atto della fabbricazione siano almeno equivalenti a quelli ottenibili con la norma armonizzata, ciò implicitamente limita l'applicazione della disposizione agli insiemi per i quali siano applicati tutti i requisiti pertinenti;
- sia espressamente previsto un regime di sorveglianza discontinua.

La circolare citata ha avuto un immediato impatto sul rilascio della dichiarazione di esonero per i generatori di cui all'art. 43 del D.M. 21 maggio 1974 (conduzione discontinua), che almeno per gli insiemi è stata di fatto soppiantata dalle disposizioni del fabbricante. Pur tuttavia, utilizzando la circolare il termine apparecchiature, ha generato diverse interpretazioni riguardo le attrezzature marcate CE per le quali evidentemente potevano non essere applicati tutti i requisiti relativi alla sicurezza, in concreto ciò ha limitato l'azione dell'INAIL nelle procedure di rilascio di tutti gli esoneri. A seguito dell'emanazione del Decreto 7 agosto 2020 è ora possibile ricorrere all'istituto dell'esonero, che sicuramente riguarderà anche tutti quei generatori, rientranti nelle tipologie previste dal decreto, costruiti e/o messi in funzione dopo l'emanazione della circolare n.1 del 2009.

3. I requisiti tecnici e le condizioni per il rilascio della dichiarazione di esonero

In considerazione di quanto espresso nei precedenti paragrafi, in particolare riguardo il processo di accertamento dei requisiti e delle condizioni per il rilascio della dichiarazione di esonero, è rilevante operare una distinzione tra generatori immessi sul mercato come attrezzature, includendovi anche quelli ante-PED, e quelli marcati CE come insiemi.

È utile rilevare che il Decreto 7 agosto 2020 stabilisce in capo all'INAIL la responsabilità di valutare l'applicabilità dell'esonero dall'abilitazione, mentre la valutazione della modalità di conduzione continua o discontinua, per gli insiemi è certamente demandata al fabbricante che a tal fine predispone le istruzioni nel manuale d'uso del generatore; da ultimo, per le attrezzature, è responsabilità dell'utilizzatore che deve attuare quanto previsto dalle specifiche tecniche nazionali.

Mentre per gli insiemi i requisiti delle norme armonizzate UNI EN della serie 12952 (generatori a tubi d'acqua) e 12953 (generatori a tubi da fumo) costituiscono il riferimento più aggiornato secondo il progresso tecnologico, la definizione dei requisiti tecnici per i generatori marcati CE come attrezzature è inclusa nelle specifiche tecniche nazionali.

È noto che le suddette specifiche tecniche devono essere recepite dal legislatore in base all'art. 3 del D.M. 329/04. In attesa del recepimento, si mette in evidenza che, almeno per la conduzione continua, la Raccolta E contiene già quanto previsto dalle norme armonizzate e quindi le valutazioni tecniche per il riconoscimento dell'esonero dalla conduzione abilitata, almeno per la conduzione continua, non dovrebbero discostarsi molto da quanto avveniva prima dell'emanazione della PED e dei suoi decreti di recepimento e attuazione.

Con riferimento ai generatori contemplati nel Decreto 7 agosto 2020, in tabella 1 si riporta, rispetto alla funzione di sicurezza prevista per l'esonero, un confronto tra quanto richiesto nella raccolta E e quanto previsto dalle attuali norme armonizzate UNI EN 12952/12953. È facilmente riscontrabile che, sia per attrezzature che per insiemi, non sussistono particolari differenze, in caso di conduzione continua. Analogo confronto è stato effettuato in tabella 2 per le condizioni di ammissibilità alla conduzione discontinua (aggiuntive rispetto a quelle già evidenziate per la conduzione continua), fermo restando che per i generatori marcati CE tale modalità di conduzione come insiemi deve essere consentita dal fabbricante, ottemperando appunto ad un livello di sicurezza equivalente a quello stabilito nelle norme UNI EN, ad esempio mediante applicazione delle UNI/TS 11325 parte 3 o 10. Anche in tal caso si riscontrano analoghi requisiti nella Raccolta E e nelle norme armonizzate.

È necessario precisare che negli standard UNI EN 12952/12953 non sono previsti espressi requisiti relativi a limitazioni del fluido riscaldante, richiamati in altre norme armonizzate, inoltre il dimensionamento delle valvole di sicurezza secondo la Raccolta E è molto simile a quello riportato nella UNI EN 4126-1. Per gli insiemi marcati CE è rilevante stabilire se il fabbricante ha previsto un rischio di surriscaldamento e quindi se ha dotato il generatore di quanto necessario per evitare il superamento dei limiti stabiliti (flusso acqua alimento, temperatura, pressione, etc.) ovvero se l'analisi di rischio lo esclude in base a quanto richiesto nelle norme armonizzate.

4. Gli insiemi e le norme armonizzate

Come riscontrabile nella tabella 1, i requisiti di sicurezza per la conduzione continua da parte di persona non abilitata sono pressoché identici tra le specifiche nazionali e quelle armonizzate, mentre variano, seppur di poco, per gli insiemi marcati CE secondo le norme armonizzate, ove si mettano a confronto i requisiti per la conduzione discontinua contenuti nella Raccolta E. Ciò evidentemente è dovuto alla data di emanazione della norma, da ciò la necessità di aggiornare costantemente le specifiche nazionali UNI/TS.

Le norme armonizzate e di riflesso le UNI/TS che ad esse si ispirano, si basano sui presupposti della guideline PED 8/15 (ora H-15), che in estrema sintesi richiede che il generatore operi in maniera automatica e sia inclusa nel manuale d'uso una modalità di conduzione senza supervisione continua.

Tipologia del generatore	Funzione di sicurezza e/o condizione limite	Dispositivi di protezione Accessori di sicurezza		
		RACCOLTA E	UNI EN 12953	UNI EN 12952
<i>Generatori attraversamento meccanico limitata potenzialità aventi $PS \cdot V \leq 3000 \text{ bar} \cdot l$ e $PS \leq 12 \text{ bar}$</i>	Arresto dell'apporto di calore nel caso di arresto dell'apporto di acqua di alimentazione e raggiungimento del limite di temperatura dell'acqua (TS). Portata di scarico degli accessori di sicurezza non inferiore alla producibilità al carico massimo continuo del generatore e limitazione della pressione massima di esercizio a 12 bar Prova a caldo	Flussostato e asservimento elettrico delle pompe/ Termostato di blocco Valvola di sicurezza dimensionata con raccolta E e pressostato di sicurezza con pressione di taratura $\leq 12 \text{ bar}$ Prova a caldo	Non applicabile	5.1.1/5.5.1 parte 7 protezione mediante appropriati limitatori in caso di abbassamento del limite del flusso acqua alimento e/o temperatura 4.1 parte 7 e Parte 10 (UNI EN 4126) Valvole di sicurezza 5.1.1 Parte 10
<i>Generatori di vapore a bassa pressione $PS \leq 1 \text{ bar}$, superficie di riscaldamento $\leq 100 \text{ m}^2$, producibilità al carico massimo continuo $\leq 2 \text{ t/h}$</i>	Limitazione della pressione massima di esercizio a 1 bar	Valvola di sicurezza e pressostato di sicurezza con pressione di taratura $\leq 1 \text{ bar}$	4.1. parte 6 e Parte 8 (UNI EN 4126) Valvole di sicurezza 5.6.2 parte 6	4.1 parte 7 e Parte 10 (UNI EN 4126) Valvole di sicurezza 7.5.1.2 parte 7
<i>Generatori di acqua surriscaldata a bassa pressione $PS \leq 5 \text{ bar}$, temperatura massima dell'acqua (4) $\leq 120 \text{ }^\circ\text{C}$, superficie di riscaldamento $\leq 100 \text{ m}^2$, potenzialità $\leq 1380 \text{ kW}$ (2 t/h)</i>	Limitazione della pressione massima di esercizio dell'acqua surriscaldata $\leq 5 \text{ bar}$ Limitazione della temperatura massima di esercizio dell'acqua surriscaldata $\leq 120 \text{ }^\circ\text{C}$	Valvola di sicurezza e pressostato di sicurezza con pressione di taratura $\leq 5 \text{ bar}$ Valvola di scarico termico o di intercettazione del combustibile abbinata a termostato	4.1. parte 6 e Parte 8 (UNI EN 4126) Valvole di sicurezza 6.5.2.1 parte 6 Limitatore P/T 6.5.2.1 e 4.4.1 parte 6 Limitatore di temperatura e prevenzione del calore residuo	4.1 parte 7 e Parte 10 (UNI EN 4126) Valvole di sicurezza 6.8.2 parte 7 (internal generation) 4.2.3, 6.1.6 e 6.8 parte 7 Limitatore di temperatura e dispositivi di dissipazione calore residuo
<i>Generatore a sorgente termica diversa dal fuoco per il quale le membrature a contatto con il fluido riscaldante sono progettate a $TS \geq$ di quella del fluido di riscaldamento o vi è una limitazione sulla T_{max} del fluido riscaldante</i>	Le membrature a contatto con il fluido riscaldante sono progettate a $TS \geq$ di quella del fluido di riscaldamento o vi è una limitazione sulla T_{max} del fluido riscaldante Portata di scarico degli accessori di sicurezza non inferiore alla PS del generatore	$TS \geq T_{\text{MAX}}$ per caratteristiche progettuali d'impianto: nessun dispositivo di limitazione sul generatore; oppure $TS < T_{\text{MAX}}$ con termostato di blocco sul fluido riscaldante Valvola di sicurezza dimensionata con raccolta E	4.3.2/4.4.1 parte 6 Prevenzione del rischio di surriscaldamento 4.1. parte 6 e Parte 8 (UNI EN 4126) Valvole di sicurezza	4.2.3/4.5.2 parte 7 Prevenzione del rischio di surriscaldamento 4.1 parte 7 e Parte 10 (UNI EN 4126) Valvole di sicurezza

Tabella 1. Confronto condizioni per l'esonero per la conduzione continua tra Raccolta E e norme armonizzate EN

Tipologia del generatore	Funzione di sicurezza e/o condizione limite	Dispositivi di protezione Accessori di sicurezza		
		RACCOLTA E	UNI EN 12953	UNI EN 12952
Generatori attraversamento meccanico limitata potenzialità aventi $PS \cdot V \leq 3000 \text{ bar} \cdot l$ e $PS \leq 12 \text{ bar}$	Arresto dell'apporto di calore nel caso di raggiungimento del limite di pressione dell'acqua (PS) e temperatura (TS) Regolazione del generatore in funzione della pressione	Pressostato di blocco e secondo termostato di blocco Regolatore di pressione	Non applicabile	7.5.1.2/7.5.1.3/7.5.3.2 parte 7 pressostato di blocco e secondo termostato di blocco 4.2.2./7.2/7.5.3.1 parte 7 Regolazione automatica della pressione e del sistema di riscaldamento
Generatori di vapore a bassa pressione $PS \leq 1 \text{ bar}$, superficie di riscaldamento $\leq 100 \text{ m}^2$, producibilità al carico massimo continuo $\leq 2 \text{ t/h}$	Arresto dell'apporto di calore nel caso di arresto dell'apporto di acqua di alimentazione (l'attivazione deve essere assicurata anche in caso di arresto delle pompe). Arresto dell'apporto di calore nel caso di raggiungimento del limite di pressione dell'acqua (PS). Regolazione del generatore in funzione della pressione e del livello	n. 2 livellostati di blocco pressostato di blocco regolatore di pressione e regolatore di livello	5.6.1 parte 6 Due livellostati di blocco oppure un livellostato e un sistema equivalente meccanico/elettronico 5.6.2 parte 6 Pressostato di blocco 4.4.1/5.5.1 parte 6 Regolazione del sistema di riscaldamento in funzione della pressione/regolazione del livello	5.5.1/7.5.2.2 parte 7 Numero due livellostati di blocco 7.5.1.2/7.5.1.3/7.5.2.2 parte 7 pressostato di blocco 4.2.2./7.2/7.5.1.1 parte 7 Regolazione automatica della pressione e del sistema di riscaldamento 7.5.2.1 parte 7 regolazione livello
Generatori di acqua surriscaldata a bassa pressione $PS \leq 5 \text{ bar}$, temperatura massima dell'acqua (4) $\leq 120 \text{ }^\circ\text{C}$, superficie di riscaldamento $\leq 100 \text{ m}^2$, potenzialità $\leq 1380 \text{ kW}$ (2 t/h)	Arresto dell'apporto di calore nel caso di arresto dell'apporto di acqua di alimentazione (l'attivazione deve essere assicurata anche in caso di arresto delle pompe). Arresto dell'apporto di calore nel caso di raggiungimento del limite di pressione dell'acqua (PS). Regolazione del generatore in funzione della pressione e del livello	n. 2 livellostati di blocco pressostato di blocco regolatore di pressione e regolatore di livello	6.5.1.1/6.5.1.2 parte 6 Due livellostati di blocco 6.5.2 parte 6 pressostato di blocco 6.8/4.4.1 parte 6 Regolazione di pressione e del sistema di riscaldamento in funzione della temperatura	6.4.1/7.6.4 parte 7 Numero due livellostati di blocco 6.8.2/7.6.4/7.6.5 parte 7 Pressostato di blocco con generazione di pressione interna/esterna 4.2.2./7.2/7.6.4 parte 7 Regolazione automatica della pressione e del sistema di riscaldamento 7.6.2 parte 7 Regolazione di livello
Generatore a sorgente termica diversa dal fuoco per il quale le membrane a contatto con il fluido riscaldante sono progettate a $TS \geq$ di quella del fluido di riscaldamento	Regolare funzionalità di dispositivi di protezione, regolazione e controllo	Controlli del conduttore in base alla Raccolta E ed alle circolari ISPEL vigenti	4.3.5/7 e Annex C parte 6	7.3 e Annex B parte 7

Tabella 2. Confronto condizioni di ammissibilità per la conduzione discontinua tra Raccolta E e norme armonizzate EN

Inoltre la norma prevede che il sistema di riscaldamento debba essere bloccato da eventuali défaillance del sistema di sicurezza del generatore, che il generatore debba essere dotato di dispositivi di monitoraggio, allarme e sicurezza scelti in funzione dell'analisi di rischio e dei limiti ammissibili (pressione, temperatura e livello dell'acqua), nonché sia garantito lo smaltimento del calore residuo a seguito di un blocco. La linea guida contempla altresì requisiti relativi alle condizioni di restart manuale dopo un blocco e presenza obbligatoria del conduttore. Un aspetto importante è il rimando ai requisiti di qualità dell'acqua di alimento da specificare nelle istruzioni operative, quando parametri specifici della qualità dell'acqua sono soggetti a rapide variazioni dando luogo a situazioni pericolose durante il periodo di funzionamento senza sorveglianza. La protezione contro il superamento di ogni limite deve essere assicurata da accessori di sicurezza.

Le norme armonizzate UNI EN 12952 e 12953 contengono, oltre i requisiti già evidenziati in tabella 2, opportune informazioni su manutenzioni e test, rispettivamente contenute nella parte 7 Annex B e parte 6 Annex C (sorveglianza discontinua fino a 72 ore).

La norma UNI EN 12952-7 contiene anche al punto 7 (requisiti aggiuntivi per generatori di vapore e ad acqua surriscaldata), specifici per alcuni parametri della qualità dell'acqua (durezza) e per alcuni limitatori supplementari.

Tenuto conto del quadro normativo riepilogato in tabella 2, si evidenzia che i requisiti previsti dalle norme armonizzate per una sorveglianza discontinua da parte del conduttore entro tempi di controllo stabiliti dal fabbricante, non si discostano molto da quelli previsti dalla Raccolta E, eccezion fatta per i limiti sulla qualità dell'acqua.

Infatti, nel caso di conduzione discontinua, sia le norme armonizzate che le UNI/TS 11325 prescrivono particolari requisiti relativi alla qualità dell'acqua (conducibilità, sostanze nocive che possono generare inquinamento, durezza) non previste nell'applicazione degli articoli 29, 39, 41 del D.M. 21 maggio 1974. La Raccolta E prevedeva solo per i generatori a funzionamento automatico di cui all'art. 43 del D.M. 21 maggio 1974 (sorveglianza discontinua) requisiti di limitazione per tali parametri.

La UNI EN 12952-7 e la UNI EN 12953-6 prevedono, qualora da una specifica analisi di rischio emerga che esiste un rischio corrispondente che può compromettere la sicurezza del generatore o dei limitatori, l'adozione di dispositivi di monitoraggio in continuo della conduttività, durezza e sostanze nocive ed idonee protezioni (limitatori) che attuino opportune correzioni o l'eventuale interruzione o deviazione dell'alimentazione nel caso di superamento dei limiti stabiliti.

In tale direzione va anche la UNI/TS 11325-10 applicabile ai generatori marcati CE oggetto del Decreto 7 agosto 2020, seppur limitandosi a valori limite relativi alla conducibilità ed al rischio di inquinamento da sostanze nocive.

5. Evoluzione delle norme armonizzate

Le norme EN della serie 12952 e 12953 sono elaborate in ambito CEN dal TC269 (Shell and water tube boiler) rispettivamente nei WG1 e WG2, cui partecipano rappresentanti italiani designati dall'UNI nell'ambito della Commissione Tecnica CT221 "Progettazione e costruzione di attrezzature a pressione e di forni industriali", del Sottocomitato 3 "Generatori di calore e impianti a pressione".

Allo stato attuale, sono attivi i progetti di norma prEN 12953-6 "Requisiti per l'apparecchiatura della caldaia" e prEN 12953-9 "Requisiti dei dispositivi di limitazione della caldaia e degli accessori". Questi due progetti sono in fase avanzata di revisione e devono essere approvati congiuntamente.

Le principali novità, limitatamente agli aspetti trattati in questo lavoro, sono in sintesi:

- introduzione e modifica delle definizioni di PS e TS, dispositivi di monitoraggio, limitatori, accessori di sicurezza e a pressione;

- chiarimento del concetto di avviamento a freddo e a caldo del generatore;
- miglior definizione del concetto di indipendenza dei limitatori rispetto alle funzioni di monitoraggio (mutua influenza);
- imposizione dell'analisi dei pericoli e dei rischi nonché una classificazione SIL per ogni limitatore;
- introduzione di requisiti specifici del dispositivo di monitoraggio della temperatura di fornace o del sistema equivalente;
- ammissibilità del bypass dei limitatori per un tempo definito al fine di consentirne i test funzionali (in modalità indipendente), tale previsione deve essere implementata nell'analisi SIL;
- rivisitazione di modalità e condizioni per lo smaltimento del calore residuo in caso di blocco di un limitatore;
- inammissibilità del restart da remoto (a freddo e dopo un blocco) del generatore;
- inserimento di requisiti per numero e portata delle pompe di alimento, in analogia, seppur con differente approccio, con quanto già descritto nella UNI EN 12952-7;
- modifica della logica del dispositivo automatico di controllo del massimo livello che può essere implementato nel controllo automatico di livello, a meno che l'analisi di rischio effettuata dall'acquirente determini la necessità di protezione delle attrezzature a valle del generatore, nel qual caso occorre installare un dispositivo di monitoraggio o un limitatore che interrompa l'alimentazione dell'acqua ed eventualmente anche l'alimentazione di energia al generatore;
- introduzione esplicita di un dispositivo di monitoraggio del flusso dell'acqua in caso di rischio di surriscaldamento (del tipo a riavviamento automatico, in caso sia garantito il flusso minimo);
- inserimento di requisiti espliciti per lo smaltimento del calore residuo per generatori di acqua surriscaldata in analogia a quanto già descritto nella UNI EN 12952-7;
- per generatori di acqua surriscaldata il limitatore del flusso minimo di acqua di circolazione è sostituito con un dispositivo di monitoraggio richiesto solo in caso vi sia rischio di surriscaldamento;
- nel prEN 12953-9 sono stati introdotti requisiti per i sistemi PLC che devono uniformarsi alla UNI EN 50156-2 ed alle prescrizioni di marcatura dei limitatori in conformità alla PED.

Ampia discussione sta avvenendo in ambito CEN relativamente alle modifiche sul controllo della qualità dell'acqua di caldaia, infatti è richiesto in genere il monitoraggio della conduttività, anche se non più in continuo nel caso di supervisione continua o discontinua fino a 24 ore. Nel caso di sorveglianza discontinua fino a 72 ore è previsto un monitoraggio in continuo con un blocco nel caso di superamento dei limiti, tale blocco può non essere immediato ma basarsi su un'analisi di rischio del fabbricante che determini le condizioni di azionamento del dispositivo. Nel caso di sorveglianza discontinua oltre le 72 ore il fabbricante deve effettuare un'analisi di rischio per scegliere tra un limitatore o un dispositivo di monitoraggio, che effettuino le azioni già citate per il regime fino a 72 ore.

Riguardo la contaminazione di sostanze nocive ed il controllo di durezza dell'acqua di alimento e reintegro (o conducibilità per acqua demineralizzata), permangono i requisiti di controllo in continuo dei limiti operativi, tuttavia non è più richiesto un dispositivo con caratteristiche di limitazione conforme alla UNI EN 12953-9, ma un semplice dispositivo di monitoraggio.

Importante novità è stata proposta nell'annesso C (informativo) della UNI EN 12953-6: è stato chiarito che in caso di supervisione discontinua fino a 24 ore i test sono giornalieri, inoltre è consentito agli stati membri, mediante norme nazionali, di introdurre test e controlli suppletivi, così come è consentito ai produttori e loro clienti mediante accordo, di stabilire

deviazioni sulla periodicità e sul tipo di controlli garantendo comunque un livello di sicurezza non inferiore a quello previsto dall'annesso.

Nel progetto di norma prEN 12953-6 è stato introdotto l'annesso normativo "I" che definisce i requisiti per i dispositivi di monitoraggio del flusso d'acqua e della temperatura di fornace, oltre che per tutti i dispositivi di classe A come definiti nella EN 60730-1 (privi di fault assessment), eliminandoli di fatto dal prEN 12953-9; mentre i requisiti dei dispositivi di classe B e C (limitatori) saranno trattati sempre nella parte 9. Al momento vi sono pareri discordanti tra i vari Paesi membri su tale approccio.

Nel progetto di norma della parte 9 sono stati introdotti due interessanti annessi:

- l'annesso E informativo destinato a fornire riferimenti sulle prove di tipo e sull'analisi SIL (EN 13611, EN 61508, EN 61511)
- l'annesso F normativo relativo ai requisiti ed ai test per la sicurezza elettrica

Con riferimento alle UNI EN 12952 parti 7 e 11 il TC269 ha approvato "preliminary work item" per una loro revisione, ma al momento non vi sono testi disponibili dei progetti di norma.

6. Conclusioni

L'entrata in vigore del Decreto 7 agosto 2020 consente agli utilizzatori di generatori di vapore o acqua surriscaldata previsti nell'allegato III di avvalersi dell'esonero dalla conduzione "abilitata", attraverso una procedura di accertamento tecnico effettuata dall'INAIL in conformità al decreto e basata fondamentalmente sull'esame documentale o sulla verifica di condizioni che dovranno essere aderenti con le disposizioni giuridiche e soprattutto con lo stato dell'arte in termini di normativa tecnica. E' condivisibile che un approccio mirato ad uniformarsi alle disposizioni in ambito europeo, così come alle UNI/TS, garantisca livelli di sicurezza migliori di quelli stabiliti nelle Raccolte E ed H, in particolare riguardo il controllo della qualità dell'acqua e le protezioni di tipo automatico dei sistemi di riscaldamento dei generatori a fuoco diretto, pur riconoscendo alle Raccolte una valenza giuridica e tecnica per generatori marcati CE come attrezzature ed ante-PED, all'avanguardia tenuto conto della data di emanazione. Tale approccio dovrà essere supportato nel tempo da un continuo aggiornamento delle UNI/TS e delle procedure messe a punto dall'INAIL ove vi siano modifiche sostanziali delle norme armonizzate, in particolare riguardo i dispositivi di monitoraggio ed i limitatori, tenendo conto che si tratta di dispositivi destinati ad assicurare logiche e funzioni di sicurezza.

Per gli insiemi marcati CE assume un aspetto rilevante l'analisi dei pericoli e dei rischi effettuata dal fabbricante, specie per i casi di conduzione senza supervisione continua. Quindi l'accertamento dei requisiti e delle condizioni dell'esonero passa attraverso un'attenta valutazione delle scelte del fabbricante, del livello di sicurezza raggiunto con riferimento agli standard europei o equivalenti, delle istruzioni contenute nel manuale d'uso. Per i generatori ante-PED e per quelli marcati CE come attrezzature è evidente che l'analisi di rischio e le scelte sul livello di sicurezza da raggiungere sono in capo al datore di lavoro, anche sulla base di quanto previsto dal titolo III del D.Lgs 81/08 in materia di uso di attrezzature di lavoro, pertanto è auspicabile l'adozione di livelli di sicurezza equiparati a quelli delle norme europee, soprattutto qualora venga scelta la soluzione di una conduzione discontinua, per la quale la responsabilità resta in capo al datore di lavoro.

7. Bibliografia

- [1] Regio Decreto del 12 maggio 1927 n. 824 - Approvazione del regolamento per l'esecuzione del R. decreto-legge 9 luglio 1926, n. 1331, che costituisce l'Associazione nazionale per il controllo sulla combustione.
- [2] Decreto Ministeriale del 21 maggio 1974 - Norme integrative del regolamento approvato con R.D. 824/27 e disposizioni per l'esonero
- [3] D.M. 1 dicembre 1975 - Norme di sicurezza per apparecchi contenenti liquidi caldi sotto pressione
- [4] Decreto Legislativo 25 febbraio 2000, n. 93 - Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione
- [5] Decreto 7 agosto 2020 - Abilitazione alla conduzione di generatori di vapore
- [6] Raccolta E ISPESL - Specificazioni tecniche applicative del D.M. 21 maggio 1974
- [7] Raccolta H ISPESL - Specificazioni tecniche applicative del D.M. 1 dicembre 1975
- [8] UNI EN 12952 serie – Caldaie a tubi d'acqua
- [9] UNI EN 12953 serie – Caldaie a tubi da fumo
- [10] UNI/TS 11325-10 - Messa in servizio e utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 10: Sorveglianza dei generatori di vapore e/o acqua surriscaldata esclusi dal campo di applicazione della UNI/TS 11325-3
- [11] Guidelines related to the Pressure Equipment Directive 2014/68/EU (PED)
- [12] Iuri Mazzarelli, Ivan Mazzarelli - Applicazione pratica della conduzione discontinua di generatori di vapore di piccola e media potenzialità mediante controllo remoto – Atti SAFAP - 2012

La conduzione e l'esercizio dei generatori di vapore alla luce del D.M. 94 del 07/08/2020

F. Di Tosto¹, G. Giannelli², A. Muratore², G. Sferruzza³, G. Grillone³

¹ Inail - Uot di Roma

² Inail - Uot di Como

³ Inail - Uot di Palermo

Sommario

Il presente lavoro si propone di fornire un'analisi dettagliata delle novità in materia di conduzione ed esercizio dei generatori di vapore. Le novità introdotte dal D.M. 94 del 07/08/2020 (di seguito "Decreto") in materia di abilitazione alla conduzione dei generatori di vapore, vanno a ridefinire il percorso dei conduttori abilitati nei riguardi del precedente D.M. 01/03/1974. Cambiano radicalmente le modalità di formazione ed i requisiti di ammissione all'esame di abilitazione: restano invece inalterati i limiti dimensionali corrispondenti ai vari gradi di abilitazione.

Cambia la modalità di rinnovo della patente, attraverso un meccanismo ancorato al riscontro dell'idoneità alla mansione accertata dal medico competente. La validità della patente viene estesa sino al compimento dei 70 anni.

Viene reintrodotta (art. 1 c. 4 e allegato III) la possibilità di conduzione senza abilitazione per generatori di limitata pericolosità: viene infatti prevista una procedura di esonero per tipologie di generatori e caratteristiche dimensionali definite.

Il Decreto rivisita anche le sedi di esame e le periodicità delle sessioni di abilitazione.

Il Decreto dispiegherà in pieno i suoi effetti dall'inizio di ottobre 2021.

1. I gradi di abilitazione

L'abilitazione alla conduzione dei generatori di vapore e di acqua surriscaldata viene concessa su diversi gradi, per ciascuno dei quali vengono indicate le caratteristiche dimensionali del generatore. Sono previsti quattro gradi di abilitazione, inversamente proporzionali alle caratteristiche di superficie/producibilità al carico massimo continuo del generatore. Nella tabella 1 sono indicati i gradi di abilitazione e i corrispondenti limiti di superficie/producibilità ammessi.

Grado	Producibilità	Superficie
I	Illimitata	Illimitata
II	Fino a 20 t/h	Fino a 500 mq
III	Fino a 3 t/h	Fino a 100 mq
IV	Fino a 1 t/h	Fino a 30 mq

Tabella 1. Gradi di abilitazione

Da un confronto con il precedente D.M. 01/03/1974 si può constatare come il quadro dei gradi di abilitazioni rimanga inalterato.

Dalla tabella 1 consegue anche quanto previsto nei requisiti dei generatori presso cui, il candidato, deve essere stato formato per la parte pratica. Occorre prestare particolare attenzione alla esonerabilità del generatore: non può essere condotta la parte pratica su generatori esonerabili dalla presenza del conduttore abilitato.

2. L'abilitazione alla conduzione

2.1 La patente di abilitazione

La patente di abilitazione alla conduzione dei generatori di vapore, viene rilasciata su domanda (nella quale deve essere specificato il grado di abilitazione per il quale si intende ottenere l'abilitazione) da presentarsi all'INL (Ispettorato Nazionale Lavoro): è consentito presentare domanda in qualsiasi ispettorato ove abbia luogo la sessione prescelta, anche di provincia diversa da quella di residenza. Dopo il vaglio dei requisiti del candidato (che in ogni caso deve aver compiuto 18 anni alla data di scadenza del bando) il candidato viene ammesso all'esame di abilitazione (art. 8 del Decreto).

2.2 Validità e rinnovo della patente

La patente di abilitazione ha validità sino al compimento del settantesimo anno di età: tale previsione è retroattiva e si applica anche alle patenti conseguite con la vecchia normativa.

Il rinnovo della patente segue un percorso semplificato rispetto alla disciplina previgente: la procedura in vigore sino alla piena efficacia del Decreto prevedeva, infatti, una richiesta di rinnovo da presentare all'ispettorato del lavoro competente per residenza del conduttore. Il nuovo Decreto prevede invece che il rinnovo avvenga a seguito dell'accertamento dell'idoneità alla mansione ai sensi dell'art. 41 del D.Lgs. 81/08 e ss.ii.mm. Salvo diversa prescrizione del medico competente, il rinnovo avviene ogni 5 anni, che diventano 2 oltre i 60 anni di età del conduttore. Dunque con l'entrata in vigore del Decreto, non sarà più necessario presentare istanza all'ispettorato del lavoro per ottenere il rinnovo. Sarà sufficiente allegare alla patente il certificato di idoneità alla mansione rilasciato dal medico competente.

L'idoneità alla mansione e il compimento dei 18 anni sono necessari anche per i generatori esclusi dall'applicazione del Decreto, ai sensi del comma 5 dell'art. 1: si tratta di generatori di piccola potenzialità le cui caratteristiche, specificate dal Decreto al comma 5 dell'art. 1, coincidono con le caratteristiche previste nell'art. 2 comma 1 lettere e) ed f) del D.M. 329/04, risultando, tali generatori, esclusi dall'applicazione di quest'ultimo.

2.3 L'esame di abilitazione

Lo svolgimento degli esami di abilitazione è regolato dall'art. 8 del Decreto. I periodi di svolgimento e le sedi di esame sono elencati nell'allegato I. Si riscontrano novità sia per quel che riguarda i periodi di esame, sia per le sedi di esame.

Da un esame puntuale dell'allegato I si evidenzia l'istituzione di nuove sedi d'esame, la variazione di alcuni periodi d'esame su sedi già presenti nei vecchi elenchi e la revisione del numero delle sessioni per alcune sedi di esame.

L'esame è volto a verificare le conoscenze del candidato in termini teorico-pratici e in materia di conduzione dei generatori di vapore.

L'accertamento delle conoscenze avviene presso un generatore di vapore di tipo non esonerabile ai sensi dell'art. 1 c. 4 e dell'allegato III.

L'elenco dei candidati idonei al relativo grado è affisso all'esterno dei locali dove si svolgono gli esami.

2.4 La commissione esaminatrice

La composizione della commissione esaminatrice è regolata dall'art. 7 del Decreto. Rispetto all'assetto precedente viene specificato che quello che nel D.M. 01/03/1974 era

definito membro esperto, nel Decreto viene univocamente identificato in un funzionario tecnico dell'Unità Operativa Territoriale dell'INAIL competente per territorio.

La tabella 2 descrive la composizione della Commissione esaminatrice.

La nomina della commissione esaminatrice è disposta dal Direttore dell'Ispettorato Territoriale del Lavoro competente per la sede di esame.

Oltre ai componenti tecnici è prevista una componente a cura dell'Ispettorato territoriale del lavoro che svolge le funzioni di segreteria provvedendo all'istruttoria delle domande di ammissione.

Ente	Componenti	Requisiti	Funzione
INL	1 titolare + 1 supplente	Laurea Magistrale Ingegneria	Presidente
ASL/ARPA	1 titolare + 1 supplente	Laurea Magistrale Ingegneria	Componente
INAIL – UOT CVR	1 titolare + 1 supplente	Preferibilmente Laurea Magistrale Ingegneria	Componente
ITL	1	n.a.	Segreteria

Tabella 2. Composizione commissione esaminatrice

3. Il percorso formativo

3.1 Requisiti di ammissione ai corsi

I percorsi formativi costituiscono titolo essenziale per l'ammissione all'esame: il candidato, per essere ammesso all'esame, dovrà dimostrare di aver seguito un corso di formazione teorico-pratico di durata e caratteristiche connesse al grado di abilitazione e ai requisiti con cui è ammesso al corso.

I requisiti più stringenti investono l'ammissione al corso formativo per l'ammissione all'esame di abilitazione di I grado. L'art. 4 c. 2 richiede infatti il possesso del patentino di 2° grado (conseguito da almeno un anno) oppure di un titolo di studio tra quelli previsti dalla lettera a) alla lettera d) dei medesimi articolo e comma. Si tratta di lauree conseguite con il vecchio ordinamento, lauree magistrali, lauree di primo livello (triennali) o diplomi di istituto tecnico (nautico o industriale) o diploma di maturità professionale equipollente. Nelle tabelle 3a e 3b sono indicati i requisiti per l'ammissione ai corsi di formazione grado per grado.

La parte pratica del corso consente la partecipazione ad una sola sessione d'esame. È possibile cambiare generatore o formatore durante il corso, purché ciò venga registrato nella documentazione del corso.

Una volta completato il corso sarà possibile partecipare all'esame solo se tra la data di presentazione della domanda e il termine del corso non risulti trascorso più di un anno. L'introduzione del percorso formativo teorico-pratico archivia l'esperienza del tirocinio che aveva suscitato più di qualche perplessità durante lo svolgimento degli esami. Seppure, sulla carta, costituisse uno strumento valido, il tirocinio non ha garantito un sufficiente grado di preparazione pratica per gli aspiranti conduttori riducendosi spesso ad un tirocinio solo sulla carta. L'articolazione del nuovo percorso formativo, sotto la responsabilità del soggetto formatore, con la previsione di un modulo pratico da svolgere sul campo, garantirà una più attenta formazione del candidato presso il generatore.

3.2 Soggetti formatori

In merito ai soggetti formatori il Decreto fornisce indicazioni precise; a parte le Regioni, come di norma, direttamente o attraverso ASL o soggetti accreditati ai sensi delle procedure previste in sede Conferenza Stato-Regioni, vengono individuati altri enti titolati all'attività di formazione ope legis:

- Ministero del Lavoro;
- Ispettorato Nazionale del Lavoro;
- INAIL.

I percorsi formativi sono a titolo oneroso. Il personale impiegato nell'attività di formazione (formatori) deve documentare un'esperienza in ambito formativo, nel settore dei generatori di vapore per la parte teorica; per la parte pratica devono possedere un'esperienza almeno triennale nelle tecniche di conduzione dei generatori di vapore ovvero nella costruzione e nel funzionamento degli stessi.

Grado	caso	Titolo abilitativo	Titolo di studio
1°	a	2° grado da almeno un anno (art. 4 c. 2)	n.a.
	b	n.a.	Laurea Ingegneria, in Chimica o in Chimica Industriale - R.D. 1652/38 (art. 4 c. 2 lett. a)
	c		Laurea Magistrale LM-20, 21, 22, 25, 29, 30, 33, 34, 53, 54, 71 (art. 4 c. 2 lett. b)
	d		Laurea Specialistica 24S, 26S, 27S, 29S, 32S, 33S, 36S, 37S, 61S, 62S, 81S (art. 4 c. 2 lett. b)
	e		Laurea classi L9, L27 e L28 D.M. 16/03/2007 MIUR (art. 4 c. 2 lett. c)
	f		Laurea classi 10, 21, 22 e 25 D.M. 04/08/2000 MIUR (art. 4 c. 2 lett. c)
	g		Diploma Ist. Tecnico Nautico Sez. Macchinisti (art. 4 c. 2 lett. d)
	h		Diploma di Istituto Tecnico Industriale limitatamente a specifiche specializzazioni (art. 4 c. 2 lett. d)
	i		Diploma di maturità professionale riconosciuto equipollente ai precedenti diplomi (art. 4 c. 2 lett. d)
2°	j		3° grado da almeno un anno (art. 4 c. 3)
	k	n.a.	Diploma di scuola secondaria di II grado (art. 4 c. 3)

Tabella 3 a. Requisiti di ammissione al corso di formazione

Grado	Caso	Titolo abilitativo	Titolo di studio
3°	l	4° grado da almeno un anno (art. 4 c. 4)	n.a.
	m	n.a.	< 18 anni - qualifica triennale leFP attestante l'adempimento del diritto- dovere alla formazione (art. 4 c. 4 lett. a)
	n		> 18 anni - Diploma di scuola secondaria di primo grado e assolvimento dell'obbligo di istruzione (art. 4 c. 4 lett. b)
4°	o	n.a.	< 18 anni - qualifica triennale leFP attestante l'adempimento del diritto- dovere alla formazione (art. 4 c. 5 lett. a)
	p		> 18 anni - Diploma di scuola secondaria di primo grado e assolvimento dell'obbligo di istruzione (art. 4 c. 5 lett. b)

Tabella 3 b. Requisiti di ammissione al corso di formazione

3.3 I percorsi per i vari gradi di abilitazione

In funzione del grado per il quale si intende ottenere l'abilitazione e del pre-requisito individuato per la partecipazione al corso, il percorso formativo prevede diverse articolazioni, sia in termini di tempistiche che di aree tematiche da sviluppare. In alcuni casi viene concessa una riduzione della durata delle parti pratiche e teoriche ma anche l'esenzione dalla parte teorica (percorso formativo per il conseguimento del patentino di primo grado – Allegato I par. 10 punto 10.3.1). La valutazione del percorso formativo da condurre a termine per l'ammissione all'esame è dunque cucito sul candidato in termini di valutazione del profilo culturale e professionale dello stesso. Per meglio comprendere quanto detto esaminiamo il caso del percorso per il conseguimento del primo grado.

La scelta del percorso adeguato parte dalla valutazione del profilo culturale di provenienza e per il quale è stabilita l'ammissione al percorso stesso. Con riferimento alla tabella 3a il candidato si presenterà all'ammissione con un determinato caso (dal caso a al caso i). La combinazione della presenza di abilitazione al grado precedente e della casistica specifica culturale cui è riferibile, instrada il candidato verso un corso propriamente articolato e di durata definita. Nella tabella 4 il caso riferibile ai punti 10.1, 10.2 e 10.3 del paragrafo 10 dell'allegato II del Decreto: candidato in possesso dei titoli di studio previsti nei casi da b ad i della tabella 3a, con o senza abilitazione al 2° grado.

Caso (Tab. 3a)	2° grado	Durata parte teorica (h)		Durata parte pratica	Requisiti GDV
		Modulo giuridico	Modulo tecnico		
b, c, d	no	12	-	40 gg (non < di 320 ore)	Pot. > 20 t/h o Sup. > 500 mq
	si	-	-	20 gg (non < di 160 ore)	
e, f	no	12	48	50 gg (non < di 400 ore)	
	si	-	-	25 gg (non < di 200 ore)	
g, h, i	no	12	148	60 gg (non < di 480 ore)	
	si	-	-	30 gg (non < di 240 ore)	
a	si	12	148	60 gg (non < di 480 ore)	

Tabella 4. Percorso formativo abilitazione 1° grado

In analogia con l'esempio precedente si può procedere anche per gli altri gradi, come specificato nelle tabelle 5, 6 e 7.

Caso (Tab. 3a)	3° grado	Durata parte teorica (h)		Durata parte pratica	Requisiti GDV
		Modulo giuridico	Modulo tecnico		
k	no	12	128	40 gg (non < di 320 ore)	Pot. > 3 t/h o Sup. > 100 mq
	si	6	64	20 gg (non < di 160 ore)	
j	si	12	128	40 gg (non < di 320 ore)	

Tabella 5. Percorso formativo abilitazione 2° grado

Caso (Tab. 3a)	4° grado	Durata parte teorica (h)		Durata parte pratica	Requisiti GDV
		Modulo giuridico	Modulo tecnico		
m,n	no	12	108	30 gg (non < di 240 ore)	Pot. > 1 t/h o Sup. > 30 mq
	si	6	54	15 gg (non < di 120 ore)	
l	si	6	54	15 gg (non < di 120 ore)	

Tabella 6. Percorso formativo abilitazione 3° grado

Caso (Tab. 3a)	Abilitazione	Durata parte teorica (h)		Durata parte pratica	Requisiti GDV
		Modulo giuridico	Modulo tecnico		
o	n.a.	8	72	30 gg (non < di 240 ore)	Generatore non esonerabile dalla conduzione abilitata
p	n.a.	8	72	30 gg (non < di 240 ore)	

Tabella 7. Percorso formativo abilitazione 4° grado

In merito alla durata della parte pratica permane un dubbio sulla conduzione continua o discontinua: se nel caso di conduzione continua il problema delle tempistiche non è posto in discussione (salvo che per la presenza o l'assenza di funzionamento a ciclo continuo), tale aspetto temporale diviene critico nel caso di sorveglianza senza assistenza continua a 24 o 72 ore. In quest'ultimo caso, infatti, si pone il problema delle giornate di conduzione che potrebbero non essere considerabili come consecutive. In tale ottica diventa critica la durata effettiva della parte pratica della formazione che la commissione dovrà valutare in sede di riunione preliminare.

3.4 I contenuti dei corsi

Il decreto riallinea i contenuti dei corsi alla situazione giuridico-tecnica attuale. Vengono infatti introdotti gli argomenti relativi al D.Lgs. 81/08 e ss.ii.mm. nonché la direttiva PED, recepita con D.Lgs. 93/2000 e ss.ii.mm. La conseguenza dell'introduzione di questi due nuovi argomenti è l'allineamento (almeno per i generatori la cui costruzione sia avvenuta dopo l'adozione del D.Lgs. 93/2000) anche delle relative norme tecniche di riferimento, con la formazione che dovrà, necessariamente, tenere conto delle norme EN adottate nel corso degli anni. Sicuramente costituiranno oggetto di formazione le norme UNI/EN 12952 e 12953 (tutte le parti) che caratterizzano rispettivamente i generatori a tubi d'acqua e i generatori a tubi da fumo: dette norme garantiscono infatti il rispetto dei requisiti essenziali di sicurezza della direttiva PED. Va tuttavia osservato che la scelta del codice di riferimento per la progettazione dei generatori, ai fini del rispetto dei RES della Direttiva PED, è demandata in via esclusiva al fabbricante, che potrà optare per codici diversi dalle EN, dimostrando, in ogni caso, il rispetto dei RES imposti dalla Direttiva.

Accanto alle norme non meno importanti, ai fini della corretta conduzione dei generatori, il Comitato Termotecnico Italiano ha sviluppato e pubblicato nell'ambito UNI una serie di specifiche tecniche che costituiscono un valido riferimento per l'esercizio e la conduzione dei generatori; in particolare sono di assoluta pertinenza le specifiche tecniche UNI/TS 11325-10:2018 e UNI 11325-3:2018: si tratta di due specifiche che affrontano la problematica della "sorveglianza" dei generatori di vapore o di acqua surriscaldata con o senza assistenza continua del generatore. Vale la pena, in questa sede, accennare al significato del termine "Sorveglianza" introdotto nella specifica tecnica: si tratta di un termine perfettamente calzante con l'elevato grado di automazione dei generatori moderni, in termini assoluti esaustivo per i generatori a funzionamento automatico, per i generatori non a funzionamento automatico integra anche le operazioni di conduzione del generatore, anche se queste sono ormai condotte con l'ausilio di moderni accessori che agevolano il compito del conduttore. Le due specifiche, allineate con le norme UNI/EN 12952 e UNI/EN 12953, forniscono un valido strumento tecnico per una sorveglianza, adeguatamente attenta, in caso di conduzione senza assistenza continua del conduttore (che comunque deve essere abilitato, salvo che per i generatori esonerati dalla conduzione abilitata). Di particolare rilevanza, tra le altre, ai fini dell'esercizio dei generatori di vapore, le specifiche tecniche UNI/TS 11325-6:2014 "Messa in servizio delle

attrezzature ed insiemi in pressione”, e la 11325-12:2018 “Verifiche periodiche delle attrezzature e degli insiemi in pressione”.

Accanto all'introduzione dei nuovi elementi sopra introdotti, che arricchiscono gli argomenti dei corsi, resta valido l'impianto degli argomenti generali già presenti nel precedente D.M. 01/03/1974 in quanto riportati nelle parti 11, 12, 13 e 14 dell'allegato II del Decreto.

4. Gli esoneri

Lungamente atteso dagli utilizzatori il Decreto reintroduce a pieno titolo l'istituto dell'esonero dalla conduzione abilitata, per generatori di limitata pericolosità. Tale accezione di limitata pericolosità, per i generatori di vapore o di acqua surriscaldata non deve trarre in inganno: la limitata pericolosità correlata alle caratteristiche del generatore, deve essere comunque accompagnata da un'attenta sorveglianza (sia pure da persona non abilitata) e da una costante attenzione alla manutenzione ed ai controlli sul generatore e sull'acqua di alimento e di caldaia. In particolare ciò vale per i generatori di vapore e di acqua surriscaldata a bassa pressione per i quali è necessario allertare gli utilizzatori sulla presenza comunque di rischi connessi al loro esercizio e valutare attentamente gli ausili hardware e software al conduttore.

I generatori interessati a questa tipologia di deroga alla conduzione abilitata sono quelli a cui rimanda l'art. 1 c. 4 del Decreto e sono meglio specificati nell'allegato III punto 1.1. le cui caratteristiche, per comodità, sono riportate in tabella 8.

La casistica dei generatori per i quali è possibile richiedere l'esonero è piuttosto articolata, comprendendo generatori certificati ed accessoriati secondo la normativa nazionale preesistente alla PED e generatori accessoriati e certificati secondo la direttiva PED; in quest'ultimo caso la certificazione può essere prevedendo la realizzazione di un insieme, ovvero può prevedere la fornitura del solo involucro, demandando poi all'utilizzatore l'accessoriamento del generatore secondo le informazioni fornite dal fabbricante. Si può, inoltre, porre il caso di un generatore già precedentemente esonerato, per cui cambino le condizioni poste alla base del rilascio dell'esonero (es. spostamento).

In ogni caso l'allegato III traccia la strada per affrontare tali casi, distinguendo due categorie di generatori:

- Punto a. del paragrafo 2 dell'allegato III punto 2.1
 - Generatori esclusi dal controllo della messa in servizio di cui all'art. 5 del D.M. 329/04, con l'esonero rilasciabile sulla base della documentazione allegata in fase di dichiarazione di messa in servizio di cui all'art. 6 del medesimo D.M. 329/04;
- Punto b. del paragrafo 2 dell'allegato III punto 2.1
 - Generatori soggetti a verifica obbligatoria di primo impianto ovvero della messa in servizio di cui all'art. 4 del D.M. 329/04, con l'esonero rilasciabile a seguito della verifica di cui al medesimo punto 4.

Riferimento Allegato III	Tipo generatore	Producibilità	Ps	Ps x V	Superficie	Temperatura	Potenzialità
a.	Attraversamento meccanico	n.a.	≤ 12 bar	≤ 3000 bar x L	n.a.	n.a.	n.a.
b.	Vapore a bassa pressione	≤ 2 t/h	≤ 1 bar	n.a.	≤ 100 mq	n.a.	n.a.
c.	Acqua surriscaldata a bassa pressione	n.a.	≤ 5 bar	n.a.	≤ 100 mq	≤ 120 °C	≤ 1380 kW
d.	Sorgente termica diversa dal fuoco	Membrane soggette a pressione a contatto con il fluido scaldante progettate per $T \geq$ Temperatura del fluido scaldante					

Tabella 8. Caratteristiche dei generatori esonerabili – Allegati III D.M. n° 94 del 07/08/2020

Il punto 2.2. fornisce infine indicazioni sulla permanenza dell'esonero già rilasciato precedentemente, per generatori assoggettati a controllo di messa in servizio, almeno sino a che non mutino le condizioni poste alla base del rilascio dello stesso: in quest'ultimo caso, al mutare delle condizioni, potrà essere rilasciato un nuovo esonero a seguito di una nuova verifica di cui all'art. 4 del D.M. 329/04.

Dietro la categorizzazione imposta dall'allegato III del Decreto si annida una casistica articolata di generatori per i quali la procedura operativa per il rilascio dell'esonero da parte dell'UOT INAIL competente per territorio, dovrà fornire le indicazioni appropriate. I generatori esonerati dalla conduzione abilitata dovranno essere condotti da persona di età maggiore di 18 anni e riconosciuta idonea alla mansione ai sensi dell'art. 41 del D.Lgs. 81/08 e ss.ii.mm.

5. Sorveglianza con assistenza continua o senza assistenza continua

Premesso che il Decreto non si occupa di tali regimi, conviene, tuttavia, in questa sede, affrontare questo argomento, stante il fatto che ormai tutti i moderni generatori tendono ad essere costruiti e accessoriati per consentire il regime di sorveglianza senza assistenza continua.

Il fatto di essere condotti senza assistenza continua, richiede che il generatore sia adeguatamente accessoriato, al fine di garantire il controllo automatico di alcuni parametri fondamentali per il sicuro esercizio, negli intervalli di assenza della persona addetta dalla sorveglianza del generatore (sia essa a 24 ovvero a 72 ore).

Le specifiche tecniche 11325-3:2018 e 11325-10:2018 forniscono, in questo ambito, indicazioni puntuali circa le operazioni che la persona addetta dovrà effettuare con le cadenze prestabilite, nonché sugli accessori necessari a garantire la sicurezza dell'esercizio. Stabilisce inoltre quali siano le operazioni che dovranno essere condotte con la presenza del conduttore ed in particolare:

- Fase di accensione o riaccensione del generatore;
- Durante i sopralluoghi periodici per la verifica del funzionamento dei dispositivi di controllo, regolazione e sicurezza;
- In caso di malfunzionamento dei dispositivi di regolazione e controllo, con conduzione manuale continua, sino alla risoluzione del malfunzionamento.

In merito agli accessori le Specifiche individuano, innanzitutto, quali funzioni siano essenziali per la gestione in sicurezza dei generatori. A titolo esemplificativo si riportano, in tabella 9, i parametri caratteristici, come estratti dalla 11325-3:2018 al punto 5.2.2, per generatori ad attraversamento meccanico e per generatori di acqua surriscaldata: detti parametri sono giudicati dalle specifiche critici ai fini della sicurezza e, durante la

sorveglianza con assistenza o senza assistenza continua devono essere posti all'attenzione del conduttore (anche in sala controllo, se prevista) o controllati dai sistemi in caso di sorveglianza senza assistenza continua (generatori a funzionamento automatico).

Tipo di generatore	Parametro
Generatori ad attraversamento meccanico	Temperatura di uscita del vapore
	Temperatura dei fumi
	Pressione del vapore
	Posizione del registro di deviazione del flusso gassoso (GDV a recupero)
Acqua surriscaldata	Temperatura di mandata e di ritorno dell'acqua
	Pressione in caldaia
	Posizione del registro di deviazione del flusso gassoso (GDV a recupero)
	Pressione vaso di espansione (pressurizzato)
	Livello vaso di espansione
	Rete: pressione di mandata e di ritorno
	Pompe di circolazione: pressione di spinta
Tabella 9 - Parametri critici.	

Accanto all'individuazione dei parametri caratteristici, validi per qualunque tipo di sorveglianza si decida di adottare, le Specifiche forniscono indicazioni aggiuntive sui controlli da adottare in caso di adozione della sorveglianza senza assistenza continua della persona addetta per un periodo di oltre 24 e fino a 72 ore:

- Sistema per il controllo automatico della conducibilità dell'acqua alimento con blocco dell'alimentazione al sistema scaldante in caso di parametri fuori specifica;
- Sorveglianza automatizzata delle condense di recupero (se è previsto tale recupero) con deviazione delle condense in caso di riscontro di caratteristiche fuori specifica (del fabbricante o, in difetto, da normativa) ovvero con blocco in caso di avaria del sistema di deviazione o assenza di questo sistema.
- Per i generatori di vapore, esclusi quelli ad attraversamento meccanico, è necessario il controllo automatizzato e permanente anche dell'acqua di caldaia.
- Dispositivo di controllo fiamma per combustibili gassosi di tipo autocontrollato; per tutti gli altri bruciatori è richiesto il controllo, alla scadenza stabilita del

periodo di assenza del conduttore (ogni 72 ore), del dispositivo di controllo fiamma.

In appendice, le specifiche forniscono un'ampia e dettagliata indicazione dei controlli e delle relative tempistiche con cui questi devono essere effettuati al fine di garantire la sicurezza di esercizio del generatore. L'indicazione avviene attraverso tabelle di prospetto, distinte per tipologia di generatore e riportando la tipologia di controllo da effettuare sui dispositivi o sui parametri critici. Sono previsti diversi tipi di controllo:

- O – Osservazione: es. rumori, anomali odori o altri riscontri anomali;
- C – Controllo, controlli e/o prove del corretto funzionamento, comprensivo dell'osservazione;
- T – Test, Controlli e/o prove del corretto funzionamento, effettuati da personale qualificato, mediante la comparazione dei valori misurati con campioni di misura riferibili.

6. Conclusioni

Da quanto esposto sin qui, si può affermare che il D.M. n° 94 del 07/08/2020 costituisce un punto di svolta nella conduzione dei generatori di vapore. La figura del conduttore viene valorizzata attraverso l'adozione di percorsi formativi articolati e tarati in funzione del profilo culturale e del grado di abilitazione che si intende conseguire. Si rileva uno snellimento delle procedure connesse con il rinnovo dell'abilitazione e si assiste alla reintroduzione dell'istituto dell'esonero dalla conduzione abilitata; quest'ultimo aspetto incontra le esigenze delle aziende di poter contare su una deroga alla conduzione abilitata, per generatori di limitata pericolosità, già prevista nella previgente normativa nazionale.

Vengono regolati i requisiti dei soggetti formatori e dei formatori stessi.

L'elevazione dell'età massima del conduttore, portata a 70 anni, riscontra la tendenza all'innalzamento dell'età di servizio del personale addetto prima del collocamento in quiescenza.

Vengono riviste le Sedi e le date delle sessioni di esame, codificata in modo puntuale la composizione della commissione esaminatrice; gli argomenti dei percorsi formativi vengono adeguati al progresso tecnologico raggiunto ed al panorama normativo vigente.

7. Bibliografia

[1] Ministero del lavoro e delle politiche sociali - DECRETO 7 agosto 2020 - Abilitazione alla conduzione di generatori di vapore;

[2] Il Ministro per il lavoro e la previdenza sociale di concerto con il Ministro per l'industria, il commercio e l'artigianato - Decreto Ministeriale 1° marzo 1974 - Norme per l'abilitazione alla conduzione di generatori di vapore.

Anomalie nell'intervento delle valvole di sicurezza in relazione all'utilizzo e alla configurazione

F. Panin¹, E. Artenio², F. Di Rocco³

¹ Inail - Uot di Padova

² Inail - Dit

³ Inail - Uot di Verona

Sommario

Per assicurarci che un'attrezzatura in pressione sia esercita in sicurezza il DM 329/04 prevede verifiche periodiche d'integrità e funzionamento, le prime sono definite dall'art. 12 ed hanno obbligo di verifica ogni 10 anni (tranne per gli estintori) le seconde sono definite dall'art. 13 e hanno obbligo di verifica dai 2 ai 5 anni; in sintesi una volta che si è accertato il buono stato delle membrature l'attenzione si rivolge, con maggiore frequenza, agli accessori di sicurezza.

Pur essendo le VS (Valvole di Sicurezza) le componenti attenzionate con più frequenza in una linea in pressione, pur essendoci svariati tipi di valvole, spesso la loro scelta viene fatta con poca consapevolezza di tutti gli aspetti che costituiscono le condizioni al contorno del buon funzionamento, come ad esempio la compatibilità con i materiali dei componenti (tutti i componenti!) il tipo di scarico, ecc...

Scelte di VS non compatibili, o comunque non ottimali, per una certa installazione, possono portare ad anomalie di funzionamento, viceversa una corretta scelta delle VS, anche in linea con i suggerimenti del costruttore, possono allungare di molto la durata del periodo di funzionamento ottimale.



Figura 1. Componenti di una VS

1 Definizione di valvola di sicurezza

Lo standard ISO 4126-1 definisce la valvola di sicurezza come una “*valvola che automaticamente, senza l’assistenza di un’energia diversa da quella del fluido in questione, scarica una quantità di fluido al fine di prevenire il superamento di una pressione di sicurezza predeterminata e che è progettata per richiudersi e impedire un ulteriore flusso di fluido dopo che sono state ripristinate le condizioni di esercizio normale*”; così definito è un dispositivo di grande affidabilità, a sicurezza intrinseca, anche perché richiede che “*le valvole di sicurezza devono essere costruite in modo che la rottura di ogni parte o il guasto di ogni dispositivo non ostruisca il libero e totale scarico attraverso la valvola*”.

1.1 Componenti di base

Le valvole di sicurezza possono essere costituite anche da molti componenti a seconda di diversi fattori come utilizzo, affidabilità, stress, frequenza nella manutenzione, simulazione di intervento ecc.

I componenti di base, quelli cioè che sono sempre presenti in ogni tipo di valvola (tranne a contrappeso), sono sempre gli stessi, ovviamente possono presentarsi con materiali e forme diverse.

In figura 2 i disegni schematici di due valvole a protezione di attrezzature con fini diversi, autoclave di spumantizzazione (Sx) e generatore di vapore (Dx), con configurazioni differenti hanno comunque in evidenza gli stessi componenti.

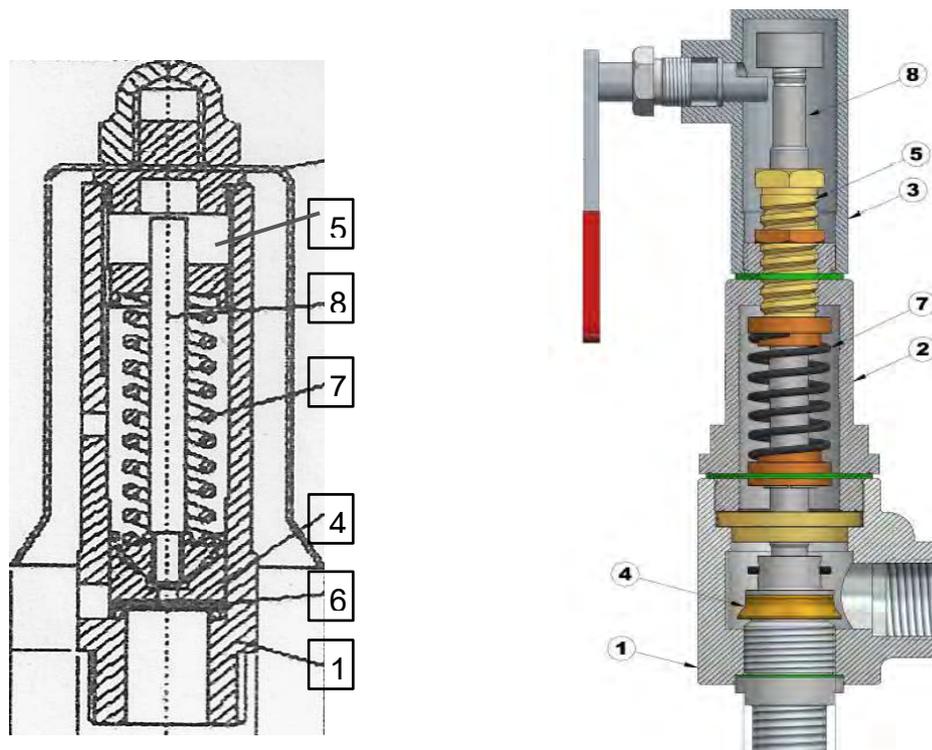


Figura 2. Due valvole di sicurezza*: una con protezione (Sx) una con maniglia per verificarne l'apertura (Dx)

1.2 Funzionamento di una valvola di sicurezza

1.2.1 Dinamica di intervento

L'intervento di una valvola di sicurezza si può riassumere così:

- I. Il fluido dell'attrezzatura protetta dalla valvola preme sulla superficie della sede e dell'otturatore alla pressione di esercizio;
- II. Per un'anomalia la pressione del fluido sull'otturatore aumenta e vince quella della molla sull'otturatore, quindi l'otturatore si alza, comprimendo la molla e spostando lo stelo (INTERVENTO entro il 3% dalla pressione di taratura);
- III. Se la pressione è sufficiente l'otturatore arriva ad un punto oltre il quale non può più alzarsi raggiungendo la massima portata di scarico (SOVRAPPRESSIONE entro il 10% dalla pressione di taratura), così parte del fluido dell'attrezzatura protetta esce, avendo come primo effetto un abbassamento della pressione del serbatoio;
- IV. La pressione del fluido nel serbatoio si abbassa fino a quando la pressione della molla sull'otturatore vince quella del fluido sull'otturatore (RICHIUSURA).

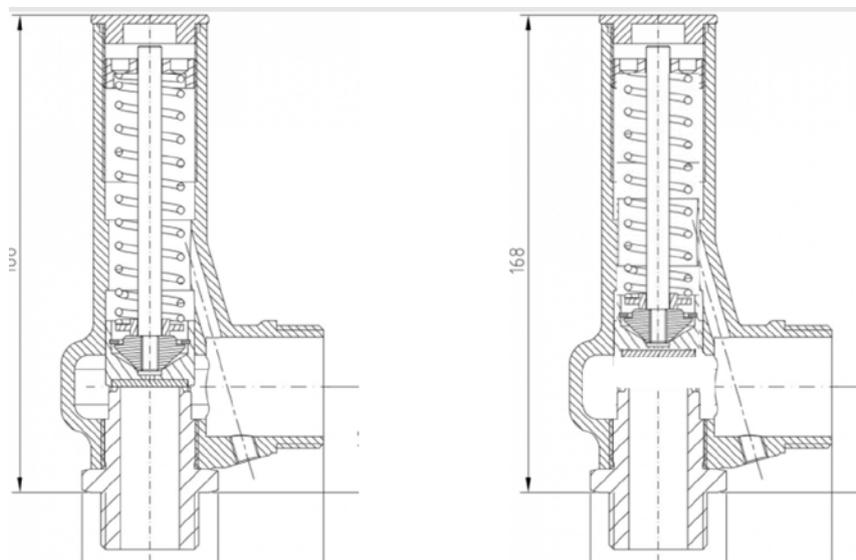


Figura 3. VS* in tenuta (Sx) e apertura (Sx)

1.2.2 Vantaggi di un sistema che sfrutta l'energia del guasto per eliminarlo

A differenza di altri dispositivi, sfruttare l'energia dell'anomalia per attivare la valvola di sicurezza rende il dispositivo molto più affidabile di altri. I malfunzionamenti della valvola inoltre sono raramente relativi ad una sua completa mancata apertura, ma una mancata apertura entro un intervallo di pressione ben definito, questo rende il sistema molto affidabile.

1.3 Anomalie di funzionamento

Il corretto funzionamento vedrebbe la valvola di sicurezza intervenire alla pressione di taratura con una tolleranza ammissibile del 3%, per poi raggiungere la sovrappressione, calare e richiudersi.

Posto che la taratura si sia svolta correttamente possono verificarsi diverse anomalie:

- Mancato intervento (alla massima pressione disponibile)
 - ✓ corsa dello stelo intasata (ad esempio da detriti che si depositano nel tempo all'interno della corsa passando dal foro sul cappello)
- Sovrappressione oltre il 10% della pressione di taratura
 - ✓ corsa dello stelo intasata (da detriti che si depositano nel tempo all'interno della corsa passando dal foro sul cappello)
 - ✓ guarnizione incollata (affinità chimica guarnizione-metallo, incompatibilità col fluido, inquinamento ambientale, ecc...)
- Intervento oltre il 3% della pressione di taratura
 - ✓ corsa dello stelo intasata (da detriti che si depositano nel tempo all'interno della corsa passando dal foro sul cappello)
 - ✓ guarnizione incollata (affinità chimica guarnizione-metallo, incompatibilità col fluido, inquinamento ambientale, ecc...)
- Intervento intempestivo ovvero a pressione inferiore a quella di taratura
 - ✓ molla usurata (spesso per motivi ambientali)
- Scarico insufficiente
 - ✓ corpo valvola intasato (da sporcizia o dal fluido se scarico convogliato)
- Trafilamento in richiusura
 - ✓ Stelo storto
 - ✓ Guarnizione danneggiata
 - ✓ Otturatore danneggiato
 - ✓ Interfaccia guarnizione-otturatore sporca

Alcuni costruttori hanno provveduto a fare fronte alle cause delle anomalie sopra elencate tramite delle innovazioni nella configurazione della valvola di sicurezza

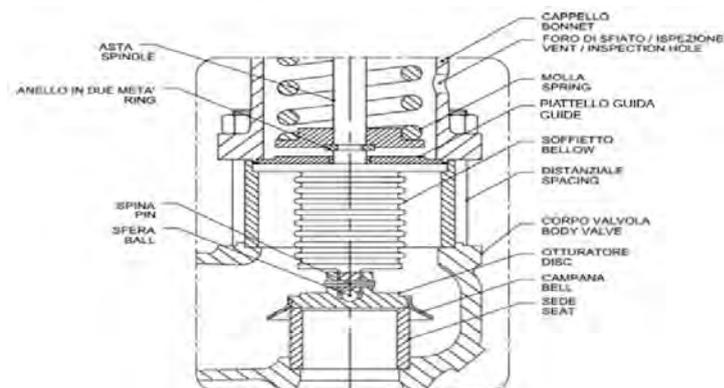


Figura 4. Particolare dei componenti compresi tra SEDE e STELO utili alla prevenzione

L'accoppiamento tra stelo e sede (fig. 4) prevede diversi altri componenti oltre l'otturatore:

- SOFFIETTO
 - ✓ Protegge tutti i componenti racchiusi dal cappello dal fluido dell'attrezzatura
 - ✓ Equilibra l'effetto dovuto alla contropressione imposta con modifiche dell'alzata e quindi dello scarico
- SPINA E SFERA
 - ✓ Accoppiano lo stelo, protetto dal soffiutto, all'otturatore, permettendogli di inclinarsi per piccoli angoli prima durante e dopo l'intervento vero e proprio
- CAMPANA
 - ✓ Raccoglie e convoglia il fluido in uscita dalla sede verso il corpo permettendo l'intervento ovvero l'alzata dell'otturatore

1.4 Tipi di funzionamento

La forma a “campana” dell’otturatore facilita lo scarico (blowdown) e quindi l’alzata, perché il fluido non solo preme una prima volta sull’otturatore prima di uscire, ma anche una seconda volta, dopo essere stato riflesso (rimbalzato) dal corpo valvola, grazie alla campana che incanala il flusso.

La quantità di flusso riflesso può variare grazie alla regolazione del blowdown, andando a variare la dinamica di riflessione del fluido che, colpita la parte inferiore dell’interno del corpo valvola, viene costretto ad una inversione di direzione generando la spinta suppletiva.

La dinamica d’intervento definisce due tipi di valvole di sicurezza, una a blowdown basso ed una a blowdown alto, distinzione ripresa anche dal punto di vista normativo, sia nella ISO 4126-1 che nella UNI 13648-1. Queste due tipologie di VS hanno configurazione costruttive simili con l’unica differenza dovuta alla geometria della zona SEDE-OTTURATORE.

Quella sopra esposta non deve essere considerata una categorizzazione rigida in quanto sul mercato sono disponibili anche VS caratterizzate dalla possibilità di effettuare una regolazione del blowdown. A questa tipologia di valvole di sicurezza, si aggiungono le cosiddette valvole sfioratrici, con una configurazione costruttiva molto diversa e destinata ad avere alzata prossima allo 0, con una forma dell’otturatore speculare, rispetto alle VS normali, che non permette l’alzata vera e propria.

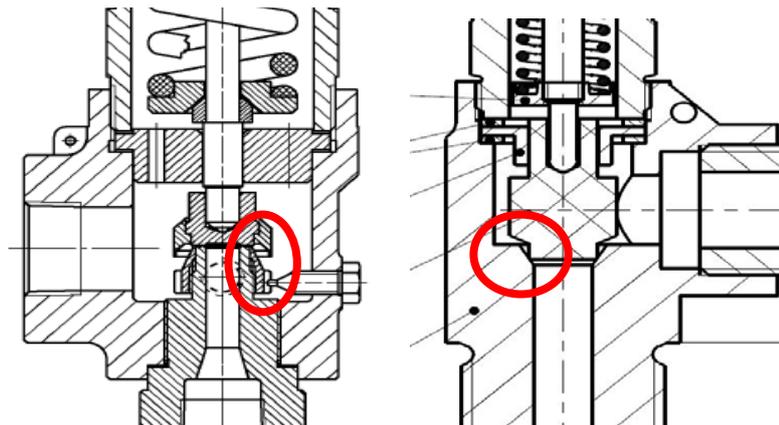


Figura 5. Confronto tra una VS* regolabile in blowdown (Sx) ed una valvola sfioratrice (Dx)

Come si vede dalla figura 5, mentre l’otturatore della valvola di sinistra ha la classica forma a campana, per convogliare ed essere spinto dalla maggior parte di fluido in pressione, l’otturatore della valvola di destra ha una forma speculare, per fare scivolare via il fluido una volta uscito dalla sede

1.5 Verifiche d’intervento

Dal precedente elenco si evince che la corsa dello stelo deve essere libera da ostacoli poiché, in caso contrario, questo potrebbe avere gravi ripercussioni sull’efficienza del dispositivo.

In ambienti come le industrie di marmo e le acciaierie ad esempio, dove polveri e scorie, dovute alla lavorazione, rimangono sospese in aria, si sono riscontrate malfunzionamenti delle valvole di sicurezza, causati da depositi e residui che ne ostruivano le parti mobili.

In questi casi le valvole intervenivano in ritardo rispetto alla pressione di taratura. La loro manutenzione evidenziava una corposa presenza di polvere accumulatasi nelle zone mobili, la cui eliminazione ha riportato il funzionamento della valvola a livelli accettabili.

Alla luce di quanto sopra esposto l'utilizzatore ha deciso di implementare una procedura di manutenzione annuale delle valvole di sicurezza.

1.5.1 Configurazione verificabile senza simulazione di guasto

Vista l'importanza di verificare la corsa dello stelo, i produttori di valvole hanno messo in campo diversi prodotti (vedi fig. 6) atti a verificare l'efficienza delle valvole di sicurezza, senza doverle smontare dall'attrezzatura che proteggono.

La possibilità di intervento viene verificata tramite:

- leva collegata allo stelo
- anello attaccato allo stelo
- stelo a vista
- ghiera mobile per spostamento stelo

Le verifiche d'efficienza non sono una verifica della corretta taratura, ovvero la puntualità della valvola nell'aprire alla pressione prevista e di raggiungere la massima alzata entro il 10% da essa, ma esclusivamente prova atta ad accertare la libertà di movimento delle parti mobili.

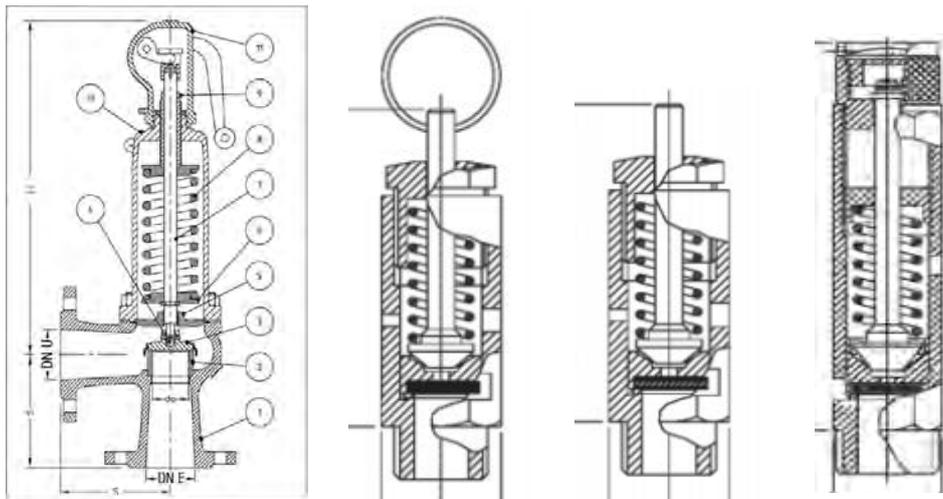


Figura 6. Esempi di VS* con apertura manuale

Seppure le istruzioni sull'uso e la manutenzione delle valvole lo riportino, alcune importanti informazioni talvolta vengono, sia dall'utilizzatore che da progettisti e installatori. Ad esempio i manuali riportano che *“le valvole devono essere aperte manualmente facendole scattare mediante la leva o la ghiera di apertura; questa prova deve farsi mantenendo nell'apparecchio protetto una pressione compresa fra l'80 e il 90% di quella di taratura della valvola*”*.

Questa operazione viene spesso omessa, sia perché le valvole di sicurezza sono installate in posti difficili da raggiungere, (scale improvvisate e posti stretti), sia perché può richiedere uno sforzo eccessivo come ad esempio per una valvola da 20 bar con un piccolo orifizio installata su un serbatoio a 10 bar, obbligherebbe il verificatore a sollevare un peso nell'ordine dei 10 kg.

1.5.2 Configurazione verificabile solo con simulazione di guasto

Quando la valvola non è stata configurata dal costruttore per verificarne con facilità l'efficienza, è possibile comunque provare la valvola senza disinstallarla dall'attrezzatura, a patto che quest'ultima sia protetta mediante l'attivazione di altre misure (svuotamento del serbatoio e possibile fermo linea).

1.5.2.1 Messa in pressione della linea per verifica valvola

L'art. 13 del D.M. 329/04, al comma b), recita: "...La verifica di funzionalità dei predetti accessori di sicurezza può essere effettuata con prove a banco, con simulazioni, oppure, ove non pregiudizievole per le condizioni di esercizio, determinandone l'intervento in opera.". Il suddetto articolo autorizza la verifica delle valvole di sicurezza in loco, dando l'opportunità di verificare l'effettivo intervento che, in assenza delle operazioni manutentive dovute alle verifiche, si sarebbe manifestato in caso di una sovrappressione anomala.

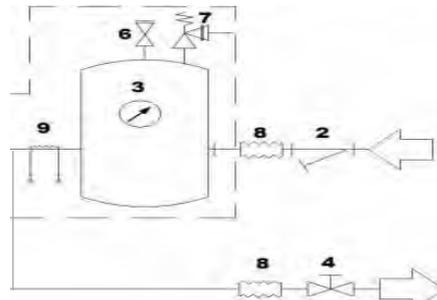


Figura 7. Esempio di linea di aria in cui a valvola (4) chiusa la VS (7) interviene con

1.5.2.2 intercettazione di una valvola di sicurezza con un 3 vie

Sistema utilizzato soprattutto in quegli impianti con fluidi pericolosi, cabine REMI o celle di refrigerazione ad esempio, dove non solo per disinstallare la valvola bisogna svuotare l'impianto con particolare attenzione, ma il fermo linea può provocare grossi danni

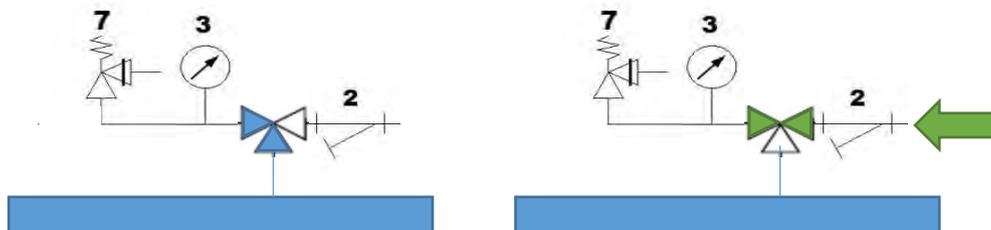


Figura 8. Prova su linea funzionante di una VS tramite intercettazione con un 3 vie, configurazione in esercizio (Sx) con fluido di linea (blu) e di prova (Dx) con fluido da bombola (verde); la valvola di non ritorno (2) è facoltativa,

Questo tipo di verifica implica l'intercettazione del collegamento VS-LINEA, questo perché la valvola a tre vie realizza il collegamento VS-BOMBOLA.

In questo caso, come richiesto nel punto 12.6 del capitolo D.1.D.2 della Raccolta E, è necessario che il datore di lavoro preveda una procedura operativa per cui il manutentore:

1. rimuove il sigillo dell'organo di vigilanza applicato in occasione dell'autorizzazione all'inserimento dell'organo di intercettazione tra valvola e attrezzatura
2. firmi su un registro data e ora della rimozione
3. testi la valvola
4. applichi un nuovo sigillo
5. firmi sullo stesso registro data e ora della nuova applicazione
6. rende disponibile il registro all'organo di vigilanza in occasione di verifica periodica

1.5.2.3 Verifica con martinetti

La norma UNI 11513 regola la verifica delle valvole di sicurezza tramite martinetti, in questo caso il cappello della valvola viene smontato e lo stelo tirato da un martinetto.

La forza necessaria allo sfioro, che viene applicata allo stelo tramite il martinetto, viene utilizzata per il calcolo della pressione di intervento. Per utilizzare questo sistema risulta necessario uno stelo di una lunghezza necessaria tale da consentire la trazione del martinetto.

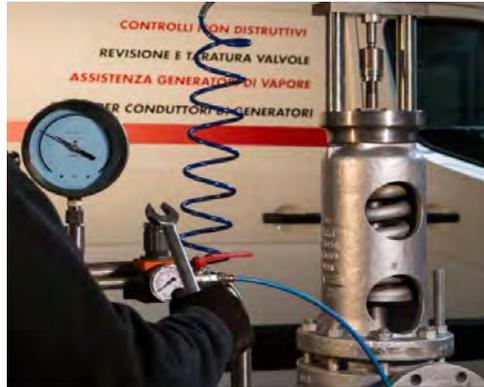


Figura 9. Valvola di sicurezza testata sul posto tramite banco mobile e martinetti

2 Scelta corretta delle VS

Evidenziati i principali dettagli caratteristici delle valvole di sicurezza, questi devono essere considerati al momento della scelta, in funzione del tipo di installazione da proteggere.

2.1 Compatibilità dei materiali

La ISO 4126 specifica esplicitamente che i materiali devono essere scelti per resistere alle sollecitazioni alle quali la VS potrebbe essere sottoposta, inoltre, nel caso di fluidi combustibili, è opportuno accertarsi che il materiale sia antiscintillante.

2.1.1 Corpo valvola

Con l'esperienza maturata i costruttori non producono più solo valvole in ghisa o ottone, ma anche in inox, in acciai speciali, in materiale plastici e in acciai rivestiti da materiali plastici, qualche esempio nella figura 6.



Figura 10. VS * da sinistra a destra: INOX - OTTONE - PVC

2.1.2 Otturatore

La ISO 4126, trattando i materiali dell'otturatore, chiede esplicitamente che *“i materiali per la sede e il disco devono essere scelti in modo da garantire la resistenza al legame metallico tra queste due superfici al fine di impedire un aumento della pressione di taratura per esempio mediante incollaggio o taratura a freddo”*.

Una particolare valutazione va fatta riguardo la tipologia di accoppiamento otturatore-orifizio. La tenuta metallica garantisce maggior precisione in apertura per assenza di incollaggi ma risulta molto sensibile alla presenza di impurità sulla superficie di contatto. La tenuta morbida evita la presenza di piccoli trafileamenti ma genera il fenomeno dell'incollaggio.

I costruttori stanno sempre più valutando l'importanza della compatibilità dei materiali dell'otturatore con i fluidi contenuti nelle attrezzature protette, per questo ci sono sempre più materiali tra cui scegliere per gli otturatori o le loro guarnizioni, alcuni esempi in tabella.

MATERIALE/RESISTENZA	CORROSIONE	TERMICA
ASTM 420	ALTA	-196/500°C
ASTM 316	ALTA	-196/500°C
HASTELLOY	ALTA	ALTA
VETRO TEMPERATO	ALTA	
SILICONE		-60/200°C
PTFE	ALTA	-196/250°C
VITON		-20/200°C
NBR		-10/100°C
KALREZ	ALTA	-20/250°C
EPDM		-50/150°C

Tabella 1. Alcuni materiali utilizzati da vari costruttori* di VS per gli otturatori e le loro caratteristiche

2.1.3 Sede

Per aumentare la resistenza ai fluidi corrosivi, molti costruttori, propongono valvole con sede rivestita di materiale plastico ad alta resistenza alla corrosione, un esempio è quello in figura 7, dove oltre alla copertura della sede anche il soffiutto è in materiale plastico anti corrosivo a protezione della molla.

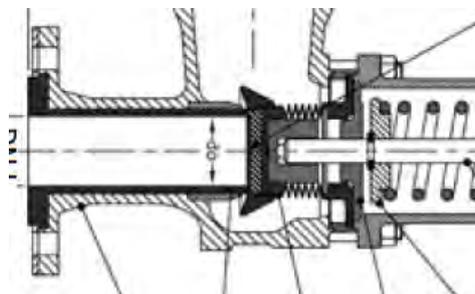


Figura 11. VS* in acciaio rivestito in materiale plastico per fluidi corrosivi

2.2 Configurazione esterna

Per la ISO 4126: *“le valvole di sicurezza per fluidi tossici o infiammabili devono essere del tipo a cappello chiuso, per impedire perdite nell'atmosfera”* ma allo stesso modo il cappello chiuso protegge la molla da eventuali atmosfere corrosive esterne (salsedine, cloro ecc...)

2.3 Tipo di scarico

2.3.1 Scarico lineare con l'aumento di pressione (blowdown basso)

Si utilizza questa tipologia di scarico, quando le anomalie sono frequenti e l'accumulo del fluido scaricato può dare luogo alla creazione di atmosfere esplosive. Lunghi e lenti processi termodinamici, come quelli che avvengono nei serbatoi criogenici, possono determinare questi frequenti aumenti di pressione (causati dalla mancanza di prelievo) con conseguenti aperture delle valvole di sicurezze poste a loro protezione.

È per questo motivo che le VS vengono spesso affiancate da valvole sfioratrici per eliminare la lenta e bassa sovrappressione dovuta alla necessità di gasificazione.

2.3.2 Scarico blowdown alto

Le VS che devono eliminare anomalie non frequenti, di fluidi non pericolosi che è possibile disperdere rapidamente, è preferibile abbiano un blowdown alto, ottenibile anche sovradimensionando la portata della VS proporzionali rispetto alle esigenze di linea.

3 Conclusioni

La grande varietà di tipologie di impianto, i fluidi utilizzati, gli ambienti dove vengono ad operare, determinano esigenze differenti riguardo le valvole di sicurezza da adottare, ma i produttori hanno un'offerta ampia ed eterogenea per fare fronte a queste esigenze.

Nonostante la vasta scelta di differenti tipologie di VS presenti sul mercato, capita frequentemente di trovare gli stessi dispositivi a protezione di impianti con caratteristiche notevolmente diverse (processi, fluidi, parametri di esercizio etc...), a causa della scarsa conoscenza delle possibili soluzioni disponibili. Ovviamente tale circostanza inficia il corretto funzionamento delle valvole.

Per ovviare a tale problematica si sta iniziando a creare una registrazione degli interventi delle VS, caratterizzandoli con informazioni sulla causa, processo protetto, fluido in gioco, situazione manutentiva, ecc... al fine di generare una panoramica che orienti correttamente la scelta di questi dispositivi di sicurezza, da parte di progettisti e utilizzatori.

4 Bibliografia

- [1] *“Dispositivi di sicurezza per la protezione contro le sovrappressioni - Parte 1: Valvole di sicurezza”* ISO 4126-1:2019
- [2] *“Verifica in esercizio della taratura delle valvole di sicurezza mediante martinetti”* UNI 11513
- [3] *“Recipienti criogenici - Dispositivi di sicurezza per la protezione contro la sovrappressione - Parte 1: Valvole di sicurezza per il servizio criogenico”* UNI 13648-1
- [4] Catalogo BESA 2021
- [5] Catalogo NGI 2021
- [6] Catalogo Maietti
- [7] *“Dispositivi di sicurezza per la protezione contro le sovrappressioni - Parte 7: Dati comuni”* ISO 4126-7:2016
- [8] Catalogo Parcol
- [9] Catalogo Herose

Impianti per la produzione di azoto - Stato dell'arte e criticità

R. Iovene¹, R. Vasile¹, V. Cusano²

¹ Inail – Uot di Pescara

² Nippon Gases Operations S.r.l.

Sommario

I principali gas presenti nell'aria hanno numerosi impieghi in ambito industriale e scientifico, trovando applicazioni sia in forma liquida che gassosa. Il crescente interesse verso di essi ha determinato un notevole sviluppo delle tecnologie e tecniche di separazione dei componenti.

Oggetto del lavoro è l'analisi delle principali tecniche di frazionamento dell'aria, con particolare riferimento alla produzione dell'azoto, effettuata mediante ricerche sullo stato dell'arte, l'analisi storica e l'esperienza maturata durante le verifiche di messa in servizio, per valutarne il campo d'impiego e le criticità di processo legate alle diverse tipologie d'impianto.

A seguito di un'attenta analisi sulle tecniche di separazione ad oggi più diffuse, si è scelto di porre l'attenzione sugli impianti di separazione criogenica dell'aria, i più economici per la produzione di grandi quantità di gas ad elevata purezza, e sui loro sistemi di sicurezza e controllo. Attraverso l'analisi storica e lo studio del processo di produzione sono stati evidenziati gli step critici che possono dar luogo ad eventi incidentali e tra questi è stato approfondito il rischio legato alla concentrazione di idrocarburi e di altri contaminanti nel liquido ricco (liquido arricchito di ossigeno), presente all'interno del condensatore nella colonna di frazionamento, che in casi limite può provocare lo scoppio del condensatore stesso. Scopo del presente lavoro è l'individuazione delle problematiche connesse alla presenza di contaminanti all'interno del liquido ricco, l'analisi delle attuali strategie messe in atto al fine di garantire l'esercizio degli impianti in sicurezza e la validazione delle stesse.

1. Introduzione

L'aria è composta prevalentemente da Ossigeno (21% O₂), Azoto (78% N₂) e Argon (1% Ar), che sono anche gas tecnici indispensabili nei moderni processi industriali. Ad oggi la produzione di questi gas può essere effettuata partendo da aria atmosferica mediante metodi di separazione che possono sfruttare la distillazione criogenica, i setacci molecolari (Pressure swing adsorption) e le fibre polimeriche (Membrane permeation); obiettivo principale comune ai tre sistemi è l'eliminazione dell'acqua e dell'anidride carbonica, che rappresentano impurezze nei prodotti finali, determinandone un'impossibilità di impiego. La separazione criogenica dell'aria per la produzione di Ossigeno, Argon e Azoto è attualmente il processo produttivo più utilizzato poiché il più economico per produrre grandi quantità di gas ad elevate purezze.

2. Processi di frazionamento dell'aria

I principali processi industriali per il frazionamento di Ossigeno, Argon e Azoto sono:

- Separazione criogenica dell'aria;
- Pressure swing adsorption (setacci molecolari);
- Membrane permeation (fibre polimeriche).

Il processo attualmente più diffuso, utilizzato già a partire dai primi del '900, è la separazione criogenica, gli altri due metodi, sviluppati solo successivamente, sono utilizzati nei casi in cui non sono richieste ingenti portate orarie e purezze elevate. Nella Figura 1 è riportato, a titolo esemplificativo, il campo di applicazione dei tre processi per la produzione di azoto relativamente a purezza e a portata oraria.

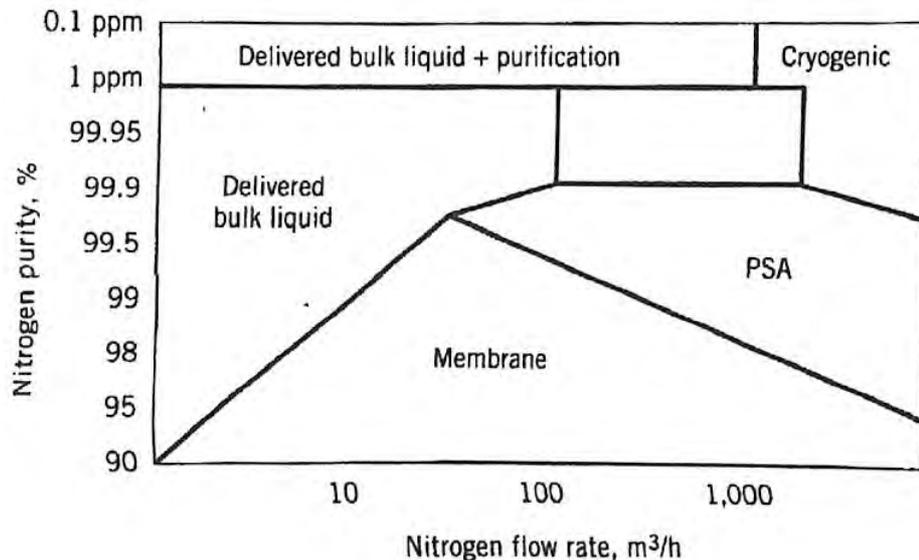


Figura 1. Campo di applicazione processi di frazionamento aria per la produzione di N₂

2.1 Separazione criogenica dell'aria

La Separazione criogenica dell'aria è il primo processo ad essere stato sviluppato e si basa sulle diverse temperature di ebollizione allo stato liquido dei tre gas principali costituenti l'aria mediante l'impiego di colonne di distillazione. Il processo, descritto nel capitolo successivo, si compone essenzialmente di tre macrofasi: compressione e raffreddamento dell'aria, purificazione dell'aria e distillazione. Tale processo è attualmente il più economico per produrre grandi quantità di gas ad elevate purezze.

2.2 Pressure swing adsorption

Il Pressure swing adsorption è stato il primo processo non criogenico ad essere sviluppato intorno alla fine degli anni '60 e si basa sulla filtrazione ad opera di setacci molecolari (Carbon Molecular Sieves), in grado di trattenere quasi totalmente per adsorbimento le molecole di ossigeno, acqua e anidride carbonica. Il processo si basa essenzialmente sull'elevata porosità dei CMS, infatti le molecole di ossigeno, essendo più piccole di quelle dell'azoto, penetrano nei pori del setaccio al carbonio, mentre le molecole di azoto non riuscendo ad introdursi nei pori aggirano il setaccio e in tal modo vengono separate.

L'aria compressa, preventivamente filtrata, passa alternativamente in uno dei due letti catalitici (uno in fase di lavoro e l'altro in fase di rigenerazione). Quando il letto è saturo di ossigeno, l'aria viene inviata al secondo letto, e il primo viene rigenerato mediante depressurizzazione con contro-flusso, durante la quale si ha il rilascio di ossigeno, acqua e anidride carbonica. L'azoto invece, separato dall'ossigeno, lascia la colonna CMS per essere stoccato in una riserva interna. Il processo prosegue in modo ciclico e totalmente automatico offrendo purezze dell'Azoto superiori al 99,999% ed una vita media delle colonne che generalmente supera i 10 anni.

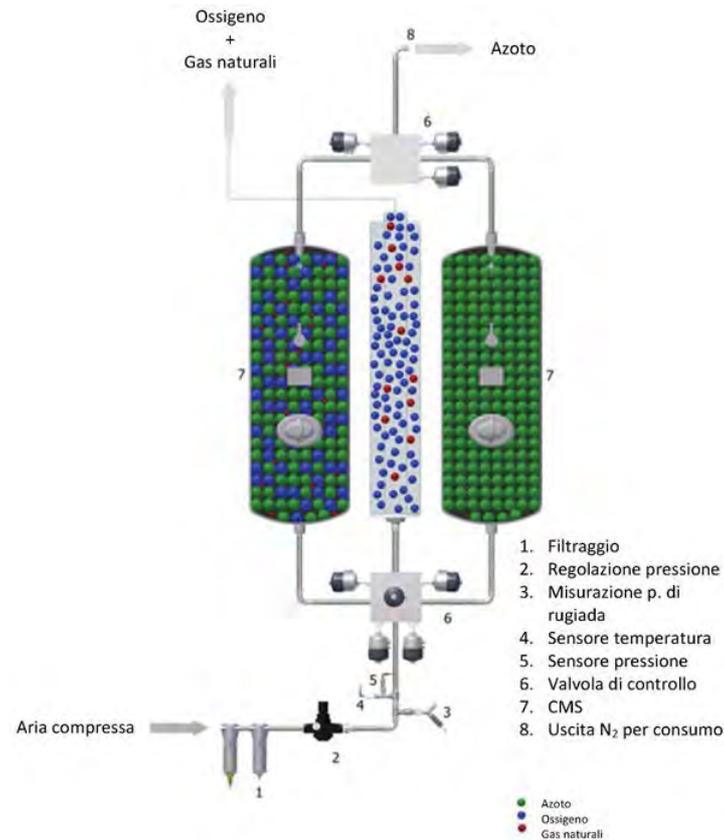


Figura 2. Pressure swing adsorption

2.3 Membrane permeation

Il Membrane permeation è il principio di separazione dell'aria mediante membrana, sviluppato negli anni '80, che sfrutta la diversa diffusività di ossigeno e azoto all'interno di fibre polimeriche e consiste nel veicolare le molecole all'interno di una colonna con fasci di fibre cave, al fine di ottenere una separazione molecolare data dall'affinità chimico/fisica con le fibre stesse. L'aria compressa, preventivamente filtrata e riscaldata (per rimuovere vapore acqueo e anidride carbonica), viene veicolata all'ingresso della colonna dove le molecole di ossigeno, grazie alla maggiore velocità di permeazione, sono direzionate verso l'uscita di scarico "vent" esterno, consentendo all'azoto di fluire fino alla fine della colonna filtrante e raggiungere l'uscita. Si tratta di un sistema semplice ed economicamente vantaggioso, ma che purtroppo, oltre ad offrire un Azoto con purezze inferiori al 99,5%, va incontro ad un ciclo di vita medio inferiore a 5 anni, meno della metà di quanto sia in grado di garantire invece la tecnologia Pressure Swing Adsorption.

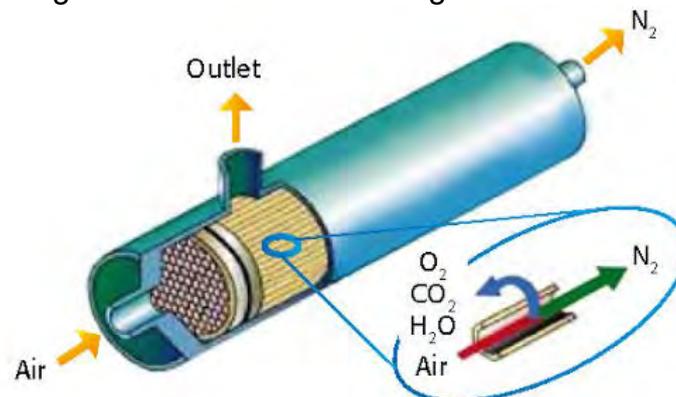


Figura 3. Membrane permeation

3. La separazione criogenica dell'aria

La separazione criogenica dell'aria è il processo produttivo che sfrutta le diverse temperature di ebollizione dei tre componenti principali dell'aria (azoto, ossigeno e argon). Le tre macro fasi del processo sono:

- Compressione e raffreddamento dell'aria;
- Purificazione dell'aria;
- Distillazione.

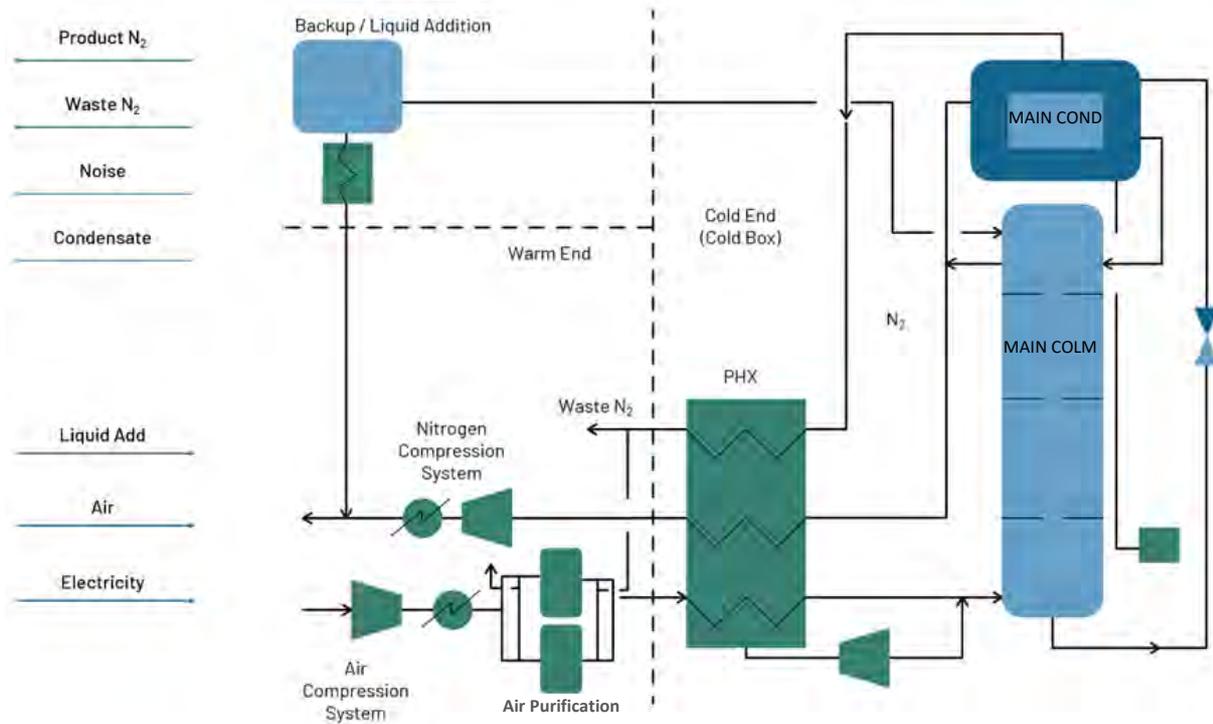


Figura 4. Impianto di separazione criogenica

3.1 Compressione dell'aria

L'aria, necessaria per il processo di produzione dell'azoto, viene aspirata dall'atmosfera e compressa fino alla pressione di circa 7 bar da un compressore a vite. A seguito della compressione l'aria è raffreddata in uno scambiatore aria/acqua per eliminarne l'acqua presente, per poi entrare in una batteria di filtri disoleatori e deumidificatori e successivamente raggiungere la trappola a carboni. A questo punto l'aria, dopo essere stata disoleata, arriva ai serbatoi di prepurificazione.

3.2 Purificazione dell'aria

Lo scopo della purificazione è quello di privare l'aria dell'anidride carbonica e dell'umidità. Questo avviene grazie ad un processo di assorbimento di tipo reversibile e rigenerabile, mediante depressione rapida e flussaggio in controcorrente dei materiali assorbenti costituiti da setacci molecolari e allumina posti all'interno di ciascun serbatoio.

I due serbatoi purificatori funzionano in continuo, alternando fasi di lavoro a fasi di rigenerazione. La gestione delle fasi di rigenerazione dei setacci è eseguita dal PLC che comanda l'apertura e la chiusura delle valvole di pressurizzazione e depressurizzazione. Quando un serbatoio è in servizio, l'altro è in fase di rigenerazione, e al termine della stessa il serbatoio viene pressurizzato per essere rimesso in servizio. Il serbatoio che ha terminato il servizio viene depressurizzato e rigenerato. Questi cicli si svolgono in continuo

senza discontinuità nella produzione di azoto gassoso. L'aria, una volta purificata, attraversa il filtro polveri per l'eliminazione di eventuali particelle solide e da qui inviata alla colonna per il processo di frazionamento che avviene nella parte di impianto denominato "COLD BOX".

3.3 Frazionamento dell'aria (distillazione)

Le apparecchiature presenti all'interno della struttura chiusa denominata "Cold Box" sono:

- Scambiatore principale a tre linee (PHX);
- Colonna di frazionamento (MAIN COLM);
- Condensatore principale (MAIN COND).

L'aria in uscita dal filtro polveri viene inviata allo scambiatore principale PHX. Lo scambiatore è dimensionato per consentire il trasferimento delle frigorifiche tra l'aria purificata e deumidificata (flusso caldo) e l'azoto gassoso puro prodotto (GAN) e l'azoto gassoso impuro prodotto (WN) (flussi freddi). L'azoto puro prodotto (GAN) viene prelevato allo stato gassoso dalla parte alta della colonna, dopo aver attraversato lo scambiatore principale PHX ed essere stato analizzato, viene convogliato nella pipeline per essere erogato al cliente. Una parte dell'azoto prodotto viene inviato allo scambiatore del condensatore principale per essere condensato e quindi ritornare nella testa della colonna allo stato liquido. L'eventuale parte in eccesso non impiegata nel processo viene scaricata automaticamente in atmosfera. L'azoto impuro prodotto (WN) viene prelevato allo stato gassoso dalla parte alta del condensatore. Dopo aver attraversato lo scambiatore principale PHX viene impiegato nel processo di rigenerazione del materiale assorbente contenuto nei serbatoi come descritto in precedenza; la parte in eccesso non impiegata nel processo di rigenerazione viene scaricata automaticamente in atmosfera.

La colonna di frazionamento dell'aria è composta da:

- piatti di frazionamento posti nella parte inferiore;
- una testa superiore.

Nella parte bassa della colonna entra l'aria raffreddata nello scambiatore principale PHX.

Nella testa della colonna entra:

- azoto liquido proveniente dallo scambiatore del condensatore principale;
- azoto liquido (liquid addition) proveniente da serbatoio criogenico di backup.

Il processo di frazionamento avviene in quanto il flusso di aria che sale dal fondo della colonna attraversando i piatti forati incontra in controcorrente il flusso di azoto liquido che scende dalla testa della colonna. Poiché la temperatura di ebollizione dell'azoto (-195,8°C) è inferiore alla temperatura di ebollizione dell'ossigeno (-183°C), l'azoto contenuto nell'aria vaporizza e si sposta verso la testa della colonna mentre l'ossigeno e gli altri elementi dell'aria condensano e si spostano verso il fondo della colonna. Pertanto, nel fondo della colonna viene raccolto il cosiddetto liquido ricco composto da ossigeno, argon, un residuo di azoto ed altri elementi dell'aria, mentre in testa alla colonna fluisce l'azoto puro (GAN) allo stato gassoso. La produzione di azoto puro allo stato gassoso (GAN) è funzione della richiesta dell'utenza all'uscita dello scambiatore principale.

Il condensatore principale, posto al di sopra della colonna di frazionamento, è costituito da un recipiente in acciaio inossidabile, contenente al suo interno una serpentina immersa nel liquido ricco, e svolge primariamente due funzioni. Nel lato a bassa pressione (circa 2 bar) avviene la produzione di azoto impuro (WN) allo stato gassoso, impiegato nel processo di rigenerazione del materiale assorbente contenuto nei serbatoi prepurificatori, mentre nel lato alta pressione (circa 6 bar), cioè all'interno della serpentina, avviene la liquefazione dell'azoto. Il liquido ricco (miscela di ossigeno + azoto) prelevato dalla parte bassa della colonna viene inviato al condensatore. Attraverso un processo di espansione vengono prodotte le frigorifiche che servono a liquefare l'azoto gassoso, presente all'interno della serpentina del condensatore, che viene reflusso in testa alla colonna principale.

4. Problematiche connesse alla presenza di contaminanti nel liquido ricco presente all'interno del condensatore nella colonna di frazionamento

L'esperienza acquisita negli anni, riguardo le problematiche dovute alla presenza di idrocarburi e altri contaminanti che si possono formare all'interno del liquido arricchito di ossigeno presente all'interno del condensatore, posto al di sopra della colonna di frazionamento, ha portato ad un'attenta disamina di tutte le problematiche che ne conseguono, con la messa in campo di adeguate strategie di prevenzione del fenomeno.

4.1 Formazione del liquido ricco

Durante il processo di frazionamento, il flusso di aria entrante dal fondo della colonna di frazionamento sale e attraversa i piatti forati di distillazione, incontrando in controcorrente il flusso di azoto liquido che scende dalla testa della colonna. L'azoto contenuto nell'aria sale verso la testa della colonna mentre l'ossigeno e gli altri componenti dell'aria condensano accumulandosi verso il fondo grazie alle differenti temperature di ebollizione. Si forma così, nel fondo della colonna di frazionamento, un liquido ricco di ossigeno e argon che viene rinviato al condensatore principale ed utilizzato per liquefare il flusso di azoto necessario al funzionamento della colonna stessa.

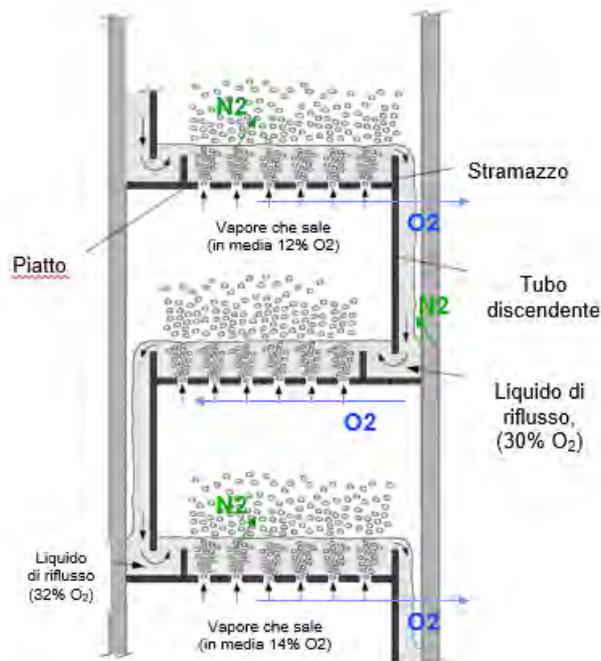


Figura 5. Processo di formazione del liquido ricco

4.2 Rischio esplosione

L'analisi storica degli incidenti documentati avvenuti su tale tipologia di impianti a partire dagli anni '60, ha evidenziato come particolarmente critica la presenza di contaminanti all'interno del liquido ricco, rinviato dalla colonna di frazionamento al condensatore principale, in quanto gli stessi possono determinare l'attivazione di un processo di combustione, che nei casi più gravi ha portato all'esplosione del condensatore, trattandosi di fatto di un recipiente in pressione. Per l'attivazione del processo di combustione sono necessari tre elementi:

- Combustibile (costituito dai contaminanti presenti nel liquido ricco);
- Ossigeno (presente in abbondanza nel condensatore principale);
- Innescò.

Ne deriva che tutti i combustibili (contaminanti) presenti all'interno del condensatore principale devono essere mantenuti in concentrazioni al disotto del rispettivo limite inferiore di esplosività (LEL), per il metano pari a 5.1% in O₂ e per l'etano pari a 3% in O₂. Le principali cause di accumulo di idrocarburi e altri contaminanti nel liquido ricco sono:

- drenaggio inadeguato;
- ebollizione del liquido senza sfioro;
- livello del condensatore inadeguato;
- parametri operativi inadeguati.

Tra gli accorgimenti necessari ad evitare che i contaminanti presenti nell'aria finiscano nel processo e quindi anche nella colonna di frazionamento, vi è l'utilizzo delle batterie di prepurificazione. Solitamente si utilizzano prepurificatori di aria con letti composti da setaccio molecolare, il quale permette di rimuovere completamente acetilene, propilene e tutti gli idrocarburi C₄+, inoltre rimuove solo parzialmente etilene, propano e N₂O, non sono invece rimossi metano ed etano.

4.3 Ebollizione fino all'essiccamento ed Ebollizione senza uscita

Esistono due fenomeni fisici che possono dar luogo ad elevate concentrazioni di idrocarburi nel liquido ricco, anche in presenza di una massa liquida iniziale che, a seguito della prepurificazione, si presenta relativamente priva di idrocarburi:

- Ebollizione fino all'essiccamento (Boiling to Dryness)
- Ebollizione senza uscita (Dead Ended)

Il processo di ebollizione fino ad essiccazione si instaura quando il liquido bollente ricco di ossigeno, presente nel condensatore, si avvicina al suo punto di rugiada, in tale stato i contaminanti meno volatili si concentrano nella fase liquida residua. Se l'ebollizione avviene a bassa pressione, è probabile che alcuni di questi contaminanti raggiungano i loro limiti di solubilità e quindi si separino in fase solida. La separazione di una fase liquida o solida ricca di idrocarburi genera, in termini di concentrazioni, le condizioni di infiammabilità all'interno del condensatore.



Figura 6. Boiling to Dryness

Al fine di scongiurare l'instaurarsi del fenomeno sopra descritto, si deve procedere al controllo del livello del liquido in cui è immerso lo scambiatore, all'interno del condensatore/ribollitore, ed assicurare che vi sia una circolazione sufficiente all'interno del condensatore, al fine di evitare che le sue superfici interne si asciughino, con conseguente innalzamento della temperatura e volatilizzazione dei contaminanti.

Il processo di ebollizione senza uscita, si instaura quando nel condensatore principale alcuni dei passaggi risultano ostruiti. In tale situazione l'ossigeno continua ad evaporare,

depositando i contaminanti meno volatili. L'ossigeno vaporizzato viene continuamente reintegrato dal liquido contaminato, proveniente da altri passaggi, che entra nella parte superiore della sezione ostruita formando delle "sacche".

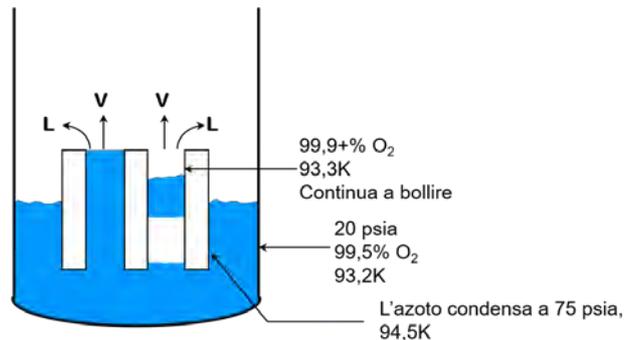


Figura 7. Dead Ended

In tale situazione gli idrocarburi, depositati nel liquido presente sopra l'ostruzione, raggiungono valori di concentrazione pari al loro limite di infiammabilità ben prima che la loro presenza determini un aumento sufficiente della temperatura di ebollizione del liquido ricco tale da esaurire la forza motrice necessaria al trasferimento di calore, prevenendo un'ulteriore vaporizzazione di ossigeno e il reintegro nel condensatore di ulteriore liquido contaminato. Per quanto descritto è evidente che in tale situazione gli idrocarburi possono accumularsi indefinitamente, anche quando la loro concentrazione iniziale nel condensatore risulta bassa. Allo stato attuale non si dispone di sistemi esterni atti a rivelare ostruzioni nel condensatore, sebbene la presenza di eventuali solidi nel liquido ricco, evidenzia la possibilità dell'instaurarsi di eventuali otturazioni.

4.4 Procedure di sicurezza per il condensatore

Per scongiurare l'instaurarsi dei fenomeni descritti nel precedente paragrafo, la Nippon Gases ha predisposto delle procedure di sicurezza relative all'effettuazione di analisi su campioni prelevati dall'impianto, tra queste di particolare interesse è la procedura "SOP - Procedura Operativa Standard 60, Programma di Campionamento del Condensatore Principale", che stabilisce la periodicità di campionamento del liquido ricco dal condensatore principale al fine di misurare la concentrazione di idrocarburi presenti al suo interno. Particolare attenzione è posta sull'acetilene, la cui concentrazione non deve risultare superiore a 0,5 ppm, in quanto tale idrocarburo si dissolve molto lentamente nel liquido ricco e risulta estremamente instabile e pericoloso allo stato solido, anche se presente in piccole quantità.

L'azienda ha inoltre definito i cosiddetti "COP - Parametri Operativi Critici relativi ai condensatori principali", che indicano i limiti entro cui devono rientrare prestabiliti parametri di processo, definiti appunto critici, al fine di evitare danni all'impianto e/o situazioni pericolose per la sicurezza, tra questi i più importanti sono:

- Basso livello di liquido al Condensatore Principale: Se il livello del condensatore principale scende al di sotto del punto di allarme, quindi troppo basso, il rateo di circolazione attraverso lo scambiatore non sarà adeguato. Una inadeguata circolazione può dar luogo all'ebollizione completa del liquido ricco presente nel condensatore, fino a raggiungere la condizione limite di asciugatura delle pareti superiori, con conseguente incremento ed accumulo locale di idrocarburi sulle superfici asciutte;
- Alto tenore di anidride carbonica all'uscita del prepurificatore: Un alto tenore di anidride carbonica, misurato all'uscita del prepurificatore a setacci molecolari, è un

campanello di allarme della presenza di idrocarburi nel flusso d'aria in ingresso allo scambiatore principale, se invece l'anidride carbonica è entro i limiti accettabili (1 ppm), anche gli idrocarburi pesanti e l'acetilene saranno trattenuti dai setacci molecolari. Al fine di evitare l'ingresso di idrocarburi all'interno della colonna di frazionamento, coadiuvare la prepurificazione con lo scarico/drenaggio temporaneo del liquido ricco è il modo migliore per garantire che nel pool di ossigeno non si formino livelli pericolosi di idrocarburi o contaminanti congelabili, inoltre si garantisce la rigenerazione del liquido e si evita il suo "stagnamento". Tali operazioni dovrebbero essere sempre accompagnate da un programma di monitoraggio di HC, CO₂ e N₂O, necessario a valutare l'efficacia delle stesse.

Durante l'esercizio dell'impianto, nel caso in cui i risultati delle analisi di laboratorio, condotte secondo quanto indicato nelle procedure predefinite, non dovessero soddisfare i limiti prestabiliti nei "COP", si renderà necessario procedere al riscaldamento della colonna di frazionamento mediante un contro flusso di aria secca e pulita a temperatura ambiente, allo scopo di rimuovere tutta la condensa e ridurre l'umidità interna al più basso livello possibile. La rimozione del vapore d'acqua dà infatti la certezza che anche altri contaminanti più volatili, come anidride carbonica e idrocarburi siano stati rimossi.



Figura 8. Campione di liquido ricco chiaro



Figura 9. Campione di liquido ricco torbido



Figura 10. Residui di CO₂ solida

5. Conclusioni

L'esame degli incidenti occorsi a partire dagli anni '60 sugli impianti di separazione criogenica dell'aria, nonché lo studio delle conseguenze derivanti dalla gravità degli stessi, ha messo in luce l'importanza della vigilanza sulla sicurezza dei processi. Lo sviluppo tecnologico, in oltre 100 anni di storia, ha permesso di definire un sistema di controllo degli impianti condotto mediante l'analisi di alcuni parametri stabiliti e definiti critici, atti a valutare l'effettivo andamento del processo ed evitare possibili scenari incidentali. Il mondo e la sua atmosfera sono in continua evoluzione: oggi per esempio si progettano impianti per un'atmosfera che contiene 100 ppm di CO₂ in più rispetto a 35 anni fa. Le aziende che producono e gestiscono gli impianti di separazione criogenica dell'aria sono quindi chiamate ad uno studio sempre più approfondito dei processi al fine di comprenderne appieno le criticità e modificarne le soluzioni impiantistiche anche in considerazione dei cambiamenti dell'atmosfera terrestre.

6. Bibliografia

- [1] K. Ohlrogge, J. Wind, T. Brinkmann. Membranes for Recovery of Volatile Organic Compounds. Comprehensive Membrane Science and Engineering. Vol. 2, 2010, pages 213-242.
- [2] J. Beck, D. Friedrich, S. Brandani, S. Guillas, E. S. Fraga. Surrogate based Optimisation for Design of Pressure Swing, Adsorption System. Computer Aided Chemical Engineering. Vol. 30, 2012 pag. 1217-1221
- [3] H. Khajuria, E. N. Pistikopoulos. Integrated Design and Control of Pressure Swing Adsorption System. Computer Aided Chemical Engineering. Vol. 29, 2011, pag. 628-632
- [4] <http://www.5ggas.it/azoto.htm> - Impianti di produzione on-site - Azoto
- [5] <https://www.inmatec.de/it/technologie-azoto.html> - Pressure Swing Adsorption (PSA)
- [6] Impianto azoto NIPPON GASES® N15 - Manuale generale impianto 13/05/2021 Rev. 1
- [7] MC and Product Boiler Safety Fundamentals – 01/29/2009 Copyright © 2009, Praxair Technology, Inc. All rights reserved

Sistema di sicurezza anticondensa, integrato con recupero termico, installato su caldaie per la produzione di acqua calda

T. Pagliuso¹, V. Vosa¹, G. Lodomini², E. Fiocca², A. Villa³

¹ Inail - Uot di Napoli

² Libero Professionista

³ Società Viessmann S.r.l.

Sommario

Il lavoro svolto dall' Inail Uot di Napoli in collaborazione con i tecnici Dott. P.I. G. Lodomini, Ing. E. Fiocca e Ing. A. Villa, si prefigge di illustrare, per gli impianti di produzione acqua calda, un sistema di sicurezza anticondensa integrato con la produzione e il recupero energetico dai fumi delle caldaie tramite economizzatore, in alternativa alla classica pompa anticondensa.

Esso è volto a garantire sia la sicurezza della circolazione in caldaia, in rispetto alla Raccolta R edizione 2009 ai fini dell'anticondensa, sia la possibilità di recupero energetico tramite i fumi delle caldaie in modo da rendere l'installazione dell'impianto appetibile dal punto di vista economico per la possibilità di usufruire degli incentivi di Legge e la riduzione dei costi di gestione.

Nella fattispecie, come sicurezza anticondensa, è stata installata una valvola deviatrice a tre vie la quale, durante i transitori di avviamento e ogni qualvolta la temperatura scende al di sotto di un valore preimpostato, devia una parte dell'acqua al fine di innalzare la temperatura di ritorno in caldaia. In contemporanea l'acqua calda di ritorno, a valore preimpostato tramite la valvola a tre vie, viene in parte convogliata all'economizzatore nel quale si preriscalda raffreddando i fumi di scarico, fino, in alcuni casi a raggiungere la temperatura di condensazione.

Un software di gestione dell'insieme consente di monitorare e gestire il corretto funzionamento in simultanea della valvola a tre vie, delle pompe di processo, dell'economizzatore e permette di mantenere il controllo sul corretto funzionamento dell'impianto e la gestione delle sicurezze.

1. Introduzione

Una caldaia è costituita sostanzialmente da uno scambiatore di calore suddiviso in due aree ben distinte, all'interno delle quali passano i fumi ad elevata temperatura e il fluido termovettore (acqua calda, acqua surriscaldata o vapore).

I fumi ad elevata temperatura provengono da un dispositivo, il bruciatore, che genera una fiamma miscelando in una corretta proporzione il combustibile con l'aria ambiente. I fumi generati dalla combustione nel bruciatore percorrono il corpo caldaia (lo scambiatore di calore) per cedere il calore all'acqua di riscaldamento.

I fumi all'interno della caldaia contengono vapore acqueo che condensa se viene a contatto con superfici a temperatura inferiore al punto di rugiada (< 55°C per il gas metano). La condensa che si genera dai fumi di combustione è acida e aggrredisce i materiali con cui si realizzano le caldaie standard (non a condensazione) portando alla corrosione delle superfici di scambio. Questi fenomeni possono portare a cedimenti strutturali se la formazione di condensa è continua e prolungata nel tempo.

È da evidenziare che il D.P.R. 59/09¹ prevedeva l'utilizzo di impianti a bassa temperatura². Oggi il buon senso, e l'evoluzione tecnologica, spingono verso un uso di fonti di alimentazione a bassa temperatura al fine di ridurre le perdite per dispersione attraverso i circuiti di distribuzione degli impianti.

2. Fenomeno della condensazione nelle caldaie

La caldaia a condensazione consente di recuperare il calore latente contenuto nei fumi ed è costruita con scambiatori in materiali resistenti alle condense acide (ad esempio acciaio inossidabile). Per questa ragione, a parità di potenza, una caldaia a condensazione costa di più di una caldaia standard.

Ogni costruttore di caldaie, seguendo le richieste di mercato, ha individuato una taglia al di sopra della quale non risulta più conveniente produrre caldaie a condensazione. Tipicamente questa taglia si attesta attorno ai 2.000 kW, e riguarda generalmente solo applicazioni industriali o teleriscaldamento.

In questi casi, come vedremo in seguito, è comunque possibile sfruttare il fenomeno della condensazione dei fumi per risparmio energetico inserendo uno scambiatore fumi/acqua costruito con materiali idonei a valle della caldaia che raffreddi i fumi fino a far condensare il vapore acqueo nel caso in cui il ritorno dall'impianto sia a temperature inferiori alla temperatura di rugiada.

In ogni caso nelle caldaie standard va evitato il più possibile il fenomeno della condensazione dei fumi.

Per ovviare al fenomeno della condensazione nelle caldaie standard i costruttori sono ricorsi a diverse soluzioni nel corso degli anni:

- Deflettore sull'ingresso dell'acqua di ritorno dall'impianto per ottenere una miscelazione ed una temperatura più elevata a contatto con i tubi fumi.

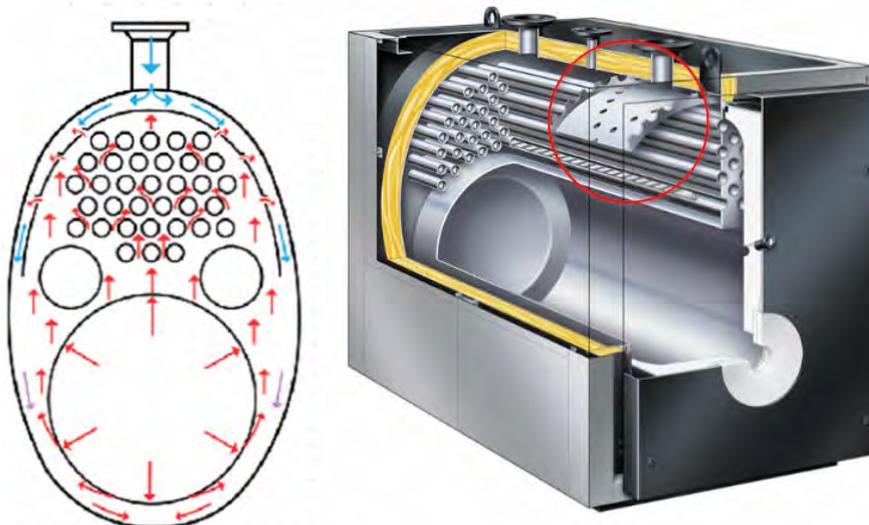


Figura 1. Caldaia con deflettore sull'ingresso dell'acqua di ritorno

¹ DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 2 aprile 2009, n. 59: "Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettera a) e b), del Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia"

² Art. 8 comma 4 del D.P.R. 59/09 prevede: b) la temperatura media del fluido termovettore in corrispondenza delle condizioni di progetto sia non superiore a 60 °C;

- Tubi fumo a doppio strato per ridurre la velocità di scambio termico, soprattutto nella parte terminale dove le temperature dei fumi sono più basse e la formazione di condensa più probabile.

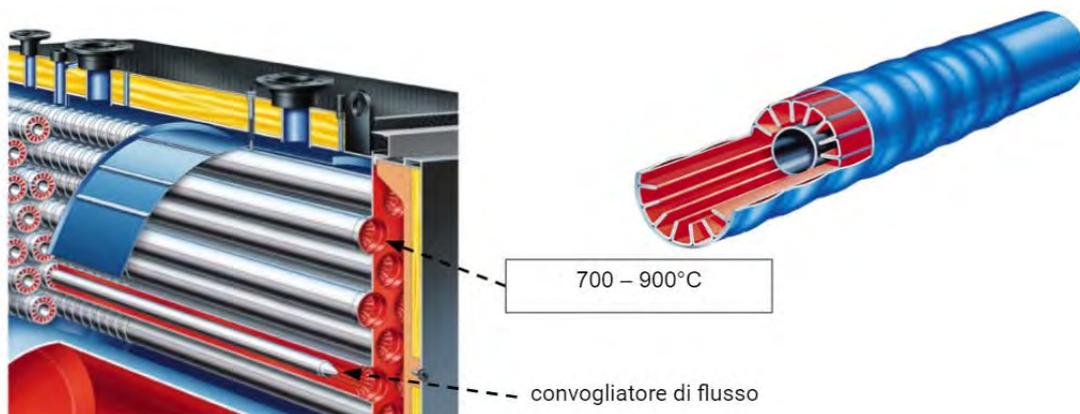


Figura 2. Tubi fumo a doppio strato

- Pompa anticondensa

Le soluzioni viste in precedenza migliorano l'efficienza del generatore, ma non permettono di controllare la temperatura di ritorno in qualsiasi condizione, perciò su tutti i generatori tradizionali viene normalmente montata una pompa definita "anticondensa".

La pompa anticondensa è normalmente dimensionata per una portata pari a circa il 30% della portata nominale, e ha una duplice funzione: assicurare una portata continua in caldaia al fine di garantire un adeguato raffreddamento delle superfici e aumentare la temperatura di ritorno prelevando acqua calda dalla mandata della caldaia e immettendola nel ritorno miscelandola con l'acqua più fredda proveniente dal ritorno dell'impianto.

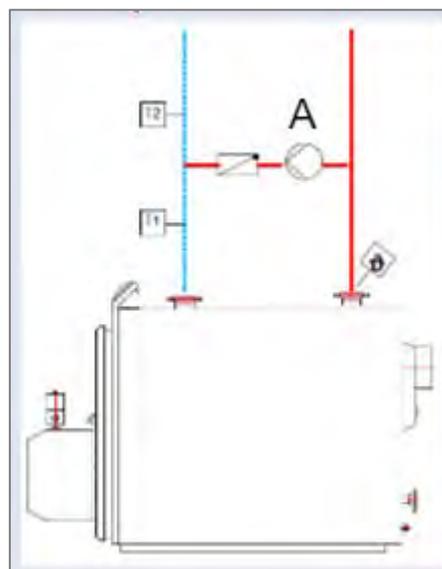


Figura 3. Schema caldaia con pompa anticondensa

La pompa anticondensa ha il vantaggio di essere una soluzione molto semplice ed è installabile su qualsiasi tipologia di generatore, ma purtroppo ha dei limiti nel caso in cui l'acqua dell'impianto fosse estremamente fredda (riscaldamento dell'impianto intermittente,

o utilizzatori a bassa temperatura). Infatti in questi casi la pompa anticondensa non può assicurare che la temperatura in caldaia non scenda sotto della temperatura critica.

3. Installazione della valvola a tre vie e scambiatore fumi-acqua sulle caldaie³

3.1 Controllo continuo ritorno

La soluzione ottimale per avere un controllo puntuale della temperatura in caldaia è quella di inserire sulla tubazione di mandata o di ritorno una valvola a tre vie (montata in miscelazione o deviazione). Questa valvola, controllata dalla regolazione di caldaia, controlla in modo preciso la temperatura di ritorno e di conseguenza la temperatura di caldaia, in modo da evitare i fenomeni di condensazione.

La valvola per il controllo continuo del ritorno, invia solo la quantità d'acqua indispensabile al mantenimento della temperatura nominale:

- nel caso di ritorni molto freddi la valvola manderà sul ritorno una grande quantità di acqua prelevata dalla mandata;
- nel caso di ritorni a temperatura superiore a quella di set-point (ad esempio 55°C), non ci sarà miscelazione, ma la mandata sarà inviata direttamente all'impianto senza prelievi per il riscaldamento del circuito di ritorno.

Quando si opta per questa soluzione, è di fondamentale importanza prevedere l'installazione della pompa del circuito primario (che in questo caso ricordiamo è l'unica pompa responsabile della circolazione in caldaia) appena a valle della caldaia, prima dello stacco che consente la miscelazione attraverso la valvola a tre vie, come si vede nello schema seguente (Figura 4).

In questo modo è garantita la circolazione dell'acqua calda in caldaia in qualunque condizione di funzionamento della valvola a tre vie e quindi anche in caso di guasto alla valvola o al servomotore della stessa.

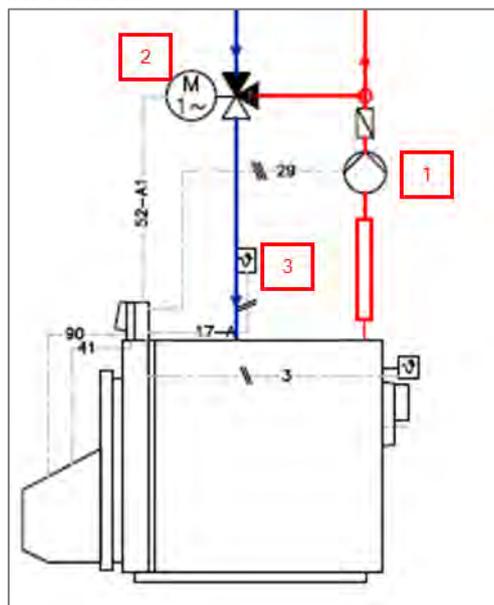


Figura 4. Caldaia con valvola a tre vie⁴

³ Sistema progettato e realizzato da uno specifico fabbricante

⁴ Schema realizzato da uno specifico fabbricante

3.2 Controllo continuo temperatura di ritorno con valvola a tre vie

Funzionamento (Figura 4):

la pompa 1 entra in funzione all'attivazione della caldaia, il sensore 3 rileva la temperatura sulla tubazione di ritorno, la valvola miscelatrice 2 miscela l'acqua in arrivo dalla tubazione di ritorno con l'acqua della mandata di caldaia, in modo da mantenere la temperatura minima di caldaia necessaria per evitare fenomeni di condensazione (ad esempio $55^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$).

3.3 Scambiatore Fumi

Come accennato in precedenza, per aumentare l'efficienza di caldaie standard di media/elevata potenza ($\geq 2.000 \text{ kW}$) è possibile inserire degli scambiatori fumi-acqua che in generale permettono l'aumento del rendimento del sistema, in funzione delle caratteristiche dell'impianto, anche attraverso lo sfruttamento della condensazione nei fumi. Mentre nelle caldaie standard la condensazione è un fenomeno da evitare, in questi scambiatori è possibile far condensare i fumi senza che la condensa arrechi danni agli stessi, recuperando del calore che altrimenti andrebbe perduto in atmosfera. Questo è possibile grazie ai materiali e alla conformazione con cui sono costruiti.

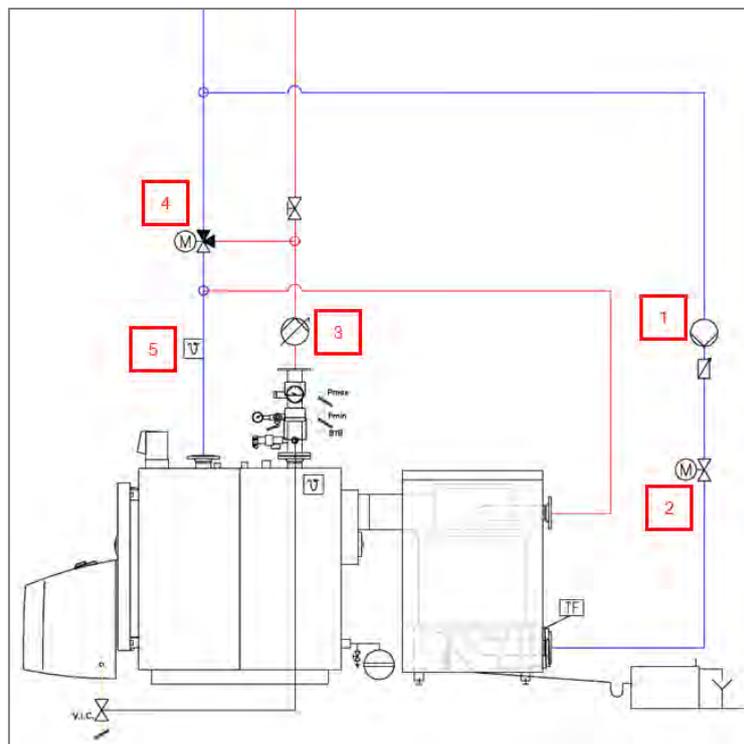


Figura 5. Caldaia con valvola a tre vie e scambiatore fumi-acqua⁵

⁵ Schema realizzato da uno specifico fabbricante

3.4 Scambiatore di calore fumi/acqua calda

Funzionamento (Figura 5):

la pompa 3 entra in funzione all'attivazione della caldaia, il sensore 5 rileva la temperatura sulla tubazione di ritorno, la valvola miscelatrice 4 miscela l'acqua in arrivo dalla tubazione di ritorno con l'acqua della mandata di caldaia, in modo da mantenere la temperatura minima di caldaia necessaria per evitare fenomeni di condensazione. La pompa 1 e la valvola 2 si attivano all'accensione del bruciatore, in questo modo i fumi in uscita dalla caldaia vengono raffreddati e il calore recuperato viene inviato sul ritorno della caldaia.

3.5 Recupero termico dalla condensazione dei fumi

Per comprendere al meglio come la condensazione dei fumi possa portare dei benefici in termine di recupero termico è necessario definire cosa sono il potere calorifico superiore (PCS) e inferiore (PCI) di un combustibile.

- Potere calorifico inferiore (PCI)

Come potere calorifico inferiore si definisce il solo calore sensibile, utilizzabile senza condensazione del vapore acqueo dei gas di scarico.

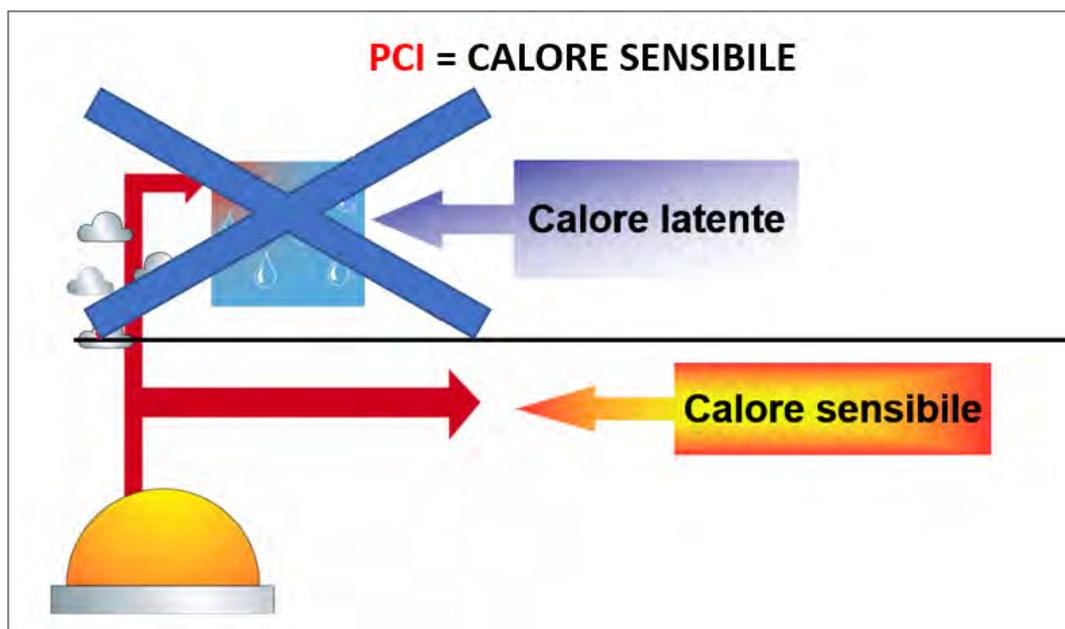


Figura 6. Potere calorifico inferiore (PCI)

- Potere calorifico superiore (PCS)

Come potere calorifico superiore si definisce la quantità totale di calore liberata durante la combustione, quindi anche il calore latente contenuto nel vapore acqueo presente nei gas di scarico.

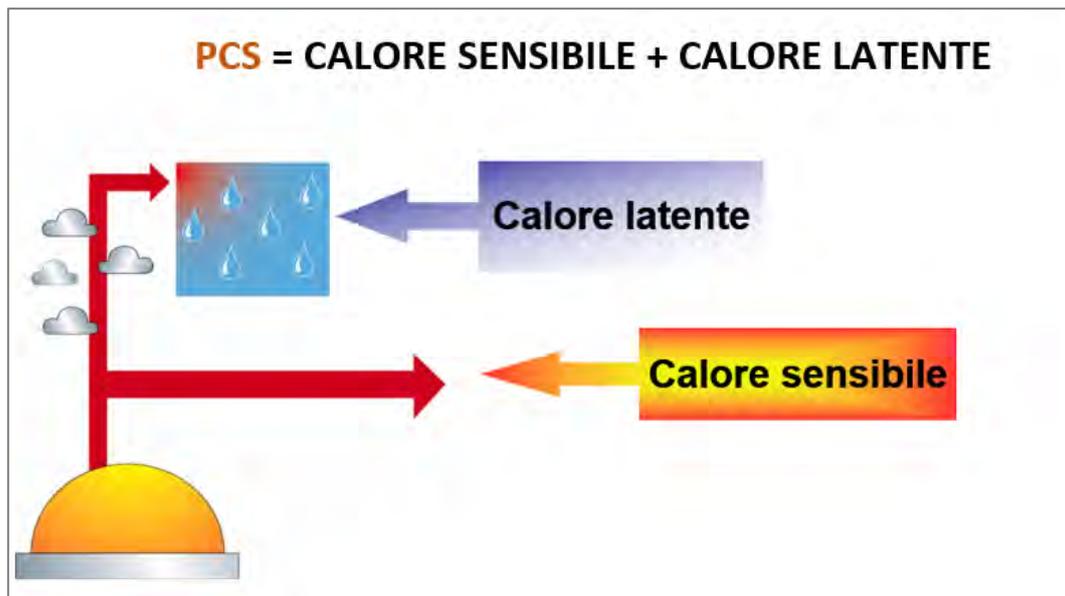


Figura 7. Potere calorifico superiore (PCS)

Ogni combustibile ha diversi poteri calorifici e diversi rapporti tra PCI e PCS, dalla tabella seguente è possibile vedere i diversi PCI e PCS dei combustibili più diffusi:

	Potere calorifico superiore PCS kWh/m ³	Potere calorifico inferiore PCI kWh/m ³	PCS/PCI	PCS-PCI kWh/m ³	condensazione teorica kg/m ³ ¹⁾
gas di città	5,48	4,87	1,13	0,61	0,89
gas nat. L	9,78	8,83	1,11	1,04	1,53
gas nat. H	11,46	10,35	1,11	1,11	1,63
propano	28,28	25,99	1,09	2,29	3,37
butano	37,22	34,31	1,08	2,91	4,29
gasolio el ²⁾	10,68	10,08	1,06	0,60	0,88

1) riferita alla quantità di combustibile

2) per il gasolio i valori sono riferiti a "litro"

Tabella 1. PCI e PCS dei combustibili più diffusi

Come si può osservare, nel caso di gas naturale, il rapporto tra PCS e PCI è di 1,11, che rappresenta il massimo recupero energetico ottenibile abbassando la temperatura dei fumi allo scarico.

L'aumento del grado di rendimento con la tecnica della condensazione si ottiene grazie ad alcuni fattori principali:

- recupero di calore per condensazione del vapore acqueo contenuto nei gas di scarico (recupero calore latente)
- una minore dispersione attraverso i gas di scarico (recupero calore sensibile) (la temperatura gas di scarico è inferiore, poiché il calore sensibile viene ceduto quasi completamente all'acqua di caldaia)

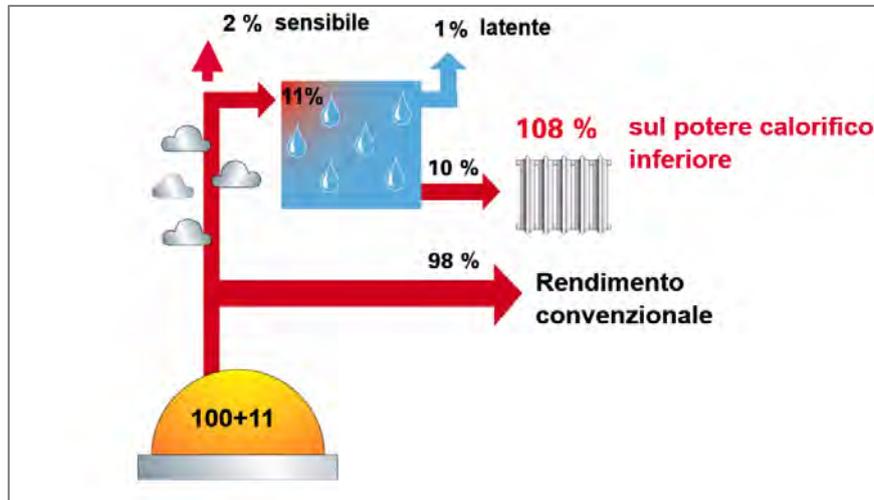


Figura 8. Schema rendimento da condensazione fumi

3.6 Rendimento da condensazione fumi

Il rendimento dell'impianto aumenta quanto più è bassa la temperatura di ritorno dall'impianto.

Negli impianti di riscaldamento è ormai prassi prevedere temperature di ritorno alla caldaia inferiori a 55°C .

A titolo esemplificativo, si riportano alcuni salti tipici di temperatura utilizzati nei più utilizzati impianti di riscaldamento:

- Radiatori: $60-40^{\circ}\text{C}$. In genere la temperatura di mandata di progetto dipende dal grado di isolamento dell'edificio e dal dimensionamento dei terminali. In ogni caso questa viene tipicamente gestita in modo scorrevole in funzione della temperatura esterna (ad esempio 60°C o 65°C in corrispondenza della temperatura esterna di progetto).
- Fan-coil: $45^{\circ}\text{C}-40^{\circ}\text{C}$. In genere non si prevedono temperature di mandata inferiori a 40°C per evitare problemi di comfort termico dovuto alla sensazione di "aria fredda".
- Pannelli radianti: $35^{\circ}\text{C}-30^{\circ}\text{C}$.

L'abbinamento di una caldaia standard ad uno scambiatore fumi permette di:

- aumentare la temperatura di ritorno nella caldaia con evidenti benefici sulla riduzione dei fenomeni di condensazione in caldaia
- sfruttare il fenomeno della condensazione dei fumi e di incrementare l'efficienza del sistema.

Nell'esempio mostrato nel grafico seguente, con una temperatura di ritorno pari a 45°C si ottiene una riduzione delle perdite al camino fumi e condensa (curve 3 e 1) e un recupero termico (curva 2) ottenendo complessivamente un aumento di rendimento del generatore dell'11,8% (curva 4) rispetto al rendimento ottenibile senza sfruttare il fenomeno della condensazione.

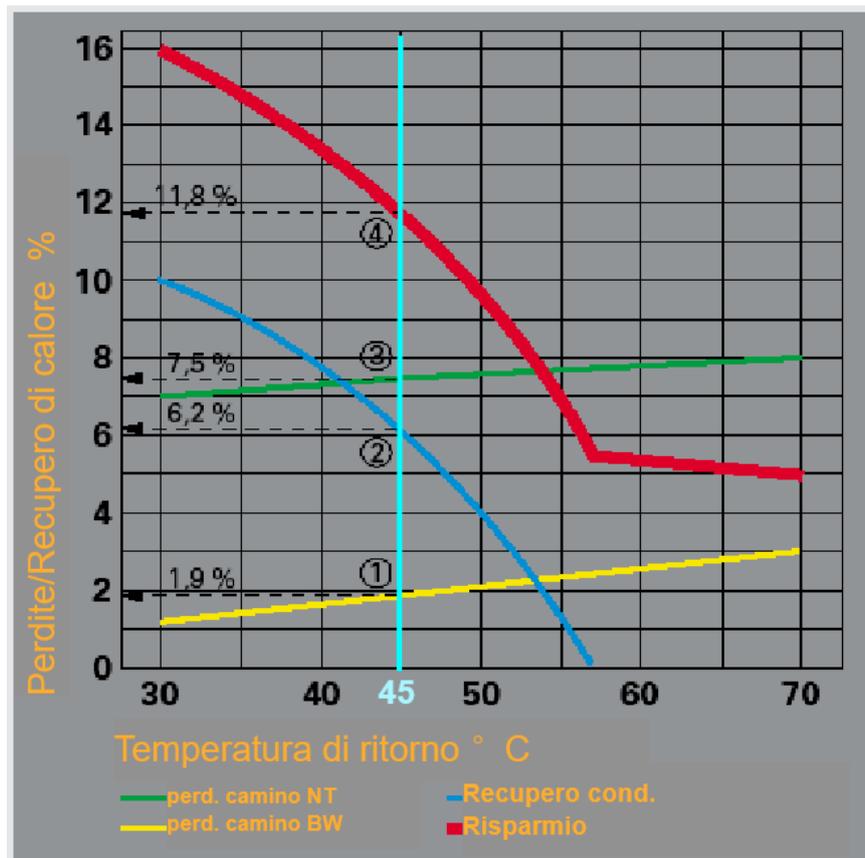


Figura 9. Perdite/Recupero di calore %

3.7 Confronto energetico

Volendo esaminare le soluzioni prospettate da un punto di vista energetico possiamo quantificare il risparmio di energia primaria, e di conseguenza il risparmio economico, dovuto alla sostituzione della pompa anticondensa e all'inserimento di un economizzatore che consente lo sfruttamento del fenomeno della condensazione e quindi il recupero del calore latente dei fumi.

Ipotizziamo un sistema di generazione composto da una caldaia da 2 MW e un funzionamento per 16h al giorno e per 5 gg/7gg (circa 260 gg/y).

In questo caso nella situazione di baseline il consumo stimato è di 8.320.000 kWh/anno di energia primaria.

L'inserimento dell'economizzatore consente di ottenere, come visto nel grafico precedente, nell'ipotesi di ritorno impianto a 45°C, circa il 10% in più di rendimento.

Questo risparmio in termini di energia primaria si traduce in un risparmio economico, in funzione della tariffa del gas metano, dell'ordine di decine di migliaia di euro e quindi tempi di ritorno dell'investimento sostenibili.

3.8 Beneficio Ambientale ed Economico

Dal punto di vista ambientale, assunto che convenzionalmente un TEP⁶ corrisponde a circa 11630kWh, abbiamo un risparmio (prendendo quale riferimento il 10%) pari a 832.000kWh ovvero circa 72 TEP. Dal punto di vista economico, stimando pari a circa 0.35€/mc il risparmio si traduce in circa 30.000,00 euro.

⁶ Tonnellata Equivalente di Petrolio

4. Conclusioni

Il lavoro svolto dall' INAIL UOT CVR di Napoli in collaborazione con i tecnici Dott. P.I. G. Lodomini e Ing. E. Fiocca ha mostrato come possibile abbinare, nel caso di caldaie standard (non a condensazione), un sistema di sicurezza anticondensa con un sistema di recupero energetico dai fumi delle caldaie tramite economizzatore.

Il sistema di sicurezza anticondensa scelto, nel rispetto della "Raccolta R" edizione 2009, consente di garantire in ogni situazione la circolazione dell'acqua in caldaia attraverso l'installazione di una valvola a tre vie in luogo del più tradizionale sistema con pompa anticondensa. La valvola deviatrice a tre vie, ogni volta che la temperatura scende al di sotto di un valore preimpostato, devia una parte dell'acqua al fine di innalzare la temperatura di ritorno in caldaia.

Il sistema si applica a caldaie standard, costruite con materiali non idonei al contatto prolungato con le condense acide dei fumi, nelle quali il fenomeno della condensazione è da evitare, tipicamente di taglia pari a 2.000 kW o superiore.

In questi casi è comunque possibile sfruttare il fenomeno della condensazione dei fumi per risparmio energetico inserendo uno scambiatore fumi/acqua costruito con materiali idonei a valle della caldaia che raffreddi i fumi fino a far condensare il vapore acqueo.

Il sistema di regolazione dell'impianto consente di monitorare e gestire il corretto funzionamento in simultanea della valvola a tre vie, delle pompe e dell'economizzatore, permettendo di mantenere il controllo sul corretto funzionamento dell'impianto e la gestione delle sicurezze.

In questo modo l'installazione dell'impianto è più appetibile sia dal punto di vista ambientale sia dal punto di vista economico per la possibilità di usufruire degli incentivi di Legge e la sensibile riduzione dei costi di gestione.

5. Bibliografia

- [1] Viessmann – Notiziario Tecnico – Caldaie di media e grande potenzialità
- [2] Viessmann – Notiziario Tecnico – Tecnica della condensazione
- [3] INAIL – RACCOLTA R – Edizione 2009 - Specificazioni tecniche applicative del Titolo II del DM 1.12.75
- [4] DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 2 aprile 2009, n. 59: "Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettera a) e b), del Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia"
- [5] ENEA: Agenzia Nazionale Per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile, fattori di conversione di unità di misura dell'energia

Impianti solari termici per la produzione di acqua calda ad uso riscaldamento ed ACS, di potenzialità inferiore a 35 kW – Criticità correlate alla sicurezza impiantistica e alla salute umana

R. Iovene¹, R. Vasile¹, A. Morettini²

¹ Inail – Uot di Pescara

² Inail – Uot di Campobasso

Sommario

Sono diffusi, soprattutto in ambito civile, e sono alla portata economica della collettività, impianti solari termici che permettono di ottenere dall'energia solare acqua calda ad uso riscaldamento, sanitario e tecnologico.

Il quadro normativo vigente in Italia prevede che l'utilizzo di tale tipologia di impianti sia subordinato a specifiche disposizioni legislative in merito alla sicurezza, dettate dal Titolo II del D.M. 01/12/1975 e dalla Raccolta R ed.2009, oltre che a specifiche disposizioni legislative in merito alla salvaguardia della salute umana, in particolare relative alla proliferazione della legionella nei serbatoi di accumulo ACS, dettate dalle linee guida del Ministero della Salute del 2015, integrate dall'ISS nel 2020.

Attraverso una attenta disamina delle indicazioni normative esistenti e mediante l'esecuzione di rilievi diretti in campo, effettuati su impianti soggetti a verifiche di primo impianto, sono emerse criticità in impianti termici integrati con impianti solari aventi una potenzialità inferiore a 35 kW, correlate sia al rischio di sovratemperatura presso le utenze finali, che al rischio di proliferazione della legionella.

Tali impianti, spesso caratterizzati dalla presenza di serbatoi di accumulo acqua calda di notevoli dimensioni e con prelievo discontinuo di ACS, risultano infatti esclusi dal controllo degli enti preposti sulla parte solare.

Si è cercato, quindi, di individuare possibili soluzioni impiantistiche, indirizzate nello specifico al controllo delle temperature nel serbatoio di accumulo ACS, atte alla riduzione delle criticità riscontrate.

1. Gli impianti di riscaldamento per la produzione di acqua calda

Un impianto termico può essere definito, secondo quanto indicato nel Titolo II del D.M. 01/12/1975, come un impianto tecnologico utilizzante acqua calda sotto pressione, con temperatura dell'acqua non superiore alla temperatura di ebollizione alla pressione atmosferica, destinabile al riscaldamento degli ambienti ed alla produzione di acqua calda ad uso sanitario o per processi produttivi.

Dal punto di vista realizzativo, gli impianti termici si suddividono in due tipologie principali caratterizzate dal sistema di espansione del fluido termovettore adottato, impianti a vaso di espansione aperto ed impianti a vaso di espansione chiuso.

In entrambe le tipologie gli elementi fondamentali e comuni costituenti l'impianto termico sono rappresentati da:

- il generatore atto alla produzione di calore e al riscaldamento del fluido termovettore, corredato dai sistemi di controllo, protezione e sicurezza;
- le tubazioni costituenti il sistema di distribuzione del fluido termovettore;
- i sistemi di utilizzazione del fluido termovettore, tra cui anche sistemi di accumulo per la produzione di acqua calda sanitaria (in seguito ACS).

Il riscaldamento del fluido termovettore ad opera del generatore di calore avveniva fino a pochi anni fa, mediante l'esclusivo utilizzo di combustibile di tipo solido, liquido o gassoso, ovvero legno/pallet, gasolio, gas metano e GPL.

Le prime dimostrazioni risalenti agli anni '70 di un legame tra il livello di inquinamento globale e l'utilizzo di combustibile fossile per la produzione di calore, le difficoltà di un approvvigionamento continuo di quest'ultimo e il costante aumento dei costi dei vari combustibili, hanno spinto lo sviluppo tecnologico verso la realizzazione di impianti in cui il calore viene generato non più unicamente a mezzo dei processi di combustione tradizionali, ma attraverso l'impiego integrato di fonti di energia alternativa, naturale e pulita.

2. L'impianto solare termico

I sistemi tecnologici in grado di produrre energia termica sfruttando l'energia solare (impianti solari termici) sono ormai largamente diffusi, anche grazie ad una progressiva diminuzione dei loro costi realizzativi, e, in via generale, basano il loro funzionamento sull'interazione tra due circuiti idraulici distinti, un circuito solare ed un circuito utilizzatore.

Il primo circuito (solare) è destinato all'assorbimento della radiazione solare e alla sua conversione in energia termica, il secondo circuito (utilizzatore) è invece destinato al riscaldamento degli ambienti, alla produzione di acqua calda per uso sanitario o per ulteriori usi tecnologici.

I due circuiti, sebbene idraulicamente separati, sono posti tra loro in contatto mediante un sistema di interscambio, atto al trasferimento dell'energia termica prodotta dal circuito solare al circuito utilizzatore e che, quindi, funge da "generatore di calore" per quest'ultimo.

Il circuito solare è principalmente costituito da:

- un insieme di collettori solari, più comunemente chiamati pannelli;
- un insieme di dispositivi di regolazione e controllo, di protezione e di sicurezza;
- un sistema di tubazioni di collegamento dei collettori al sistema di scambio termico.

I collettori, sono dei dispositivi che, sfruttando la radiazione solare a cui sono sottoposti durante le ore diurne, diffusa o diretta, consentono il riscaldamento di un fluido termovettore, in genere glicole propilenico, permettendo la trasformazione dell'energia solare in energia termica.

In commercio esistono diverse gamme di collettori solari che è possibile dividere in due tipologie principali, pannelli solari piani e pannelli solari sottovuoto.

I pannelli solari piani, protetti da superficie vetrata o meno, rappresentano la versione più semplice e sono caratterizzati dalla presenza di un assorbitore realizzato con tubazioni parallele collegate in estremità a dei collettori, in grado di ricevere la radiazione solare e di portare a temperatura il fluido termovettore del circuito solare che scorre al suo interno.

I pannelli solari sottovuoto, del tipo semplice o a concentrazione, presentano un funzionamento più complesso e permettono di riscaldare il fluido termovettore del circuito solare a temperature molto elevate consentendone anche la sua vaporizzazione.

I suddetti pannelli sono caratterizzati dalla presenza di un assorbitore a tubazioni parallele concentriche, chiuse ad un'estremità e collegate all'altra estremità ad un condensatore coibentato. Nella tubazione più esterna è presente un primo fluido che, portato a temperatura mediante l'irraggiamento solare, evapora giungendo al condensatore dove cede la propria energia termica al fluido termovettore del circuito solare presente nella tubazione interna.

Il fluido termovettore, in uscita dai collettori solari, mediante un sistema di tubazioni, giunge al sistema di scambio termico, facente parte del circuito utilizzatore.

Il circuito utilizzatore è principalmente costituito da:

- un sistema di scambio termico, ovvero uno scambiatore di calore o un bollitore dotato di scambiatore interno;

- un insieme di dispositivi di controllo e regolazione, di protezione e di sicurezza, posti in prossimità dello scambiatore o del bollitore;
- un sistema di tubazioni che collegano lo scambiatore o il bollitore alle attrezzature utilizzatrici terminali del circuito.

Lo scambiatore o il bollitore, permettendo al proprio interno il contatto tra il circuito solare e il circuito utilizzatore, consentono la trasmissione dell'energia termica tra i due fluidi termovettori in essi contenuti.

Con riferimento ai p.ti 2.14 e 2.15 del CAP R.3.H. della Raccolta R ed.2009, possono individuarsi due tipologie di impianti solari termici realizzabili, impianti di tipo semplice e impianti di tipo integrato.

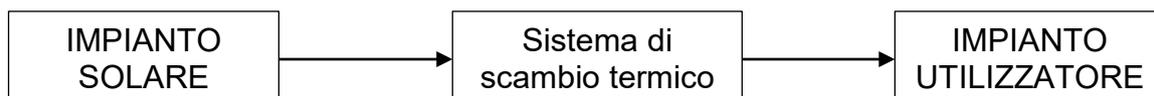


Figura 1. Impianto semplice

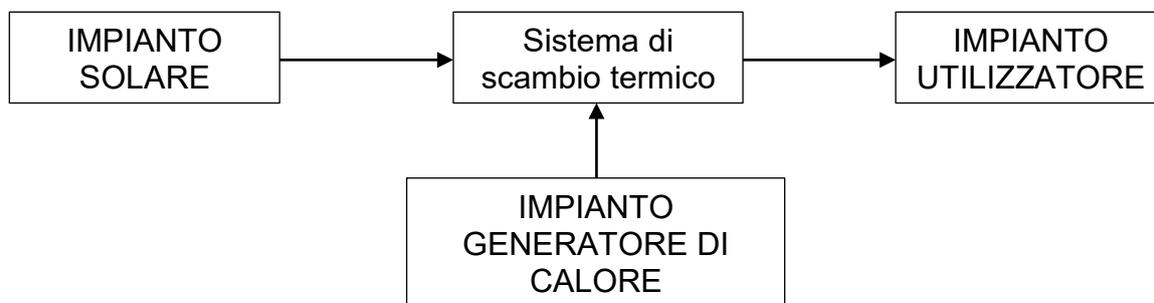


Figura 2. Impianto integrato

Gli impianti semplici sono quei sistemi costituiti da un circuito solare, un sistema di scambio termico ed un circuito utilizzatore, mentre gli impianti integrati sono quei sistemi in cui ad un impianto semplice di base risultano connessi uno o più generatori di calore rientranti nel campo di applicazione del Titolo II del D.M. 01/12/1975.

Gli impianti solari termici a causa di una produzione di calore altamente variabile, non costante nelle 24 ore giornaliere e durante l'anno, in quanto strettamente subordinata alle condizioni di irraggiamento dei collettori, trovano maggiore e migliore impiego in impianti di tipo integrato.

Le norme attualmente vigenti in materia di sicurezza impiantistica, prevedono l'assoggettabilità dell'impianto solare alle disposizioni per l'installazione e l'esercizio delle attrezzature a pressione dettate dal D.M. 329/04 e l'assoggettabilità dell'impianto utilizzatore, qualora la potenzialità dell'impianto solare sia pari o superiore ai 35 kW e/o la superficie dei pannelli sia non inferiore a 50 mq, alle disposizioni del Titolo II del D.M. 01/12/1975, e cioè alle specifiche tecniche indicate nel CAP R.3.H della Raccolta R ed.2009. Per gli impianti utilizzatori rientranti nel campo di applicazione delle norme vigenti, i sistemi di scambio termico devono essere corredati di dispositivi di sicurezza, protezione e controllo di seguito brevemente descritti, ovviamente diversificati in funzione del sistema di espansione adottato, a vaso aperto oppure a vaso chiuso.

Per impianti di tipo a vaso aperto, il p.to 3.2.1 del CAP R.3.H della Raccolta R ed.2009 prevede che siano collegati direttamente allo scambiatore o al bollitore:

- un sistema di espansione aperto;
- un tubo di sicurezza ed un tubo di carico;

- un termostato di regolazione ed un termostato di blocco operanti su valvole termoregolatrici del fluido del circuito solare;
- un dispositivo di protezione livello minimo operante su una valvola termoregolatrice del fluido del circuito solare;
- un termometro con pozzetto per termometro di controllo e un manometro con attacco per manometro di controllo.

Per impianti di tipo a vaso chiuso, il p.to 3.2.2 del CAP R.3.H della Raccolta R ed.2009 prevede che siano collegati direttamente allo scambiatore o al bollitore:

- un sistema di espansione chiuso;
- una valvola di sicurezza e una valvola di scarico termico o una valvola di intercettazione del fluido del circuito solare autoazionata;
- un sistema o termostato di regolazione e un termostato di blocco operanti su valvole termoregolatrici del fluido del circuito solare;
- un dispositivo di protezione pressione minima operante su una valvola termoregolatrice del fluido del circuito solare;
- un termometro con pozzetto per termometro di controllo e un manometro con attacco per manometro di controllo;

Per impianti solari termici caratterizzati da una potenzialità inferiore a 35 kW e/o una superficie inferiore a 50 mq, valgono esclusivamente le disposizioni generali sulla realizzazione degli impianti e le norme di buona tecnica realizzativa.

3. La Legionellosi

La legionella è un batterio aerobio di tipo gram-negativo di cui il più pericoloso tra le diverse specie conosciute è la Legionella Pneumophila.

Il batterio è in grado di sviluppare sia la Febbre di Pontiac e sia una forma acuta di polmonite in grado di colpire severamente il sistema respiratorio dell'essere umano, più comunemente conosciuta come Malattia dei Legionari o Legionellosi.

Per generare la Legionellosi, il batterio deve poter penetrare nei polmoni e questo avviene mediante aerosol, nello specifico attraverso l'inalazione di goccioline d'acqua delle dimensioni di 1-5 micron che contengono il batterio stesso.

Secondo l'ultimo rapporto europeo annuale sulla sorveglianza epidemiologica in merito alla legionella, pubblicato nel maggio 2021, nei 28 paesi dell'Unione Europea e nei paesi dello Spazio Economico Europeo si sono riscontrati 11298 casi di legionella nell'anno 2019, di cui 10636 casi confermati con un tasso di 2,2 casi ogni 100.000 abitanti.

Seppur tale rapporto dimostri un numero complessivo di casi di legionella in calo rispetto al 2018 (11403), analizzando i dati statistici nel dettaglio e con particolare riferimento al nostro paese, è possibile evidenziare come in Italia, a partire dal 2015, il numero di persone afflitte da tale patologia sia in costante aumento.

Il batterio della legionella, normalmente presente in acqua, può proliferare e svilupparsi al verificarsi di determinate condizioni favorevoli, sia di tipo ambientale che di tipo fisico-chimico, nel seguito elencate:

- ambiente con presenza di ossigeno;
- ambiente acquatico in stagnazione;
- presenza di elementi nutritivi in tubazioni e attrezzature idriche come biofilm, scorie, calcare, ruggine, materiali plastici;
- temperatura dell'acqua compresa in un intervallo tra i 20°-50°C circa.

Country	2015		2016		2017		2018		2019		
	Number	Rate	ASR								
Austria	160	1.9	161	1.9	219	2.5	237	2.7	255	2.9	2.6
Belgium	118	1.1	157	1.4	235	2.1	270	2.4	224	2.0	1.8
Bulgaria	1	0.0	0	0.0	2	0.0	11	0.2	5	0.1	0.1
Croatia	48	1.1	31	0.7	33	0.8	43	1.0	-	-	-
Cyprus	2	0.2	3	0.4	1	0.1	5	0.6	4	0.5	0.5
Czechia	120	1.1	147	1.4	217	2.1	231	2.2	277	2.6	2.3
Denmark	185	3.3	170	3.0	278	4.8	264	4.6	270	4.7	4.2
Estonia	6	0.5	14	1.1	16	1.2	18	1.4	12	0.9	0.8
Finland	17	0.3	15	0.3	27	0.5	24	0.4	44	0.8	0.7
France	1389	2.1	1218	1.8	1630	2.4	2133	3.2	1816	2.7	2.5
Germany	842	1.0	974	1.2	1278	1.5	1446	1.7	1545	1.9	1.6
Greece	29	0.3	31	0.3	43	0.4	65	0.6	45	0.4	0.4
Hungary	58	0.6	66	0.7	62	0.6	74	0.8	113	1.2	1.1
Iceland	1	0.3	3	0.9	3	0.9	5	1.4	-	-	-
Ireland	11	0.2	10	0.2	25	0.5	25	0.5	21	0.4	0.5
Italy	1572	2.6	1733	2.9	2037	3.4	3018	5.0	3143	5.2	4.2
Latvia	22	1.1	24	1.2	31	1.6	37	1.9	42	2.2	2.1
Liechtenstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lithuania	7	0.2	11	0.4	14	0.5	21	0.7	17	0.6	0.6
Luxembourg	5	0.9	3	0.5	9	1.5	10	1.7	14	2.3	2.3
Malta	6	1.4	8	1.8	11	2.4	13	2.7	5	1.0	0.8
Netherlands	419	2.5	454	2.7	561	3.3	584	3.4	566	3.3	3.0
Norway	60	1.2	43	0.8	52	1.0	69	1.3	65	1.2	1.2
Poland	23	0.1	24	0.1	38	0.1	70	0.2	74	0.2	0.2
Portugal	145	1.4	197	1.9	232	2.3	211	2.1	201	2.0	1.7
Romania	3	0.0	2	0.0	19	0.1	62	0.3	19	0.1	0.1
Slovakia	14	0.3	14	0.3	14	0.3	54	1.0	85	1.6	1.6
Slovenia	106	5.1	93	4.5	117	5.7	160	7.7	195	9.4	8.3
Spain	1024	2.2	951	2.0	1363	2.9	1513	3.2	1542	3.3	2.9
Sweden	142	1.5	145	1.5	189	1.9	198	2.0	182	1.8	1.6
United Kingdom	412	0.6	383	0.6	504	0.8	532	0.8	517	0.8	0.7
EU-EEA	6947	1.4	7085	1.4	9260	1.8	11403	2.2	11298	2.2	1.9

Tabella 1. Rapporto europeo annuale sulla sorveglianza epidemiologica

La pericolosità del batterio è correlata, oltre che alle citate condizioni per la proliferazione, anche alla sua possibilità di diffusione, ovvero a fenomeni di vaporizzazione delle acque e alla generazione di aerosol.

Ne deriva che gli impianti atti alla produzione di acqua calda sanitaria, ed in particolare i serbatoi di accumulo della stessa, rappresentano un'importante fonte di pericolo per l'essere umano nei confronti delle infezioni generate dal succitato batterio.

L'acqua in stagnazione, la temperatura di utilizzo dell'acqua calda sanitaria mediamente sui 40°-45°C, la presenza di sedimentazioni e di ruggine in condotte e serbatoi, elementi tipici di un impianto di produzione e accumulo ACS, favoriscono pertanto la proliferazione del batterio che ha oltretutto possibilità di diffusione attraverso la vaporizzazione dell'acqua in corrispondenza degli erogatori finali.

Ai sensi dell'art.18, c.1, lett.p del D.Lgs. n.81 del 9 aprile 2008 e s.m.i., il datore di lavoro ha l'obbligo di redigere un documento di valutazione dei rischi presenti presso la propria attività (DVR), considerando tra le possibili fonti di rischio anche quelli di natura biologica.

Il titolo X e l'allegato XLVI trattano rispettivamente l'esposizione ad agenti biologici e la loro classificazione.

Il D.Lgs. n.81/08 classifica i batteri appartenenti al gruppo della legionella (*Fluoribacter Bozemanii*, *Legionella Pneumophila* e *Legionella Spp*) tra quelli appartenenti al gruppo 2, rientrano quindi tra gli agenti biologici che possono causare malattie in soggetti umani e costituire un rischio per i lavoratori.

Ne deriva che è compito di ogni datore di lavoro valutare i rischi correlati alla Legionellosi e predisporre le opportune misure di sicurezza.

Indicazioni sulla valutazione del rischio e sulle opportune misure di sicurezza da intraprendere, sono dettate in Italia dalle “Linee guida per la prevenzione e il controllo della Legionellosi”, allegato A dell’accordo Stato-Regioni del 7 maggio 2015.

Le citate linee guida sono state riprese, aggiornate e ribadite dal rapporto ISS COVID-19 n.21/2020 del 3 maggio 2020, “Guida per la prevenzione della contaminazione da Legionella negli impianti idrici di strutture turistico recettive, e altri edifici ad uso civile e industriale non utilizzati durante la pandemia Covid-19”, in considerazione della presenza sul territorio nazionale di un numero elevato di impianti idrici non utilizzati a causa dell’emergenza epidemiologica da virus Sars-Cov-2.

Nelle linee guida attualmente vigenti vengono fornite istruzioni in merito alle forme di controllo da adottarsi negli impianti idrici civili e alla valutazione del rischio da Legionellosi ed indicazioni su metodi di prevenzione e sulle tecniche di progettazione, realizzazione e gestione degli impianti.

In particolare, nell’allegato 13 delle linee guida del 2015, vengono illustrati i metodi di prevenzione e controllo della contaminazione del sistema idrico.

Nel suddetto allegato, le metodologie atte alla disinfezione degli impianti dal batterio della legionella sono suddivise in due gruppi principali, misure a breve termine e misure a lungo termine.

Le misure a breve termine consistono essenzialmente nella decalcificazione delle parti di impianto meno usurate, da effettuarsi mediante immersione in soluzione acida, e nella sostituzione delle componenti di impianto usurate. Tali misure devono sempre essere adottate e rientrano nella ordinaria gestione e manutenzione degli impianti.

Le misure a lungo termine possono essere suddivise in due ulteriori sottogruppi, misure di tipo fisico e misure di tipo chimico.

- Metodi di disinfezione di tipo fisico:
 - microfiltrazione del fluido ACS applicata in corrispondenza delle utenze finali e/o in corrispondenza dei circuiti e dei serbatoi per la sua produzione presenti in centrale termica;
 - shock termico programmato e saltuario applicato al fluido ACS;
 - shock termico programmato e continuo applicato al fluido ACS (pastorizzazione);
 - trattamento del fluido ACS con raggi UV applicato in corrispondenza dei circuiti e dei serbatoi destinati alla sua produzione e presenti in centrale termica.
- Metodi di disinfezione di tipo chimico:
 - iperclorazione del fluido ACS (shock o continua);
 - immissione di biossido di cloro nel circuito ACS;
 - immissione di ozono nel circuito ACS;
 - immissione di monocloroammina nel circuito ACS;
 - ionizzazione del fluido ACS con ioni di rame o argento mediante processo elettrolitico;
 - immissione di perossido di idrogeno e ioni argento nel circuito ACS;
 - immissione di acido peracetico nel circuito ACS.

Le diverse metodologie sopra elencate possono essere applicate singolarmente o in combinazione.

I metodi di tipo fisico risultano di più semplice impiego, in quanto i metodi di tipo chimico, prevedono l’impiego di sostanze negli impianti tali da rendere necessaria una successiva ripulitura degli stessi al fine di ripristinare la potabilità dell’acqua e la sua possibilità di utilizzo a livello sanitario.

4. Impianto solare termico per la produzione di acqua calda sanitaria

Gli impianti solari termici, come già evidenziato nei precedenti paragrafi, non riuscendo a sviluppare singolarmente potenzialità particolarmente elevate per un utilizzo autonomo e non garantendo un funzionamento costante nelle 24 ore e nel corso dell'intero anno solare, trovano il loro utilizzo più frequente in impianti termici civili di tipo integrato, dove sono solitamente impiegati per la produzione specifica di acqua calda sanitaria.

Gli impianti per la produzione di ACS, necessitando della presenza di un accumulo, al fine di garantire una costante disponibilità per l'utenza, nella maggior parte dei casi presentano un sistema di scambio termico, tra il circuito solare ed il circuito utilizzatore, costituito da bollitori di accumulo dotati di scambiatore interno; è inoltre possibile trovare la soluzione progettuale che prevede l'installazione di scambiatori a piastre esterni collegati a puffer di accumulo.

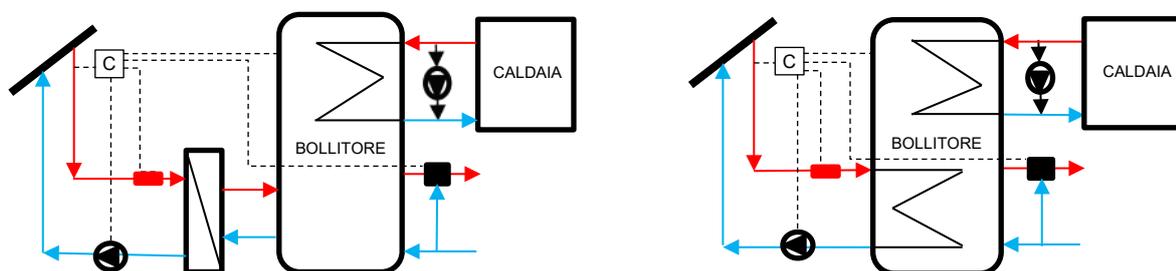


Figura 3. Impianti con sistema di scambio termico esterno ed interno

Tralasciando funzionamenti a circolazione naturale di esigua applicazione, il fluido termovettore del circuito solare confluisce, a mezzo di un gruppo pompe, nel sistema di scambio termico dove trasmette la propria energia termica al fluido del circuito utilizzatore destinato all'uso sanitario.

Al fine di governare l'intero impianto e, in particolare, di controllare la temperatura del fluido termovettore nel circuito utilizzatore, generalmente sul circuito solare, a monte dello scambiatore, vengono installati:

- un gruppo pompe di circolazione;
- delle sonde termiche atte al rilevamento della temperatura del fluido termovettore poste in prossimità dei pannelli;
- una valvola termoregolatrice, comandata dalle suddette sonde termiche, adibita alla modulazione/blocco del flusso del fluido termovettore nello scambiatore.

Sul circuito utilizzatore, a valle dello scambiatore, vengono invece solitamente installati:

- delle sonde termiche atte al rilevamento della temperatura del fluido di mandata ACS;
- una valvola miscelatrice posta sul circuito di mandata, comandata dalle suddette sonde termiche, adibita a mantenere il fluido ACS inviato all'utenza alla temperatura di utilizzo prefissata, mediamente compresa nell'intervallo tra 40°C e 65°C.

Il suddetto sistema è gestito nel suo complesso da una centralina di termoregolazione.

Dai rilievi condotti in campo, effettuati in sede di verifica di primo impianto ai sensi dell'art. 22 del D.M. 01/12/1975 su impianti termici integrati con impianti solari aventi potenza inferiore a 35 kW, è emerso che il sistema impiantistico sopra descritto è stato riscontrato nella totalità degli impianti e nelle varianti riportate nella tabella seguente.

CIRCUITO SOLARE P < 35KW	SISTEMA DI SCAMBIO TERMICO	CAPACITA' ACCUMULO ACS (Lt.)	SICUREZZE SOVRATEMPERATURA DA CIRCUITO SOLARE	SICUREZZE SOVRATEMPEARURA USCITA ACCUMULO ACS	SISTEMA ANTILEGIONELLA SU ACCUMULO ACS
1	Bollitore con Scambiatore interno	1500	Centralina per arresto pompe di circolazione circuito solare T = 130°C	Valvola miscelatrice per ricircolo ACS	Shock termico settimanale
2	Bollitore con Scambiatore interno	2054	Centralina per arresto pompe di circolazione circuito solare T = 130°C	Valvola miscelatrice per ricircolo ACS	Shock termico settimanale
3	Bollitore con Scambiatore interno	300	Centralina per arresto pompe di circolazione circuito solare T = 130°C	Valvola miscelatrice per ricircolo ACS	Shock termico settimanale
4	Bollitore con Scambiatore interno	896	Centralina per arresto pompe di circolazione circuito solare T = 120°C	Valvola miscelatrice per ricircolo ACS	Shock termico settimanale
5	Bollitore con Scambiatore interno	1038	Centralina per arresto pompe di circolazione circuito solare T = 130°C	Valvola miscelatrice per ricircolo ACS	Shock termico settimanale
6	Bollitore con Scambiatore interno	2000	Centralina per arresto pompe di circolazione circuito solare T = 120°C	Valvola miscelatrice per ricircolo ACS	Shock termico settimanale
7	Bollitore con Scambiatore interno	1443	Centralina per arresto pompe di circolazione circuito solare T = 120°C	Valvola miscelatrice per ricircolo ACS	Shock termico settimanale
8	Bollitore con Scambiatore interno	1578	Centralina per arresto pompe di circolazione circuito solare T = 130°C	Valvola miscelatrice per ricircolo ACS	Shock termico settimanale
9	Bollitore con Scambiatore interno	1037	Centralina per arresto pompe di circolazione circuito solare T = 120°C	Valvola miscelatrice per ricircolo ACS	Shock termico settimanale
10	Bollitore con Scambiatore interno	1000	Centralina per arresto pompe di circolazione circuito solare T = 120°C	Valvola miscelatrice termostatica	Nessuno

Tabella 2. Rilievi effettuati in campo

5. Problematica per la sicurezza impiantistica e per la salute umana: sovratemperatura e Legionellosi.

Da un'analisi approfondita del sistema tecnico sopra descritto, ad oggi largamente utilizzato per i nuovi impianti solari termici aventi potenza inferiore a 35 kW, come emerso anche dai rilievi effettuati in campo, si è osservato che tale schema impiantistico, se non integrato da ulteriori accorgimenti tecnici, può generare rischi per la sicurezza impiantistica e per la salute umana sia in termini di sovratemperatura che di Legionellosi, a causa delle criticità nel seguito esaminate.

5.1 Aumento di temperatura nel circuito solare

Nel caso di aumento della temperatura del fluido presente nel circuito solare interviene la centralina solare che alla temperatura di 120°-130°C arresta le pompe di circolazione al fine di non far innalzare la temperatura dell'acqua presente nel serbatoio di accumulo ACS. Generalmente tale situazione accade o per assenza di richiesta da parte delle utenze del circuito ACS, o per forte irraggiamento dei collettori solari nei mesi estivi e, in casi estremi, per malfunzionamenti dell'impianto. In tali situazioni, essendo i collettori solari sottoposti ad un continuo irraggiamento durante le ore diurne ed essendo il fluido termovettore in essi contenuto totalmente o quasi totalmente impossibilitato a cedere la propria energia termica al fluido contenuto nel bollitore, si avrà un innalzamento della temperatura del fluido solare stesso, raggiungendo in alcuni casi anche i 180°-200°C e la cosiddetta "stagnazione". In questo stato la sovratemperatura è tale da essere causa di problematiche impiantistiche, non tanto connesse alla resistenza dei singoli pannelli, quanto correlate alla resistenza delle tubazioni ed alla resistenza di tenuta delle loro giunzioni. La presenza sul circuito solare di

valvole di sicurezza e di sfiati, fa sì che questo sia comunque protetto da rischi di sovrappressione correlati alla vaporizzazione del fluido termovettore. Se la condizione di “stagnazione” perdura nel tempo, ad impianto solare fermo, anche l’impianto utilizzatore non è esente da rischi. E, sebbene dal punto di vista della resistenza impiantistica non sorgono problematiche particolarmente gravi, l’alta temperatura è causa dell’instaurarsi di fenomeni di deposizione di materiale sedimentato nelle attrezzature di impianto (scambiatore, tubazioni, raccordi, etc), che possono nel tempo provocare rilevanti ostruzioni. Ad oggi le soluzioni tecniche integrative per limitare tale problematica si basano essenzialmente sulla limitazione della temperatura nei collettori solari attraverso l’installazione di un dissipatore di energia termica costituito da scambiatore ad aria, o un dissipatore di energia termica costituito da scambiatore ad acqua, o infine oscuranti per pannelli solari.

5.2 Aumento di temperatura nel circuito utilizzatore

Nel caso di un aumento imprevisto della temperatura nel circuito utilizzatore, il sistema riduce drasticamente la portata del fluido termovettore del circuito solare che confluisce nello scambiatore, agendo sulla valvola termoregolatrice o direttamente sulla pompa di circolazione, fino ad arrivare, in determinate condizioni, all’interruzione completa della circolazione del fluido. Durante i rilievi condotti in campo alcuni manutentori hanno lamentato, in condizioni di malfunzionamento delle sonde di temperatura che regolano la valvola miscelatrice, un aumento anomalo e incontrollato della temperatura del fluido ACS in uscita dal bollitore, con conseguente rischio di ustione per gli utilizzatori. Si sottolinea che lo schema impiantistico sopra descritto prevede, come unico controllo della temperatura del fluido in uscita dal bollitore, l’accoppiata sonde di temperatura – valvola miscelatrice, a differenza di quanto accade per gli impianti con potenza superiore a 35 kW per i quali sono invece attesi una serie di dispositivi di sicurezza sia per la pressione che per la temperatura. Ad oggi, per gli impianti solari termici di potenza inferiore a 35 kW non sono quindi state disposte soluzioni tecniche integrative per limitare tale problematica, che può essere evitata mediante l’installazione di una valvola di scarico termico o sistema equivalente che possa intervenire in caso di malfunzionamento delle sonde di temperatura.

5.3 Proliferazione della legionella nell’accumulo ACS

Nel caso di impianto solare non attivo e/o di scarsa richiesta di ACS da parte dell’utenza, l’acqua presente nei serbatoi tende a stagnare e a raffreddarsi stabilizzandosi a bassi valori di temperatura, comunque generalmente mai inferiori ai 20°C, grazie alla presenza di coibentazioni delle attrezzature. In tali condizioni di stagnazione tali attrezzature, spesso calcificate e non prive di sedimenti derivanti dal normale utilizzo, possono diventare luogo ideale per il proliferare del batterio causa della Legionellosi. Ad oggi le soluzioni tecniche integrative per limitare tale problematica si basano essenzialmente su un innalzamento della temperatura all’interno del serbatoio di accumulo. Lo Shock termico è infatti, tra tutte le metodologie di disinfezione, quella di più comune utilizzo e sfrutta la sensibilità del batterio della legionella alla variazione di temperatura. Nella tabella seguente vengono illustrati gli effetti della variazione della temperatura sui batteri:

TEMPERATURA	EFFETTO SUI BATTERI
> 70° C	Morte istantanea dei batteri
60°C ~ 70°C	Morte del 90% dei batteri entro 2 minuti
50°C ~ 60°C	Morte del 90% dei batteri entro 2 ore
20°C ~ 50°C	Campo di crescita ottimale batteri
< 20°C	Stato quiescente dei batteri

Tabella 3. Effetti della temperatura sui batteri

Lo shock termico del serbatoio ACS può essere applicato secondo due modalità distinte:

- Shock termico programmato e saltuario applicato al fluido ACS, che consiste nell'elevare la temperatura del fluido ACS a 70°-80°C per tre giorni consecutivi, assicurando il deflusso del fluido da tutti i punti di erogazione per almeno 30 minuti al giorno;
- Shock termico programmato e continuo applicato al fluido ACS (pastorizzazione), che consiste nel mantenere in modo più o meno costante la temperatura del fluido ACS presente nei serbatoi ad una temperatura di 60°-65°C, nell'effettuare un suo ricircolo in tutto l'impianto di distribuzione ad una temperatura di 55°-60°C per almeno 30 minuti al giorno e nel garantire sempre una temperatura di erogazione del fluido pari 48°-53°C.

Si evidenzia che il metodo dello shock termico, sebbene di semplice realizzazione tecnica, presenta svantaggi correlati all'incompatibilità con le vigenti norme in materia di risparmio energetico e ad un elevato rischio ustioni degli utenti finali. Inoltre l'innalzamento della temperatura all'interno dell'accumulo ACS viene effettuata mediante l'impiego del generatore di calore a servizio dell'impianto che, come si vede nella Figura 3, è collegato alla sola serpentina superiore. Tale condizione fa sì che, in assenza di un idoneo sistema di movimentazione dell'acqua all'interno dell'accumulo, la stratificazione verticale della stessa, in base alla temperatura, possa creare delle zone meno riscaldate nella parte bassa del serbatoio con conseguente inefficacia del processo. Pertanto si rende necessario abbinare allo shock termico l'installazione di gruppi di ricircolo, posti sul circuito ACS in uscita dal bollitore. Tali sistemi di ricircolo, al fine di movimentare tutta l'acqua presente nell'accumulo, devono essere a regola d'arte e collegati al bollitore con tubazioni di ritorno poste sia a metà dello stesso che sul fondo. Se non così realizzati, ma se collegati esclusivamente a tubazioni di ritorno poste a media altezza dell'accumulo, non verrà impedita la formazione di acqua stagnante in corrispondenza del fondo del serbatoio.

6. Conclusioni

Per impianti solari termici caratterizzati da una potenzialità inferiore a 35 KW e/o superficie inferiore a 50 mq, valgono le disposizioni generali sulla realizzazione degli impianti e le norme di buona tecnica realizzativa e pertanto, non essendo obbligatoriamente soggetti all'applicazione della Raccolta R ed.2009 CAP R.3.H, risultano sprovvisti di una serie di dispositivi di sicurezza, e presentano quindi, generalmente, delle soluzioni impiantistiche più semplici che possono essere causa di problematiche connesse a rischi per la salute e la sicurezza degli utilizzatori derivanti da sovratemperatura e Legionellosi. Tali rischi possono però essere mitigati mediante l'applicazione di ulteriori soluzioni tecniche-impiantistiche ad oggi già presenti sul mercato e che sarebbe auspicabile raccogliere e regolamentare in un documento di indirizzo.

7. Bibliografia

[1] D.M. 01/12/1975 e Raccolta R ed.2009.

[2] European Centre for Disease Prevention and Control. Legionnaires' disease. In: ECDC. Annual epidemiological report for 2019. Stockholm: ECDC; 2021.

[3] Accordo Stato Regioni n.79/CSR del 7 maggio 2015. Linee guida per la prevenzione e il controllo della legionellosi.

[4] Ricci ML, Rota MC, Scaturro M, Veschetti E, Lucentini L, Bonadonna L, La Mura S. Guida per la prevenzione della contaminazione da Legionella negli impianti idrici di strutture turistico recettive, e altri edifici ad uso civile e industriale non utilizzati durante la pandemia Covid-19. Versione del 3 maggio 2020. Roma: Istituto Superiore di Sanità; 2020. (Rapporto ISS COVID-19 n.21/2020).

Studio di un impianto per il recupero di energia termica dai prodotti di combustione di un forno industriale, inserito in un circuito di produzione di acqua surriscaldata esistente. Considerazioni sui dati di progetto del sistema di recupero ed adempimenti Inail.

P. Infortuna¹, S. Spinoso¹, F. Panico²

¹ Inail – Uot di Torino

² Libero professionista

Sommario

Attualmente molte realtà industriali, nell'ottica continua del risparmio energetico associato ad una più efficiente gestione dei flussi energetici globali, al fine di ottimizzare i consumi di combustibili tradizionali, quali per esempio il metano utilizzato per alimentare generatori di vapore o di acqua surriscaldata, individuano soluzioni che possano minimizzare tali consumi cercando di massimizzare il recupero di quell'energia che, per determinati cicli produttivi, normalmente verrebbe ceduta all'ambiente.

Un caso molto comune è rappresentato da tutti i cicli produttivi che utilizzano forni industriali, come impianti di verniciatura o impianti di trattamenti termici.

Il caso preso in esame, è quello di un recupero di energia termica dai prodotti di combustione di un forno industriale di un impianto di verniciatura, ed il suo inserimento in un circuito di produzione di acqua surriscaldata esistente.

Partendo quindi dalle caratteristiche principali dell'impianto di produzione di acqua surriscaldata (PS, TS, portata, sistema di espansione, organi di movimentazione del fluido), stabilita la quantità di energia termica recuperabile, saranno preventivamente individuate le caratteristiche tecniche, in termini di dati di progetto relativi a PS e TS, affinché i componenti di nuova costruzione, che dovranno essere installati per le azioni di recupero, trasformazione ed immissione nell'impianto esistente, garantiscano condizioni di sicurezza adeguati, compatibili con il resto dell'impianto e conformi agli standard normativi applicabili ed alle regole della buona tecnica.

Lo studio, inoltre, si occuperà di elencare tutti i documenti necessari per regolarizzare, dal punto di vista burocratico, l'impianto che si vuole realizzare ai fini degli adempimenti previsti dalla regolamentazione vigente.

1. Introduzione

In uno stabilimento industriale, in cui è presente una centrale termica per la produzione di acqua surriscaldata, si vuole installare un impianto di recupero di energia termica che, utilizzando il calore residuo ancora contenuto nei prodotti di combustione del proprio forno industriale, permetterà di innalzare la temperatura dell'acqua che circola nella tubazione di ritorno del circuito denominato "tecnologico continuo", che mediamente si aggira intorno ai 115°C, portandola ad un valore compreso tra 115°C e 135°C, prima dell'ingresso nella centrale termica di produzione dell'acqua surriscaldata dello stabilimento. In tal modo il recuperatore fungerà da economizzatore, attuando un preriscaldamento dell'acqua di ritorno. La centrale termica, costituita da due generatori di acqua surriscaldata e da un sistema di espansione e relative tubazioni di collegamento e di trasporto, conformi alle disposizioni della Raccolta "H" il cui progetto risulta regolarmente approvato e verificato, provvederà successivamente ad aggiungere la quantità di calore necessaria a portare la temperatura di mandata sul valore di progetto. Nella Figura 1 si riporta uno schema semplificato della centrale termica.

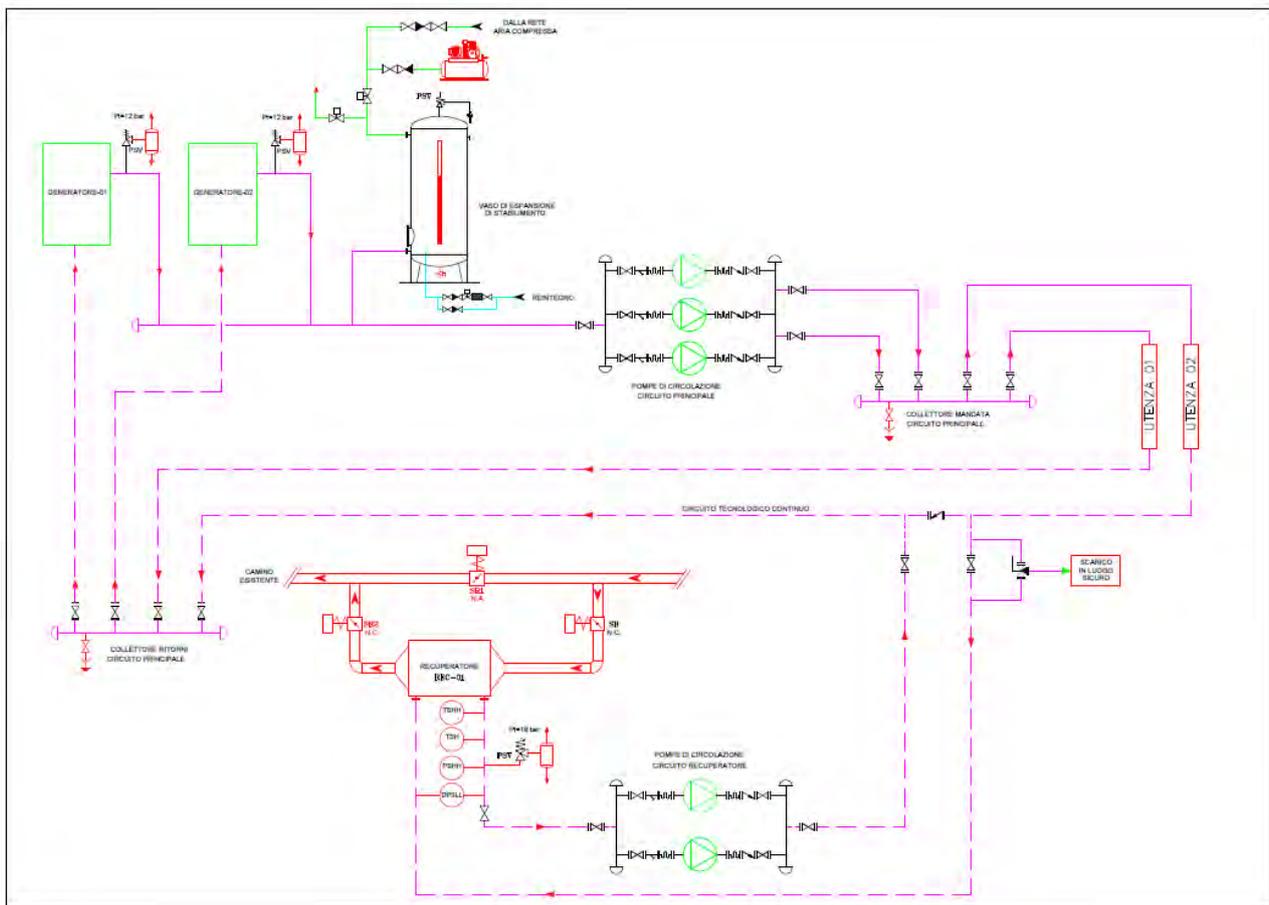


Figura 1

Così come si può evincere dallo schema in Figura 1, l'intervento da realizzare prevede l'installazione di n° 1 scambiatore di calore, ovvero di una batteria di recupero costituita da un cassone fumi nel quale sono inseriti una serie di tubi per il passaggio dell'acqua surriscaldata, con relative tubazioni di collegamento, da posizionare su un nuovo condotto orizzontale che convoglia i fumi in uscita dal forno industriale, verso il cassone di tale batteria, prima di inviare gli stessi al camino esistente.

A completamento del circuito di recupero si prevede:

1. L'inserimento, sul nuovo condotto fumi, di un modulo di contenimento della batteria di recupero, l'installazione di un filtro a ciclone, di un ventilatore centrifugo e di una serie di serrande, a sicurezza positiva, per il collegamento alla tubazione di by-pass fumi.
2. L'inserimento di nuove canalizzazioni di collegamento dell'impianto esistente alle nuove apparecchiature.
3. L'installazione di nuove tubazioni di collegamento, che saranno marcate CE, alla linea ritorno del circuito "tecnologico continuo", con interposizione di elettropompe di circolazione ed accessori di completamento.
4. L'installazione di tutti i dispositivi di sicurezza, protezione e controllo, sulle nuove tubazioni di acqua surriscaldata.

Per il modulo di contenimento della batteria di recupero, sarà necessario farsi rilasciare dal fabbricante una dichiarazione di incorporazione (rif. Allegato II, parte 1, sezione B, della Direttiva 2006/42/CE).

L'inserimento della batteria di recupero sull'impianto esistente, ed in particolare l'insieme delle azioni di collegamento delle nuove tubazioni a quella esistente, non si prefigura come riparazione in quanto la tubazione esistente, sulla quale si andranno a collegare le nuove tubazioni di mandata e ritorno della stessa batteria di recupero, ricade in seconda categoria

e quindi non rientrava nell'obbligo dell'applicazione dell'art. 16 del D.M. 329/04: in questo caso, le suddette azioni, dovranno rispettare le regole della buona tecnica.

Giusto per completezza di trattazione, diverso sarebbe stato se la stessa tubazione risultasse in terza categoria in quanto, poiché sarebbe stata obbligatoria la sua denuncia ai sensi dello stesso art. 16 sopra citato, la stessa tubazione risulterebbe possedere un numero di matricola rilasciato dall'ISPESL, oggi INAIL RCV, e quindi, in questo caso, sarebbe stato necessario istruire una pratica di riparazione, ai sensi dell'art. 14 dello stesso D.M. 329/04, per il collegamento della batteria di recupero alla tubazione in questione.

Relativamente alle disposizioni della Raccolta "H", si può affermare che:

- l'aumento del contenuto d'acqua totale dell'intero circuito non altera il calcolo relativo al dimensionamento del sistema d'espansione esistente, ovvero il volume utile del vaso d'espansione, il cui dimensionamento risulta già approvato nella Raccolta "H" esistente, continua ad essere sufficiente a contenere l'espansione del nuovo contenuto d'acqua;
- l'aumento di potenzialità è solo un aumento apparente, in quanto, comportandosi la batteria di recupero come economizzatore, la nuova potenza introdotta equivale a quella non prodotta dai generatori di acqua surriscaldata esistenti, per cui il dimensionamento del diametro interno del tubo d'espansione, di cui alla formula riportata al punto 1.3 del Capitolo H3 della Raccolta "H", non varia rispetto alla stessa Raccolta "H" già approvata.

2. Dati di progetto

Circuito primario: prodotti della combustione del forno di verniciatura

- PS \leq 0,5 bar
- TS = 600 °C

Circuito secondario utenze: acqua surriscaldata

- PS = 18 bar
- TS = 150 °C

Per quanto riguarda la batteria di recupero che deve essere costruita, il fabbricante della stessa, se non esplicitamente richiesto in fase di definizione dell'ordine di acquisto, decide, in base a propria valutazione tecnico/economiche, di progettare e realizzarla con una TS che può essere inferiore o uguale alla TS del circuito primario: nel primo caso, essendo presente il rischio di surriscaldamento, al fine di categorizzare l'attrezzatura e quindi scegliere il Modulo per la sua costruzione, dovrà utilizzare la Tabella 5 della direttiva 2014/68/UE (Attrezzature a pressione a focolare od altro tipo di riscaldamento, con rischio di surriscaldamento, destinate alla generazione di vapore od acqua surriscaldata a temperature superiori a 110°C); nel secondo caso dovrà utilizzare la Tabella 2 della stessa Direttiva (Recipienti destinati a contenere gas, gas liquefatti, gas dissolti sotto pressione, vapori e liquidi la cui tensione di vapore alla temperatura massima ammissibile è superiore di almeno 0,5 bar alla pressione atmosferica normale, per fluidi del gruppo 2).

Questa scelta andrà ad influenzare anche la progettazione dei sistemi di sicurezza, protezione e controllo che dovranno essere installati a corredo della stessa batteria di recupero infatti, nel caso di scambiatori di calore, qualora il secondario sia progettato per una temperatura non inferiore a quella massima del fluido primario e per una pressione almeno pari a quella del vapore d'acqua saturo a detta temperatura, possono essere omessi i dispositivi di protezione, quali pressostato e termostato di blocco (rif. Raccolta H - CAPITOLO H5 - punto 4.2) e, in questo caso, occorrerà installare una valvola di sicurezza tarata alla suddetta pressione e dimensionata in modo da scaricare la portata corrispondente all'aumento di volume dell'acqua contenuta nel circuito secondario dello

scambiatore, qualora tale circuito possa essere intercettato nell'andata e nel ritorno (rif. Raccolta H - CAPITOLO H4 - punto 1.9).

Per semplicità di trattazione, il presente studio, si basa sulla scelta di progettare il primario ed il secondario, della batteria di recupero, alla stessa temperatura ($TS = 600 \text{ }^\circ\text{C}$).

Relativamente al volume, il suo valore dipende dal dimensionamento termodinamico, ovvero dalla superficie di scambio che è necessaria per far aumentare la temperatura, di un determinato ΔT , di una specifica portata d'acqua sottoposta ad un afflusso di calore: nel nostro caso si avrà una superficie di scambio tale da avere un contenuto d'acqua pari a 135 litri. Occorre ora determinare la sua pressione di progetto.

2.1 Determinazione della pressione di progetto del sistema di recupero calore

Si assume che i generatori di acqua surriscaldata della centrale termica si trovino accidentalmente in condizioni di scatto delle valvole di sicurezza e che le pompe di circolazione del circuito principale lavorino a bassa portata, in un punto della curva caratteristica prossimo alle condizioni di "bocca chiusa". Poiché ciò che determina la pressione nei vari punti dell'impianto è la posizione del vaso di espansione sul circuito principale, la taratura delle valvole di sicurezza e le pompe di circolazione, nelle condizioni sopra citate e con riferimento allo schema di Figura 1, la pressione massima che si può instaurare sulla batteria di recupero è pertanto:

- pressione di taratura valvola di sicurezza (generatori di acqua surriscaldata) = 12 bar
- pressione a "bocca chiusa" delle pompe di circolazione del circuito principale (50 metri)
 - $P_p = 919 \cdot 9,81 \cdot 50 / 100.000 = 4,51 \text{ bar}$
- dislivello valvole di sicurezza generatori di acqua surriscaldata - pompe di circolazione principali (7 metri)
 - $P_{dvds1} = 919 \cdot 9,81 \cdot 7 / 100.000 = 0,631 \text{ bar}$
- dislivello pompe di circolazione principali - batteria di recupero (2 metri)
 - $P_{dpc} = 919 \cdot 9,81 \cdot 2 / 100.000 = 0,181 \text{ bar}$
- dislivello valvola di sicurezza batteria di recupero - mandata acqua surriscaldata (2 metri)
 - $P_{dvds2} = 919 \cdot 9,81 \cdot 2 / 100.000 = 0,181 \text{ bar}$

Sommando quindi tutti i contributi, si ottiene una pressione massima pari a 17,503 bar, per cui la batteria dovrà avere una pressione minima di progetto pari a 18 bar. Questo valore risulta compatibile con i dati di progetto dell'impianto esistente, così come indicati al Capitolo 2.

Alla luce di quanto sopra possiamo quindi definire i dati di progetto, del lato secondario (acqua surriscaldata), della batteria di recupero, ovvero:

- $V = 135 \text{ litri}$
- $PS = 18 \text{ bar}$
- $TS = 600 \text{ }^\circ\text{C}$

È necessario sottolineare il concetto che il valore di PS individuato è strettamente legato all'impianto così come è schematizzato in Figura 1, ovvero le considerazioni sopra riportate sono valide se riferite a quello stesso schema; tuttavia, qualora ci si trovi in una condizione impiantistica tale per cui il valore individuato risulti essere superiore ai dati di progetto iniziali, previa approvazione dell'INAIL RCV, potrebbe essere accettata la possibilità di installare dispositivi di sicurezza certificati PED, quali, ad esempio, pressostati di blocco posizionati sul collettore di mandata delle pompe principali di circolazione, al fine di limitare, in ogni caso, la pressione ad un valore compatibile con gli stessi dati di progetto iniziali e quindi poter progettare la batteria di recupero, ed in generale qualsiasi altra utenza, a tale valore.

2.2 Considerazioni sulla temperatura minima di progetto del circuito secondario acqua surriscaldata

Analizzando i diversi dati di progetto, è necessario soffermarsi sul valore della temperatura di progetto, infatti, così come ipotizzato, la TS di entrambi i lati della batteria di recupero (600 °C), non risulta compatibile con lo stesso dato di progetto, ma relativo al circuito secondario utenze di acqua surriscaldata, indicato nel Capitolo 2 (150 °C). Per ovviare a tale problema, sarà necessario prevedere, sulla tubazione di mandata dell'acqua surriscaldata della batteria di recupero, l'installazione di interruttori termici automatici di blocco, certificati come dispositivi di sicurezza CE, che interverranno alla temperatura di 150 °C agendo sulle serrande, poste sui condotti fumi, che convoglieranno gli stessi al by-pass, escludendo così la stessa batteria; vedremo tra poco che tale soluzione ci permetterà anche di assumere determinate condizioni per il dimensionamento delle valvole di sicurezza.

Per un più efficiente funzionamento della batteria di recupero, associati agli interruttori termici automatici di blocco, si dovrà prevedere anche l'installazione di interruttori termici automatici di regolazione.

3. Studio sulle valvole di sicurezza per scarico acqua surriscaldata ad una temperatura di 150°C

Secondo la Raccolta "H", al punto 1.4 del Capitolo H4, ogni generatore di acqua surriscaldata deve essere corredato di una o più valvole di sicurezza con capacità di scarico di vapore saturo totale non inferiore al valore derivante dalla seguente formula

$$Q = 3600 \cdot \frac{P}{r}$$

dove:

P = potenza termica nominale del generatore;

r = calore di vaporizzazione dell'acqua alla pressione di scarico della valvola di sicurezza.

Nel nostro caso, non potendo usufruire completamente della possibilità ammessa dalla Raccolta "H" al punto 1.9 del Capitolo H4, in quanto la pressione di progetto, del lato secondario (acqua surriscaldata), della batteria di recupero è inferiore alla pressione del vapore saturo alla temperatura di progetto del lato primario (prodotti della combustione), che nel nostro caso coincide con quella del lato secondario (acqua surriscaldata), siamo costretti, in prima battuta, a dimensionare la valvola di sicurezza utilizzando la formula sopra indicata, e quindi sostituendo i valori:

$P = 1060$ kW

$r = 1914,75$ kJ/kg (pressione di taratura delle valvole di sicurezza 18 bar)

otteniamo

$$Q = 1992,9 \text{ kg/h}$$

Considerando inoltre anche quanto previsto al punto 1.5 dello stesso Capitolo H4 sopra citato, sarà necessario installare n° 2 valvole di sicurezza, ognuna con pressione di taratura pari a 18 bar e capacità di scarico vapore pari a 996,15 kg/h.

Tuttavia, così come anticipato nel Capitolo 2, la batteria di recupero, anche per l'installazione di interruttori termici automatici di blocco, potrebbe essere considerata ricadente nel caso previsto di cui al punto 1.9 del Capitolo H4 della Raccolta "H" e quindi, previa approvazione dell'INAIL RCV, potrebbe essere accettata la possibilità di installare una sola valvola di sicurezza dimensionata in modo da scaricare la portata corrispondente all'aumento di volume dell'acqua contenuta nel circuito secondario della stessa batteria. A riguardo, di seguito, si riportano i calcoli considerando due condizioni:

- portata di acqua surriscaldata da scaricare con una variazione di temperatura dell'acqua da 100 a 150°C;
- portata di acqua surriscaldata da scaricare considerando il fenomeno in una fase transitoria.

Condizione a)

È necessario, prima di tutto, calcolare l'aumento di capacità termica nel secondario, utilizzando la seguente formula

$$E = \frac{V_a \cdot C_p \cdot \Delta t}{1000}$$

dove:

V_a = Massa dell'acqua contenuta nel circuito secondario della batteria di scambio sommata al contenuto dei vari tratti di tubazione di collegamento = 340 kg

C_p = Calore specifico (alla temperatura media di 125 °C) = 4,24 kJ/kg °C

Δt = Variazione di temperatura = 50 °C

sostituendo otteniamo

$$E = 72,08 \text{ MJ}$$

Da questo dato possiamo ricavare il tempo necessario al riscaldamento dell'acqua, ovvero

$$T = \frac{E}{P}$$

dove:

P = potenza termica nominale della batteria di recupero = 1,060 MJ/sec

sostituendo otteniamo

$$T = 68 \text{ sec}$$

Bisogna ora calcolare il volume d'espansione del secondario, utilizzando la seguente formula

$$V_e = V_a \cdot e$$

dove:

e = coefficiente di espansione da 100 °C a 150 °C = 0,04508

sostituendo otteniamo

$$V_e = 15,3 \text{ kg}$$

A questo punto, la portata di acqua surriscaldata da dover scaricare sarà data dalla seguente formula

$$Q = \frac{V_e}{T} \cdot 3600$$

sostituendo otteniamo

$$Q = 810 \text{ kg/h}$$

Condizione b)

Per la quantità di acqua surriscaldata da scaricare si suppone che la batteria di recupero funzioni al carico massimo e che la temperatura dell'acqua sia al valore medio tra ingresso ed uscita. La temperatura finale, ed il conseguente aumento di volume specifico nella stessa batteria di recupero corrispondente al transitorio per cui si raggiunge la pressione di scatto della valvola di sicurezza, è determinata dalla seguente formula

$$t_f = t_{mi} + \frac{W \cdot (t_s - t_{mi}) \cdot \Delta T}{\Delta t_m \cdot C_p \cdot M}$$

da cui

$$\Delta T = \frac{(\Delta t_m \cdot C_p \cdot M) \cdot (t_f - t_{mi})}{W \cdot (t_s - t_{mi})}$$

dove:

Δt_m = differenza della temperatura media di scambio = 214,201 °C

C_p = calore specifico alle condizioni di t_{mi} e p_0 = 4,25 kJ/kg °C

M = massa dell'acqua contenuta nel circuito secondario della batteria di scambio sommata al contenuto dei vari tratti di tubazione di collegamento = 319,384 kg

t_f = temperatura finale di scatto valvola di sicurezza equivalente al valore della temperatura che fornisce lo stesso valore del volume specifico dell'acqua alla pressione di scarico della valvola di sicurezza e calcolato in modo interattivo utilizzando il tabulato di Mollier = 125,730 °C

t_{mi} = temperatura media iniziale = 125 °C

W = potenza termica nominale della batteria di recupero = 1060 kW

t_s = temperatura di esercizio del fluido primario = 460 °C

sostituendo otteniamo

$$\Delta T = 0,5977 \text{ sec}$$

La formula per determinare la portata di scarico è la seguente

$$Q = \frac{V \left(\frac{v_2 - v_1}{v_1} \right)}{v_2 \cdot \Delta T} \cdot 3600$$

dove:

V = volume d'acqua del circuito secondario = 340 litri

v_2 = volume specifico alle condizioni di t_f e p_0 (pressione assoluta iniziale 9 bara) = 1,06524 dmc/kg

v_1 = volume specifico alle condizioni di t_{mi} e p_0 = 1,06455 dmc/kg

sostituendo otteniamo

$$Q = 1246 \text{ kg/h}$$

Si può notare che, in quest'ultimo caso, la portata di scarico calcolata è nettamente maggiore rispetto a quella calcolata nell'altra condizioni, per cui la scelta di prediligere tale condizione è più cautelativa rispetto all'altra.

In ogni caso, le valvole di sicurezza devono essere provviste di:

- dichiarazione di conformità PED accompagnata, eventualmente, dal certificato di taratura al banco emesso dagli organi competenti;
- foglio di calcolo del costruttore riportante la capacità di scarico di acqua surriscaldata alle condizioni di scarico e la dichiarazione che la stessa valvola di sicurezza è idonea a scaricare acqua surriscaldata (rif. Raccolta H - Capitolo H4 - punto 1.2)

Inoltre, lo scarico di ciascuna valvola di sicurezza non deve creare contropressioni, deve essere convogliato in luogo sicuro e non deve recare danno alle persone, in caso di intervento.

Particolare importanza deve essere data alla tubazione di scarico delle valvole di sicurezza, nel caso in cui queste devono scaricare liquido surriscaldato, in quanto, con riferimento alla UNI EN 12828:2005, esse devono scaricare in sicurezza ed opportune installazioni devono essere previste per tale scopo; in particolare, requisiti specifici possono essere applicabili a generatori aventi una potenza nominale maggiore di 300 kW, ovvero, in questi casi, sarebbe opportuno installare, all'uscita della tubazione di scarico, un separatore di liquido, flash tank, collegato, nella parte superiore, ad una tubazione di sfogo, che scarichi in aria libera, del vapore che si genera dalla vaporizzazione dell'acqua surriscaldata che sta fuoriuscendo dalla valvola di sicurezza, e nella parte inferiore ad una tubazione di raccolta del liquido, che trasporti l'acqua in un luogo sicuro, così come si può notare nel particolare dello schema in Figura 2. Ovviamente, il flash tank, verrà dimensionato in maniera tale che, al suo interno, la pressione non superi il valore di 0,5 bar.

4. Vaso d'espansione

Secondo la Raccolta "H", al punto 1.1 del Capitolo H3, ogni generatore deve essere in comunicazione non intercettabile con un sistema d'espansione dimensionato dal tecnico abilitato in base al volume dell'acqua contenuta nell'impianto ed al coefficiente di espansione corrispondente alla temperatura di progetto del generatore. Nel nostro caso, l'esperienza

insegna che l'installazione di un vaso d'espansione, dedicato alla batteria di recupero, crea scompensi sull'intero circuito: questo perché il vaso d'espansione, in generale, funge da punto neutro per le variazioni di pressione che si instaurano in tutte le parti dell'impianto e quindi tutte le valutazioni effettuate sinora, in merito alla determinazione della pressione di progetto, non sarebbero più valide e, aspetto più importante, l'intero impianto non lavorerebbe in condizioni ottimali.

In ogni caso, la Raccolta "H", permette l'installazione di una valvola a tre vie avente sezione di passaggio non inferiore a quella del tubo di espansione stesso ed atta a mettere in comunicazione il generatore con l'atmosfera ogni qualvolta lo si separa dal sistema di espansione (rif. Raccolta H - Capitolo H3 - punto 1.1).

Per poter fare uso di tale possibilità, è necessario però assumere che, come tubo di espansione, si considera il tratto di tubazione che collega la batteria di recupero all'impianto esistente, da qui, in condizioni di normale esercizio dell'impianto, il tratto di tubazione esistente garantisce il collegamento al vaso d'espansione.

Alla luce di questa assunzione, insieme a quelle già indicate alla fine del Capitolo 1, è possibile quindi inserire una valvola a tre vie come indicato nello schema di Figura 1, di cui si riporta di seguito un particolare della stessa tavola.

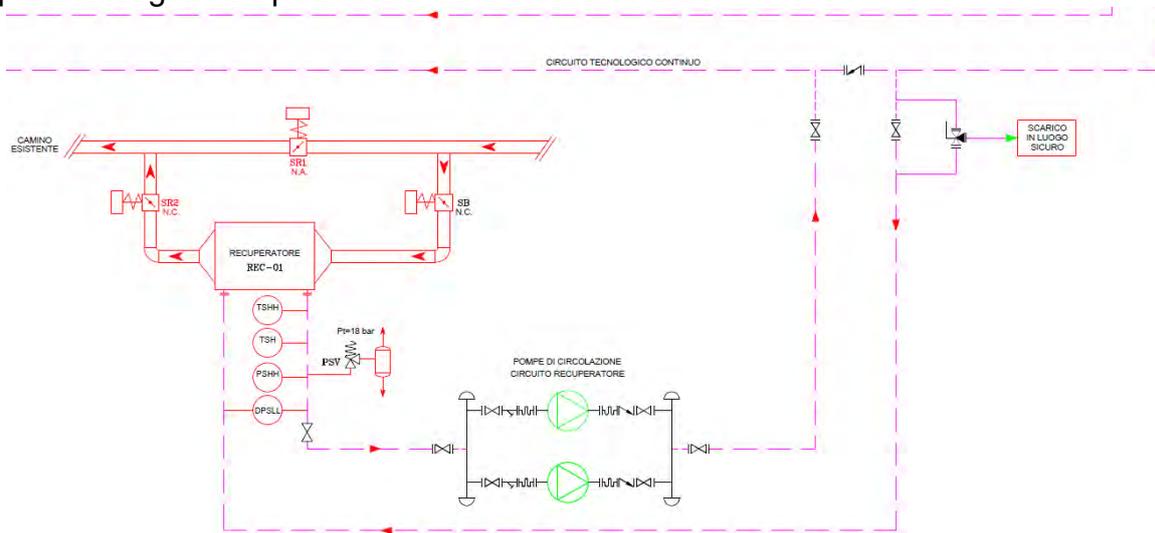


Figura 2

Come si può notare, l'installazione, sul by-pass della valvola di intercettazione a due vie, di una valvola a tre vie garantisce, nelle normali condizioni di esercizio e quindi con la valvola a due vie aperta, il deflusso su entrambi i rami delle tubazioni e, qualora si voglia intercettare la batteria di recupero per eventuali operazioni di manutenzione ordinaria, si dovrà agire sia sulla valvola a due vie, chiudendola, sia sulla valvola a tre vie, escludendo così l'arrivo dalla tubazione esistente e mettendo in comunicazione con l'atmosfera la batteria di recupero, azione, quest'ultima, sempre garantita non essendoci altre valvole di intercettazione da tale punto alla batteria stessa. Inoltre, la stessa valvola a tre vie sul by-pass, funge anche da sicurezza, nel caso di erronea chiusura della valvola d'intercettazione a due vie, garantendo sempre il collegamento della batteria di recupero all'impianto esistente e quindi al vaso d'espansione.

Il diametro interno, della tubazione di by-pass, è stato dimensionato rispettando la formula riportata al punto 1.3 del Capitolo H3 della Raccolta "H", ovvero

$$D = \sqrt{\frac{P}{2,3}}$$

dove:

P = potenza termica nominale del generatore = 1060 kW

sostituendo otteniamo

$$D = 21,47 \text{ mm}$$

Verrà quindi installata una valvola a tre vie da 1" che garantisce comunque il rispetto della Raccolta "H", la quale prescrive che il diametro interno del tubo d'espansione, nel nostro caso considerato quello di by-pass installato in parallelo al tratto di tubazione che collega la batteria di recupero all'impianto esistente, deve comunque essere non inferiore a 25 mm.

La scelta di installare il by-pass deriva da considerazioni prettamente pratiche e funzionali, ovvero è più facile manovrare valvole a tre vie di piccole dimensioni rispetto a quelle di grandi dimensioni ed inoltre, quelle di grandi dimensioni, garantiscono la propria efficienza di funzionamento per periodi più brevi.

Tuttavia, previa approvazione dell'INAIL RCV, potrebbe essere concessa una deroga all'obbligo di installare il vaso d'espansione, e quindi, nel nostro caso, del by-pass completo di valvola a tre vie, sulla base delle assunzioni fatte in precedenza e, in particolare, sulla base di un'attenta analisi dei rischi connessi ad un'eventuale intercettazione della batteria di recupero rispetto al vaso d'espansione, rischi che potrebbero essere eliminati installando dispositivi di sicurezza certificati PED, per esempio un pressostato differenziale di minima pressione, installato tra ingresso ed uscita della batteria di recupero, che escluderebbe la stessa batteria, nello stesso modo dell'interruttore termico automatico di blocco di cui al Paragrafo 2.2 del Capitolo 2, qualora non ci sia circolazione, il tutto avvalendosi del concetto di armonizzazione delle normative nazionali alla Direttiva PED.

5. Adempimenti Inail

Relativamente alle pratiche da espletare, nei confronti dell'INAIL RCV, al fine di omologare il sistema di recupero inserito nell'impianto esistente, è necessario fare alcune considerazioni; prima di ogni cosa bisogna aver chiaro se la batteria di recupero è stata certificata come recipiente (autoproduttore), oppure come generatore di acqua surriscaldata; successivamente bisogna considerare la scelta dell'utilizzatore relativamente alla certificazione richiesta in fase di definizione dell'ordine di acquisto, ovvero se è stato richiesto che il sistema fosse certificato come insieme oppure no; nel primo caso, il fabbricante del sistema rilascerà una dichiarazione di conformità CE come insieme, che comprenda tutte le attrezzature a pressione, sostanzialmente batteria di recupero e nuove tubazioni di collegamento, e tutti gli accessori di sicurezza, protezione, regolazione e controllo, nel secondo caso sarà l'utilizzatore a farsi carico dell'assieme delle singole attrezzature, compresa l'installazione di tutti i dispositivi di sicurezza, protezione, regolazione e controllo, e quindi il fabbricante dovrà fornire solamente le dichiarazioni di conformità CE delle singole attrezzature, nonché quelle degli accessori di sicurezza.

5.1 Batteria di recupero certificata come recipiente

In questo caso, se l'impianto è certificato come insieme ricadente nel campo di applicazione dell'art. 5 comma d) del D.M. 329/04, allora sarà necessario solamente denunciare l'insieme ai sensi dell'art. 6 dello stesso decreto, e dovranno essere allegati alla denuncia i seguenti documenti:

- Dichiarazione di conformità CE alla Direttiva 2014/68/UE dell'insieme;
- Elenco di tutte le attrezzature a pressione costituenti l'insieme, ivi compresi le tubazioni con DN > 80 e gli accessori di sicurezza;
- Relazione tecnica con lo schema dell'impianto recante le condizioni di installazione e di esercizio, le misure di sicurezza, protezione e controllo adottate;
- Un'espressa dichiarazione redatta ai sensi dell'art. 2 del DPR n. 403 del 20/10/1988 attestante che l'installazione è stata eseguita in conformità a quanto indicato nel Manuale d'Uso e che l'insieme sia stato debitamente installato, mantenuto in efficienza, utilizzato

conformemente alla sua destinazione e non pregiudichi la salute e la sicurezza delle persone o degli animali domestici o la sicurezza dei beni;

- Eventuale elenco dei componenti operanti in regime di scorrimento viscoso o sottoposti a fatica oligociclica.

5.2 Batteria di recupero certificata come generatore di acqua surriscaldata

In questo caso, se l'impianto è certificato come insieme ricadente nel campo di applicazione dell'art. 5 comma d) del D.M. 329/04, allora si deve fare riferimento alla Lettera Circolare ISPEL n. 04 del 2005 e successiva circolare INAIL 60202 del 27/11/2015, e dovranno essere allegati alla denuncia i documenti indicati nella stessa Circolare.

Nel caso invece che l'impianto non sia certificato come insieme, sia che la batteria di recupero è certificata come recipiente o come generatore di acqua surriscaldata, allora bisogna fare riferimento alla Lettera Circolare ISPEL n. 06 del 2005; in questo caso sarà necessario allegare anche una relazione tecnica attestante la rispondenza dell'impianto alla Raccolta "H" dell'ISPEL ed uno schema P&I dell'impianto riportante tutte le indicazioni necessarie per la verifica di conformità alla stessa Raccolta "H", nonché gli altri documenti indicati nella stessa Circolare.

6. Conclusioni

Il presente lavoro ha avuto lo scopo di fornire i principali concetti legati alla progettazione di massima di un impianto di acqua surriscaldata, cercando di analizzare macroscopicamente le funzioni dei componenti che lo costituiscono e le problematiche ad essi connesse. Sarebbe auspicabile, così come già realizzato per la Raccolta "R", pubblicare una nuova versione anche della Raccolta "H", nell'ottica di armonizzare la stessa alla Direttiva PED.

7. Bibliografia

[1] Raccolta "H" dell'ISPEL - Specificazioni tecniche applicative del Decreto Ministeriale 01.12.1975 per liquidi surriscaldati.

[2] Decreto Legislativo 27/01/2010 n. 27 - Attuazione della Direttiva 2006/42/CE.

[3] Decreto Ministeriale 01.12.2004 n. 329 - Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del Decreto Legislativo 93/2000.

[4] Decreto Legislativo 15/02/2016 n. 26 - Attuazione della Direttiva 2014/68/UE in materia di attrezzature a pressione.

[5] UNI EN 12828:2005 - Progettazione dei sistemi di riscaldamento ad acqua.

[6] Lettera Circolare ISPEL n. 4/05 - Accertamenti della rispondenza alle norme vigenti, in materia di prevenzione e sicurezza, di generatori di vapore marcati CE come insiemi e inseriti in un impianto.

[7] Lettera Circolare INAIL n. 60202 del 27.11.2015 - Dichiarazione di messa in servizio di generatori di vapore marcati CE ai sensi dell'art.6 del DM 329/04 ed esclusi dal controllo obbligatorio di messa in servizio - Chiarimenti procedurali.

[8] Lettera Circolare ISPEL n. 6/05 - Accertamenti della rispondenza alle norme vigenti, in materia di prevenzione e sicurezza, di attrezzature a pressione marcate CE inserite in impianti termici per la produzione di acqua surriscaldata ed assemblate dall'utilizzatore sul luogo di impianto in regime di normativa nazionale.

Studio di un impianto “ORC” alimentato ad acqua surriscaldata integrato in un inceneritore per CSS per produzione di energia elettrica e termica

M. De Musso¹, A. De Musso²

¹ Inail – Uot di Bari

² Libero professionista

Sommario

In un momento di crisi economica per le aziende, come quella che si sta attraversando in questo momento storico, ed alla luce di un continuo aumento del costo dell'energia elettrica e termica, diventa fondamentale per le aziende porsi l'obiettivo di ridurre i costi di produzione elaborando strategie di efficientamento energetico e recuperi energetici senza perdere di vista la sicurezza degli impianti. Questo si sta verificando anche nell'ambito della gestione dello smaltimento dei rifiuti.

Nel presente lavoro si vuol descrivere le caratteristiche tecniche di un impianto di Cogenerazione da Combustibile Solido Secondario basato sulla realizzazione di un sistema di Recupero di Calore con sistema ORC (ORGANIC RANKINE CYCLE) per la generazione di energia elettrica e termica, e di studiare il dimensionamento e le sicurezze da porre a corredo dello stesso impianto in considerazione del fatto che il Circuito dell'acqua surriscaldata è soggetto alla normativa del DM. 01/12/1975 e del DM. 329/2004

Inoltre scopo dello studio è di analizzare e verificare quanto contenuto nelle istruzioni Operative delle attrezzature fornite dai rispettivi fabbricanti, caratteristiche tecniche degli accessori di controllo e regolazione, se queste risultano esaustive o carenti soprattutto in termini di rischi residui.

1. Introduzione

Negli ultimi 15 anni in Europa è stato installato un numero impressionante di sistemi di Cogenerazione CHP - ORC alimentati a biomassa ed attualmente si stanno costruendo impianti con Cogenerazione da Inceneritore di Rifiuti da Combustibile Solido Secondario. Per Cogenerazione da inceneritore di Rifiuti CSS (Combustibile Solido Secondario) si intende la produzione combinata di Energia Elettrica e Termica, con maggiore efficienza rispetto alla produzione separata di elettricità e calore, che si traduce in una riduzione della spesa energetica. I sistemi di cogenerazione vengono anche detti CHP, dall'acronimo inglese (Combined Heat and Power).

Normalmente l'energia elettrica e termica sono prodotte separatamente. Per generare l'energia elettrica si utilizzano centrali termoelettriche, che scaricano nell'ambiente energia termica a bassa temperatura, mentre per produrre energia termica, si utilizzano le centrali termiche che, con i generatori di calore, trasformano l'energia del combustibile in energia termica. Entrambe le centrali sono dotate singolarmente di apparecchiature di sicurezza e controllo prescritte dalle rispettive normative.

Quindi se un'azienda di trattamento e smaltimento rifiuti ha l'esigenza, contemporaneamente, di energia elettrica ed energia termica, anziché acquistare l'energia elettrica dalla rete nazionale e installare una generatore di calore, può valutare di realizzare un sistema, che produca sia energia elettrica che energia termica bruciando Rifiuti CSS, cioè un impianto di cogenerazione che creerà all'azienda un risparmio energetico determinato dal minor consumo di energia e dal contemporaneo smaltimento dei rifiuti.

Gli impianti di cogenerazione nascono, infatti, dal tentativo di sfruttare una tecnologia che consente di aumentare l'efficienza energetica di un sistema di conversione di energia che

partendo dal presupposto che esiste una quantità significativa di calore di scarto che anziché essere immessa in atmosfera può essere recuperata e sfruttata all'interno di un nuovo ciclo di produzione dell'energia.

Quindi se a valle di un impianto di incenerimento di rifiuti si installa un generatore di vapore o di acqua surriscaldata che recupera calore dai fumi e tramite dei moduli ORC collegati ad un generatore elettrico sincrono trifase, recuperano il calore prodotto attraverso un ciclo termodinamico si converte prima in energia meccanica e successivamente in energia elettrica. Però, per il - secondo principio della termodinamica - non tutto il calore può essere trasformato in lavoro poiché una parte deve necessariamente essere ceduta o dissipata a un'altra sorgente, per esempio, all'ambiente circostante per consentire il funzionamento del sistema.

Quindi il calore prodotto dal forno di incenerimento durante il suo funzionamento – scarico dei prodotti della combustione dei rifiuti - normalmente disperso in atmosfera, con la cogenerazione tale calore viene in gran parte recuperato e convertito a sua volta in energia elettrica e termica attraverso l'utilizzo dei generatori di vapore, acqua surriscaldata o degli scambiatori di calore a recupero da fumi.

Nell'impianto di Cogenerazione da inceneritore di Rifiuti CSS, l'Energia Elettrica viene prodotta da un Modulo ORC (ORGANIC RANKINE CYCLE), che recupera il calore proveniente da un forno inceneritore, tramite un Generatore di Calore ad Acqua Surriscaldata a recupero da fumi,

L'Energia Termica in esubero viene recuperata sotto forma di acqua calda per i servizi termici delle Utenze dell'azienda.

Il presente documento ha lo scopo di descrivere le caratteristiche tecniche di un medio impianto di cogenerazione, da 1,4 MW termici e 200 Kw elettrici, e di descrivere le misure di sicurezza, protezione e controllo da adottare in fase di esercizio.

2. Descrizione dei componenti dell'impianto di cogenerazione

L'impianto di cogenerazione è configurato per soddisfare i bisogni energetici di una ditta di trasporto, stoccaggio, trattamento e smaltimento rifiuti. Il Sistema di Recupero di Calore opera prelevando calore dai fumi ad alta temperatura provenienti dal forno inceneritore, grazie ad un apposito generatore di acqua surriscaldata a recupero da fumi, e distribuendolo verso l'Impianto ORC e verso lo scambiatore di calore per la produzione di acqua calda. L'eventuale calore in eccesso è smaltito utilizzando un Dry Cooler adiabatico.

L'impianto preso in esame è installato da un'azienda dedicata alla progettazione, realizzazione e manutenzione di impianti per la produzione energetica con moduli a Ciclo Rankine e generatori di acqua surriscaldata.

L'impianto di cogenerazione in trattazione è costituito da un forno inceneritore, da una valvola di deviazione fumi, da un generatore di acqua surriscaldata, da un modulo ORC serie LT in allestimento standard, da due scambiatori di calore del tipo a piastre e un vaso di espansione chiuso.

Essendo un impianto a pressione soggetto al D.M. 329/2004 la cui installazione viene effettuata dall'utilizzatore la scelta del tipo ed il dimensionamento dei dispositivi di sicurezza vengono effettuati dallo stesso, e pertanto devono essere osservate le norme nazionali, cioè le norme tecniche emanate con il D.M. 1/12/75 (Raccolta H dell'Ispesl), fatte salve le opportune considerazioni dovute all'esistenza della PED (ad esempio gli accessori di sicurezza debbono essere valutati PED con la IV categoria di rischio, e la temperatura di progetto delle singole attrezzature a pressione può non essere coincidente con la temperatura di saturazione corrispondente alla pressione di progetto, dipendendo dalle libere scelte del fabbricante; in tal caso le disposizioni della Raccolta H dell'INAIL dovranno essere integrate da opportune valutazioni di sicurezza che dovranno essere contenute nella

relazione tecnica da presentare preliminarmente alla richiesta di verifica di primo impianto) [1].

Il generatore installato serve per la produzione di acqua surriscaldata, tipo verticale a serpentina multitubolare, progettato appositamente per capacità basata sulla quantità e temperatura dei gas di scarico disponibili. È equipaggiato con una valvola di deviazione fumi, che viene aperta una volta raggiunta la temperatura di esercizio. In questa situazione, i gas di scarico passano attraverso un condotto diretto verso il camino. Il movimento è progressivo, controllato da un motore, con una maniglia per l'operazione manuale di sicurezza.

La temperatura di esercizio è mantenuta mediante un controllore elettronico di temperatura che comanda valvola di deviazione fumi. Quando la temperatura di esercizio è raggiunta, la valvola apre ed il flusso dei fumi viene diretto al camino. Quando la temperatura dell'acqua diminuisce, la valvola chiude ed il flusso dei fumi viene deviato attraverso il generatore. L'acqua surriscaldata prodotta dal generatore viene inviata al modulo ORC pensato per generare elettricità sfruttando la differenza di temperatura tra il calore ad esso convogliato da una fonte di calore tramite una "linea calda" nella quale circola acqua surriscaldata e la temperatura inferiore di un sistema di raffreddamento (torre evaporativa, dry cooler o pozzo) ad esso convogliata tramite una "linea fredda".

Il ciclo Rankine prende il proprio nome dal suo inventore, il fisico scozzese William Rankine (1820-1872), uno dei padri della termodinamica. Il concetto di base è semplice, ma è meglio chiarirlo con uno schema grafico (fig. 1).

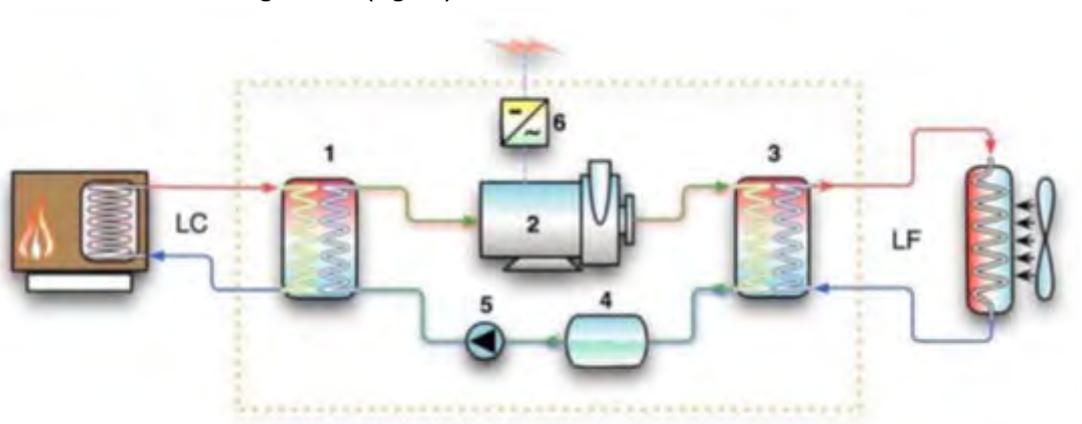


Figura 1. Schema grafico ciclo Rankine

Il calore prodotto da una sorgente di calore (es.: generatore) viene convogliato da un fluido vettore che scorre entro un circuito chiuso (la cosiddetta "linea calda", LC nello schema) allo scambiatore di calore di ingresso, detto evaporatore (1). Qui il suo calore viene trasferito al fluido di lavoro, un fluido organico con un punto di ebollizione molto inferiore a quello dell'acqua. Esposto a tale calore, il fluido di lavoro vaporizza, espandendosi e diventando un gas secco ad alta pressione che muove una turbina (2) generando energia meccanica, convertita in energia elettrica da un alternatore calettato sullo stesso asse della turbina. All'uscita della turbina il fluido di lavoro - ora in forma gassosa - viene portato ad un secondo scambiatore di calore, detto condensatore (3), dove cede il proprio calore in eccesso e condensa ritornando ad essere un liquido, che viene raccolto in un apposito serbatoio (4), pronto per essere nuovamente inviato da una pompa di ricircolo (5) nell'evaporatore completando così il circuito chiuso. Ulteriori scambiatori termici, detti rigeneratori (non indicati nello schema per semplicità) recuperano rispettivamente il calore residuo dello stadio di condensazione e dello stadio di evaporazione e lo utilizzano per preriscaldare il fluido di lavoro prima della sua reimmissione nel vaporizzatore al fine di aumentare l'efficienza generale del sistema.

2.1 Descrizione dell'insieme generatore di acqua surriscaldata

L'impianto di cogenerazione prevede il recupero termico dei gas di scarico di un forno inceneritore per produrre acqua surriscaldata mediante un generatore di acqua surriscaldata a recupero da fumi. Tale generatore è stato costruito come attrezzatura a pressione secondo la Direttiva 2014/68/UE. Trattasi di tre moduli di generatori a serpentino, del tipo a piccolo volume d'acqua a recupero da fumi, installati come unico monoblocco, e, quindi, a sorgente diversa dal fuoco ed è rappresentato in fig. 2.

È progettato per i limiti ammissibili di 11,5 bar e temperatura massima di 200°C, ha una potenza termica di 1970 Kw, ed è dotato di tutti gli accessori per la conduzione senza supervisione continua a 72 ore. Generatore estremamente compatto per acqua surriscaldata dotato di tutte le protezioni di sicurezza per alta temperatura acqua surriscaldata e dei gas di scarico, flusso acqua interrotto e sovraccarico motori elettrici. Nella fig. 3 è riportato uno schema del funzionamento dell'impianto di acqua surriscaldata [3].



Figura 2. Generatore a serpentino

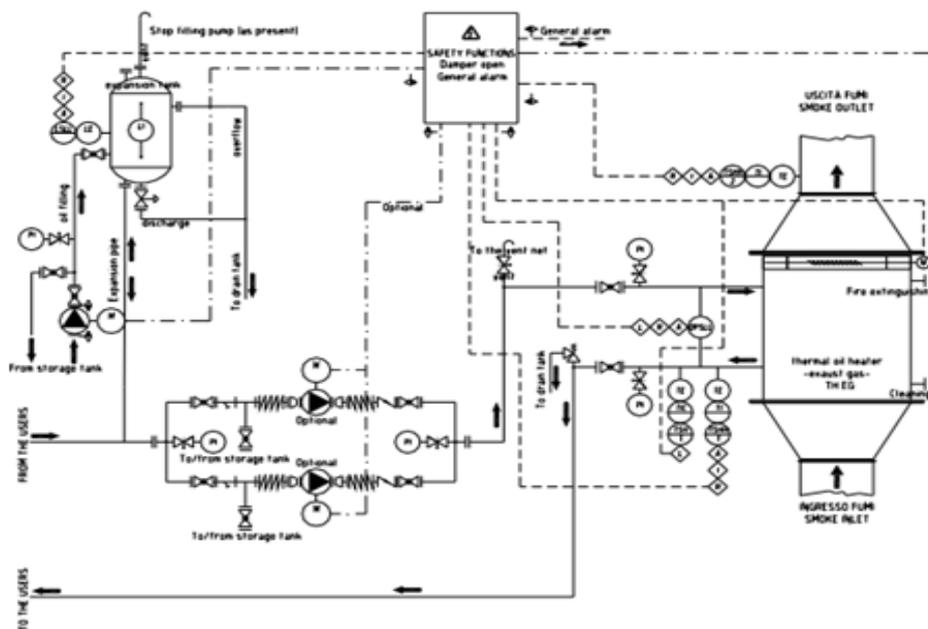


Figura 3. Schema impianto acqua surriscaldata

I rischi determinati sia rispetto alle attrezzature ricevitrici che al modulo ORC sono: sovrappressione, mancanza d'acqua, eccesso d'acqua, surriscaldamento, avaria valvola regolazione fumi, smaltimento del calore dopo shut-down, qualità dell'acqua.

2.2 Descrizione del modulo di produzione energetica a ciclo Rankine

Il ciclo termodinamico alla base del funzionamento dei moduli di produzione energetica, detti anche ORC, dalla sigla inglese Organic Rankine Cycle è un ciclo in cui un fluido di lavoro (acqua surriscaldata) viene scaldato ed evapora, compiendo con la propria espansione un lavoro meccanico, dopodiché, una volta dissipato il calore in eccesso, ricondensa in forma fluida pronto per ricominciare il ciclo. Il modulo ORC è contenuto in una struttura "skid" e necessita, per funzionare, di essere allacciato ad una fonte di calore ed a un impianto di raffreddamento nonché ad una cabina di distribuzione elettrica per l'immissione in rete dell'energia elettrica prodotta. Tale energia elettrica viene condizionata, sincronizzata ed in generale resa atta ad essere immessa in rete da un convertitore di potenza installato di serie a bordo dello skid che ospita il modulo ORC. Il calore in eccesso viene convogliato ad uno scambiatore di calore a piastre per l'utilizzo di produzione dell'acqua calda alle utenze dell'azienda o ad un sistema di raffreddamento (torre evaporativa o dry cooler) [2]. All'interno dello Skid sono installati un evaporatore, una pompa del fluido di lavoro, un turbogeneratore, un condensatore, un rigeneratore, un quadro di controllo modulo ORC, un preriscaldatore, tre valvole di sicurezza, termostato e pressostato di sicurezza, quadro inverter e valvole varie. Il modulo ORC come tutte le macchine è soggetto a norme e dispositivi di sicurezza in quanto soggetto a rischi generici, chimici, di folgorazione, di ustioni e d'incendio. Gli attuali moduli ORC sono dotati di un sistema di telecontrollo via internet tramite linea dati o rete cellulare e possono essere monitorati quotidianamente in modalità remota dal centro di controllo. Un numero di controlli regolari e piccoli interventi volti a mantenere la funzionalità del sistema devono comunque eseguiti in loco da parte delle aziende utilizzatrici.

Nella fig. 4 è riportato uno skid di un modulo ORC in cui sono visibili i vari allacci e le varie attrezzature,

Skid in allestimento standard - Vista lato allacci

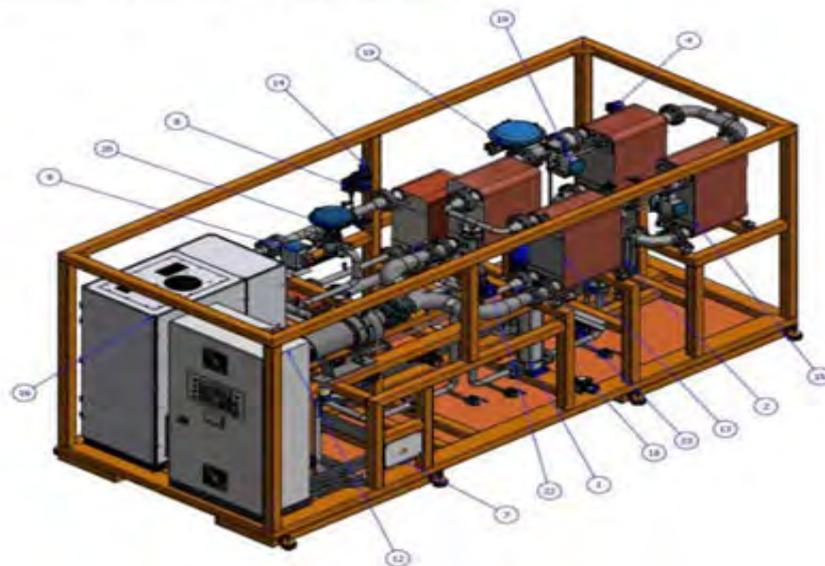


Figura 4

3. Descrizione degli accessori di controllo e sicurezza a corredo del generatore

3.1 Disposizioni legislative

Come già riportato in precedenza, il generatore di acqua surriscaldata a corredo del gruppo di cogenerazione è da considerarsi del tipo a *sorgente termica diversa dal fuoco* cioè la produzione di acqua surriscaldata deriva dal recupero del calore dei gas di scarico di un forno inceneritore e non da una combustione generata da un bruciatore a gas. Questa condizione escluderebbe il generatore dall'applicazione della specifica tecnica UNI/TS 11325/3-2018 e dalla sorveglianza da parte di un conduttore in possesso di un certificato di abilitazione e renderebbe il generatore esonerato dall'applicazione di alcuni accessori di sicurezza. Il generatore di acqua surriscaldata in esame è comunque soggetto a pericolo di surriscaldamento delle membrane a pressione, poiché è possibile superare la temperatura di progetto e, quindi, per la Specifica Tecnica UNI/TS 11325-3 "Attrezzature a pressione – Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi a pressione – Parte 3: Sorveglianza dei generatori di vapore e/o acqua surriscaldata" [4] che definisce le modalità di sorveglianza per apparecchiature con focolare a rischio di surriscaldamento, deve essere necessariamente condotto da conduttore abilitato e dotato degli opportuni accessori di sicurezza. La Direttiva PED 2014/68/UE del 15/5/2014 [5] ed il D.M. 01/12/2004 n. 329 [6] lasciano al fabbricante del generatore di acqua surriscaldata la scelta della strumentazione atta ad assicurare il soddisfacimento dei Requisiti Essenziali di Sicurezza contenuti nell'Allegato I della PED; più in particolare, i generatori di acqua surriscaldata sono soggetti a requisiti aggiuntivi che tengono in conto i particolari rischi derivanti dal pericolo di surriscaldamento (Par. 5 dell'Allegato I). Di conseguenza la valutazione del tipo e il dimensionamento dei dispositivi di protezione, costituiti da accessori di sicurezza ed accessori di controllo, deve garantire il non superamento dei limiti ammissibili dell'insieme tenuto conto delle peculiarità dello stesso e delle sue varie condizioni di esercizio. La scelta finale non dovrebbe essere soggettiva ma basata su un'accurata analisi dei rischi specifica e su una progettazione del sistema di sicurezza. La guideline 8/15 richiede che il generatore sia provvisto di accessori di sicurezza contro il superamento dei limiti di pressione, temperatura e livello dell'acqua, di un monitoraggio capace di mantenere automaticamente il generatore entro i limiti ammissibili (regolazione automatica) di indicatori ed allarmi che vengono attivati all'origine di un'anomalia, di una funzione di blocco per assenza di energia a parti del generatore (esempio alimentazione dell'acqua), una protezione riguardo parametri della qualità dell'acqua la cui rapida variazione porterebbe a situazioni pericolose nel periodo di mancanza di vigilanza del generatore.

3.2 Accessori in dotazione al generatore a recupero da fumi in esame

Il generatore in esame è stato costruito come insieme a pressione secondo la Direttiva 2014/68/UE, ha il corpo caldaia fabbricato in accordo agli standard armonizzati utilizzati mentre l'insieme del generatore di acqua surriscaldata è realizzato in conformità allo standard EN 13445-3:2019. Perciò è stata di grande importanza l'analisi dei rischi e la progettazione del sistema di sicurezza eseguita a monte della costruzione della caldaia per dotare il generatore di acqua surriscaldata di tutti gli accessori descritti in seguito per il rilievo di tutte le possibili segnalazioni di allarme e blocco che possono verificarsi. La dotazione degli accessori di sicurezza di cui viene corredato il generatore tiene conto del funzionamento senza supervisione continua del conduttore a 72 ore. I rischi individuati per la fase di esercizio, sono dovuti a surriscaldamento, mancanza d'acqua, eccesso d'acqua, smaltimento del calore dopo un blocco istantaneo e scoppio, l'installazione è dotata di un impianto di trattamento dell'acqua di alimento mediante un sistema a scambio ionico i cui parametri di alimento e di esercizio, per la pressione massima di esercizio di 11,5 bar, sono

verificati in accordo ai valori prescritti dal costruttore del generatore e riportati nel manuale d'uso e manutenzione.

Dallo schema del generatore di Fig. 5 si possono notare alcuni dispositivi di protezione e sicurezza installati sul generatore a recupero da fumi. In particolare l'insieme è dotato di:

- un manometro (**PI**) per l'indicazione visiva della pressione all'interno del generatore;
- un trasmettitore di pressione (**PT**) che trasmette al PLC nel quadro elettrico, con un segnale, la misura della pressione in caldaia e consente al PLC di comandare la valvola fumi e la valvola di presa vapore tramite regolatori;
- un trasmettitore di temperatura per la soglia di allarme alta temperatura acqua (**TSHH**), rilevata dal software, in cui viene generata una segnalazione su touch screen la quale scompare quando la temperatura scende sotto la soglia di disattivazione dell'allarme;
- un trasmettitore di temperatura per la soglia di allarme alta temperatura fumi (**TSHH**), rilevata dal software, che manda i fumi in bypass con segnalazione su touch screen e segnalazione luminosa. I fumi tornano in caldaia quando la pressione scende sotto la soglia di disattivazione dell'allarme;
- un pressostato di minima pressione (**DPSLL**) che interviene in caso di superamento della soglia di livello minima della pressione del sistema con segnalazione visiva ed acustica. Il consenso al riavvio si ha dopo che, risalita la pressione sopra la soglia di disattivazione del blocco, l'operatore effettua il reset manuale tramite il pulsante sul fronte quadro;
- un pressostato di sicurezza (**DPSL**) che interviene in caso di superamento della soglia di blocco del sistema con segnalazione visiva ed acustica. Il consenso al riavvio si ha dopo che, scesa la pressione sotto la soglia di disattivazione del blocco, l'operatore effettua il reset manuale tramite il pulsante sul fronte quadro
- un termostato di alta temperatura acqua (**TSH**), rilevata dal software, che manda i fumi in bypass con segnalazione su touch screen e segnalazione luminosa. I fumi tornano in caldaia quando la temperatura scende sotto la soglia di disattivazione dell'allarme;
- valvola di sicurezza che provvede a scaricare meccanicamente la pressione quando si supera la soglia di taratura della valvola;
- una valvola di regolazione fumi che provvede ad indirizzare i fumi in caldaia o a camino in relazione alla pressione in caldaia. È comandata, tramite un regolatore PID, da un setpoint impostato nel PLC e restituisce i segnali di posizione grazie ai finecorsa di valvola aperta e chiusa;
- un livellostato (**LSLL**) per il massimo livello dell'acqua nel vaso di espansione (Fig. 3) che manda i fumi in bypass, ferma le pompe di alimento dell'acqua e chiude la valvola pneumatica di ingresso acqua in caldaia con segnalazione su touch screen e segnalazione visiva. I fumi tornano in caldaia, le pompe si riavviano e la valvola si riapre quando il livello scende sotto la soglia di disattivazione dell'allarme;
- una seconda soglia di allarme di basso livello dell'acqua in caldaia, rilevata dal software, che manda i fumi in bypass con segnalazione su touch screen e segnalazione visiva. I fumi tornano in caldaia quando il livello sale sopra la soglia di disattivazione dell'allarme.
- un livellostato di sicurezza per il minimo livello dell'acqua nel vaso di espansione (**LE**) che in caso di superamento della soglia interviene il blocco del sistema con segnalazione visiva e acustica. Il consenso al riavvio c'è solo dopo che, ripristinato il livello dell'acqua sopra la soglia di disattivazione del blocco, l'operatore effettua il reset manuale tramite il pulsante sul fronte quadro;

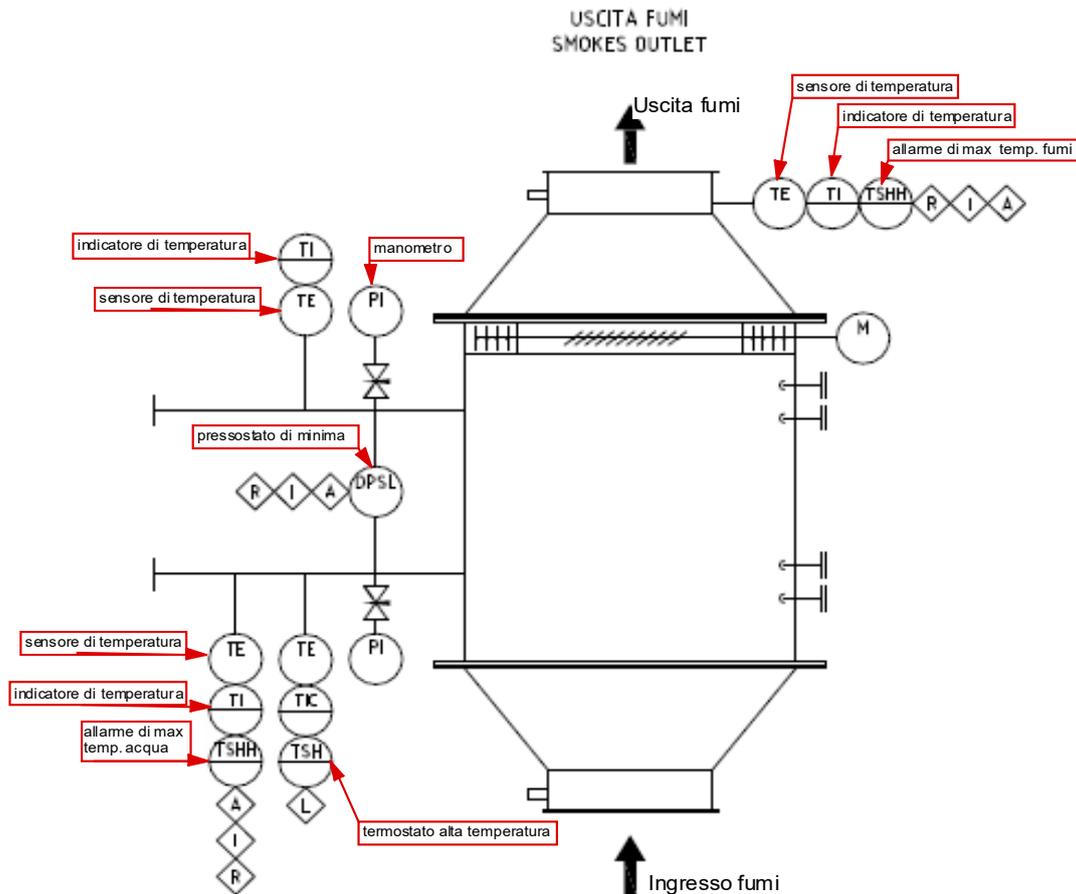


Figura 5. Dispositivi di controllo e sicurezza

Posizione	Descrizione	Posizione	Descrizione
M	Motore	TSHH	Allarme di massima temperatura acqua
I	Interblocco	TSHH	Allarme di massima temperatura fumi
R	Riarmo manuale	TSH	Termostato alta temperatura
L	Logica	TIC	Regolatore di temperatura
A	Allarme	PI	Manometro
TI	Indicatore di temperatura	DPSLL	Pressostato di minima
TE	Sensore di temperatura		

- una valvola ON/OFF di alimento che si apre quando la caldaia necessita di reintegrare l'acqua e comunica, tramite finecorsa, lo stato di valvola aperta al PLC in modo da far partire le pompe. Quando è chiusa svolge la funzione di anti allagamento;
- due pompe di alimento che provvedono a reintegrare l'acqua in caldaia. Sono comandate, tramite un regolatore PID, da un setpoint impostato nel PLC;
- una sonda di conducibilità che provvede a leggere la conducibilità dell'acqua in caldaia;
- un termometro (TE) che serve a leggere l'indicazione visiva della temperatura dei fumi allo scarico;
- un quadro elettrico di controllo che provvede a controllare e comandare, grazie al PLC e alle logiche cablate, tutti i dispositivi montati sulla caldaia garantendo il funzionamento automatico e la sicurezza di tutto il sistema.

3.3 Supervisione e telecontrollo

Oltre a tutti gli accessori descritti in precedenza il gruppo è dotato di sistema di controllo e supervisione del forno, e raccoglie in un'unica unità all'interno del quadro di comando e controllo tutte le più importanti funzioni del forno e dei suoi ausiliari, compreso il generatore

a recupero. Il terminale ha un video touch intelligente che, tramite un software, permette di navigare con facilità fra le varie maschere per operare sul gruppo stesso. Il software permette di attivare un quaderno operativo elettronico del sistema che memorizza tutti i messaggi operativi e i cambi di operazioni all'esatto momento consentendo analisi veloci e dettagliate del comportamento del gruppo di cogenerazione, di avere una funzione storica e diagnostica dei controlli. Come tutte le altre maschere anche quelle del service e diagnostica possono essere accessibili via modem tramite la normale rete telefonica. Questo consente la diagnostica da remoto con ottimizzazione dei tempi di reazione del servizio manutenzione. L'obiettivo del sistema è di gestire in maniera completamente autonoma, le sicurezze di caldaia, fornire informazioni di diagnostica e di gestire i blocchi della caldaia. Attraverso dei selettori a chiave e un pannello operatore, il conduttore abilitato in loco può gestire i test sulle sicurezze che si riferisce all'esenzione operatore entro le 72 ore, e di avere informazioni sullo stato di esse. La responsabilità di queste azioni è dell'operatore addetto alla conduzione.

L'interfaccia operatore consente il settaggio di tutti i parametri limite e/o di regolazione individuate quali livello, pressione, portate, regolazione automatiche, emissioni, temperatura dei fumi e una visione generale dello stato della caldaia. Il sistema consente di allertare con accuratezza il conduttore informandolo immediatamente sul tipo di evento e sul grado di gravità dell'evento.

4. Conclusioni

Dall'esamina del caso qui esposto, per i generatori di vapore a recupero fumi, *a sorgente termica diversa dal fuoco*, ma soggetti a pericolo di surriscaldamento assume grande importanza l'analisi dei rischi e la progettazione del sistema di sicurezza, eseguita a monte della costruzione della caldaia. La valutazione dei rischi, ai fini dell'applicazione del D.M. 1/12/2004 n. 329, in fase di esercizio, soprattutto se è inteso a ottenere l'esonero dalla supervisione continua del conduttore fino a 72 ore, va concentrata sulla interruzione improvvisa del funzionamento del forno, del malfunzionamento del sistema di bypass dei fumi e soprattutto su un cattivo trattamento delle acque di alimento. Dalla valutazione dell'analisi dei rischi effettuata dalle varie aziende che hanno partecipato alla costruzione dell'impianto, nei loro manuali di uso e manutenzione, si è potuta verificare che esse hanno eseguito un'attenta analisi dei rischi sia propri, relativamente alle varie sezioni dell'impianto, che dei rischi derivanti dalle interferenze delle varie attrezzature installate. Pertanto avendo visionato i manuali e analizzato la valutazione dei rischi effettuato dalle varie aziende si è potuto verificare che è stata fatta una coerente valutazione dei rischi da parte delle stesse e che le analisi fatte sono congruenti a quanto prescritto dalle normative in vigore.

5. Bibliografia

- [1] Rif. Lettera circolare ISPESL n. 6/05
- [2] Manuale Utente Moduli ORC serie LT di produzione energetica a ciclo Renkine della ZUCCATO ENERGIA - Via della Consortia, 2 – Verona – Italia.
- [3] Manuale istruzioni per l'uso della Avogadro Energy Srl, via Reccagni, 15/B Castel Mella (BS) – Recuperatori a circolazione forzata di acqua surriscaldata RPW-V.
- [4] UNI/TS 11325-3:2018 - Attrezzature a pressione - Messa in servizio e utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 3: Sorveglianza dei generatori di vapore e/o acqua surriscaldata.
- [5] D.Lgs. 15 febbraio 2016, n. 26 – “Attuazione della direttiva 2014/68/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 15 maggio 2014, concernente l'armonizzazione delle

legislazioni degli Stati Membri relativa alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione (rifusione).

[6] Decreto Ministeriale n° 329 del 01/12/2004 - pubblicato su Gazz. Uff. Suppl. Ordin. n° 22 del 28/01/2005 - Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.

Impianto di cogenerazione a servizio di un pastificio. Innovazioni di processo e sicurezza dell'impianto.

G. Battista¹, C. De Toro¹, R. Modestino¹, G. Vaccaro², A. Amato³

¹ Inail - Uot di Avellino

² Inail - Uot di Potenza

³ Grastim Energy

1. Premessa

La definizione di cogenerazione, così come proposta nell'Art. 2 del Decreto Legislativo n. 20 del 8 febbraio 2007, esplicita un processo combinato di energia elettrica e termica che, partendo da una sola fonte di energia primaria permette uno sfruttamento notevolmente più razionale dei combustibili (fossili o da fonti rinnovabili), con conseguente impatto positivo sia dal punto di vista economico che ambientale.

Tale innovazione di processo si sta affermando, negli anni, in diversi contesti; in questo lavoro si vuole presentare in particolare l'applicazione in un contesto rurale, nella fattispecie ad un pastificio irpino, descrivendo un sistema di cogenerazione a servizio di un'azienda per la produzione di pasta secca convenzionale e valutando la sicurezza del sistema secondo il DM 329/04.

L'impianto, progettato e messo in esercizio nel 2013, è stato successivamente modificato al fine di soddisfare l'aumento di richiesta dei profili di consumo elettrico e termico da parte dell'azienda.

Si tratta sostanzialmente di un "Insieme a pressione divisibile" costituito da due batterie a recupero installate, per la produzione di acqua surriscaldata, a valle di due motori endotermici alimentati a gas naturale proveniente da una linea dedicata all'alimentazione esclusiva dell'impianto.

Grande importanza, ai fini della sicurezza dell'impianto, assume l'analisi dei rischi, finalizzata ad assicurare il soddisfacimento dei Requisiti Essenziali di Sicurezza contenuti nell'Allegato I della PED del sistema di sicurezza.

L'impianto analizzato, prima realizzazione in provincia di Avellino da parte di un'azienda privata, ha rappresentato per la realtà irpina un esempio di grande interesse verso l'evoluzione tecnologica e la salvaguardia dell'ambiente.

L'impianto di cogenerazione è in grado di produrre più dell'80% dell'energia necessaria per alimentare il Pastificio, con 2.565 tonnellate di CO₂ evitate ogni anno, 3.900 tep/anno risparmiate e 41.000 MWh/anno di recupero termico.

2. Introduzione

2.1 Gli impianti di cogenerazione

Gran parte dell'energia elettrica utilizzata quotidianamente proviene da impianti termici, nei quali calore ad alta temperatura viene prima convertito in energia meccanica e successivamente, grazie a generatori elettrici, in energia elettrica.

Nel caso di impianti termonucleari, il calore proviene da reazioni di fissione, mentre nel caso di centrali termoelettriche dalla combustione del combustibile scelto tra carbone, gas naturale, frazioni del petrolio, biomasse.

La conversione da calore ad energia meccanica avviene poi sfruttando un ciclo termodinamico; ma indipendentemente dal tipo di ciclo adottato, il secondo principio della termodinamica stabilisce che non tutto il calore fornito può essere trasformato in lavoro; il

limite massimo teorico della quota di calore effettivamente convertibile in lavoro è fissato dal rendimento del ciclo di Carnot.

In questi tipi di impianti, il processo di combustione non viene sfruttato totalmente poiché si determina una dissipazione di calore sotto forma di vapori o fumi di scarico.

L'idea degli impianti di cogenerazione nasce proprio dal tentativo di recuperare questo calore inutilizzato, trasformando uno "scarto di processo" in energia termica utile alla stessa azienda.

La produzione combinata di energia elettrica e calore è spesso indicata con l'acronimo inglese CHP (Combined Heat and Power), mentre per "Impianto di cogenerazione ad alto rendimento" (CAR) si intende sempre un impianto di produzione congiunta e contemporanea di energia elettrica ed energia termica ma il cui il rendimento, in termini di sfruttamento dell'energia primaria, superi una certa soglia, stabilita dalla normativa, che varia in funzione della classe di potenza dell'unità cogenerativa.

Precisamente la Direttiva Europea 2004/8/CE definisce "impianti di cogenerazione ad alto rendimento" quegli impianti in cui il risparmio di energia primaria è, prendendo come riferimento impianti di capacità superiore a 1 MWe, almeno del 10% superiore rispetto ai valori di riferimento per la produzione separata di elettricità e calore.

La medesima direttiva, recepita in Italia dal D.L. 20/2007 e dai DM 4/8/2011 e 5/9/2011, obbliga gli Stati membri a incentivare la cogenerazione attraverso regimi di sostegno dedicati (ad esempio una forma di incentivo importante è rappresentata dai Titoli di Efficienza Energetica [TEE], anche detti Certificati Bianchi, a cui gli impianti di CAR possono accedere).

Schematicamente il processo cogenerativo può essere rappresentato come in figura 1 sottostante.



Figura 1. Schema funzionamento processo cogenerativo

2.2 La cogenerazione nel settore alimentare

La diffusione in Italia della cogenerazione è stata trainata soprattutto dal settore industriale; le industrie siderurgiche e le raffinerie, nel tentativo di ridurre i propri costi energetici, hanno effettuato notevoli investimenti in cogenerazione negli ultimi anni. Altri comparti, invece, possiedono ancora ampi margini di miglioramento. Tra questi

sicuramente il settore alimentare, dove la cogenerazione può assumere un ruolo molto importante; qui, infatti, agiscono generalmente quattro tipi di energia:

- acqua calda fino a 95 °C
- acqua surriscaldata fino a circa 150 °C
- vapore fino a 20 barg
- acqua refrigerata fino a 5 °C.

In questo specifico settore trova grande applicabilità un campo particolare nei sistemi di cogenerazione, la trigenerazione che consente di utilizzare energia termica anche per generare energia frigorifera.

Un esempio comune è relativo al processo di produzione della pasta secca; l'acqua calda viene utilizzata per la produzione dell'impasto, che viene poi essiccato con acqua surriscaldata e infine raffreddato per il confezionamento.

Ma ci sono anche altri esempi nel campo del Food&Beverage come le latterie, dove con il vapore si pastorizza il latte, con l'acqua calda si lavano i contenitori e con il freddo si abbassa la temperatura del latte per confezionarlo, oppure il processo di produzione dei salumi, in cui vengono utilizzati vari vettori energetici: elettricità per l'alimentazione elettrica dell'impianto e delle varie apparecchiature di lavorazione, vapore per i forni di cottura, acqua gelida per le celle frigorifere ed acqua calda per i lavaggi.

3. Caso Studio

3.1 Descrizione dell'impianto

L'impianto di cogenerazione descritto di seguito è a servizio di un pastificio localizzato nel comprensorio dell'Area di Sviluppo Industriale di Valle Ufita, nel comune di Flumeri (AV).

La società produttrice di energia, la Grastim JV srl, è stata incaricata nel 2011 di progettare, costruire e gestire un nuovo impianto di autoproduzione in assetto cogenerativo in un'area esterna a cielo aperto contigua all'area in cui sorge lo stabilimento industriale suddetto.

La Grastim ha dunque realizzato e messo in esercizio l'impianto nell'anno 2012; ma in seguito alla significativa variazione in aumento dei profili di consumo elettrico e termico dello stabilimento, al fine di soddisfare tale aumento di richiesta è stata apportata una modifica al ciclo produttivo esistente, con la sostituzione di una delle due macchine generatrici con una nuova di maggior potenza.



Figura 2. Vista dell'impianto



Figura 3. Particolare dell'impianto

Il gruppo di cogenerazione si basa oggi su 2 motori endotermici a gas naturale della potenza elettrica di 2,677 MW e 4,405 MW; la potenza totale immessa dal combustibile è pari a 15,75 MWt. I gruppi di cogenerazione sono alimentati da gas naturale proveniente da una linea dedicata all'alimentazione esclusiva dell'impianto di cogenerazione.

Gli alternatori calettati ad essi generano energia elettrica a 11 kV ed operano in parallelo alla rete esterna; è quindi presente un impianto elettrico in media tensione con interruttori di macchina, sezioni di risalita con trasformatori 11/20 kV e pannelli di collegamento con interruttore a 20kV.

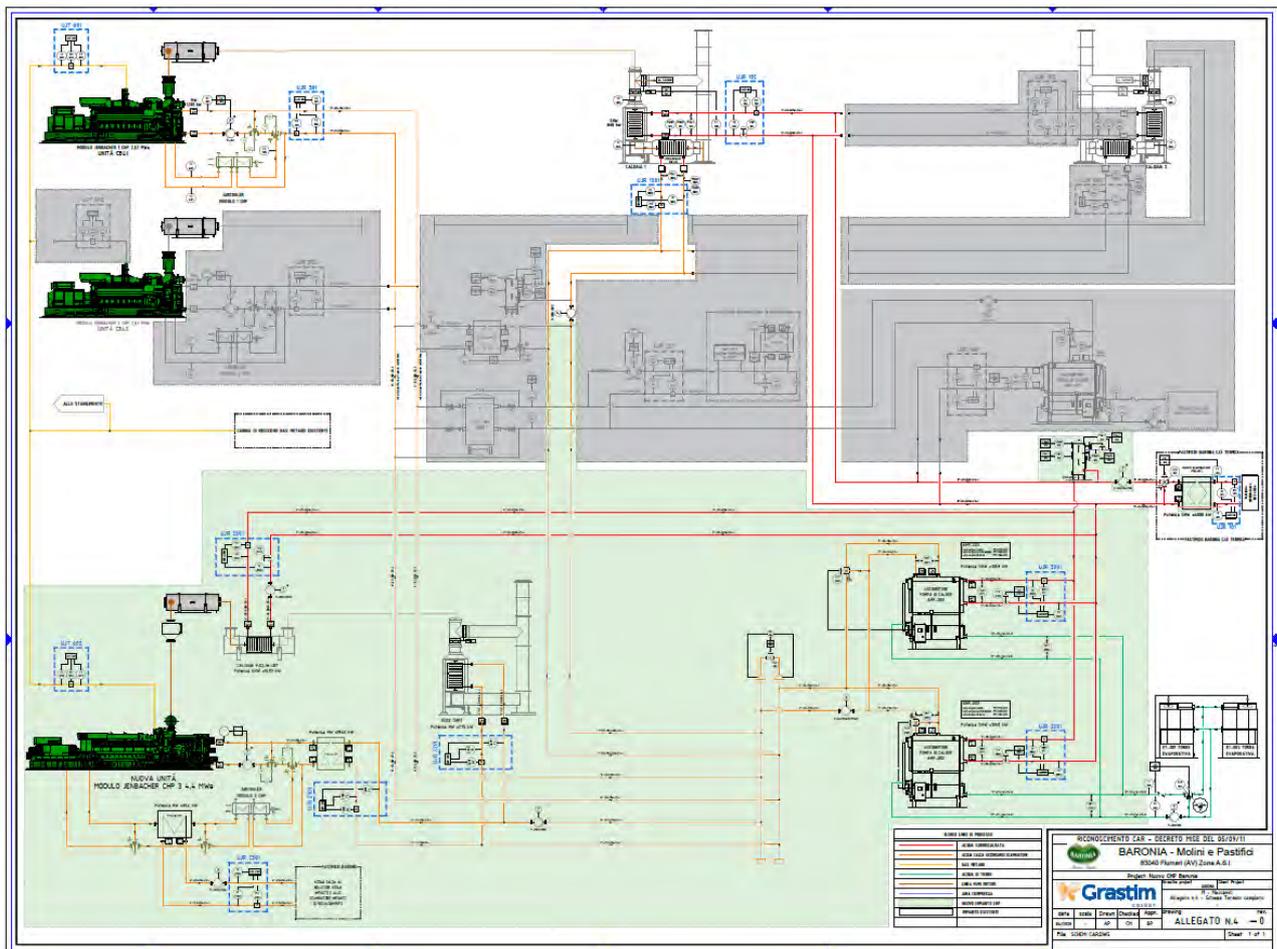


Figura 4. Schema termico completo

Oltre a generare energia elettrica, l'impianto utilizza i reflui termici dei motori per produrre ulteriori vettori termici impiegati dall'opificio industriale, in particolare:

- Acqua surriscaldata a 140 °C;
- Acqua calda a 63 °C.

L'acqua surriscaldata è prodotta grazie:

- ai gas di scarico dei due motori che attraversano una batteria di scambio termico alettata acqua/fumi (per l'unità da 2,7 MW) avente una potenza di 0,9 MWt ed un generatore a recupero a tubi da fumo (per l'unità da 4,7 MW) di potenza pari a 1,5 MW;
- ai due assorbitori che ricevono acqua calda a 93 °C sia dai motori endotermici (ovvero l'acqua di raffreddamento del primo stadio intercooler, circuito olio e camicie del motore) che dai due economizzatori delle caldaie a recupero. Questi particolari macchinari, noti precisamente come "assorbitori a pompa di calore", sfruttano la

capacità di una soluzione salina (precisamente acqua e bromuro di litio) di assorbire l'energia termica in seno all'acqua calda a 93 °C e trasferirla ad una sorgente termica a temperatura più elevata, ovvero l'acqua surriscaldata a 140 °C.

Il totale della potenza termica generata sotto forma di acqua surriscaldata è pari a 4,2 MWt.

L'acqua calda a 63 °C deriva invece dal raffreddamento del secondo stadio intercooler e secondo stadio olio motore, per una potenza termica recuperata di 842 kWt.

Per la conduzione e la gestione operativa dell'impianto, è presente un sistema di supervisione in grado di monitorare le diverse aree funzionali e di acquisire ed elaborare graficamente i parametri energetici in gioco, nonché di operare le principali manovre d'impianto attraverso una postazione di controllo installata in sito, in posizione adiacente al modulo cogenerativo.

3.2 L'innovazione di processo e l'impatto ambientale

La cogenerazione si può definire come il metodo con il quale si realizza il simultaneo utilizzo di elettricità e calore. Si comprende, quindi, come la cogenerazione non implichi l'utilizzo di nuove tecniche per la produzione di energia ma una "rivalutazione" delle attuali tecnologie. La sua forza è pertanto nell'innovazione del processo produttivo che, seppur con un minimo di calore comunque dissipato durante il processo, può portare importanti benefici sia in termini economici che ambientali.

Tale processo incrementa notevolmente l'efficienza nell'utilizzo dell'energia primaria determinando:

- dal punto di vista economico, un risparmio derivante da un minor consumo di combustibile e da una minore perdita di trasmissione e distribuzione dell'energia in quanto gli impianti sono localizzati generalmente in prossimità dei bacini d'utenza;
- dal punto di vista ambientale una riduzione delle emissioni in atmosfera e un minor rilascio di calore residuo nell'ambiente, e quindi un minore inquinamento atmosferico e minore inquinamento termico, obiettivo prioritario per lo sviluppo sostenibile.

Nel caso specifico, come anticipato in premessa, il rendimento globale dell'impianto è pari al 75% e la produzione combinata di energia elettrica e calore, possibile attraverso la cogenerazione, evita l'immissione in atmosfera di 2.565 tonnellate di CO₂ ogni anno ed un risparmio di 2.900 tonnellate equivalenti di petrolio (tep) all'anno.

4. Rischio sovrappressione e sicurezza dell'impianto

La Direttiva PED 2014/68/UE del 15/5/2014 ed il D.M. 329 del 01/12/2004 lasciano al fabbricante dell'attrezzatura la scelta della strumentazione atta ad assicurare il soddisfacimento dei Requisiti Essenziali di Sicurezza. Come precisa la stessa PED, occorre fare anche una distinzione tra i dispositivi per la limitazione diretta della pressione (es. le valvole di sicurezza, i dispositivi a rottura prestabilita, i dispositivi pilotati per lo scarico della pressione o altro) e i dispositivi di limitazione, che svolgono una funzione di protezione attiva.

Dall'analisi dei rischi condotta sull'insieme emerge l'importanza di considerare prima singolarmente i componenti costituenti l'insieme e poi gestire eventuali superamenti di pressione, temperatura e sollecitazione dell'insieme mediante catene di sicurezza.

Le catene di sicurezza sono di tipo "fail-safe", ciò significa che in caso di guasto, il singolo componente deve rimanere in una condizione sicura o trasferire il sistema in uno stato sicuro, richiedendo sempre il riarmo manuale da parte del personale di conduzione.

ESERCIZIO: SUPERAMENTO AMMISSIBILI DI PRESSIONE, TEMPERATURA E SOLLECITAZIONI	
EVENTO	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Malfunzionamento dei dispositivi di sicurezza per la pressione, meccanici ad azione diretta VALVOLE DI SICUREZZA, RIDUTTORI CONBLOCCO ▪ Taratura scaduta VALVOLE DISICUREZZA ▪ Malfunzionamento dei dispositivi di sicurezza per la pressione, elettromeccanici ad azione indiretta PRESSOSTATI ▪ Malfunzionamento dei dispositivi di sicurezza per la temperatura, elettromeccanici ad azione indiretta LIVELLOSTATI -TERMOSTATI ▪ Omesse verifiche periodiche per testare l'efficienza dei dispositivi di sicurezza ▪ Dispositivi di sicurezza non idonei in termini di capacità di scarico / azione e setpoint ▪ Cablaggio elettrico non adeguato in termini di componentistica
PERICOLO	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Rischi</u>: <ul style="list-style-type: none"> ✓ Cedimento / Scoppio / Esplosione delle membrature atte al contenimento della pressione o allo scambiotermico; ✓ Incendio ✓ Sollecitazione oltre gli ammissibili dell'impianto esistente posto a valle dell'insieme e fuori dal limite di batteria ✓ Fuoriuscita di fluido in pressione ad alte temperature e/o infiammabile dalle giunzioni flangiate con rischio di ustione e incendio ✓ Esposizione a rischio di gravi infortuni del personale di conduzione / manutenzione impianto e non solo
PROVVEDIMENTO	<ul style="list-style-type: none"> ▪ I componenti dell'insieme sono tutti marcati CE singolarmente; I più critici sono rappresentati dal Motore Endotermico, caldaia ad H2O surriscaldata, vaso di espansione H2O surriscaldata. Tutte le apparecchiature recano la marcatura CE: il motore secondo la direttiva macchine e gli altri secondo la direttiva PED e/o ATEX. ▪ Tutti i componenti a valle delle sorgenti energetiche sono congruenti in termini di fluido e ammissibili a quelli che sono le max. condizioni operative delle stesse; ▪ Le catene di sicurezza sono di tipo "failsafe"; ▪ In seguito all'intervento di una catena sicurezza, è richiesto sempre il riarmo manuale da parte del personale di conduzione. ▪ Le Valvole di Sicurezza andranno periodicamente controllate ed azionate manualmente, ove applicabile, come prescritto nel manuale del componente; ▪ Le tubazioni sono progettate considerando valori idonei di PS e TS. ▪ Verifiche periodiche delle catene di sicurezza secondo manuale di uso e manutenzione e secondo segnalazioni / allarmi di richiamo per tale azione, da parte dell'unità di comando e controllo centralizzata (SCADA) / DCS ▪ I dispositivi di sicurezza del circuito Gas Naturale sono posti all'interno della cabina gas del cliente, sottoposta regolarmente a manutenzione dalla società di distribuzione. ▪ Il compressore è marcato CE come Insieme

Figura 5. Estratto documento analisi dei rischi

Passando nel dettaglio all'analisi delle sicurezze relativa ai dispositivi di sicurezza e regolazione atti ad impedire il superamento dei valori ammissibili in termini di pressione, temperatura e livello dell'insieme, possiamo esaminare distintamente alcuni circuiti:

• Circuito LG

Questo circuito rappresenta la dorsale principale per l'alimentazione delle camere / cilindri del motore endotermico. I dispositivi di sicurezza che preservano il circuito dal superamento dei valori ammissibili sono posti all'interno della cabina generale del distributore locale, sottoposta regolarmente a manutenzione dalla società di distribuzione, e consiste in un riduttore che garantisce una pressione max. di 4,7 barg.

• Circuito HG

Questo circuito rappresenta l'alimentazione delle precamere del motore endotermico. La pressione del gas viene innalzata da un compressore con valvola di sicurezza, tarata a 9 barg, installata a bordo del compressore stesso.

• Circuito SHW

Il circuito SHW (composto dalle linee 5"-01-SHW-CS-I, 8"-01-SHW-CS-I, 6"-20-SHW-CS-I, 5"-28-SHW-CS-I, 5"-30-SHW-CS-I e 8"-31-SHW-CS-I) è protetto dai dispositivi di sicurezza posti in prossimità dei componenti che forniscono energia termica al fluido, che sono le pompe di calore e la caldaia. Le pompe di calore sfruttano la solubilità e l'elevata affinità tra due sostanze, di cui una funziona da refrigerante e l'altra da assorbente, per realizzare un ciclo dove l'energia introdotta è prevalentemente termica. Come coppia di fluidi refrigerante/solvente viene utilizzata H₂O/LiBr, in cui l'acqua funge da refrigerante e il

bromuro di litio da solvente; per costituzione fisica della macchina, quindi, non è possibile produrre acqua surriscaldata a temperature superiori a 150 °C; all'aumentare della temperatura nell'assorbitore, infatti, si ha la cristallizzazione dei sali di bromuro di litio che genera lo shut-down della macchina.

La caldaia, invece, produce acqua surriscaldata recuperando energia termica dai gas di scarico del motore, prima che questi ultimi vengano espulsi in atmosfera attraverso il camino; la caldaia, dunque, è un corpo in pressione che può essere soggetto anche a surriscaldamenti, per cui è dotata di componenti di sicurezza quali pressostato, termostato e livellostato tarati come segue:

- Pressostato: 10 barg;
- Termostato: 150 °C
- Livellostato: minimo livello

Raggiunto uno di questi valori, il componente di sicurezza invia un segnale al quadro di comando della caldaia che, a sua volta, comunica con il quadro di comando del motore provocandone l'intervento, interrompendo quindi l'alimentazione del motore e della caldaia. Il blocco motore avviene chiudendo la valvola del gas di alimentazione e la valvola a farfalla a bordo motore; la caldaia invece viene disalimentata grazie all'intervento del diverter, espellendo i gas di scarico direttamente al camino.

La catena di sicurezza sopra descritta è rappresentata nel seguente schema semplificato:

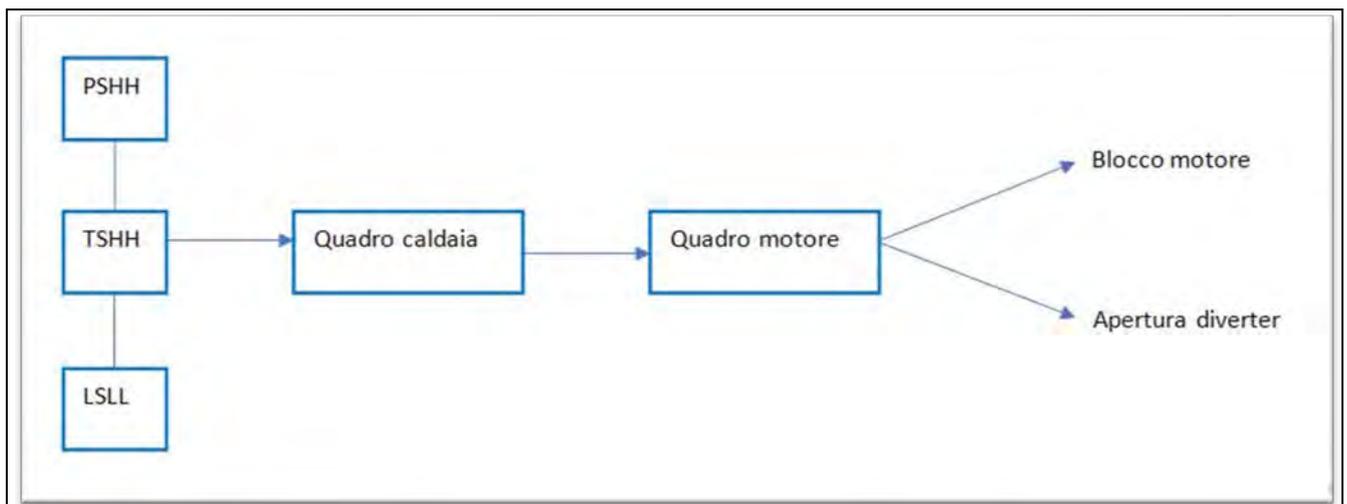


Figura 6. Schema catena di sicurezza

Al fine di assicurare che la caldaia operi entro i valori limiti ammessi, e che in caso di superamento dei limiti l'alimentazione di energia sia interrotta senza l'intervento umano, sono stati rispettati tutti i requisiti minimi della catena di sicurezza, come previsto dalla norma EN-12953/6:2011 "Caldaie a tubi di fumo – Parte 6: Requisiti per l'apparecchiatura della caldaia".

5. Conclusioni

La ricerca del settore energetico è sempre più volta alla produzione di energie pulite e minori emissioni di CO₂; questa esigenza di un migliore impatto ambientale si unisce alla volontà dei singoli consumatori di avere un risparmio energetico ed economico. Gli impianti di cogenerazione, possono essere in molti casi una soluzione efficace, tuttavia la scelta se investire o meno in questo tipo di soluzione si effettua sempre considerando la specifica realtà in cui si vuole implementare il cogeneratore.

Dal punto di vista della sicurezza di tali impianti, legati al rischio di sovrappressione, la Direttiva PED e le norme di riferimento UNI-EN-ISO definiscono le modalità per raggiungere tale obiettivo.

Da un'accurata analisi dei rischi, che permetta di individuare gli elementi critici del sistema, è possibile definire i requisiti dei sistemi di sicurezza per assicurare un funzionamento del sistema entro i valori limiti ammessi di temperatura e pressione, e definire eventuali interventi qualora si verifichi un superamento di tali limiti.

6. Bibliografia

[1] E. Ferrari, P. Napolitano. "Innovazioni impiantistiche: la cogenerazione e la rigenerazione nel settore rurale"; 2019.

[2] R. Sandonà. "Valutazione sull'utilizzo della cogenerazione nel settore residenziale e nel settore terziario"; 2015.

Disponibile in http://tesi.cab.unipd.it/49235/1/Sandon%C3%A0_Riccardo.pdf

[3] Decreto Legislativo n. 20 del 8 Febbraio 2007

[4] EN12953:2011-6 "Caldaie a tubi di fumo – Parte 6: Requisiti per l'apparecchiatura della caldaia"

Analisi dei meccanismi di danneggiamento in impianti a ciclo combinato: impatti sui criteri di progettazione e metodologie di controllo e manutenzione

D. Sallustio¹, S. Larghi²

¹ Inail – Uot di Bari

² Nooter Eriksen S.r.l.

Sommario

Attualmente la maggior parte della potenza installata degli impianti per la produzione di energia elettrica è basata sulla tecnologia a ciclo combinato.

Negli ultimi 15 anni i Generatori di Vapore a Recupero (GVR) sono diventati sempre più complessi, incorporando caratteristiche di progettazione come circuiti a pressione multipla, risurriscaldamento, post-combustione, ecc. I progetti continuano a cercare la massima efficienza attraverso pressioni e temperature più elevate che, allo stesso tempo, impongono esigenze sempre più elevate sull'integrità delle parti in pressione dei GVR. Inoltre, la gestione di questi impianti, inizialmente progettati per operare ad un carico base, è vincolata alle esigenze dell'attuale mercato dell'energia, che ha comportato significative parzializzazioni e numerosi cicli di accensione e spegnimento degli stessi, con conseguente stress dei componenti più sensibili e dei materiali che li costituiscono.

In questo articolo si analizzeranno i principali meccanismi di danneggiamento dei GVR sulla base delle anomalie rilevate nel corso dei controlli periodici effettuati sugli impianti interessati e della letteratura tecnica specializzata, inclusi quelli che possono conseguire da un esercizio "flessibile", indicando i metodi di controllo più efficaci.

1. Sintesi dei meccanismi di danneggiamento dei GVR

Una statistica molto ampia sul comportamento dei GVR in servizio è oggi disponibile ed è la base su cui progettisti e fabbricanti lavorano per migliorare l'efficienza e l'affidabilità dell'impianto.

L'analisi di questa statistica mostra come i problemi che interessano le parti in pressione dei GVR sono sostanzialmente riconducibili ai seguenti meccanismi di danneggiamento.

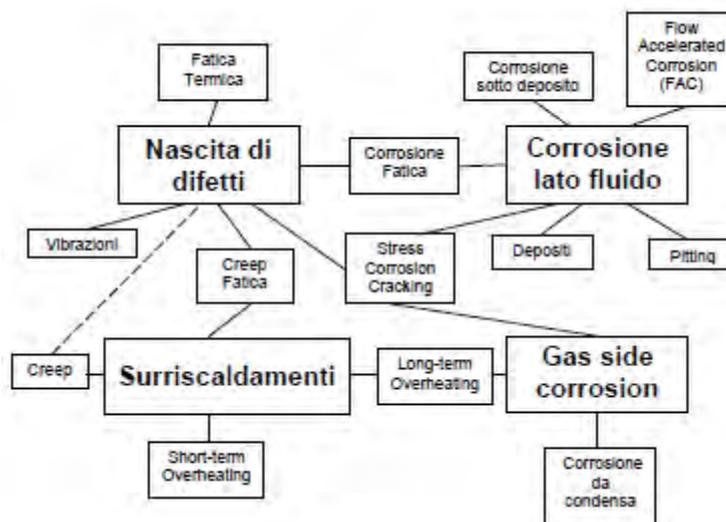


Figura 1. Sintesi dei meccanismi di danneggiamento nei GVR

Impianti di età e caratteristiche diverse possono essere interessati da una vasta gamma di problemi che impattano sulle loro efficienza, affidabilità e vita attesa.

Infatti, se per un nuovo GVR può essere relativamente semplice ottimizzare la progettazione in funzione delle esigenze operative previste, ad esempio per garantire una certa flessibilità dell'impianto, per quelli in servizio risulta spesso piuttosto oneroso apportare modifiche, specie alle parti in pressione.

Quindi per i GVR in servizio le soluzioni sono tipicamente:

- applicare le azioni correttive strettamente necessarie per raggiungere un'efficienza ed un'affidabilità accettabili;
- effettuare le manutenzioni correttive e preventive atte a risolvere e prevenire avarie ed indisponibilità degli impianti;
- modificare il meno possibile le condizioni di esercizio sulla base delle quali gli impianti sono stati progettati (spesso di difficile realizzazione per esigenze di mercato).

2. Fattori operativi: loro influenza sui meccanismi di danneggiamento e possibili azioni correttive

Di seguito si sintetizzano i principali fattori operativi che influenzano la vita di un GVR correlati ai meccanismi di danneggiamento, le cause di rottura e le possibili azioni correttive da intraprendere in fase di progettazione o esercizio/manutenzione per aumentare la vita attesa e l'affidabilità dell'impianto.

2.1 Funzionamento ciclico dell'impianto

Essenzialmente tutti i meccanismi di danneggiamento dei GVR sono riconducibili a/o amplificati dalle sollecitazioni e dalla chimica del ciclo.

L'esercizio "flessibile" dell'impianto comporta infatti variazione cicliche di sforzo ed instabilità della chimica del ciclo.

Le possibili azioni per contrastare le cause delle rotture sopra citate e ridurre o prevenire il danneggiamento del GVR sono sostanzialmente le seguenti:

- progettazione ex novo del GVR o delle modifiche richieste per un funzionamento ciclico;
- definizione del piano di manutenzione preventiva da applicare ai componenti critici, ad esempio, dopo un certo numero di transitori determinato con l'analisi a fatica;
- modificare le procedure di avviamento/fermata e funzionamento per non superare sollecitazioni accettabili (soluzione spesso non compatibile con le esigenze di mercato);
- installare hardware e sistemi di controllo appropriati ad implementare procedure operative ottimizzate.

L'esercizio flessibile comporta quindi la necessità di effettuare ispezioni appropriate ed eventuali successive riparazioni: questo risulta fattibile solo se in fase di progettazione e realizzazione si prevedono lay-out che consentano un facile accesso ai componenti.

2.2 Temperature dei gas di scarico

Le temperature dei gas di scarico della turbina a gas impattano direttamente sulla vita dei componenti del GVR in quanto possono produrre fenomeni di creep-fatica, fatica termica, corrosione-fatica, surriscaldamenti di breve e lungo periodo, corrosione sotto depositi, depositi. È, quindi, fondamentale riuscire a controllare tali temperature sia in termini di valori assoluti che di tassi di variazione durante gli avviamenti. Questo è particolarmente

significativo quando l'impianto opera a bassa potenza o negli impianti dotati di post-combustione.

2.3 Chimica del ciclo

Un altro aspetto di notevole rilevanza è la tenuta sotto controllo della chimica del ciclo, in particolare nei transitori di impianto, in quanto una scarsa qualità del fluido di processo favorisce tutti i meccanismi di corrosione lato acqua, compresi i meccanismi sotto deposito; la formazione di depositi nei circuiti dell'evaporatore; l'aumento dei rischi di high temperature fatigue (HTF) legati alla chimica e la corrosione da pitting; la flow accelerated corrosion (FAC). Per contrastare tali fenomeni è quindi necessario in fase di progettazione predisporre un impianto di trattamento in base alle caratteristiche dell'approvvigionamento idrico e alle esigenze dell'unità a ciclo combinato, scegliere materiali adeguati alle varie parti del GVR e, per quanto riguarda il condensatore, assicurarsi che sia "a tenuta stagna" e costruito con tubi atti a fornire le migliori prestazioni chimiche. In fase di esercizio si deve provvedere a selezionare livelli di ossigeno disciolto coerenti con la chimica dell'acqua di alimento più adatti al mantenimento dei livelli target durante tutte le modalità operative nonché a monitorare attentamente tali livelli. Si devono inoltre stabilire limiti personalizzati per i parametri chimici come il sodio, la silice, la conducibilità cationica e gli organici basati su linee guida affidabili per prevenire fenomeni di corrosione e di depositi, nelle sezioni dell'evaporatore del GVR e in turbina.

2.4 Lavaggi chimici

Per contrastare i meccanismi di danneggiamento sopra citati in fase di esercizio è inoltre importante eseguire accurati ed appropriati lavaggi chimici, in aggiunta a quelli preoperazionali che tipicamente vengono effettuati; tali operazioni possono essere facilitate e rese più efficaci se in fase di progettazione/realizzazione sono state installate apparecchiature che permettano un'adeguata pulizia chimica (tubature e valvole di pulizia chimica permanente) o se è stato previsto l'accesso per l'installazione di tubazioni e valvole temporanee.

2.5 Combustibile

Un altro aspetto di fondamentale importanza è costituito dal combustibile impiegato. La presenza di zolfo favorisce la corrosione lato gas; la corrosione acida alle basse temperature (con riferimento al punto di rugiada), la formazione di cricche da tensocorrosione e l'aumento dello sporco. Tutti questi fenomeni vengono inoltre accentuati dalla presenza di post-combustori che possono anche provocare aumenti di temperatura più difficilmente controllabili sui moduli a valle lungo il percorso fumi nel GVR.

Come detto, parallelamente alla scelta del combustibile (per quanto possibile in relazione alla disponibilità delle forniture ed alle esigenze di mercato) grande importanza ha la limitazione dei fenomeni di condensazione nelle parti più "fredde" dell'impianto. Per fare questo è opportuno, in fase di progettazione, definire pratiche per minimizzare o eliminare la condensazione durante il funzionamento, prevedere adeguati sovrassessori di corrosione o adottare metodi per mitigare tale corrosione, fare attenzione alla valutazione della spaziatura delle alette se gli olii combustibili sono destinati ad un uso significativo.

Ulteriore effetto sinergico può essere dovuto all'interazione tra lo zolfo ed eventuali contaminanti trasportati dall'iniezione di acqua nel GVR per il controllo degli ossidi di azoto (NOx).

2.6 Stato di sforzo

Inoltre, stati di sforzo eccessivi possono essere la causa sia diretta che indiretta (amplificando ad esempio gli effetti dei fenomeni corrosivi) di numerose rotture. I principali componenti coinvolti sono:

- i collettori di ingresso dell'economizzatore/preriscaldatore di bassa pressione (LP) soggetti a fenomeni di shock termico da parte dell'acqua di alimento fredda durante gli avviamenti da caldo/tiepido che producono elevati sforzi causa di fatica e fatica-corrosione sia nel fasciame dei collettori che nelle saldature tra collettori e arpe;
- corpi cilindrici ed evaporatori, dove le differenze di temperatura generate dalle diverse inerzie termiche durante i transitori di avviamento e dal differente posizionamento delle diverse arpe e tubi di caduta (downcomers) lungo il percorso fumi causano sforzi elevati in grado di attivare meccanismi di danneggiamento quali fatica termica e fatica-corrosione;
- i collettori operanti a più alte temperature, dove le differenze di temperatura tra arpe adiacenti producono elevati sforzi causa di fatica e creep-fatica in particolare nelle saldature tra collettori e arpe;
- i drenaggi dei surriscaldatori (SH) e risurriscaldatori (RH), dove possono verificarsi elevate differenze di temperatura tra tubo e tubo e shock termico alle forature dei tubi e alle superfici interne dei collettori a causa della condensa con conseguenti fenomeni di fatica e fatica-corrosione;
- gli attemperatori, dove sollecitazioni termiche dovute all'ammissione di acqua di attemperamento non miscelata o non vaporizzata nei collettori SH/RH a valle possono produrre surriscaldamenti, shock termici, creep-fatica, fatica termica, corrosione fatica;
- i collegamenti e le connessioni, in generale, tra i vari componenti, dove sollecitazioni di flessione agli attacchi tubo-collettore, generati dai tubi, possono causare sovrasollecitazioni locali con conseguente innesco di fenomeni di creep-fatica, fatica termica, corrosione-fatica; in questo caso può essere opportuna una modifica dei percorsi delle tubazioni di collegamento e del sistema di supportazione.

I meccanismi sopra citati sono chiaramente mitigati da un'accurata progettazione che tenga conto di tutti questi fenomeni prevedendo ad esempio un'opportuna flessibilità delle linee di collegamento e dei sistemi di supportazione/vincolo dell'intero GVR, ma anche predisponendo una strumentazione di controllo specifica posizionata in modo efficace, l'automatizzazione delle procedure di avviamento e di fermata, l'automatizzazione dell'apertura e della chiusura in sequenza degli scarichi dei surriscaldatori e dei risurriscaldatori, degli scarichi delle tubazioni vapore, degli sfiati, ecc. durante gli avviamenti.

3. Meccanismi di danneggiamento e tecniche di controllo

Nel presente paragrafo si riportano, infine, le tecniche di controllo più idonee ad una rilevazione precoce degli effetti dei vari meccanismi di danneggiamento.

Tecnica di ispezione	Sigla	Riduzioni generalizzate di spessore	Difetti bidimensionali	Difetti volumetrici	Variazioni microstrutturali
Esame visivo diretto o remotizzato	VT-VTE	**/*	**/* (efficace se affioranti)		
Liquidi penetranti	PT		***/** (efficace se affioranti)		
Esame magnetoscopico	MT		***/** (efficace se affioranti o subsuperficiali)		
Ultrasuoni spessimetrici	UTS	***			
Ultrasuoni difettoscopici	UT		**/*	***/**	
Tecnica di ispezione	Sigla	Riduzioni generalizzate di spessore	Difetti bidimensionali	Difetti volumetrici	Variazioni microstrutturali
Esami radiografici	RT		*	***/**	
Eddy current	ET	***/**	***/**		
Repliche metallografiche	ST		*** (per approfondimenti)		***
Repliche estrattive	STE				***
Durezze	HT				*

*** Molto efficace

** Moderatamente efficace

* Di possibile efficacia

Tabella 1. Tecniche di controllo

4. Conclusioni

Per quanto vasta la gamma di problemi potenzialmente impattanti sull'efficienza, affidabilità e vita attesa dei GVR di età e caratteristiche diverse, la maggior parte di essi possono essere risolti, o almeno ridotti e controllati per prevenire avarie o indisponibilità degli impianti, ottimizzando o con la revisione della progettazione in funzione delle diverse esigenze operative o mediante l'applicazione di un piano di manutenzione correttiva e preventiva efficace.

Risulta, dunque, necessario il coinvolgimento sinergico dell'utilizzatore dell'impianto e del fabbricante, anche con l'eventuale ausilio di società specializzate, per la definizione del piano dei controlli e l'individuazione dei punti di intervento rappresentativi e significativi per la rilevazione dei potenziali effetti dei vari meccanismi di danneggiamento agenti sul GVR, oltre che per la successiva analisi dei risultati e definizione delle azioni correttive (riparazioni o modifiche), con il fine di aumentare la vita attesa e l'affidabilità di un impianto.

5. Bibliografia

- [1] “Descriptions of Past Research in Program 88: Combined Cycle HRSG and Balance of Plant”, Technical Report 3002003388, EPRI, Palo Alto, 2014
- [2] “Evaluation of Thermal-, Creep-, and Corrosion-Fatigue of Heat Recovery Steam Generator Pressure Parts”, Technical Report 1010440, EPRI, Palo Alto, 2006
- [3] “Heat Recovery Steam Generator Procurement Specification”, Technical Report 3002001315, EPRI, Palo Alto, 2013
- [4] “Evaluating and Avoiding Heat Recovery Steam Generator Tube Damage Caused by Duct Burners”, Technical Report 1012758, EPRI, Palo Alto, 2007
- [5] “Delivering High Reliability HRSGs”, Technical Report 1004240, EPRI, Palo Alto, 2003
- [6] “Heat Recovery Steam Generator Tube Failure Manual”, Technical Report 10045203, EPRI, Palo Alto, 2002

Analisi costruttiva e progettuale delle valvole di sicurezza con particolare attenzione all'installazione e alla ritaratura

C. Di Girolamo¹, R. De Robertis¹, L. Cavanna¹ A. Colautto² R. Ciancio³ U. Colombini⁴

¹ Inail - Uot di Piacenza

² Inail - Uot di Milano

³ Inail - Uot di Genova

⁴ Nuova General Instruments Srl

Sommario

Le valvole di sicurezza sono un dispositivo fondamentale per prevenire lo scoppio in caso di malfunzionamento delle attrezzature in pressione; nella presente memoria si metteranno in luce le caratteristiche identificative per poter esercire tali valvole in modo da prevenire ogni potenziale malfunzionamento, nonché le criticità correlate alla non corretta installazione o ad una scelta errata del prodotto valvole di sicurezza.

1. Valvole di sicurezza

1.1. Definizione secondo UNI EN ISO 4126-1:2019 p.3.1

Valvola che automaticamente, senza l'assistenza di un'energia diversa da quella del fluido in questione, scarica una quantità di fluido al fine di prevenire il superamento di una pressione di sicurezza predeterminata e che è progettata per richiudersi e impedire un ulteriore flusso di fluido dopo che sono state ripristinate le condizioni di esercizio a pressione nominale.

1.2. Descrizione e identificazione dei suoi componenti con specificità dei ruoli

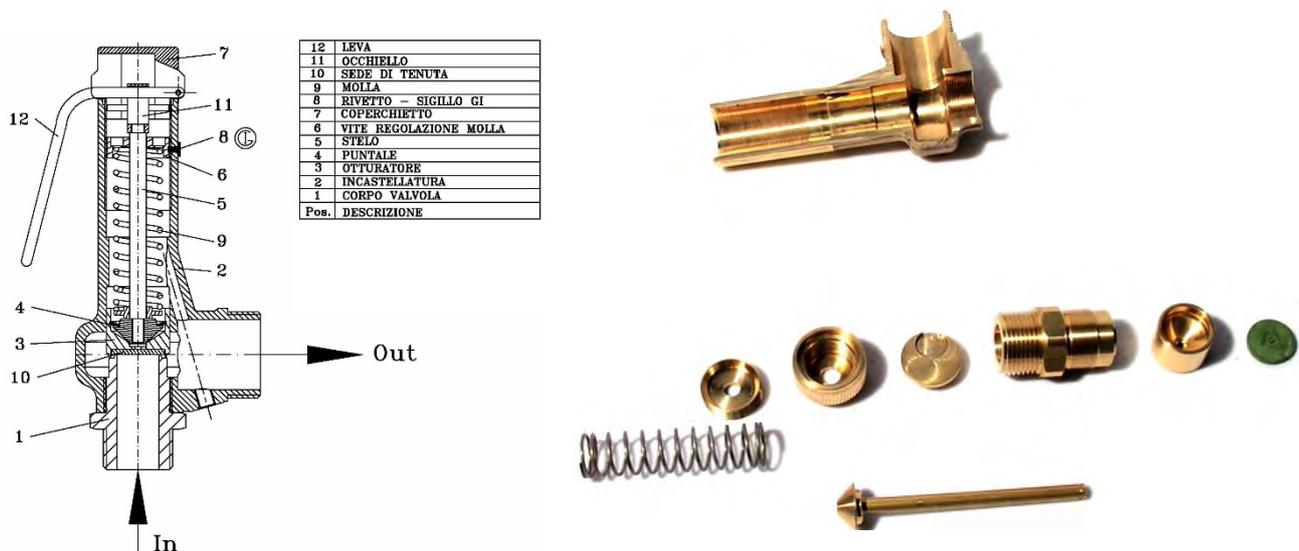


Figura 1. Esploso di una valvola di sicurezza a molla a carico diretto a scarico convogliato

1.3. Identificazione dei materiali

I fattori che entrano in gioco per la valutazione del miglior materiale della valvola e della sua tenuta sono il fluido, la pressione di taratura e la temperatura di lavoro.

I materiali più comunemente utilizzati per la produzione di valvole di sicurezza sono ghisa, ghisa sferoidale, acciaio al carbonio, acciaio inossidabile, ottone, bronzo, plastica. Di norma le molle sono costruite in acciaio al carbonio, inconel, acciaio inossidabile e le tenute possono essere del tipo metallico, elastomeri, materiali plastici.

L'ottone risulta compatibile con la maggior parte dei fluidi poco aggressivi quali aria, ossigeno, azoto, metano, refrigeranti e la sua temperatura di lavoro ammissibile è quella che va dalle temperature criogeniche di -196°C fino a 250°C .

La scelta del materiale inox viene adottata qualora la temperatura superasse i valori precedentemente citati, se i fluidi fossero di tipo aggressivo come acidi, basi oppure se il settore di impiego richiedesse materiali resistenti alla corrosione e asettici (settore alimentare/farmaceutico o navale con ambienti salini).

Per quanto riguarda le tenute il discorso è il medesimo. Per fluidi poco aggressivi si prediligono tenute morbide come il Viton; in caso di liquidi e fluidi incomprimibili l'EPDM risulta rispondere meglio rispetto ad altre opzioni. Se il fluido dovesse essere particolarmente aggressivo le tenute consigliate sarebbero il PTFE o metallica, in ambo i casi avendo una tenuta molto dura e poco incline ad adattarsi al corpo valvola su cui appoggia si consigliano pressioni di taratura superiori ai 6barg per garantire l'assenza di perdite indesiderate dal lato scarico della valvola di sicurezza.

1.4. Classificazione

Valvola di sicurezza a molla a carico diretto a scarico libero (Figura 2)

Lo scarico avviene in ambiente con flusso sull'asse verticale della valvola stessa o radialmente a 90° dell'asse verticale della valvola.

Idonee per gas inerti o non pericolosi così detti "Gas del Gruppo 2"

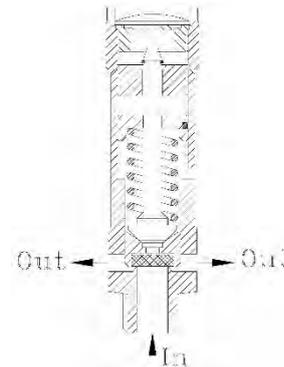


Figura 2. Valvola a molla a scarico libero

Valvola di sicurezza a molla a carico diretto a scarico convogliato (Figura 3)

Lo scarico viene canalizzato attraverso la connessione di uscita a 90° dell'asse verticale della valvola.

Idonee per gas pericolosi così detti "Gas del Gruppo 1"; spesso viene anche utilizzata per evitare che in caso di intervento lo scarico non vada ad investire cose o persone nelle immediate vicinanze.

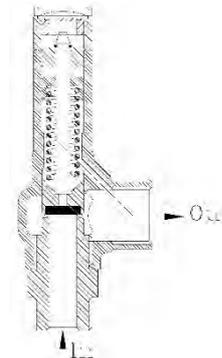


Figura 3. Valvola a molla a scarico convogliato

Valvola di sicurezza a contrappeso (Figura 4)

Sono valvole di sicurezza con funzionamento a leva alla quale viene applicato un contrappeso per generare la pressione di intervento.

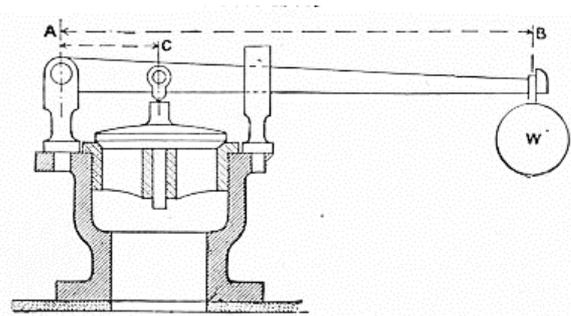


Figura 4. Valvola a contrappeso

Valvola di sicurezza bilanciata (Figura 5)

Sono valvole di sicurezza aventi le stesse caratteristiche delle valvole di sicurezza a scarico convogliato ma hanno la caratteristica di essere impiegate in applicazioni dove la contropressione in scarico può arrivare fino ad un massimo del 50% della pressione di taratura.

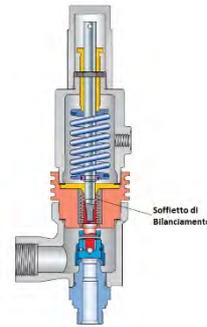


Figura 5. Valvola di sicurezza bilanciata

2. Dimensionamento

Per poter selezionare correttamente una valvola di sicurezza da installare in impianto è necessario conoscere dati fondamentali di caratterizzazione dello stesso e del processo ivi afferente. Prima di illustrare un caso pratico, paragrafo 2.2, a seguire, sono riportate le principali formule di dimensionamento in riferimento alla tipologia di fluido che interesserà la valvola di sicurezza.

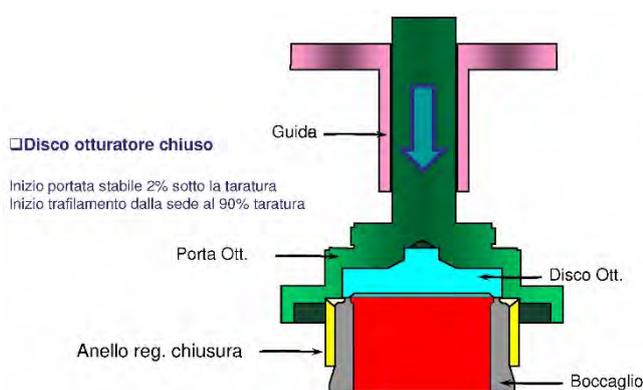


Figura 6. Esempio di una valvola chiusa

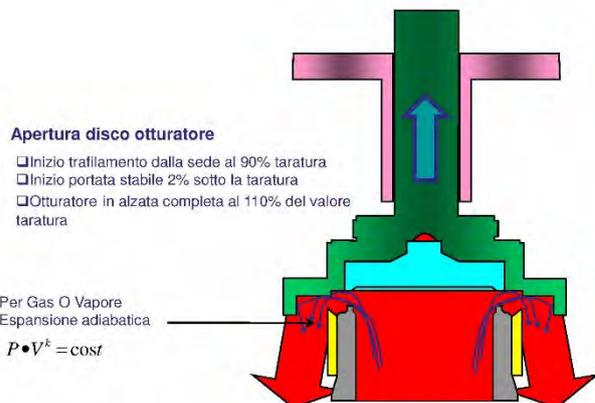


Figura 7. Esempio di valvola aperta

2.1. Formule di riferimento

Gli standard che verranno presi in considerazione sono:

- API520, ambito Stati Uniti ed Emirati, tale normativa insieme alla ASME VIII DIV.1 è quella di riferimento per i prodotti certificati ASME;
- ISO EN 4126, ambito Europeo, normativa principe per quanto riguarda valvole di sicurezza certificate PED.

Fase GAS

Nel presente caso in entrambe i riferimenti normativi, API520 e ISO 4126, la formula di calcolo è praticamente la stessa a meno di un coefficiente numerico (13,16) che serve per la conversione delle unità di misura da USC a SI nelle API520.

$$A = \frac{Q_m}{p_0 \times C \times K_{dr} \times \sqrt{\frac{M}{Z \times T_0}}} \quad (1)$$

Dove:

- A Minima sezione di passaggio (non l'area tra sede e otturatore)
- Q_m Portata massima richiesta in caso di disservizio dell'impianto
- p_0 Pressione di scarico ($P_{set} \times 1,1$)
- C Coefficiente isoentropico ricavato dal rapporto tra calore specifico a pressione e temperatura costante
- K_{dr} Coefficiente di scarico corretto, ($K_d \times 0,9$)
- K_d Coefficiente di scarico
- T_0 Temperatura di scarico
- Z Fattore di comprimibilità alla pressione e alla temperatura di scarico
- M Peso molecolare gas

In caso di contropressioni maggiori al 10% della pressione di taratura la formula 1 deve essere corretta con il coefficiente k_b che tiene conto degli influssi della contropressione e solitamente sono utilizzate valvole di sicurezza dotate di soffiato.

$$A = \frac{Q_m}{p_0 \times C \times K_{dr} \times K_b \times \sqrt{\frac{M}{Z \times T_0}}} \quad (2)$$

Figura 8, estrapolate dalla norma, la sequenza di apertura con i tipici degli andamenti dei percorsi dei gas e grandezze tipiche.

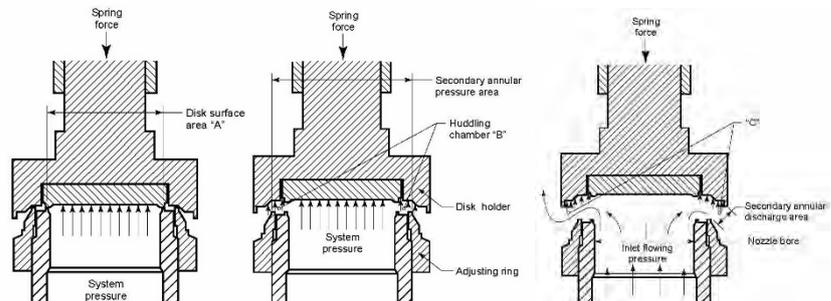


Figura 8

Fase LIQUIDA

- API 520

$$A = \frac{11,78 \times Q_m}{K_{dr} \times K_w \times K_v} \times \sqrt{\frac{G}{(P_1 - P_2)}} \quad (3)$$

Dove:

- A Minima sezione di passaggio (non l'area tra sede e otturatore)
- Q_m Portata massima, in caso di disservizio di impianto
- K_{dr} Coefficiente di scarico corretto, ($K_d \times 0,9$)
- K_d Coefficiente di scarico
- K_w Coefficiente di correzione dovuta alla contropressione
- K_v Fattore di correzione della viscosità
- G Volume specifico alla pressione e alla temperatura di scarico effettive riferite all'acqua
- P_1 Pressione di scarico ($P_{set} \times 1,1$)
- P_2 Contropressione

Figura 9, estrapolate dalla norma, la sequenza di apertura con i tipici degli andamenti dei percorsi dei liquidi.

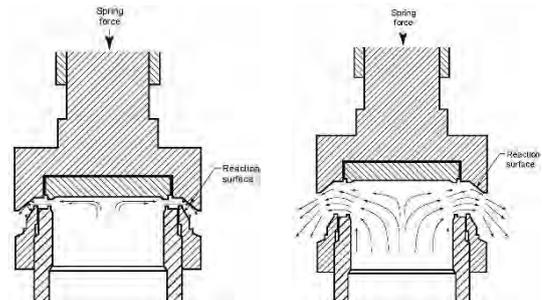


Figura 9

- ISO EN 4126

$$A = \frac{Q_m}{1.61 \times K_{dr} \times K_v \times \sqrt{\frac{p_0 - p_b}{v}}} \quad (4)$$

Dove:

- A Minima sezione di passaggio (non l'area tra sede e otturatore)
- Q_m Portata massima
- p₀ Pressione di scarico
- p_b Contropressione
- K_{dr} Coefficiente di scarico corretto, (K_d × 0,9)
- K_d Coefficiente di scarico
- K_v Fattore di correzione della viscosità
- V Volume specifico alla pressione e alla temperatura di scarico effettive

Fase MISTA

Gli standard di riferimento sono API 520 ed. 7 e 8 e ISO-EN 4126 part.10.

2.2. Caso pratico

La scelta è ricaduta sul metano per comprendere la compatibilità dei materiali in ambito ATEX e quindi con tutte le indicazioni per l'ambito a rischio esplosione.

Si richiede una valvola di sicurezza da installare su serbatoio con le seguenti caratteristiche:

- Valvola installata in Italia conforme alla 2014/68/UE categoria IV e 2014/34/UE Zona 2, categoria prodotto 2
- Pressione di taratura: 12,1 barg
- Fluido: Metano CH₄
- Temperatura del fluido: -10°C / +50°C
- Materiale del tank: Acciaio al carbonio
- Superficie esterna del tank: 16,02 m²
- Pressione in condizioni operative dell'impianto: 8,55 barg
- Temperatura in condizioni operative dell'impianto: 50°C
- Valutare caso dimensionante tra:
 - Caso incendio
 - Caso rottura riduttore 1380,5 kg/h in condizioni standard (0°C)

L'analisi dei rischi dell'impianto ha portato alla luce due casi critici:

- Per il dimensionamento "Fire Case" si dovrà verificare che la valvola di sicurezza sia idonea a scaricare l'eccesso di pressione causato da un incendio esterno all'impianto.
- Per il dimensionamento in caso di rottura del riduttore, il produttore di tale organo ha dichiarato una massima portata di metano in caso di guasto pari a 1380,5 kg/h in condizioni standard (0°C)

2.3. Dimensionamento "Fire Case"

Si procede alla valutazione del caso di incendio in cui nel caso di fluidi gassosi si utilizza la formula presente al paragrafo 4.4.13.2.4.3 della API521 che, in prima analisi prevede il calcolo della temperatura del gas alla pressione di monte:

$$T_1 = \frac{P_1}{P_n} T_n = \frac{227,04 \text{ psi a}}{138,51 \text{ psi a}} \cdot 581,67 \text{ }^\circ R = 953,45 \text{ }^\circ R \quad (5)$$

Dove:

P_1 pressione di completa apertura della valvola in psi assoluti considerando una sovrappressione del 21%;

P_n pressione in condizioni operative dell'impianto in psi assoluti

T_n Temperatura in condizioni operative dell'impianto espressa in gradi Rankine.

Si passa ora a calcolare il fattore ambientale F' utilizzando il T_1 appena ricavato, la funzione del coefficiente isoentropico del fluido, la temperatura massima di parete T_w consigliata dalla API521 pari a $593^\circ C$ per acciai al carbonio e il coefficiente di efflusso ridotto della valvola. Qui la formula con il risultato del caso studio:

$$F' = \frac{0,1406}{C K dr} \chi \frac{(T_w - T_1)^{1,25}}{T_1^{0,6506}} = 0,0163 \quad (6)$$

Siamo ora pronti a definire la sezione minima della valvola con conseguente selezione della valvola di sicurezza utilizzando il fattore ambientale, la superficie esposta al fuoco e la pressione di completa apertura della valvola.

$$A = \frac{F' A'}{\sqrt{P_1}} = \frac{0,0163 \times 172,44 \text{ sq in}}{\sqrt{227,04 \text{ psi a}}} = 0,186 \text{ sq in} = 120,1 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

La selezione della valvola ricade quindi sul modello NGI Tipo G14/S con orifizio 13,5mm e sezione 143,2 mm².

2.4. Dimensionamento in caso di rottura del riduttore

Procediamo a verificare se la valvola G14/S risulta idonea a scaricare l'eccesso di pressione anche in caso di rottura del riduttore.

In questo caso la formula di riferimento è quella descritta nella ISO 4126-7 paragrafo 6.3.3.1.

$$Q = P_o C A K dr \sqrt{\frac{M}{T_o Z}} = 14,31 \cdot 2,64 \cdot 143,2 \cdot 0,86 \sqrt{\frac{16,04}{273 \cdot 1}} = 1128 \text{ kg/h} \quad (8)$$

A fronte dei 1380,5kg/h richiesti, la valvola G14/S scarica solamente 1128kg/h di metano risultando dunque non sufficiente; si dovrà di conseguenza passare al modello NGI Tipo G20/S orifizio 20mm, sezione 314mm² e portata di scarico 2387kg/h in grado di soddisfare sia il dimensionamento in caso incendio che quello di rottura riduttore.

$$Q = P_o C A K dr \sqrt{\frac{M}{T_o Z}} = 14,31 \cdot 2,64 \cdot 314 \cdot 0,83 \sqrt{\frac{16,04}{273 \cdot 1}} = 2387 \text{ kg/h} \quad (9)$$

Dalle caratteristiche fisiche e termiche del fluido si passa ora a definire i materiali più idonei all'applicazione tramite tabelle (figura 10) di compatibilità rilasciate in letteratura e dai produttori stessi di materiali.

The following data should serve as a guide in the selection of components for particular gas services.

C Gas is compatible at room temperature in pure form with material recommended
 N Not recommended with this gas
 S Suitability depends on condition of use
 - Insufficient data available at this time

Gas	ID #	Chemical Formula	Metals						Plastics				Elastomers		
			316 Stainless Steel	Monel	Brass	Aluminum	Zinc	Copper	Kel-F	Teflon	Tetzel	Kynar	Viton	Buna-N	Neoprene
Hydrogen Sulfide	UN1053	H ₂ S	C	C	N	C	-	-	C	C	C	C	N	C	C
Isobutane	UN1969	(CH ₃) ₂ CHCH ₃	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Isobutylene	UN1055	(CH ₃) ₂ C:CH ₂	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Krypton	UN1056	Kr	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Methane	UN1062	CH ₄	C	C	S	C	C	S	C	C	C	C	C	C	C
Methyl Bromide	UN1072	CH ₃ Br	C	-	C	N	-	C	-	-	-	-	-	-	-

Figura 10. Esempio di tabella di compatibilità del materiale in relazione al fluido vettore

Vista la letteratura sopra riportata, la valvola di sicurezza G20/S verrà fornita in materiale inox 316L con tenuta in Viton idonea per temperature -20°C / +200°C e compatibile con il fluido metano. In considerazione dell'applicazione, la valvola sarà munita di Verbale di taratura al banco INAIL e certificazione PED (D.E. 2014/68/UE categoria IV) + ATEX (D.E.2014/34/UE Zona 2, categoria prodotto 2) per atmosfere potenzialmente esplosive.

2.5. Casi di particolare interesse per tipologia di installazione

Uno dei casi particolari è pervenuto da un'azienda che produce impianti speciali nel settore farmaceutico. Nello specifico la valvola di sicurezza doveva essere installata su autoclave di sterilizzazione di fiale destinate a contenere vaccini. La valvola doveva essere corredata di materiali certificati secondo EN 10204 3.1, FDA (Food and Drug Administration) e USP Class VI (Medical grade Materie plastiche).

I test da eseguire in presenza del Cliente, Cliente finale dell'impianto e Ente terzo sono stati verifica della pressione taratura, test di apertura e richiusura, test di tenuta in pressione e depressione con speciale rilevatore di fughe di idrogeno con sensibilità di 1 x 10⁻⁵ cc/s di H₂.

3. Taratura

3.1. Definizione

La pressione di taratura è la pressione predeterminata alla quale una valvola di sicurezza in condizioni operative incomincia ad aprirsi; in pratica è la lettura della pressione all'inizio trafilemento udibile.

È la pressione relativa misurata all'ingresso della valvola alla quale la forza che tende ad aprire la valvola alle condizioni di esercizio specifiche è in equilibrio con le forze che mantengono il disco della valvola sulla sede. (UNI EN ISO 4126-1:2019 p.3.5)

3.2. Procedura

La procedura adottata per arrivare alla taratura di certificazione di una valvola di sicurezza è distinta in tre fasi; ciò permette di ottimizzare tale processo riducendo al minimo le iterazioni operative e massimizzando l'efficienza, ovvero la qualità di taratura.

La prima attività di taratura ha inizio già nella *fase di assemblaggio*, fase in cui vengono assemblati tutti i componenti e, preliminarmente, viene dato un precarico alla molla che è di circa $\pm 5\%$ della pressione di taratura nominale richiesta dal cliente, a cui seguirà un periodo di riposo di circa 24 ore. Questa operazione dà modo alla sede a tenuta soffice di prendere l'impronta della controfigura situata sul corpo valvola.

Trascorsa l'iniziale fase di assestamento, con l'ausilio di dedicato impianto e strumentazione viene attuata la *prima calibrazione* del carico della molla per portare la valvola sottoposta a test ad un inizio di trafilamento entro il $\pm 3\%$ del valore di pressione nominale; anche dopo questa attività la valvola viene lasciata a riposo per circa 24 ore.

Infine, la valvola di sicurezza viene sottoposta alla *taratura finale* dove è verificato che il valore di inizio trafilamento rientri entro il $\pm 3\%$ del valore di pressione nominale e, se necessario, si eseguono piccole regolazioni per ottenere un valore sempre più vicino alla pressione di taratura richiesta. Tale attività è svolta da operatore diverso e con specifica formazione utilizzando dedicata strumentazione diversa dalla fase precedente, per garantire classe di precisione adeguata alla certificazione richiesta.

Nel caso di valvole di sicurezza con sede di tenuta metallica si segue la procedura sopra descritta senza la fase di "prima calibrazione – avvicinamento".

La procedura sopra descritta è un sistema di collaudo e taratura certificata interno utilizzato da azienda nazionale di riferimento, mutuata dall'esperienza acquisita in tutta la storia produttiva che, in particolare, nel corso degli ultimi dieci anni ha visto la produzione di circa quattro milioni di valvole di sicurezza di cui non meno del 10% sono state sottoposte a certificazione di taratura presenziata INAIL.

3.3. Qualità dei risultati

Come descritto nella procedura la certificazione finale avviene dopo una serie di step di "assestamento" che con una adeguata strumentazione, impianto e operatori altamente specializzati permettono di raggiungere un elevato standard qualitativo nella messa a punto della corretta taratura.

3.4. Strumentazione allo stato attuale

La norma *UNI EN ISO 4126-1:2019* impone l'utilizzo di un'attrezzatura di prova con incertezza di misura entro $\pm 0,5\%$. Per facilità di lettura è consigliabile l'utilizzo di manometri analogici che a differenza degli analoghi digitali hanno una maggiore stabilità del valore letto dall'operatore.

3.5. Implementazione della strumentazione di taratura finalizzata a «Industria 4.0»

Nell'ottica di sviluppare procedure di taratura adeguate all'evoluzione tecnologica sarebbe opportuno dotarsi di strumentazione di controllo digitale e di software di lettura in tempo reale dei risultati e con possibilità di trasferimento ed elaborazione dei dati per varie finalità. La condivisione dei dati in tempo reale con il cliente finale potrebbe facilitare anche il processo di auditing nei confronti del produttore ai fini della verifica della qualità del prodotto. Infine, sarebbe auspicabile la creazione di una piattaforma virtuale ove ogni cliente possa andare a reperire tutta la documentazione finale rilasciata dal produttore. Nel caso specifico sopradescritto, solitamente, vengono utilizzati di microfoni ad alta risoluzione, manometri digitali da laboratorio in classe 0,1, specifico software in grado di registrare dati e grafici di pressione per la compilazione in automatico dei Test Report. È stato inoltre verificato che le

dichiarazioni di conformità complete di manuale uso manutenzione, certificati materiali, test report vengono messe a disposizione dei clienti su un server virtuale.

4. Installazione

4.1. Concetti base per l'installazione

In accordo alla normativa *UNI EN ISO 4126-1:2019 p.5.2*, il diametro interno delle tubazioni di collegamento alla valvola deve essere almeno pari agli orifizi valvola connessi.

Se possibile si dovrà installare la valvola lontano da vibrazioni per evitare fenomeni di chattering o improvviso trafilamento valvola.

Se si convoglia lo scarico della valvola si deve tenere in considerazione i fattori riportati a seguire, che concorrono a generare una contropressione sul lato scarico della valvola di sicurezza:

- Geometria e caratteristiche della tubazione impiegata,
- Eventuale scarico in un recipiente in pressione.

La valvola di tipo convenzionale funziona correttamente fino ad una contropressione massima pari al 10% della pressione di taratura dell'organo di sicurezza; qualora la contropressione generata superi tale valore sia necessario optare per valvole di tipo bilanciato con soffiato di bilanciamento, tale dispositivo posto nella camera di convogliamento della valvola permette di isolare molla e otturatore rendendo di fatto la valvola "indipendente" dalla contropressione. A seconda del tipo di soffiato la contropressione sopportata varia dal 15%-20% fino ad un massimo del 50%.

Nelle valvole di sicurezza con soffiato di bilanciamento, molla non influenzata dal fluido, per il corretto dimensionamento, vista la contropressione in gioco, si apporta una correzione della portata di scarico tramite un fattore K_b e i valori corretti di pressione di riferimento:

P_o = pressione di scarico in bar assoluti ($P_{set} \times 1,1 + 1,013bar$)

P_b = contropressione in bar assoluti

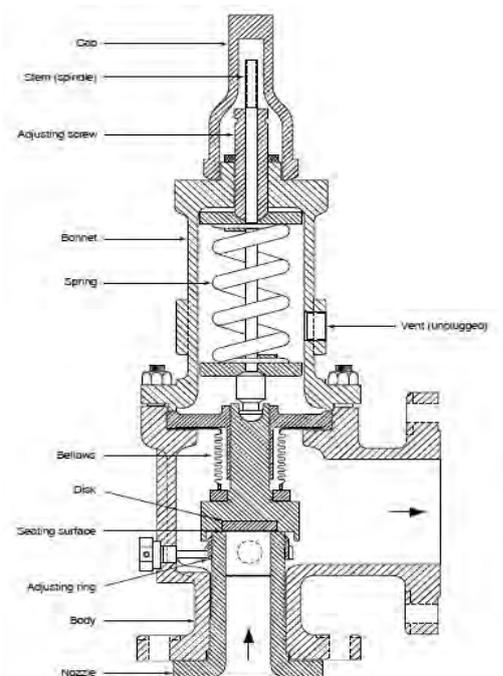


Figura 11. Valvola di sicurezza con soffiato

Si consiglia di installare la valvola in verticale con cappello verso l'alto, se si installerà la valvola orizzontalmente si consiglia di indirizzare lo scarico verso il basso per favorire il flusso del fluido in caso di intervento ed evitare invasamento della camera otturatore e molla (soprattutto per fluidi liquidi).

4.2. Raccomandazioni derivanti dall'esperienza operativa

Il mal funzionamento di una valvola di sicurezza può avvenire a causa del danneggiamento della sede di tenuta. Ciò può accadere dopo un ciclo di completa apertura e richiusura dove durante lo scarico del fluido parti solide presenti nell'impianto si potrebbero incastrare tra la tenuta e il corpo valvola causando successivamente un trafilamento ad un valore di pressione inferiore rispetto a quello di taratura.

Si consiglia quindi di non provare le valvole di sicurezza prima di installarle sull'impianto poiché tale verifica comporta un primo intervento della valvola con le conseguenti possibili problematiche appena descritte.

In figura 12 è riportato un esempio di sede di tenuta danneggiato da frammento di truciolo metallico.



Figura 12. Particolare sede con danneggiamento della tenuta

5. Manutenzione, controllo di efficienza, ritaratura

5.1. Periodicità delle attività manutentive

Per meglio comprendere le tempistiche di manutenzione è opportuno introdurre il concetto di vita media, non da intendersi come durata della valvola o dei singoli componenti, ma come il mantenimento della funzionalità e tenuta operativa della valvola entro i parametri di taratura/intervento definiti dal costruttore.

La vita media delle valvole di sicurezza a sede di tenuta con elastomeri, ed in particolari condizioni di esercizio, è di circa 24 - 36 mesi.

La vita media delle valvole di sicurezza a sede di tenuta metallica/materiale plastico, ed in particolari condizioni di esercizio, è di 36 - 48 mesi.

Alla scadenza di tali termini è opportuna la RITARATURA.

Dal manuale del Costruttore della valvola considerata nel caso-studio precedentemente esposto si apprende inoltre che la valvola mantiene le sue caratteristiche per 24/36 mesi a seconda delle specifiche costruttive; al termine di tale periodo l'utilizzatore deve procedere ad un esame visivo al fine di individuare eventuali anomalie nello stato di conservazione del manufatto e nella tenuta e in caso richiedere un intervento manutentivo.

In particolare, l'esame visivo sarà volto ad accertare l'assenza di forti ossidazioni - erosioni e che le feritoie/conessioni di scarico siano libere da ostruzioni. In assenza di evidenti ossidazioni, erosioni, incrostazioni e/o danneggiamenti dovuti a cause esterne, la vita media si prolunga di altrettanto periodo come sopra descritto.

Le periodicità imposte a livello normativo sono differenti e riguardano per lo più le verifiche di funzionalità entro i limiti di taratura degli accessori di sicurezza in occasione delle verifiche periodiche sulle attrezzature a pressione da questi protette.

In Italia il D.M. 329 del 01/12/2004 è il testo che definisce la periodicità della verifica degli apparecchi a pressione.

In particolare, l'art. 13 del D.M. 329/04 impone che la verifica di funzionalità dei già menzionati accessori di sicurezza possa essere effettuata con prove a banco, con simulazioni, oppure, ove non pregiudizievole per le condizioni di esercizio, determinandone l'intervento in opera. In particolare, per le valvole di sicurezza, la verifica può consistere nell'accertamento di avvenuta taratura entro i limiti temporali stabiliti dal fabbricante e comunque entro i limiti relativi alle periodicità delle verifiche di riqualificazione.

L'ispezione ed il rilascio dei certificati di taratura delle valvole di sicurezza è riservata ad Enti preposti ed è disciplinata dalle norme di legge specifiche vigenti nel Paese d'installazione.

6. Conclusioni

È stata sviluppata una caratterizzazione delle principali valvole di sicurezza presenti sul mercato con particolare attenzione alla scelta dei materiali del corpo valvola e della tenuta in relazione alla natura e pericolosità del fluido contenuto nell'attrezzatura/impianto da proteggere.

Ai fini dell'analisi progettuale sono state esposte le norme e le principali formulazioni da esse previste con l'esplicitazione di tutte le variabili che concorrono al dimensionamento delle valvole di sicurezza.

È stato fornito un esempio applicativo, il fluido scelto è stato il metano, per capire meglio il dimensionamento sotto le ipotesi di incendio e di errore operativo per far comprendere l'interazione tra i due scenari nella scelta del dispositivo di sicurezza in relazione a materiale e a zona ATEX.

Infine, si è passati a declinare le problematiche connesse alle operazioni di taratura andando a definire l'importanza della qualità dei risultati e i possibili sviluppi nella scelta della strumentazione di controllo in ottica 4.0.

In merito alla manutenzione, ritaratura e verifica di efficienza è stato messo in luce come l'intervallo temporale di intervento a qualsiasi titolo debba omogeneizzare le indicazioni dei costruttori con le periodicità imposte da normativa.

7. Bibliografia

[1] Decreto Legislativo 25 febbraio 2000, n. 93 "Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione".

[2] Decreto Ministero Attività Produttive n. 329 del 1° dicembre 2004 "Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'art. 19 del D. Lgs. 25 febbraio 2000, n.93".

[3] Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81 - testo coordinato con il D.lgs. 3 agosto 2009, n. 106 "Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro"

[4] Decreto Interministeriale 11 aprile 2011, "Attuazione dell'articolo 71 del Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81"

[5] Raccolta E; Ispesl: "Specificazioni Tecniche applicative del DM 21 maggio 1974 - Norme integrative del regolamento approvato con R.D. 12 maggio 1927, n. 824, e disposizioni per l'esonero da alcune verifiche e prove stabilite per gli apparecchi in pressione. "

[6] UNI EN 764-7:2004 "Attrezzature a pressione - Sistemi di sicurezza per attrezzature a pressione non esposte a fiamma".

[7] UNI EN ISO 4126-1:2019 "Dispositivi di sicurezza per la protezione contro le sovrappressioni – Parte 1: Valvole di sicurezza"

[8] UNI EN ISO 4126-7:2016 "Dispositivi di sicurezza per la protezione contro le sovrappressioni – Parte 7: Dati comuni"

[9] ISO 4126-10:2010, Safety devices for protection against excessive pressure — Part 10: Sizing of safety valves for gas/liquid two-phase flow

[10] API Standard 520, Sizing, Selection, and Installation of Pressure-relieving Devices

[11] API Standard 521, Pressure-relieving and Depressuring Systems

[12] Ove non espressamente indicato si tratta di immagini individuate da materiale di libero accesso in rete.

Impianto di recupero della CO2 nel ciclo di produzione del ghiaccio secco: descrizione del processo e implementazioni per il Piano Industria 4.0

N. Pedicini¹, T. Pagliuso¹, N. Romagnuolo¹, C. Genta²

¹ Inail

² Dryce

Sommario

L'impianto di recupero CO2, nel ciclo di produzione del ghiaccio secco, è un macchinario installato presso il sito Dryce di Cernusco sul Naviglio (Mi) e messo in servizio durante l'anno 2020.

L'impianto in oggetto recupera la CO2 rilasciata in fase gassosa durante i processi di produzione di ghiaccio secco (anidride carbonica solida) mediante Nr.7 presse di produzione.

Tale CO2 viene captata dall'impianto di recupero ed immessa nuovamente nel ciclo di produzione attraverso un processo di compressione della stessa e successiva condensazione, riducendo drasticamente i consumi di CO2 negli interi processi produttivi di ghiaccio secco, qualsiasi sia il formato prodotto.

1. Premessa

L'emergenza pandemica da COVID19 e la conseguente campagna vaccinale hanno imposto una riorganizzazione senza precedenti, in termini quantitativi e temporali, dei sistemi logistici a livello nazionale. In questo contesto intervengono ulteriori elementi di complessità come quello dovuto alle condizioni di trasporto a $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ di alcuni dei vaccini attualmente disponibili, secondo modalità disciplinate da rigide procedure e con soluzioni di trasporto certificate, che dessero evidenza che la catena del freddo fosse stata rispettata.

L'azienda ha sviluppato un sistema di imballaggio isoteramico che si è rivelato da subito come la migliore risposta alle problematiche sopra accennate, tanto da diventare fornitore esclusivo degli imballaggi per la distribuzione nazionale dei vaccini.



Ma in realtà la richiesta di ghiaccio secco (in campo medico ed alimentare, nei trasporti e nella logistica, ma anche in agricoltura, nei laboratori e nello spettacolo) era cresciuta in maniera importante già molto prima della pandemia. Ciò aveva dunque sollecitato l'azienda a ricercare sistemi che ottimizzassero la produzione dal punto di vista economico ed, al contempo, aderissero alle agevolazioni offerte dal Piano Industria 4.0 sullo sviluppo digitale delle imprese. Di qui dunque l'esigenza di installare un impianto di recupero che permettesse di ridurre notevolmente i rapporti tra Consumo di CO2/Kg di ghiaccio secco prodotto.

2. Descrizione ciclo di produzione

Lo stabilimento è adibito alla produzione ghiaccio secco in diversi formati.

Il ghiaccio secco viene prodotto a mezzo dell'espansione della CO₂ liquida stoccata in due diversi serbatoi, al cui interno la pressione viene mantenuta in un range di lavoro compreso tra i 15 ed i 18 barg, in condizioni di equilibrio con la fase gassosa.

La CO₂, prelevata dai 2 serbatoi in fase liquida, arriva alle presse di produzione attraverso apposite tubazioni di prelievo in acciaio inox, opportunamente coibentate con poliuretano espanso, e rivestite con coppelle di alluminio. L'espansione della CO₂ liquida alla pressione atmosferica, determina la produzione di neve carbonica che viene opportunamente pressata in vari formati, generando, come prodotto finito, il ghiaccio secco.

Durante tale processo di espansione, viene generata CO₂ gassosa che viene espulsa dalle presse di produzione attraverso opportuni scarichi.

3. Comparazione risultati

Il coefficiente di trasformazione della CO₂ dalla fase liquida in ghiaccio secco, senza impianto di recupero, è pari a 2,5/3 ad 1: ossia è necessario utilizzare 2,5/3Kg di CO₂ per produrre 1Kg di ghiaccio secco. In altri termini, la produzione di 1Kg di ghiaccio secco genera un quantitativo di CO₂ in fase gassosa pari a 1,5-2 Kg che normalmente viene liberato in atmosfera.

L'implementazione dell'impianto di recupero di CO₂, opportunamente dimensionato in funzione delle produttività medie giornaliere nei periodi di picco produttivo, permette dunque di riutilizzare questi 1,5-2 Kg che normalmente, senza recupero, verrebbero liberati in atmosfera.

La CO₂ recuperata, infatti, viene reimpressa in fase liquida nei serbatoi di stoccaggio attraverso un apposito ciclo termofluidodinamico, ottenendo come risultato finale un abbattimento di tale rapporto dal valore 2,5/3Kg ad 1 ad un valore pari a 1,2/1,3Kg ad 1.

In altri termini, con l'utilizzo dell'impianto di recupero, è possibile trasformare in ghiaccio secco la quasi totalità della CO₂ stoccata nei serbatoi.

Di seguito si sintetizzano i rapporti di produzione (Ratio) e le efficienze, senza e con impianto di recupero.

	Ratio di produttività (per 1Kg di ghiaccio secco prodotto)	Efficienza di produzione
Ciclo di produzione ghiaccio secco senza Impianto di Recupero	2,5/3	Dal 33 al 40%
Ciclo di produzione ghiaccio secco con Impianto di Recupero	1,2/1,3	Dal 77 all'83%

Tabella 1. Comparazione risultati in termini di efficienza

Con il processo di recupero della CO₂ e, nell'ambito di tale processo, con l'adozione e lo sviluppo di sistemi digitali di controllo e gestione l'azienda, come detto, ha raggiunto l'obiettivo di ottenere le agevolazioni fiscali contemplate dal Piano Industria 4.0. Ma è doveroso considerare anche l'importante vantaggio rappresentato dalla riduzione dei costi sostenuti per l'approvvigionamento della stessa materia prima. Infatti il costo della CO₂, per un'azienda come quella in esame, che annovera tra le sue consociate aziende produttrici di CO₂, si aggira normalmente intorno ai 90 euro/tonnellata, per arrivare, nel periodo estivo, fino a 180 euro/tonnellata nei periodi estivi, dovuti all'elevata richiesta che supera spesso la disponibilità con conseguente approvvigionamento dall'estero. Di seguito si riporta la tabella di sintesi dove si evince il costo della CO₂ recuperata, con un costo medio nel 2021 di circa

63€/Tonnellata.

	Quantità CO2 recup.	Costo En. Elettrica	Consumo specifico di En.Elettr	Consumo specifico di CO2 durante produzione	Efficienza di gestione della produzione	Costo unitario CO2 recuperata	Saving
	[Kg]	€	[Kwh/kg]	[(acq-resid) /spedita]	%	[€/kg]	[€]
GEN	244.784	6.420,81	0,16923	1,76	62%	0,060	17.177,83
FEB	299.550	7.819,00	0,16840	1,74	71%	0,054	22.899,22
MAR	360.797	9.323,38	0,16672	1,68	80%	0,049	29.356,95
APR	321.294	8.486,66	0,17041	1,62	70%	0,073	18.279,45
MAG	385.677	10.288,80	0,17211	1,67	80%	0,066	24.847,10
GIU	425.887	11.689,48	0,17708	1,70	78%	0,063	28.673,71
LUG	419.796	12.699,77	0,19518	1,90	75%	0,066	26.871,60
AGO	359.335	10.583,69	0,19002	In elab	In elab	0,071	21.127,74

Tabella 2. Sintesi risultati consuntivati relativi a consumi e specifici CO2

4. Descrizione Impianto di recupero CO2

L'impianto di recupero CO2 è costituito dai seguenti macro componenti:

- Nr.1 pallone di accumulo della CO2 che proviene dalle tubazioni di scarico;
- Nr.1 blocco di liquefazione della CO2 recuperata
- Nr.1 torre evaporativa a circuito chiuso;
- Nr.1 impianto di trattamento acqua di reintegro della torre evaporativa;
- Sistema di rilevazione concentrazione CO2;
- Sistema di monitoraggio ed acquisizione parametri di funzionamento per valutazione efficienza energetica dell'impianto;
- Piping in tubazioni in materiale plastico per il collegamento degli scarichi delle presse di produzione al pallone di accumulo;
- Piping in acciaio inox per il collegamento dei vari componenti costituenti l'impianto di recupero;
- Piping in acciaio al carbonio verniciato per il collegamento della torre evaporativa al liquefattore;
- Piping in acciaio inox per il collegamento del liquefattore ai serbatoi di stoccaggio CO2 (nr.2);
- Piping in acciaio zincato per il collegamento dell'impianto di trattamento acqua alla torre evaporativa.

Il progetto ha reso necessario la realizzazione delle seguenti opere:

- Realizzazione e potenziamento parte elettrica per supportare i carichi necessari al funzionamento dell'impianto;
- Realizzazione platea di alloggio sala macchine, all'interno della quale verranno installati i gruppi di compressione e liquefazione;
- Realizzazione platea di alloggio torre evaporativa e impianto trattamento acque;
- Realizzazione sala macchine, in struttura in acciaio zincato con pannelli laterali e superiore in materiale fonoassorbente, con finitura esterna ed interna in lamiera.

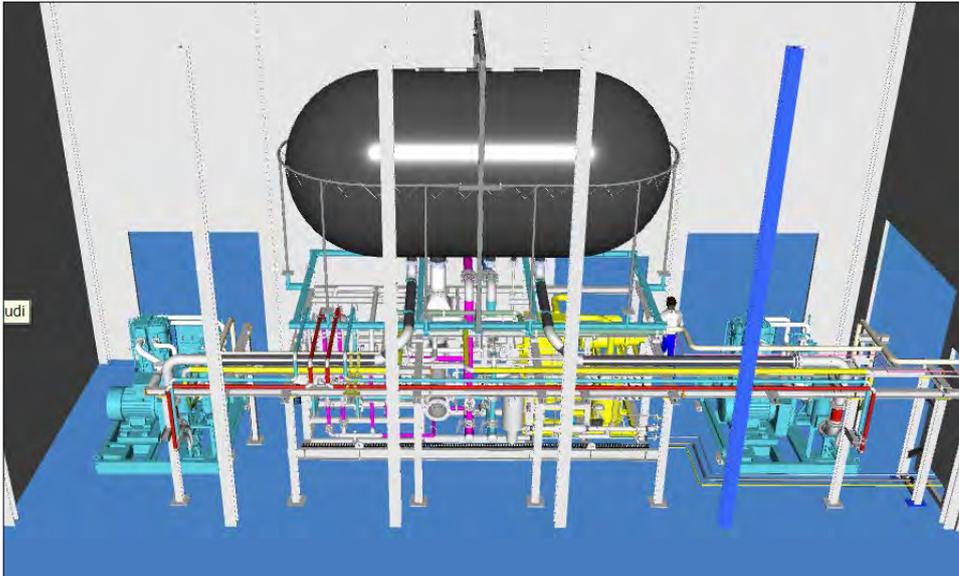


Immagine 1. Render 3D impianto recupero



Pallone accumulo
CO2 gassosa

Immagine 2. Pallone di accumulo CO2



Immagine 3. Compressore CO2 doppio stadio con Piping

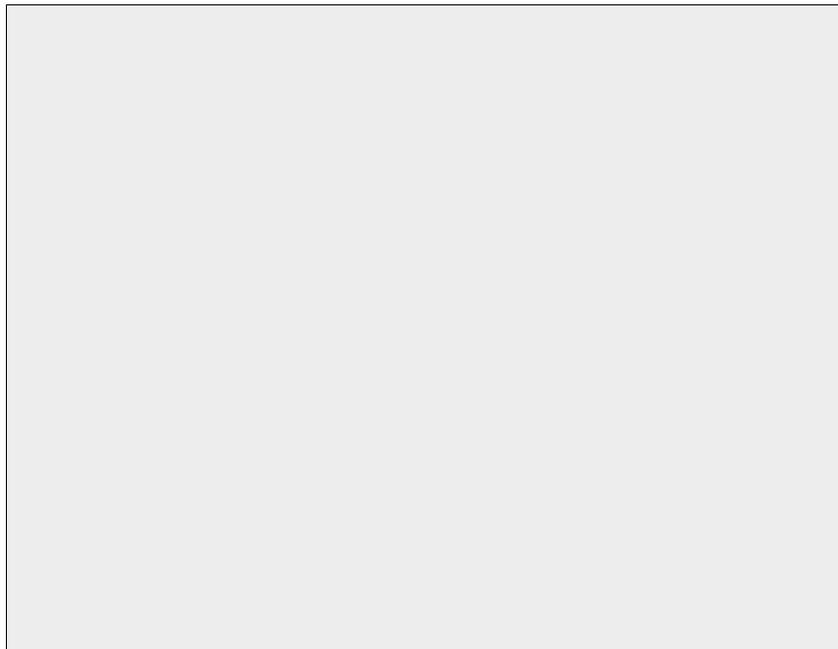


Immagine 4. Serbatoi e Torre Evaporativa

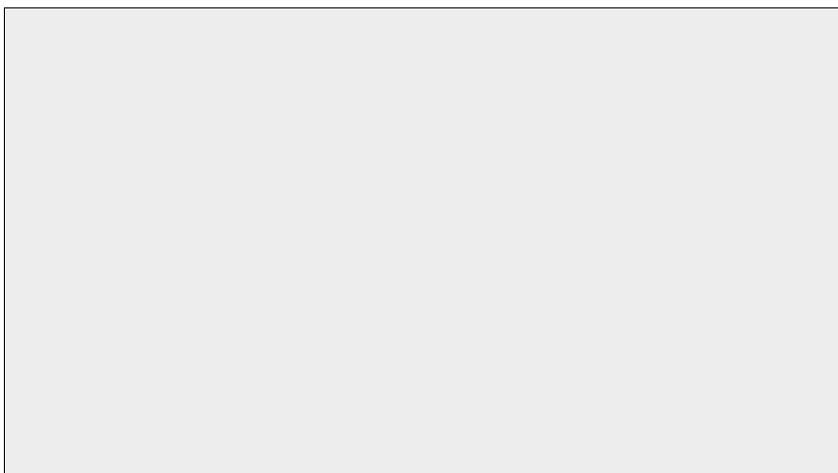


Immagine 5. Unità di condensazione

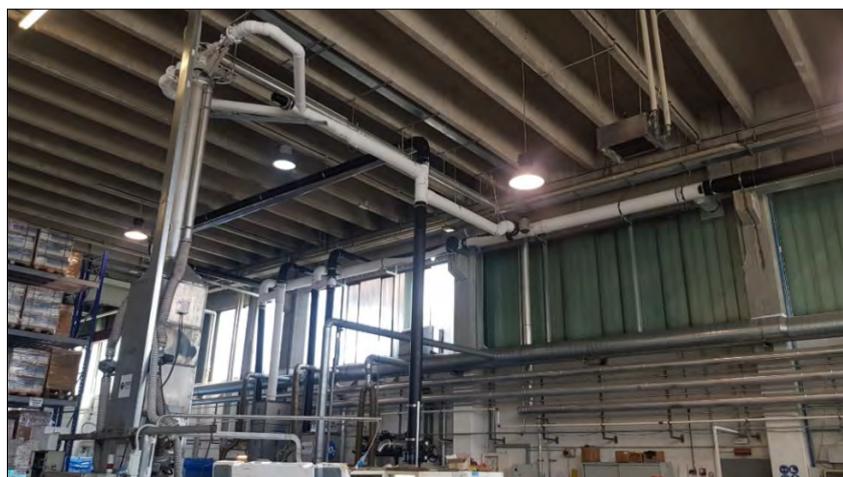


Immagine 6. Linee di Scarico CO2 Gassosa



Immagine 7. Quadro elettrico con Touch Screen di comando



Immagine 8. Vista Esterna Sala Macchine

La CO₂ in fase gassosa proveniente dalla produzione di ghiaccio secco viene captata attraverso apposite tubazioni di convogliamento, collegate alle tubazioni di scarico delle macchine, all'interno di un pallone di accumulo installato all'interno della sala macchine. La CO₂ gassosa così confinata viene compressa attraverso un compressore per CO₂ a pistoni a doppio stadio, con scambiatori ad acqua di fine primo e secondo stadio: la CO₂ viene prima compressa ad un valore di circa 3-3,5 barg, poi raffreddata e successivamente compressa a circa 16-19 bar e poi nuovamente raffreddata. Successivamente la CO₂ viene fatta attraversare da uno scambiatore a piastre: da un lato arriva la CO₂ da liquefare, dall'altro, in controcorrente, un fluido refrigerante in espansione. All'interno dello scambiatore la CO₂ viene liquefatta e sottoraffreddata e successivamente inviata al serbatoio di stoccaggio.

Il refrigerante utilizzato per il processo di scambio termico all'interno dello scambiatore a piastre entra all'interno dello scambiatore in una condizione di vapore saturo con un titolo della fase liquida ancora alto, ad una pressione equivalente ad una temperatura di espansione di circa -40°C, determinando la liquefazione ed il successivo sottoraffreddamento della CO₂. L'energia trasmessa alla CO₂ per la liquefazione è quella necessaria al completamento del passaggio di fase del refrigerante, da quella liquida a quella gassosa.

Il ciclo di funzionamento del liquefattore può essere così schematizzato: Il refrigerante viene compresso tramite un apposito compressore, successivamente condensato e sottoraffreddato per mezzo del passaggio dello stesso all'interno di un condensatore ad acqua (proveniente dal circuito chiuso della torre evaporativa). Successivamente il refrigerante attraversa la valvola termostatica elettronica con la conseguente espansione dello stesso fluido. Il successivo passaggio attraverso lo scambiatore a piastre (attraverso cui avviene la liquefazione della CO₂) ne determina il completo passaggio di fase ed il successivo surriscaldamento, prima dell'ingresso nuovamente nel compressore.

La torre evaporativa a circuito chiuso utilizza una miscela di acqua e glicole propilenico per raffreddare la CO₂ all'interno degli scambiatori di primo e secondo stadio del compressore a pistoni e per condensare il refrigerante del liquefattore all'interno dell'apposito condensatore ad acqua.

Tale miscela viene inviata a tali utenze a mezzo di apposita pompa. Tale miscela, all'interno della torre evaporativa, attraversa apposite tubazioni di raffreddamento all'esterno delle quali viene nebulizzata acqua opportunamente trattata, prelevata da una vasca di accumulo posizionata sul fondo della torre evaporativa. Apposite ventole posizionate sulla parte alta della torre, aspirando dall'interno della torre facilitano la vaporizzazione dell'acqua nebulizzata presente all'esterno di tali tubazioni, (per mezzo della variazione di temperatura

esistente tra condizioni di bulbo umido e condizioni di bulbo asciutto). Il risultato del raffreddamento di tali tubazioni è quello di abbassare la temperatura della miscela, operante all'interno del circuito chiuso, che successivamente viene di nuovo inviata al compressore e liquefattore.

Durante il funzionamento, l'acqua del circuito secondario di raffreddamento, accumulata nell'apposita vasca sul fondo della torre, viene reintegrata, a causa della sua vaporizzazione dovuta al processo di scambio termico per il raffreddamento sopradescritto, con acqua opportunamente trattata da un impianto di trattamento acqua.

Tale impianto di trattamento acqua risulta costituito da un filtro in cotone per l'eliminazione del particolato solido, da una batteria di 2 colonne di addolcimento in scambio, da un serbatoio di accumulo di una soluzione marina (salamoia) e da un sistema di dosaggio di un prodotto antibatterico e di un antialghe. Tali prodotti vengono dosati in funzione dei litri di acqua che vengono utilizzati.

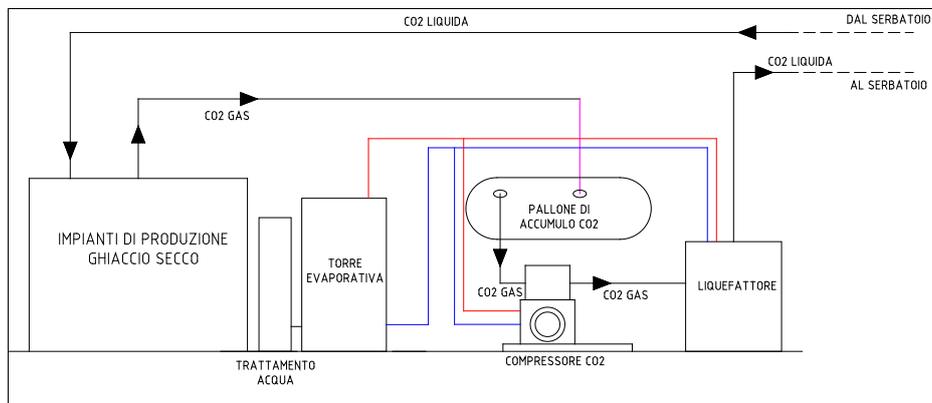


Immagine 9. Schematizzazione impianto

5. Schema funzionale impianto

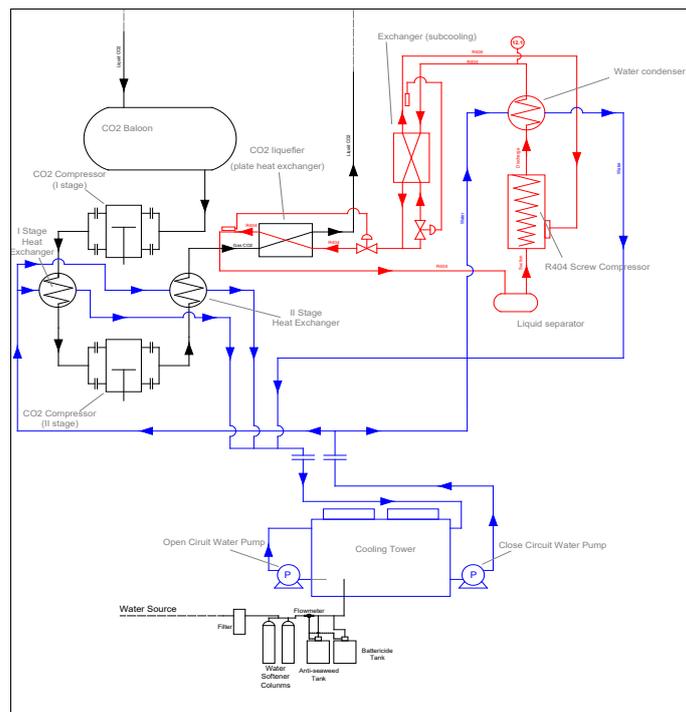


Immagine 10. Schema Funzionale Impianto P&Id

6. Industria 4.0: soddisfacimento requisiti

L'impianto è stato progettato e realizzato per poter soddisfare i requisiti richiesti dal Piano Industria 4.0, che si traduce in sostanza in una serie di misure, incentivi economici e agevolazioni per lo sviluppo digitale delle imprese.

Il sistema incentivante prevede un recupero delle spese sostenute per l'acquisto dei macchinari, sotto forma di Credito di Imposta, secondo le seguenti aliquote:

- Per spese inferiori a 2,5 milioni di Euro: aliquota al 50% nel 2021 e 40% nel 2022;
- Per spese superiori a 2,5 milioni di Euro e fino a 10 mln: aliquota al 30% nel 2021 e 20% nel 2022;
- Per spese superiori a 10 milioni di Euro e fino a 20 milioni: aliquota al 10% nel 2021 e nel 2022

Tutte le macchine per le quali si richiede l'accesso all'incentivo di cui sopra, devono rispettare i requisiti richiamati in Allegato A della Legge 11.12.2016, n. 232 e segnatamente:

- a. Controllo per mezzo di CNC (Computer Numerical Control) e/o PLC (Programmable Logic Controller),
- b. Interconnessione ai sistemi informatici di fabbrica con caricamento da remoto di istruzioni e/o part program,
- c. Integrazione automatizzata con il sistema logistico della fabbrica o con la rete di fornitura e/o con altre macchine del ciclo produttivo,
- d. Interfaccia tra uomo e macchina semplici e intuitive,
- e. Rispondenza ai più recenti parametri di sicurezza, salute e igiene del lavoro.

Inoltre tutte le macchine devono essere dotate di almeno due tra le seguenti caratteristiche per renderle assimilabili o integrabili a sistemi cyber fisici:

1. Sistemi di tele manutenzione e/o telediagnosi e/o controllo in remoto;
2. Monitoraggio continuo delle condizioni di lavoro e dei parametri di processo mediante opportuni set di sensori e ad attività alle derive di processo;
3. Caratteristiche di integrazione tra macchina fisica e/o impianto con la modellizzazione e/o la simulazione del proprio comportamento nello svolgimento del processo (sistema cyber fisico).

Punto a) e Punto d) L'impianto oggetto di questa presentazione, è dotato di un sistema di controllo a mezzo di un apposito PLC integrato con il pannello di controllo. L'interfaccia grafica permette un intuitivo controllo e monitoraggio dei parametri.

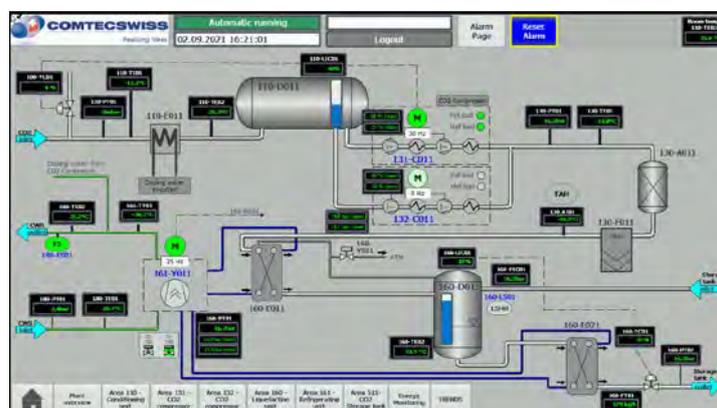


Immagine 11. Vista Touch Screen Impianto

L'impianto inoltre risulta essere collegato attraverso scheda GSM ad un server remoto, dal quale è possibile interrogare la stessa macchina, fornendo comandi e monitorando i

parametri di lavoro in continuo che ne determinano il corretto funzionamento, permettendo dunque di effettuare anche operazioni di telemanutenzione (Requisiti aggiuntivi 1 e 2, necessari a rendere l'impianto assimilabile o integrabile a sistema cyber fisici).

Punto b) La circolare n° 295485 del 01/08/2018 consente l'esclusione da tale prescrizione nel caso in cui il macchinario abbia un funzionamento del tipo ON/OFF. In tale circostanza, non è necessario che lo stesso possa ricevere part program o istruzioni da remoto, ma che sia solo in grado di trasferire informazioni in uscita dallo stesso quali ad esempio lo stato di funzionamento della macchina e relativi parametri.

Punto c) Al fine di garantire il rispetto alle prescrizioni legislative, si è reso necessario, pertanto, predisporre un Software MES (Manufacturing Execution System), preposto alla comunicazione e alla trasmissione delle informazioni tra macchina e gestionale aziendale. In particolare si è provveduto a sviluppare un software di gestione in grado di monitorare in automatico la quantità di CO2 recuperata e trasferire tale valore al gestionale per una corretta gestione delle giacenze in magazzino.

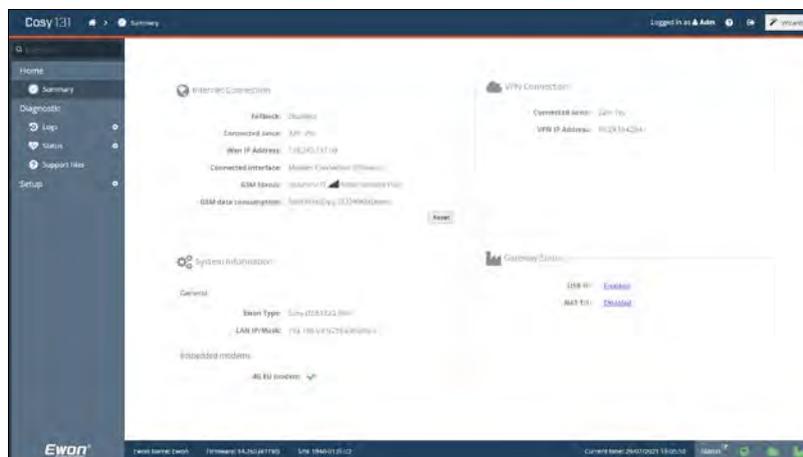


Immagine 12. Parametri di connessione

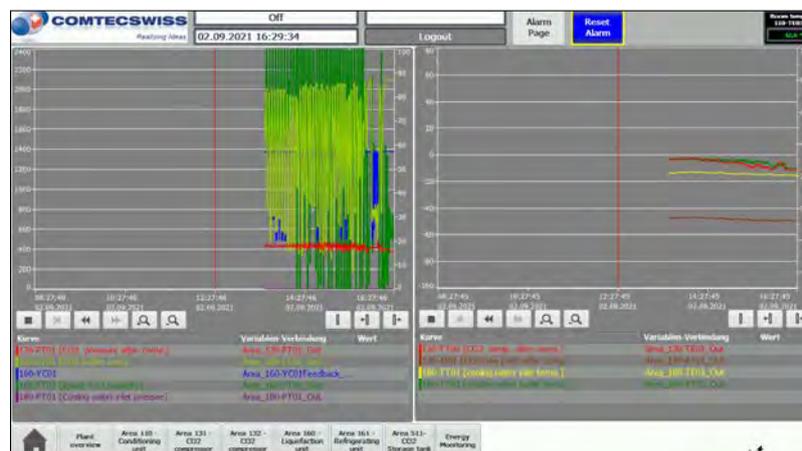


Immagine 13. Monitoraggio in continuo Parametri di lavoro

In tal modo vi è una movimentazione di magazzino generata in automatico che consente la gestione e la conoscenza dei quantitativi recuperati. In questo modo è possibile, dunque, monitorare anche i consumi specifici dell'impianto, e l'efficienza delle operazioni di recupero.

Punto e): L'impianto è dotato di marcatura CE e risponde ai più recenti parametri di sicurezza, salute e igiene del lavoro. Essendo un impianto complesso e costituito da più macchine, la dichiarazione di conformità è stata rilasciata come "insieme" comprensivo del Piping di collegamento tra le differenti unità e conformemente alle prescrizioni relative alle Direttive applicabili quali ad esempio Direttiva Macchine, Direttiva PED.

7. Conclusioni

Si conclude con la notizia che, nel periodo di stesura della presente memoria, l'azienda ha ottenuto da un ente di certificazione indipendente l'Attestato di Conformità ai sensi dell'Allegato A della Legge 11.12.2016, n. 232, che certifica la rispondenza dell'impianto descritto ai requisiti di Industria 4.0.

 	
Attestato di Conformità	
Attestato N. ICIM-0296-001-A	
<small>Al sensi della Legge di Bilancio Legge 11 dicembre 2016, n. 232, Legge 27 dicembre 2017, n. 201, Legge 30 dicembre 2019, n. 145, Legge 27 dicembre 2019, n. 192 e legge 30 dicembre 2020, n. 178, riguardanti l'acquisto di beni strumentali finalizzati alla trasformazione tecnologica e innovativa Industria 4.0.</small>	
ICIM S.p.A. Piazza Don Enrico Mapelli, 75 – 20099 Sesto San Giovanni (MI) - Italia	
Attesta che il bene materiale acquisito dall'Azienda	
Dryce S.r.l.	
Via Aosta, 5 20063 Cemusco sul Naviglio (MI)	
INSTALLATO PRESSO L'UNITÀ OPERATIVA Via Aosta, 5 20063 Cemusco sul Naviglio (MI)	
IDENTIFICATO COME	
Impianto Recupero CO₂ Marca Comtecswis; Modello CO2-Recovery Plant/ Liquefaction Unit; Matricola I2000 / S1	
RICADENTE NELLA CATEGORIA DELL'ALLEGATO A ALLA LEGGE 11 DICEMBRE 2016, N. 232 E S.M.I.	
Beni strumentali il cui funzionamento è controllato da sistemi computerizzati o gestito tramite opportuni sensori e azionamenti macchine e impianti per la realizzazione di prodotti mediante la trasformazione dei materiali o delle materie prime	
Possiede caratteristiche tecniche tali da includerlo negli elenchi di cui all'allegato A alla Legge 11/12/2016, n. 232 e s.m.i. ed è interconnesso ai sistemi aziendali di gestione della produzione.	
IL PRESENTE ATTESTATO È ACCOMPAGNATO DAL DOCUMENTO DI ANALISI TECNICA N. ICIM 0296-001-RT	
<small> ICIM S.p.A. - Piazza Don Enrico Mapelli, 75 - 20099 Sesto San Giovanni (MI) Capitale Sociale € 200.000.000,00 i.v. - Registro Imprese C.F. P. 04441900963 - R.G. Imprese C. 08003070151 - R.E.A. n. MI-1905282 Società soggetta all'attività di direzione e coordinamento ICIM GROUP S.p.A. </small>	

Questo attestato di conformità testimonia l'individuazione, nella platea a cui fa riferimento il modello Industria 4.0, di una tipologia di impianti che si discostano dalle logiche standard di automazione, tipiche dei processi di produzione in serie (vedi ad esempio il settore automotive, alimentare, della logistica o l'industria della plastica e della carta).

* * * * *

La tecnologia precedentemente illustrata, nei termini in cui è stata descritta e in cui viene effettivamente utilizzata, è attualmente impiegata dagli stabilimenti Dryce. Non si è in grado di riferire se, ad oggi, altri produttori hanno messo a punto un siffatto processo di recupero né tantomeno se eventualmente si avvalgono di sistemi digitali di controllo e gestione.

8. Bibliografia

- [1] Documentazione interna Dryce
- [2] Legge 11.12.2016, n. 232 (Allegato A)
- [3] Decreto legislativo 29/12/2016 n. 243.

Reattore di idrogenazione analisi dei rischi, vita consumata e vita utile

F. Taurasi¹, G. Vaccaro², P. Marcantonio³

¹ Inail - Uot di Campobasso

² Inail - Uot di Potenza

³ Momentive Termoli

Sommario

Il presente lavoro descrive delle attività di verifica strutturali eseguite su un reattore di idrogenazione in servizio dal 1982, volte ad allungare la vita residua in conseguenza dei ripetuti cicli termici della macchina dovute alle diverse fasi di produzione (fatica). Viene studiato il comportamento del reattore di idrogenazione in acciaio al carbonio con rivestimento interno in Nichel, che lavora in un campo operativo di pressione da sottovuoto a 50 Kg/cm². Il reattore ha un iniettore di spargimento Idrogeno che viene immesso sotto le pale dell'agitatore per venire disperso nel liquido. Nel reattore, il prodotto della reazione del CNE con Idrogeno in presenza di Ammoniaca, si svolge sopra i 150°C a 40 Kg/cm² ed è catalizzata con Nichel.

1. Descrizione processo di idrogenazione

Nel reattore di idrogenazione denominato D401 vengono effettuate due produzioni denominate A1102 e A1110 crudo. L'A1102 e l'A1110, (crudo di 3-aminopropiltrirossisilano) è il prodotto della reazione del CNE o CNM con Idrogeno in presenza di Ammoniaca. In questa reazione il gruppo nitrile è convertito in gruppo amminico primario: è una reazione di riduzione. Il reattore viene riscaldato a 150°C, e la reazione avviene alimentando Idrogeno. Questa reazione è moderatamente esotermica. La temperatura del reattore è controllata dal raffreddamento fornito da una serpentina in cui circola acqua e controllando la velocità di alimentazione dell'Idrogeno. La presenza di Ammoniaca è necessaria a spostare l'equilibrio a favore della formazione dell'Ammina primaria evitando la formazione di ammina secondaria (Bis) e di ammina terziaria (pesanti). Una volta che la reazione è completata, l'A1102/A1110 crudo viene raffreddato a 30°C e trasferito all'Item D407 e poi filtrato in C 410.

• Utilizzazione del Prodotto Finito

- L'A1102 è un prodotto atto a promuovere l'adesione tra substrati inorganici e polimeri organici amminoreattivi, utilizzato anche come materia prima per A1102 HPO, A1100 e A1106.
- L'A1110 è un prodotto atto a promuovere l'adesione tra substrati inorganici e polimeri organici amminoreattivi.



Figura 1. Particolare del reattore di idrogenazione con la camicia interna



Figura 2. Aspetto interno del reattore di idrogenazione con la camicia interna

2. Descrizione reattore idrogenazione

Il reattore di idrogenazione con Item D401 è in acciaio al carbonio con un rivestimento interno in Nichel. Ha una capacità lorda di 5 m³. Il volume disponibile per la reazione, tenuto conto della presenza dell'agitatore e delle serpentine acqua e vapore, è di 4.75 m³. Il livello a cui opera normalmente è circa 4.0 m³. Ha un campo operativo di pressione da

sottovuoto a 50 Kg/cm². Il reattore ha una serpentina interna di raffreddamento, X-401-C, in cui circola acqua. Il raffreddamento è controllato da TV-401-12B. Il reattore ha anche una serpentina interna di riscaldamento, X-401-B che usa vapore a 17.8 Kg/cm² ed è controllato da TV-401-12A. Le serpentine sono testate ogni 10 anni. Il reattore ha un iniettore di spargimento Idrogeno, X-401-D. L'Idrogeno viene immesso sotto le pale dell'agitatore ove viene immediatamente disperso nel liquido. Il reattore ha un indicatore di livello riportato a quadro in sala controllo. La sonda dello strumento non copre tutta l'altezza del serbatoio ma fornisce l'indicazione in un campo ristretto. Normalmente dopo il riempimento con CNE dovrebbe essere al 10%. Il livello serve anche come blocco di riserva per il totalizzatore del CNE. Quando il livello raggiunge 85% si chiude la valvola di carico CNE, HV-401-59. Il reattore è protetto da un disco di rottura PSE-401-39 seguito da una valvola di sicurezza PSV-401-37 nella stessa linea. Il set di ambedue, disco e PSV, è di 50 Kg/cm². Il disco di rottura è necessario per proteggere in modo adeguato l'apparecchiatura, in considerazione anche del fatto che è sempre presente Idrogeno e per il tipo di prodotti presenti nel reattore. La PSV viene utilizzata per prevenire una completa perdita di pressione del reattore che avverrebbe con la rottura del PSE. Con questo tipo di installazione potrebbe anche verificarsi che il PSE si rompa senza che ce ne accorgiamo. È stato allora installato tra PSE e PSV il pressostato PSH-401-16 che attiva un allarme in sala quadri nel caso in cui il tratto di linea fra PSE e PSV aumenti di pressione. Se il disco si rompe, la reazione va immediatamente interrotta e il reattore ventato. Il PSE va sostituito; la PSV va ispezionata alla prima fermata programma. Il reattore ha un indicatore di pressione PI-401-10 riportato a quadro con una soglia di blocco, PSHH-401-10, settata a 46 Kg/cm² che chiude la valvola d' immissione Idrogeno. Esso ha anche il PSH-401-10 con set a 4.5 Kg/cm² che chiude la valvola di scarico reattore HV-401-14 (HV401-61) e la valvola di addizione catalizzatore HV-403-2. L'agitatore del reattore con item B 402 ha l'albero e le pale costruite in acciaio al Nichel ed è stato progettato per una vigorosa agitazione in modo da tenere il Nichel sempre in sospensione e l'Idrogeno disperso nel liquido. L'agitatore è equipaggiato con tenute meccaniche doppie. Le tenute hanno olio all'interno come fluido di tenuta. L'olio è fornito a 60 Kg/cm² dal sistema di "distribuzione olio tenuta" con Item X402-A. Le tenute hanno una serpentina di raffreddamento all'interno del vano olio. Tra le varie attività di gestione, bisogna accertarsi sempre che nella serpentina circoli acqua di raffreddamento. Il sistema X402-A fornisce olio alla tenuta dell'agitatore, esso ha un serbatoio in cui viene stoccato l'olio di tenuta. L'olio dal tank passa attraverso un filtro a cartuccia e va alle pompe di carico.

3. Analisi termica

Lo studio copre l'analisi termica per la definizione della distribuzione di temperatura e degli stress termici nel reattore D-0401 dovuti ai cicli di riscaldamento e raffreddamento definiti nelle specifiche di progetto, più un'analisi strutturale a fatica per la validazione dell'apparecchio soggetto alle oscillazioni di temperatura e pressione interne. Il calcolo è stato effettuato per mezzo di un'analisi agli elementi finiti (FEA) su un modello geometrico 3D realizzato col software SolidWorks v.2013 SP.2 e in accordo al codice di calcolo ASME VIII Div.2 Ed.2017 [C1]. L'analisi numerica viene effettuata col software FEMAP FEMAP v.12.0.1, usando NX Nastran v.12.0 come solutore.

Due condizioni di carico possono essere definite (dati dal report di calcolo):

1. Pressione Interna Operativa

✚	Pressione interna operativa	$P_{operativa} = 43 \text{ bar(g)}$
✚	Pressione interna operativa nel bocchello B	$P_{operativa, B} = 35 \text{ bar(g)}$
✚	Precarico bulloni	$F_{precarico \text{ bulloni}} = 9'308'911 \text{ N (totale)}$
✚	Peso a vuoto	trascurabile
✚	Tolleranza di corrosione	$c = 0.0 \text{ mm}$

2. Transitorio Termico

✚	Coefficiente di scambio termico parete-fluido	$h = 623 \text{ W/m}^2/\text{°C}$
✚	Condizione iniziale di temperature interna	$T_{IC} = 25 \text{ °C}$
✚	Transitorio termico	See Tabella 1.1
✚	Tolleranza di corrosione	$c = 0.0 \text{ mm}$
✚	Riporto di saldatura	$W.O. = 3.0 \text{ mm}$



Figura 3. Modello geometrico completo

Transitorio di Temperatura			
Tutto l'apparecchio in contatto col fluido tranne la superficie interna del bocchello B		Superficie interna del bocchello B	
Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura
0 h / 0 s	25 °C	0 h / 0 s	25 °C
1 h / 3'600 s	25 °C	1 h / 3'600 s	25 °C
2.75 h / 9'900 s	164 °C	2.67 h / 9'600 s	180 °C
4.75 h / 17100 s	164 °C	4.75 h / 17100 s	180 °C
5.25 h / 18'900 s	60 °C	5.25 h / 18'900 s	60 °C
6 h / 21'600 S	25 °C	6 h / 21'600 S	25 °C
8 h / 28'800 S	25 °C	8 h / 28'800 S	25 °C

Tabella 1. Storia della temperatura

Il modello geometrico 3D è realizzato in condizioni corrose e tollerate (0 mm di tolleranza di corrosione, 3 mm di riporto di saldatura), e include i seguenti componenti di interesse per la presente analisi.

I valori di spessore sono presi come i minimi tra quelli nominali da disegni e quelli provenienti dal rapporto spessimetrico. Il riporto di saldatura viene considerato nell'analisi termica al fine di ottenere una miglior valutazione della mappa termica, poiché ha proprietà meccaniche e termiche differenti rispetto al materiale base. Non è invece considerato nell'analisi degli sforzi, dal momento che non contribuisce alla resistenza dell'apparecchio.

4. Risultati e conclusioni

Per il reattore di idrogenazione è stato effettuato un calcolo per mezzo di un'analisi agli elementi finiti (FEA) e in accordo al codice di calcolo ASME VIII Div.2 Ed.2017. Le massime differenze di temperatura, e quindi anche i massimi stress termici, appaiono durante la fase di riscaldamento e durante quella di raffreddamento. La distribuzione risultante di temperatura è stata usata per calcolare i relativi sforzi. Lo studio copre l'analisi termica per la definizione della distribuzione di temperatura e degli stress termici dovuti ai cicli di riscaldamento e raffreddamento, più un'analisi strutturale a fatica per la validazione dell'apparecchio soggetto alle oscillazioni di temperatura e pressione interne.

Il numero di cicli effettuato fino ad oggi (dal 1982) è pari a 22200 (conservativamente 600 cicli/anno per 38 anni di servizio), quindi molto inferiore a 98500, che è il massimo numero di cicli ammesso, calcolato nella relazione in base alla norma UNI/TS 11326-11.

Anche se il rapporto tra vita consumata e vita utile è piuttosto basso, è indubbio che il reattore sia in funzione da molti anni (38 anni). Al fine di evitare rotture e perdite, con conseguenti danni per le persone e l'ambiente, sono stati predisposti una serie di azioni che possano garantire il buono stato dei materiali, degli spessori e dei giunti saldati. Inoltre sono state previste: analisi spessimetrica (verifica degli spessori); Verifica superficiale delle saldature tramite "liquidi penetranti" (DPT); Verifica volumetrica delle saldature tramite controlli ultrasonori e/o radiografici (USD / RX). Quindi si sono messi in campo altre valutazioni strutturali aggiuntive data la vetustà del reattore. In caso si riscontrino difetti si valuta di provvedere alla riparazione ai sensi dell'art. 14 del D.M. 329/2004, secondo

quanto prescritto dalla Raccolta VSR dell'ISPESL. Inoltre dato gli anni di esercizio già avanzati si è concluso di eseguire il prossimo controllo entro 5 anni e non in occasione delle verifiche di integrità come fatto fin ora e vale a dire ogni 10 anni.

Riepiloghiamo qui sotto i dati di calcolo

CICLI DI FATICA			
Numero di cicli a fatica (avviamenti/spegnimenti, ecc.)	Da caldo: 600/anno	Da tiepido: Nessuno	Da freddo: Nessuno
Temperatura massima nel ciclo	164°C		
Temperatura minima nel ciclo	20°C		
Pressione massima nel ciclo	43 bar(g)		
Pressione minima nel ciclo	0.0 bar(g)		

ELENCO DEI PRINCIPALI COMPONENTI ESERCITI IN REGIME DI FATICA OLIGOCICLICA

CALCOLI

NORME UTILIZZATE	
Indicare norma di provenienza dati a fatica (ASME, EN, ecc.)	ASME B&PVC Sect. VIII Div.2 Ed.2017
Indicare norma calcolo sollecitazione di esercizio (VSR/VSG, ASME, TRD, EN, ecc.)	VSR / VSG
Metodo di conteggio dei cicli	Monitoraggio produzione
Norma di calcolo adottata per il calcolo a fatica	ASME VIII Div.2 – Par. 5.5.2

VALUTAZIONE E CONSIDERAZIONI FINALI	
Cicli residui	76'300 cicli
Ore di ulteriore esercizio prescritte	610'400 h
Prescrizioni particolari per l'esercizio (monitoraggio, manutenzione, declassamento delle condizioni di bollo, variazioni delle condizioni di processo, ecc.)	Nessuno
Azioni correttive da intraprendere (sostituzioni, riparazioni, ecc.)	Controllo con liquidi penetranti sulle superfici interne a supporto da ultrasuoni già in essere su superfici esterni
Riconrollo entro	5 anni
Note: Fin dall'entrata in servizio dell'apparecchio, sono stati eseguiti controlli visivi delle superfici esterne e dei giunti flangiati ogni 5 anni e controlli interni tramite personale qualificato CND coincidenti con le prove decennali di integrità.	

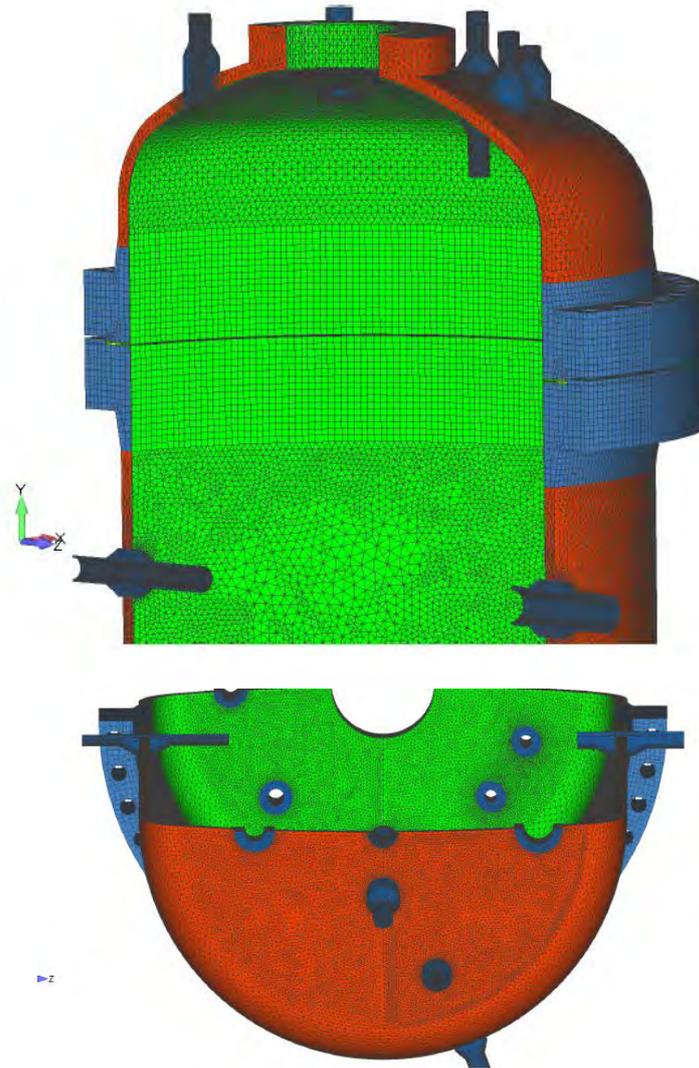


Figura 4. Modello numerico

5. Bibliografia

- [1] Raccolta VSR
- [2] OFFICINE LUIGI RESTA S.p.a. – 2023A Rev.6 (Disegno d'assieme e disegno di dettaglio)
- [3] OFFICINE LUIGI RESTA S.p.a. – 2023B Rev.4 (disegno di dettaglio)
- [4] ASME VIII Div.2 Ed. 2017, Part 5 (Design by Analysis Requirements)
- [5] ASME VIII Div.2 Ed.2017, Annex 3.F
- [6] ASME II Part D Ed. 2017 [C4] – Pressure Equipment Directive 2014/68/EU (PED)
- [7] UNI/TS 11325-11

Automazione del processo della verifica della ritaratura delle valvole di sicurezza

F. Di Rocco¹, F. Panin², E. Artenio³

¹ Inail – Uot di Verona

² Inail – Uot di Padova

³ Inail – Dit

Sommario

Durante le istituzionali verifiche della taratura di accessori di sicurezza, alcuni centri di taratura, o distributori di combustibile, con volumi di valvole da tarare considerevoli, si sono rivelati spesso incuranti di elementi come la periodica taratura degli strumenti e la riferibilità metrica; inoltre capita che l'associazione *Valvola di Sicurezza (VS) - Certificato di taratura - Dichiarazione di conformità del tipo di VS* non sia sempre corretta.

Per un centro di taratura di VS per GPL si è proposto quindi di pensare ad un banco di marcatura semiautomatico, o anche automatico, che innanzitutto creasse una valvola virtuale definita da tutte quelle grandezze caratteristiche presenti su valvola e certificato.

Uno sviluppo di questo sistema dà la possibilità, al centro di taratura, di pubblicare i dati di ogni valvola dal proprio server, in modo tale che ogni valvola, scansionato il marchio con uno smartphone, possa essere riconosciuta con tutti i dati ad essa collegati certificato di taratura compreso.

Creata l'oggetto virtuale si è suggerito di introdurre la valvola fisica in un banco di taratura e verifica della stessa, di tipo automatico (o semiaut.), con rilievo di identificativo, affinché l'oggetto virtuale venisse arricchito di quei dati relativi alla taratura.

Uno sviluppo di questo sistema darebbe la possibilità, al centro di taratura, in aggiunta a quanto già realizzato dal primo banco, di integrarsi direttamente con la piattaforma istituzionale, il CIVA, rendendo più rapidi molti passaggi.



Figura 1. Marcatura con QR Code di VS x GPL, leggibile con qualunque smartphone riporta al verbale di taratura

Ogni tipo di marcatura porta vantaggi e svantaggi, sia dal punto di vista dello strumento di marcatura (adesivo, laser, micropulsione), sia da quello del tipo (QR Code, Data Matrix, Codice a Barre, alfanumerico, ecc...); le varie tipologie sono state visionate da centri di taratura assistiti dalle UOT di Verona e Padova e dal DIT.

1. Caratteristiche di una valvola di sicurezza

La norma 4126-1:2019 dedica il capitolo 10 a “Marcatura e sigillatura”, in sostanza elenca tutte quelle grandezze che sono necessarie ad un installatore/progettista per identificare una VS tramite le caratteristiche richieste dall’attrezzatura da proteggere, e poi per installarla senza commettere errori; a questo si aggiungono le caratteristiche necessarie nel tempo per revisioni e sostituzioni, queste devono essere impresse dal costruttore sulla valvola o, in modo complementare, scritte sulla dichiarazione di conformità

1.1 Dichiarazione di conformità del costruttore e/o marcatura valvola

Il costruttore è tenuto a marcare la VS in diversi posti e con diversi dati

1.1.1 Marcatura sull’involucro

L’involucro della VS o una targhetta saldamente fissata ad esso devono riportare:

- ✓ DN ingresso
- ✓ I materiali utilizzati per l’involucro
- ✓ Freccette a indicare la direzione del fluido (se ingresso e uscita hanno DN e PN uguali)

1.1.2 Marcatura su una targhetta

Una targhetta fissata saldamente a qualunque parte della VS deve riportare

- ✓ Il riferimento della norma
- ✓ Modello
- ✓ Pressione di taratura
- ✓ Coefficiente di scarico per fluido di riferimento
- ✓ La sezione di passaggio
- ✓ Il valore minimo dell’alzata e la sovrappressione corrispondente



Figura 2. Marcatura su cappello valvola

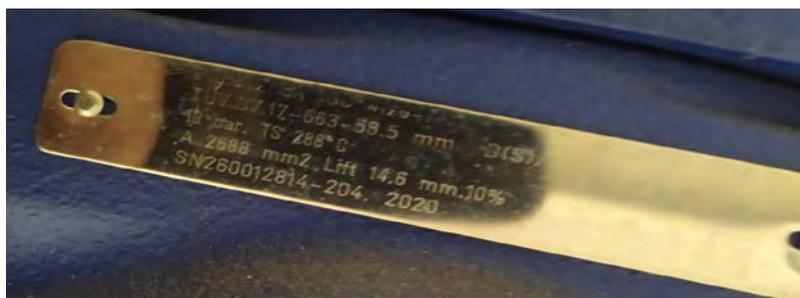


Figura 3. Targhetta identificativa di VS per GV fissata su corpo valvola

1.2 Dichiarazione di conformità alla taratura

Il tecnico INAIL, chiamato dal centro di taratura, è tenuto a redigere un modello con i seguenti valori:

- ✓ Luogo e Data
- ✓ Modello
- ✓ Numero di serie
- ✓ PN
- ✓ DN
- ✓ Pressione di taratura

Modello taratura GPL VS/I

INAIL
DIPARTIMENTO TERRITORIALE DI [REDACTED] ES
ISFESL

VERBALE DI TARATURA A BANCO DI VALVOLA DI SICUREZZA PRESSO IL CENTRO DI TARATURA DIVERSO DAL FABBRICANTE

LUOGO [REDACTED]
DATA [REDACTED]

Cliente: [REDACTED]
Costruttore: [REDACTED]
Valvola modello: [REDACTED]
Identificativo valvola: [REDACTED]
Diametro nominale: 40
Pressione di taratura Pt.: 64,00 [bar]

Il presente verbale riguarda esclusivamente il controllo della pressione di taratura della valvola.
La conformità della stessa, dal punto di vista costruttivo al modello approvato, è responsabilità del fabbricante.

A seguito del buon esito della prova di taratura, ai fini dell'identificazione della valvola, vengono punzonati i seguenti dati:

- Pressione di taratura:
- Marchio INAIL
- Numero della valvola

La taratura è stata eseguita con azoto a contropressione atmosferica.

Il tecnico [REDACTED]

Vis. A. [REDACTED]
Zona [REDACTED]
Tel-Fa [REDACTED]
P.IVA [REDACTED]
E-m [REDACTED]
Site [REDACTED]

CARATTERISTICHE TECNICHE DELLA VALVOLA DI SICUREZZA

Costruttore: [REDACTED]
Valvola modello: CSV [REDACTED] /C
Identificativo valvola: [REDACTED]
Diametro nominale: 40
Diametro orifizio: 25,40 [mm]
Pressione nominale PN: 64,00 [bar]
Pressione di taratura Pt.: 64,00 [bar]

DICHIARAZIONI DEL CENTRO DI TARATURA

Tutte le operazioni necessarie al procedimento di taratura sono state condotte nel rispetto delle indicazioni del fabbricante della valvola di sicurezza.

Non sono state apportate modifiche alle caratteristiche costruttive della valvola di sicurezza.

L'inamovibilità degli organi di regolazione viene garantita mediante piombatura con marchio [REDACTED]

Ufficio Tecnico
Centro di taratura [REDACTED]

Figura 4. Esempio di certificato di taratura di VS per GV

2. Fasi di una taratura e verifica della taratura

Quando ad un centro di taratura viene commissionata la taratura di un lotto di VS bisogna che queste vengano mantenute, quindi anche tarate, e poi verificate.

Sintetizzando diciamo che si possono avere le fasi a seguire:

- i. Ricezione VS
- ii. Manutenzione e taratura
- iii. Invio PEC (UTENTE) di richiesta di sopralluogo alla UOT Inail competente per territorio
- iv. Protocollo PEC (INAIL) di ricezione della richiesta
- v. Emissione cronologico (INAIL) per il pagamento degli oneri di verifica (tariffazione oraria)
- vi. Pagamento (UTENTE)
- vii. Attestazione pagamento (INAIL)
- viii. Sopralluogo (INAIL)
- ix. Eventuale emissione pagamento di conguaglio in caso di dilatazione dei tempi di verifica rispetto quelli valutati (INAIL) e relativo pagamento (UTENTE)
- x. Archiviazioni verbali (INAIL)

1.3 Attività del centro

Una volta che il centro prende in carico le valvole deve (dovrebbe) compilare una scheda con tutti i dati necessari per identificarla ai fini di una corretta manutenzione (FIG.5).

Sigla		Unità		Impianto			Periodicità dei controlli	
Fabbricante		Modello		N° di fabbrica			Anno di fabbricazione	
P. di taratura [bar]		Sovrapressione [% o bar]		Contropressione di prova [bar]			Temperatura max [°C]	
Posizione anello(i) di regolazione	Connessione di ingresso			Connessione di uscita			Diametro di passaggio [mm]	
	DN	PN ¹⁾	Accoppiamento	DN	PN ¹⁾	Accoppiamento		
Pressione differenziale di prova a freddo [bar]				Campo di regolazione della pressione differenziale a freddo [bar]				
Materiale corpo				Materiale otturatore				
Materiale coperchio				Materiale sede soffice				
Materiale bocchaglio				Materiale soffietto				
Materiale porta otturatore				Materiale stelo				
Materiale molla				Guarnizioni				
Materiale guida								
Interventi di manutenzione:								
Data	Manutentore	Pressione di taratura [bar]	Prova di tenuta [SI/NO]	Posizione anelli	Riparazioni eseguite	Stato di conservazione	In esercizio [E] A scorta [S]	
Annotazioni								
Nota 1) PN o classe								

Figura 5. "Scheda VS" appendice B UNI 11507:2013

Le procedure consistono nello smontaggio, analisi dello stato dei componenti, aggiustaggio/sostituzione, rimontaggio, in fine le prove di taratura e tenuta.

1.3.1 La manutenzione

La UNI 11507 definisce le procedure manutentive da effettuare sulla valvola di sicurezza a cura del manutentore dopo una verifica preliminare.

1.3.2 La taratura

La UNI 10197 definisce tutte le procedure relative alla taratura nel punto 5, dove viene anche definita la procedura di aggiustaggio, il banco di prova, la lettura efficace (media su tre letture deve comprendere le letture in un intervallo del 3%),

Queste due fasi dovrebbero terminare con la redazione di una scheda finale (FIG.6)

Ragione sociale dell'officina di manutenzione		Località	
Dati valvola (dati da ricavare dalla scheda valvola)			
Fabbricante		Modello	
N° di fabbrica		Sigla	
Designazione orificio		Diametro di passaggio [mm]	
Connessione ingresso/uscita		Anno di fabbricazione	
P differenziale di prova a freddo [bar]		Campo di regolazione della pressione differenziale a freddo [bar]	
Controlli e prove sulla valvola come ricevuta		Controlli e prove sulla valvola dopo manutenzione	
Verifica pressione differenziale di prova a freddo		Verifica pressione differenziale di prova a freddo	
Procedura ¹⁾		Procedura ¹⁾	
Fluido di prova		Fluido di prova	
Pressione rilevata [bar]		Pressione rilevata [bar]	
		Sorgenza vite di taratura [mm]	
Prova di tenuta sedi		Prova di tenuta sedi	
Procedura ¹⁾		Procedura ¹⁾	
Fluido di prova		Fluido di prova	
Pressione di prova [bar]		Pressione di prova [bar]	
Perdita rilevata		Perdita rilevata	
Prova di tenuta involucro alla contropressione		Prova di tenuta involucro alla contropressione	
Procedura ¹⁾		Procedura ¹⁾	
Fluido di prova		Fluido di prova	
Pressione di prova [bar]		Pressione di prova [bar]	
Perdita rilevata		Perdita rilevata	
Controllo visivo			
Posizione anello di regolazione		Posizione anello di regolazione	
Stato di conservazione		Elenco parti sostituite	
Depositi solidi	SI NO		
Ubicazione			
Corrosione	SI NO		
Ubicazione			
Sorgenza vite di taratura [mm]			
Stato della molla			
Lunghezza libera molla [mm]			
Strumento misura pressione			
		Costruttore	
		Modello	
		Fondo scala	
Data della prova		Classe di precisione	
Firma dell'operatore		Scadenza di taratura	
Annotazioni			
Note			
1) Indicare il codice della procedura utilizzata.			

Figura 6. "Rapporto di manutenzione di una VS" appendice C UNI 11507:2013

1.3.3 Richiesta per attività

La richiesta per attività avviene attraverso PEC dall'utente all'UOT di competenza, la PEC poi viene protocollata in un sistema informatico interno (SIDPI).

Affinché si abbia una indicazione delle attività da svolgere deve essere richiesto il servizio indicando un numero indicativo di valvole così da emettere con ore di lavoro indicative un primo bollettino di pagamento, può essere emesso a fine prestazione un eventuale conguaglio.

1.4 Attività INAIL

1.4.1 Sopralluogo

Le attività dei tecnici INAIL per la taratura delle VS per GPL sono regolamentate da una linea guida interna DOM 01/05, viene descritta la procedura di prova che si divide in:

- i. Prova, effettuata a temperatura ambiente aumentando lentamente la pressione
- ii. Aggiustaggio, agendo sulla vite di regolazione a Pressione -20% rispetto P taratura
- iii. Verifica, effettuata con il principio delle 3 letture che non si discostano più del 3% o di 0,15 bar.

Nel DOM 01/05 Vengono descritti anche i banchi di verifica della taratura, banchi che giustamente non si discostano da quelli descritti dalla UNI 10197:1993.

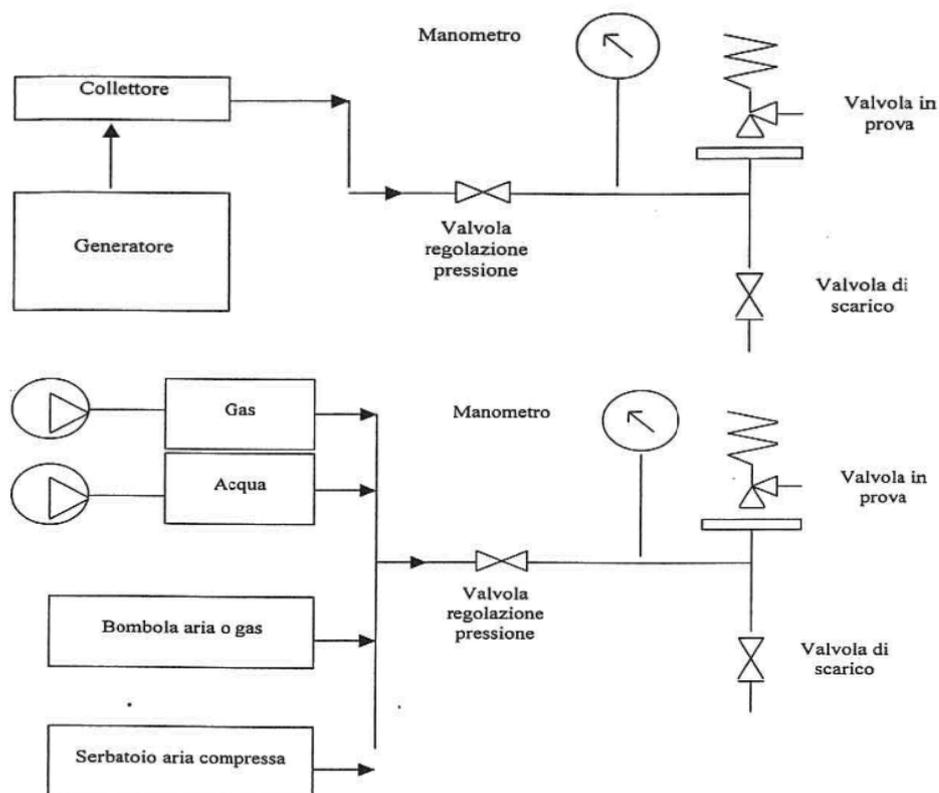


Figura 7. Sopra uno "Schema di principio di impianto per taratura valvole di sicurezza a vapor d'acqua

Ogni singola prova con esito positivo deve concludersi con la firma di un verbale che porti tutti e soli i dati relativi a quella valvola, per lotti grandi è importante fare particolare attenzione alla corretta associazione tra verbale di taratura (cartaceo) e valvola di sicurezza tramite il riferimento del costruttore e del numero di fabbrica.

1.4.2 Chiusura pratica

Una volta adempiuto al pagamento, verbale e pratica non sono archiviati nello stesso sistema informatico, e sarà il centro di taratura a fornire eventuali copie dei certificati ai propri clienti.

3. Automazione di taratura e verifica della taratura

Negli ultimi anni è aumentato rapidamente il numero di centri di taratura che investono sul proprio sistema gestionale e su sistemi di marcature con codice digitale.

Avere un sistema gestionale robusto, capace di associare ad una valvola i dati necessari alla compilazione automatica dei verbali di taratura, e che quest'associazione avvenga senza errori, è sicuramente preferibile al sistema standard, principalmente per una questione di correttezza procedurale ma anche per una diminuzione del lavoro umano.

Sono già stati implementati dei sistemi che, grazie alla scansione del QR Code (FIG.8), fanno accedere ad uno spazio virtuale dov'è possibile verificare la storia delle tarature della valvola a partire dalla costruzione.



Figura 8. Valvola di sicurezza per GPL con applicazione di QR Code

Si delinea quindi una evoluzione in due direzioni, una è quella di associare sempre più dati alla valvola tramite un marchio a codifica digitale per migliorare la consapevolezza dello stato della valvola e renderlo disponibile, l'altra di evitare la possibilità dell'errore umano.

Prima degli studi sull'incollaggio nelle valvole GPL venne definito a grandi linee un progetto di automazione dei banchi che si realizzerà in diverse fasi, concepito inizialmente solo per migliorare l'affidabilità della taratura e per generare un archivio dati sull'aggiustaggio in taratura, per meglio studiare fenomeni di anomalia d'intervento.

Con il passare del tempo questo progetto ha visto aumentare le potenziali applicazioni, come ad esempio facilitare richieste e verbalizzazioni, identificare eventuali contraffazioni, incentivare la manutenzione in qualità.

Una volta definito un marchio che soddisferà criteri di robustezza (usura atmosferica, sabbatura, ecc...) e di lettura (codifica leggibile da automi e persone), una volta marchiate le valvole (FASE1) queste potranno o essere verificate manualmente, o essere introdotte in un secondo banco (FASE 2), banco che si occuperà della verifica della taratura ed eventuale aggiustaggio delle VS per GPL.

4. Fase 1 - definizione virtuale della VS – BANCO DI MARCATURA

La prima fase del progetto, è quella di creare un oggetto virtuale “valvola”, oggetto al quale associare le informazioni del costruttore relative alle schede iniziali d’ingresso (fig 5 e 6); pertanto una volta creata la valvola come insieme di dati e, una volta creato un codice univoco presente sulla valvola con qualche tipo di marcatura, la valvola non dovrà più essere lavorata in questa postazione.

Il codice dovrà sintetizzare tutte le informazioni necessarie (costruttore-seriale-anno), per questo sono state fatte delle prove con diversi sistemi di marcature

1.5 Sistemi di marcatura

Per scegliere quale sistema utilizzare bisogna ricordare che le valvole possono essere installate all’aperto, essendo così soggette ad intemperie come la pioggia o il sole, oppure dover essere sabbiate periodicamente.

La scelta tra i tipi di marcatura in commercio presenta diverse criticità:

- ✓ I cartellini plastificati temono il sole e non sono fissati solidamente da nessuna parte della valvola (fig 9 Dx)
- ✓ Gli adesivi temono la pioggia e la sabbatura (fig 9 Sx)



Figura 9. Marcatura con adesivo (Sx) e marcatura su cartellino

Non essendoci divieti su ulteriore marcatura della VS sono state fatte prove mediante marcatura laser (FIG 10A) e a micropercussione (FIG 10B), utilizzando come metro di misura la leggibilità con alcuni smartphone o con un lettore ottico (FIG 10C).



Figura 10. Da destra: A-marcatore laser B-micropercussore portatile C-Lettore ottico

1.5.1 Micropercussione

La marcatura a micropercussione è quella in cui una testina incide con la propria punta la superficie sulla quale si vuole compaia il marchio, la macchina può avere punta con angolazione dai 120° in giù. A seconda del tipo di macchina si possono avere potenze in gioco da svariate decine a qualche centinaio di Watts.

Per la loro natura alcuni codici, come il codice a barre, non possono essere realizzati, mentre vengono invece correntemente marcati codici alfanumerico e QRcode.



Figura 11. Prove di marcatura micropercussione su VS per GPL, riconoscibili con strumento di lettura apposito

Le prove hanno dimostrato come la sabbiatura sia assolutamente ininfluente nella lettura di un marchio (fig6), i QR code vengono letti dal lettore ottico sia prima che dopo la sabbiatura, mentre il codice alfanumerico è sempre ben leggibile senza visibili modifiche.

1.5.2 Laser

La marcatura a Laser è una marchiatura relativamente più recente, le macchine vanno da poche decine di Watts fino a qualche centinaio.

L'incisione tramite Laser può avvenire in diversi modi a seconda dell'effetto che si vuole ottenere, tendenzialmente facendo muovere la testina molto lentamente per incidere per ricottura il materiale creando un rilievo; ripassando velocemente più volte sullo stesso materiale il codice è molto più visibile perché si riesce ad asportare più materiale.



Figura 12. Prove di marcatura a laser su VS per GPL, riconoscibili con strumento di lettura apposito

A differenza della micropercussione, le marcature a laser soffrono molto l'usura della sabbiatura (fig 13) che rapidamente peggiora la visibilità della marcatura, rendendo questa metodologia non utilizzabile per gli scopi proposti.



Figura 13. Valvola di fig 12 (Sx) dopo essere stata sabbiata 1 sola volta

5. Fase 2 – integrazione con CIVA – BANCO DI TARATURA E VERIFICA

La seconda fase del progetto, che non si andrà a dettagliare, prevedrebbe, dopo l'identificazione automatica della valvola, tutte quelle operazioni, registrazione dati e video compresi, che permetterebbero al tecnico di firmare, anche solo elettronicamente, i certificati, seppure non presente in persona al momento delle operazioni sul secondo banco, ma operante in remoto dopo le attività svolte in automatico (o semi) dal banco stesso.

Gli svariati vantaggi dell'automazione prima, gli obblighi al distanziamento sociale poi, hanno incentivato i centri a munirsi di sistemi in qualche modo simili a quello del progetto pilota, in fig. 14 si vede un centro di taratura che registra dati e video tramite sensori e telecamere così da poter certificare con il personale tecnico le VS tarate o ritarate.



Figura 14. Centro di taratura con registrazione dati e video per clienti, organismi notificati che visionano da remoto.

6. Conclusioni e prossime fasi

Il progetto pilota ha già testato vari sistemi di marcatura e, una volta definito un codice univoco per le valvole GPL, verrà allestito il banco e integrato il SW di archiviazione della ditta con quello del banco stesso.

Finita la fase 1 la fase successiva, se intrapresa, dovrebbe portare ad una integrazione di sistema tra utenti e CIVA.

Con l'integrazione totale di sistema (con CIVA) sarà possibile eliminare molti oneri di gestione a carico sia delle ditte interessate che delle UOT, inoltre minimizzare i tempi di attesa per le tarature di piccoli lotti delle VS ed avere maggiori dati su VS e loro usura.

Analisi di Text mining applicato alle attività a rischio di incidente rilevante

R. Modestino¹, M. del Gaudio¹, M.M. La Veglia², C. Piccolo³, R. Flammia⁴

¹ Inail - Uot di Avellino

² Direzione Regionale VVF Campania,

³ Università degli Studi di Napoli

⁴ Dott. in Biotecnologie

Sommario

Le tecniche di text mining vengono oggi applicate in numerosi campi al fine di estrarre nuova conoscenza, valutando in un opportuno contesto di riferimento, l'informazione "nascosta" contenuta nei testi.

Per fare ciò è necessario avere una corretta rappresentazione e organizzazione dell'informazione, mediante un sistema di Information Retrieval capace di effettuare un'analisi sintattica e semantica del testo.

L'argomento oggetto di studio è l'applicazione delle tecniche di text mining alle descrizioni caricate nella Banca Dati MARS (Major Accident Reporting System), il sistema informativo creato dalla Commissione Europea, in cui vengono raccolti i dati riguardanti gli incidenti avvenuti in attività a rischio di incidenti rilevante. L'obiettivo è quello di dimostrare l'attendibilità dei risultati ottenuti per promuovere l'analisi semantica delle informazioni fornite relativamente ad un incidente al fine di ricavare nuova informazione utile per la gestione della sicurezza in questi ambienti di lavoro.

Attualmente nella Banca dati Mars sono presenti oltre 1000 record riguardanti incidenti archiviati mediante diversi campi descrittivi. Molti di questi sono campi liberi, dove l'utente ha inserito il testo in linguaggio naturale. In questo studio viene analizzato il campo "consequences" per ottenere una rappresentazione dei termini maggiormente utilizzati nella descrizione delle conseguenze avute dopo l'incidente.

I risultati ottenuti verranno rappresentati graficamente per avere una rapida percezione della rilevanza dei termini maggiormente usati.

Lo scopo di questo studio è quello di dimostrare che le tecniche di Information Retrieval possono essere un valido strumento di supporto per progettare l'attività di prevenzione e sicurezza in luoghi di lavoro particolarmente critici come quelli a rischio d'incidente rilevante.

1. Introduzione

I dati oggetto di analisi, generalmente, rispettano un set di regole predeterminato che permettono la loro archiviazione in un database relazionale, da cui possono essere recuperati separatamente o in una varietà di combinazioni per l'elaborazione e l'analisi. Negli ultimi anni la digitalizzazione dei servizi si sta affermando in tutti i settori, e con essa si ha la disponibilità di dati con origini diverse, estratti da un linguaggio umano di cui può risultare difficile la comprensione e ambigua la collocazione in quanto non hanno un modello predefinito e non sono strutturati per poter effettuare una tradizionale elaborazione. Per queste ragioni si è avuto anche lo sviluppo di nuovi strumenti per l'estrazione di informazioni da questa tipologia di dato, come le tecniche di text mining.

Le potenzialità delle tecniche di text mining sono numerose, ed oggi si stanno affermando in diversi settori, passando dal business intelligence fino ad arrivare alla gestione del rischio in azienda.

Come affermò Hearst nel 1999, il text mining è *"the use of large online text collections to discover new facts and trends about the world itself. I suggest that to make progress we*

don't need fully artificial intelligent text analysis; rather, a mixture of computationally-driven and user-guide analysis may open the door to exciting new results”.

L'analisi per estrarre informazione utile, tipicamente, parte da un insieme di testi altamente eterogenei, in questo caso la descrizione delle conseguenze, scritti in linguaggio naturale quindi non strutturato e normalizzato per essere compreso da una macchina. È necessario pertanto utilizzare un sistema capace di gestire questi testi in modo da ottenere una struttura ben definita e non ambigua. Tale obiettivo è però raggiunto solo se si considera un determinato contesto di riferimento; infatti un dato può essere rilevante per un individuo in un determinato contesto e di poca importanza in un altro.

Le tecniche di Information Retrieval, di seguito IR, si occupano di rappresentare e organizzare il contenuto testuale, effettuando un'analisi semantica e sintattica del contenuto e offrendo in output correlazioni che, in questo caso, possono essere utili per le attività di ricerca nel campo della salute e sicurezza sul lavoro.

2. Quadro Normativo di Riferimento

2.1. L'incidente di Seveso

Il 10 luglio del 1976 nello stabilimento della società ICMESA sito nel territorio del comune di Meda, in Lombardia, il sistema di controllo di un reattore chimico destinato alla produzione di triclorofenolo, andò in avaria e la temperatura salì oltre i limiti previsti.

L'esplosione del reattore venne evitata dall'apertura delle valvole di sicurezza, ma l'alta temperatura raggiunta causò una modifica della reazione che comportò una massiccia formazione di diossina, che si disperse nell'aria formando una nube tossica, che colpì i comuni limitrofi.

Il comune più colpito fu Seveso, da cui prende il nome la direttiva Europea sul controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.[1]

2.2. La Direttiva Seveso

L'incidente di Seveso, e altri simili incidenti avuti in quegli anni, portarono la Comunità Europea ad adottare un sistema di analisi e regolamentazione del rischio di incidente rilevante, connessi con determinate sostanze classificate pericolose. Sei anni dopo l'incidente, la Comunità Europea adottò la Direttiva 82/501/Cee (cd. Seveso I) che si pose in tutto il panorama normativo allora vigente come la prima disciplina in materia di rischi industriali.

La Direttiva prevede specifici obblighi per i gestori degli stabilimenti in cui tali sostanze sono o possono essere presenti, in quantitativi superiori a specifici limiti di soglia stabiliti dalla Direttiva stessa.

Nel corso degli anni l'applicazione della Direttiva comunitaria ha condotto ad una revisione della stessa, con l'emanazione della Direttiva 96/82 (detta "Seveso Bis") e successivamente, il 4 luglio 2012 l'emanazione della nuova direttiva 2012/18/UE (denominata "Seveso III") sul controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.

L'evoluzione normativa rispecchia il mutato approccio della Commissione Europea: si è passati da un concetto di sicurezza rivolto principalmente alle installazioni industriali e ai lavoratori, ad uno che vede le attività produttive in un determinato contesto territoriale, urbano ed ambientale e quindi con riferimento anche alla tutela di popolazione e ambiente circostante.[6]

Ciò che invece è rimasto sempre immutato, e particolarmente interessante in questo contesto di studio, è la necessità, sempre sentita dalla Commissione Europea, di condividere le informazioni relative agli incidenti avvenuti negli stabilimenti industriali a rischio di incidente rilevante.

Attualmente la Seveso III prevede l'obbligo di scambiare informazioni tra gli Stati Membri avvalendosi di una banca dati allo scopo di:

“ a) provvedere a una rapida diffusione, a tutte le autorità competenti, delle informazioni fornite dagli Stati membri ai sensi dell'articolo 18, paragrafi 1 e 2; b) trasmettere alle autorità competenti un'analisi delle cause degli incidenti rilevanti e gli insegnamenti tratti; c) informare le autorità competenti in merito alle misure preventive adottate; d) indicare le organizzazioni in grado di fornire supporto o informazioni in relazione al verificarsi di incidenti rilevanti, alla loro prevenzione e alla limitazione delle loro conseguenze.” (art. 21 Dir. 2012/18/UE)[7]

3. La Banca dati Mars

Il Major Accident Reporting System (MARS) è un sistema informatico, istituito presso il Centro Comune di Ricerca della Commissione Europea di Ispra, atto a conservare tutti i dati, forniti dagli Stati Membri, riguardanti gli incidenti verificatisi nelle aziende classificate “a rischio di incidente rilevante” secondo la Direttiva Seveso II.

La Banca dati fu introdotta dalla prima direttiva Seveso (EC/105/82) e lanciata nel 1984 come un sistema di reporting su base volontaria; solo nel 1996 la Seveso II ha stabilito l'obbligo, per gli Stati Membri, di riportare gli incidenti rilevanti alla Commissione Europea. Il database non mira a giudicare il corretto operato delle aziende, piuttosto il suo scopo è quello di permettere lo scambio di informazioni, in modo tale da informare le compagnie e le nazioni, sui rischi legati all'uso di sostanze pericolose, che a causa di un fenomeno non controllato possono mettere a rischio la salute delle persone sia all'interno che all'esterno dell'azienda. A tal fine i dati relativi all'incidente sono oggi disponibili online ma non sono pubbliche, invece, le informazioni riguardanti l'azienda coinvolta nell'incidente.

Il sito web e-Mars della banca dati, aggiornato nel dicembre del 2020, fornisce un'area pubblica per consultare i dati statistici già elaborati; permette inoltre di effettuare ricerche personalizzate o esportare i dati per ulteriori analisi in formato Excel. Tuttavia, in media, occorrono circa tre anni per poter completare il processo di reporting dell'incidente, pertanto molti reports non sono disponibili prima dei 2-3 anni dalla data di accadimento. Inoltre se sono necessari importanti attività legali relativi all'incidente questi tempi possono essere anche maggiori [8]

3.1. Configurazione della struttura

Il formato del report MARF (Mars Accident Reporting Form) è organizzato in due sezioni, una pubblica ed una privata.[3]

- a) Sezione riservata: area accessibile mediante login solo alle autorità coinvolte, dove vengono caricati dati che permettono una precisa identificazione del luogo e della data dell'incidente.
- b) Sezione pubblica: area rivolta al pubblico e composta da 8 sezioni (Fig 1) con sottosezioni realizzate prevalentemente da campi con testo libero e campi con menù a tendine per permettere una più rapida definizione delle voci.

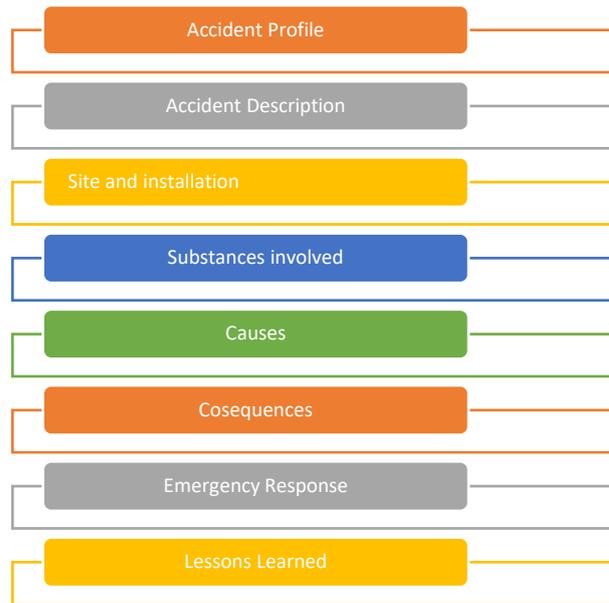


Figura 1. Sezioni pubbliche del MARF

4. Ricerca semantica e analisi

Un Information Retrieval System (IRS) è un sistema informatico sviluppato per svolgere in modo automatico compiti dell' IR.

Questi sistemi informativi elaborano un elevato quantitativo di dati opportunamente collezionati in un archivio e correttamente indicizzati per facilitare il processo di Ranking & Retrieval. Il processo di indicizzazione consiste nell'andare a rappresentare in maniera formale il contenuto informativo dei documenti della collezione assegnando dei descrittori ad ogni documento e creando una struttura dati, composta dall'insieme dei descrittori, che prende il nome di Indice.

Successivamente l'attività di retrieval avviene sulla base delle interrogazioni (queries) di interesse, cioè avviene un matching tra i documenti in archivio e le condizioni espresse nelle richieste effettuate. Sulla base dei risultati ottenuti si può ampliare e quindi perfezionare la query per ottenere risultati maggiormente rilevanti.[2]

L'attività svolta vuole verificare l'efficacia di queste tecniche applicate alle informazioni inserite nei campi liberi del report della banca dati Mars.

L'attività può essere sintetizzata in tre fasi essenziali:

- **Fase 1:** Information retrieval per ricavare i documenti rilevanti
- **Fase 2:** Information extraction per estrarre informazioni di interesse dai documenti
- **Fase 3:** Data mining per scoprire nuove associazioni dalle informazioni estratte

5. La Metodologia Applicata

Partendo dall'architettura funzionale descritta precedentemente, è necessario adottare un modello IR come framework per gestire la rappresentazione dei documenti, le queries e le relazioni tra loro. Si è scelto di adottare il modello dello spazio vettoriale (VSM).

Il modello assegna ad ogni termine nei documenti un peso e di conseguenza i documenti vengono rappresentati come vettori in uno spazio n-dimensionale (n = numero di termini indicizzati); infine rappresenta i termini e i documenti utilizzando una matrice A di dimensioni

$m \times n$ detta matrice di incidenza o matrice termini-documenti, in cui ogni riga rappresenta un termine e ogni colonna un documento.[5]

Definito il framework adottato, è possibile esplicitare le tre fasi enunciate precedentemente. Per svolgere l'attività di studio si è scelto di avvalersi dell'ambiente di sviluppo software R. Nato da un progetto dell'Università di Auckland per lo sviluppo di una piattaforma per l'analisi statistica, R si propone come un potente ambiente di analisi computazionale e grafica, dotato di un completo linguaggio con cui l'utente interagisce con il motore interno.

Si tratta di un software libero che viene distribuito con la licenza GNU GPL, ed è disponibile per diversi sistemi operativi (ad esempio Unix, GNU/Linux, macOS, Microsoft Windows). [9]

5.1. Estrazione dati

La fase iniziale da cui partire è l'individuazione della fonte di informazione di interesse, quindi della base di dati contenente i documenti che devono essere analizzati.

Le informazioni oggetto di studio sono le informazioni inserite dai Paesi Membri della Comunità Europea nella banca dati e-Mars.

Le informazioni sono state estratte dalla banca dati presente sul sito ufficiale della Commissione Europea (<https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/search>) non impostando alcun filtro nella ricerca avanzata del motore e ottenendo un file Excel disponibile per elaborazioni successive.

Attualmente sono disponibili 1095 record, esportabili in un foglio di calcolo, dove le colonne corrispondono alle sezioni descrittive dell'evento e le righe ai report incidentali comunicati dai Paesi Membri.

Di queste colonne si è scelto di analizzare "consequences" in cui vengono descritte le conseguenze avute dall'incidente.

5.2. Selezione e Indicizzazione

L'informazione per essere trattata in modo automatico richiede una fase di pre-processing per eliminare il rumore presente e per organizzarla nel modo più appropriato.

Mediante opportuni script java le informazioni presenti nei singoli record selezionati sono stati importati in files di testo, generando per ogni descrizione un documento idoneo all'elaborazione per le fasi successive.

Per quanto concerne l'analisi si è scelto di utilizzare il framework tm, un text mining package di R. [4]

La struttura di base su cui lavorano le funzioni del package tm viene nominata Corpus e rappresenta una collezione di documenti di testo.

Il metodo costruttore Vcorpus() genera un Corpus volatile partendo da una predefinita fonte; in particolare in questo caso le sorgenti dei dati sono le cartelle contenenti i files con le singole descrizioni delle conseguenze degli incidenti .

Successivamente si è passati alla fase di preprocessing; applicando una serie di trasformazioni fornite dal pacchetto tm mediante la funzione tm_map(), sono stati eliminati alcuni caratteri speciali, gli spazi bianchi, le stopwords, la punteggiatura ed è stato effettuato lo stemming.

La rimozione delle stopwords è una strategia utile per filtrare le parole chiavi e ridurre la dimensione dei termini indice di un documento; soprattutto in questo caso studio è indispensabile eliminare le parole molto frequenti, le preposizioni ed altro che portano poca informazione sul contenuto dei singoli documenti e soprattutto creano rumore.

Lo stemming nasconde la variabilità con cui un concetto è espresso con parole diverse, mediante l'identificazione della radice linguistica di una parola (stem) in modo tale da ricondurre parole che hanno la stessa radice linguistica allo stesso stem.

Selezionando opportuni packages software si è proceduti all'estrazione delle informazioni di interesse e alla rappresentazione grafica.

La fase di analisi richiede la creazione della matrice termini-documenti descritta precedentemente; nella matrice $A_{(m \times n)}$, composta da n descrizioni degli incidenti, e m termini presenti nei testi, ogni documento viene rappresentato da un vettore m -dimensionale. Se il generico elemento a_{ij} è nullo il termine i -esimo non è presente nel documento j -esimo, altrimenti rappresenta una funzione delle occorrenze del termine nel documento.

Mediante la classe TermDocumentMatrix è stata generata la matrice termini-documenti, rappresentata in Figura 2.

```

TermDocumentMatrix in memory: 100% documents loaded
Non-/sparse entries: 35014/8698706
Sparsity : 100%
Maximal term length: 227
weighting : term frequency (tf)
sample :
Docs
Terms 107.txt 228.txt 235.txt 344.txt 565.txt 614.txt 719.txt 896.txt 96.txt 967.txt
area      5         0         5         3         1         1         9         3         5         3
caus      3         4         2         4         0         1         0         1         3         2
damag     2         0         0         10        0         4         0         5         0         3
establish 1         2         0         1         0         3         0         1         0         4
fire      0         5         0         1         5         0         0         12        0         6
installationaffect 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0
loss      0         0         1         0         1         2         0         0         0         0
materi    1         0         0         1         1         0         0         3         1         0
peopl     0         0         0         0         3         8         0         0         0         1
water     7         5         7         3         6         3         5         3         2         3
> |

```

Figura 2. Estratto della matrice Termini Documenti ottenuta dall'elaborazione dei testi

A questo punto i dati ottenuti possono essere analizzati con numerose funzioni di R al fine di ottenere i risultati di interesse. Lo studio condotto vuole analizzare le frequenze dei termini per ottenere una rappresentazione grafica dei termini maggiormente utilizzati.

La Figura 3 rappresenta i primi 10 termini con maggiore frequenza ottenuti per l'analisi delle conseguenze dell'incidente mentre la Figura 4 offre una rappresentazione grafica mediante wordcloud dei 50 lemmi più usati.

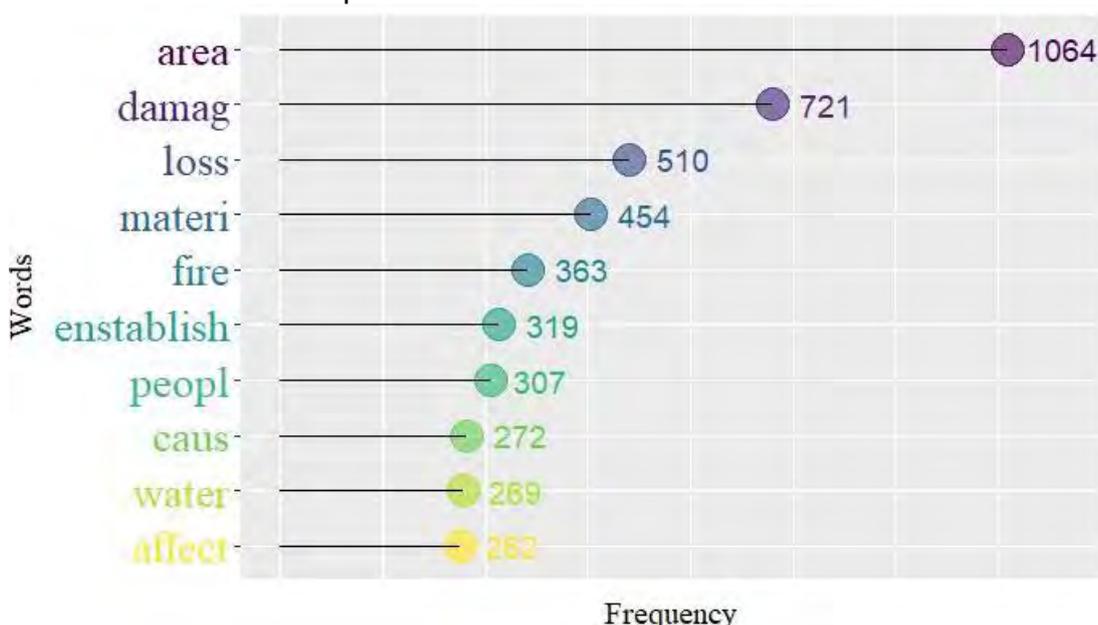


Figura 3. Rappresentazione grafica delle 10 parole con maggiore frequenza individuate dall'elaborazione

È necessario inoltre descrivere anche la struttura delle sezioni della banca dati consultabili online per un'accurata valutazione dei termini ottenuti.

Lo screenshot di Figura 6 raffigura la sezione "Consequences" permettendo di immaginare il form proposto per l'immissione dell'informazione.

Oltre ad una parte descrittiva, di testo libero, il form per l'immissione cerca di guidare l'utente nell'inserimento delle informazioni. Per raggiungere tale obiettivo, si chiede di distinguere le conseguenze per l'ambiente, per le persone, i danni economici subiti e i danni strutturali. Le sottosezioni sono delle checklist dove è possibile selezionare le voci di interesse per un determinato incidente. Tutte le informazioni vengono esportate nel foglio Excel nello stesso record.

Consequences

Consequences Description

The incident caused material loss. Toxic combustion products were formed. The smoke of the fire covered a large area west of Drachten. At first it was feared that the smoke contained a lot of toxic substances. Therefore the Ministry of Agriculture took precautionary measures. The concentration of toxic materials in the water, soil and grass was measured. Milk from cows in the area was destroyed.

People - Remarks:
39 employees of ATF were examined to detect possible adverse effects on their health. The overall conclusion of the examination was favourable. Some employees reported irritation of the airway one day after the fire. Social life was influenced to some extent, due to overwork. Biometric tests did not show abnormalities due to exposure to toxic substances. One of the companies involved in the clean-up operation also had its employees examined. No adverse effects on health were registered. Furthermore, monitoring of levels of toxic substances in the area around the site (both air and soil) showed that no one was exposed to significant levels of dioxins during or after the fire.

Material Loss - Remarks:
The farmers affected by the preventive measures receive a total of 500,000 Euros for compensation of their expenses and losses.

Discussion about consequences:
Initial testing indicated elevated levels of lead and cadmium up till 4 kilometres from the fire. At a distance of 300 metres the cadmium levels in the grass exceeded about ten times the allowed maximum levels for cattle-fodder. In the week after the fire grass and milk samples were taken again to examine the nature, concentration levels and possible risks of the combustion products that were released during the fire. The results of this investigation may be summarized as follows:|- As a result of the preventive measures taken, no elevated levels of heavy metals, PCB's and dioxins were expected in milk from the area. Measurements on milk samples collected on May 13, 14 and 15 confirmed these assumptions.|- Grass samples taken in the area 1.5 till 30 kilometres from the fire showed no elevated levels of PCB's, dioxin-like substances or heavy metals.|- Elevated levels of dioxin were found only in grass at distances less than 1500 metres from the fire.|- At one of the 49 measure sites, at a distance of 1 kilometre from the fire, elevated levels of vanadium, chrome, arsene, cadmium, mercury and lead were measured in the grass. The allowed maximum level in cattle-fodder was exceeded only for lead on this site. No other samples in the area 0,5 till 30 kilometres from the fire showed excess of the allowed maximum levels for heavy metals in cattle-fodder.

Affected Area: installation
Affected Area: establishment
Affected Area: off-site: local

Human

Environmental

Cost

On site	Cost in euro	Quantity/Effect
<input checked="" type="checkbox"/> material losses		farmers received 500,000 Euros in compensation
<input type="checkbox"/> response, cleanup, restoration costs		
<input type="checkbox"/> Other		
Off site	Cost in euro	Quantity/Effect
<input type="checkbox"/> material losses		
<input type="checkbox"/> response, cleanup, restoration costs		
<input type="checkbox"/> Other		

Figura 6. Schermata Consequences Description Emars (Fonte: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content>)

Le parole maggiormente usate per la descrizione delle conseguenze sono “area”, “damag”, “material” e “loss” con un numero di occorrenze superiore a 400.

Mentre il lemma “area” non risulta fortemente correlato con altre parole nei documenti, si ha invece che:

- Damag è spesso presente abbinata alla parola “structur”, “ceil” e “refinery”. Da un’analisi immediata è possibile osservare che una delle principali conseguenze dell’incidente è stato un danno strutturale allo stabilimento e presumibilmente al tetto. La Figura 7 è l’esempio di un caso in cui il danno (damag) ha coinvolto il tetto (ceiling).

Consequences Description

MATERIAL LOSS:
 The extent of the damage caused by the explosion and the following fires was as follows: the reactor was badly distorted; the valve on the underside of Reactor 6 was also distorted and leaked; the sightglass in the manlid was shattered; the agitator was blown from its seating and deposited a few metres away; the glass fittings on Reactors 5 and 7 were shattered; electric cable insulation was charred and paintwork on the walls, ceilings and nearby millroom doors was scorched as far as 15 metres away; the glass in the windows on the first floor was shattered and the window frames distorted next to Reactors 5 and 7; windows up to 30 metres were blown out. The costs of the damage has been estimated at about 0.4M Euros.

People - Remarks:
 No people were injured by the explosion because, when the accident occurred, the operators were changing in their locker room except for an operator that was trapped in the mill room weighing finished product. He could not exit by the process area and had to exit through a hatch on the floor, jump onto a rotary dryer below and climb down to the ground floor.

Affected Area: installation
 Affected Area: establishment

Figura 7. Testo descrittivo delle conseguenze di un incidente (Fonte: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content>)

- Le altre due parole usate più frequentemente sono fortemente correlate tra loro: “mater” e “loss” cioè la descrizione di fuoriuscita di materiale. Come si può vedere dalla Figura 6 “material losses” è una voce della checklist, questo potrebbe giustificare la rilevanza dei due termini.

Gli stessi, però, sono presenti anche nel testo libero della descrizione. La descrizione in Figura 6, ad esempio, afferma come prima battuta, che *“The incident caused material loss”*.

Da notare, sempre in Figura 6, che accanto alla voce “Material loss” viene suggerito di indicare anche l’ammontare del danno economico; dall’analisi si evince che la parola “euro” risulta correlata (0.44) al termine “loss”.

Osservando invece le statistiche presenti sul sito della Commissione Europea è risultato particolarmente interessante, ai fini dell’indagine, il grafico rappresentante la percentuale dei casi distinti per “Reasons Reporting” (Figura 8).

Come previsto dall’Allegato VI della Direttiva 2012/18/UE ogni incidente denunciato alla Commissione deve avere almeno una delle conseguenze espresse in Reasons Reporting. Premettendo che i casi possono avere più di una conseguenza per cui essere riportati, è interessante notare che hanno una maggiore percentuale i casi che hanno avuto *“Conseguenze per le persone o i beni”* quindi con *“abitazione/i all'esterno dello stabilimento danneggiata/e e inagibile/i a causa dell'incidente;”*, seguiti dai casi con *“Sostanze pericolose coinvolte”* dove si è verificato *“Ogni incendio o esplosione o emissione accidentale di sostanza pericolosa implicante”*.

Ciò conferma ulteriormente i risultati ottenuti dall’analisi.

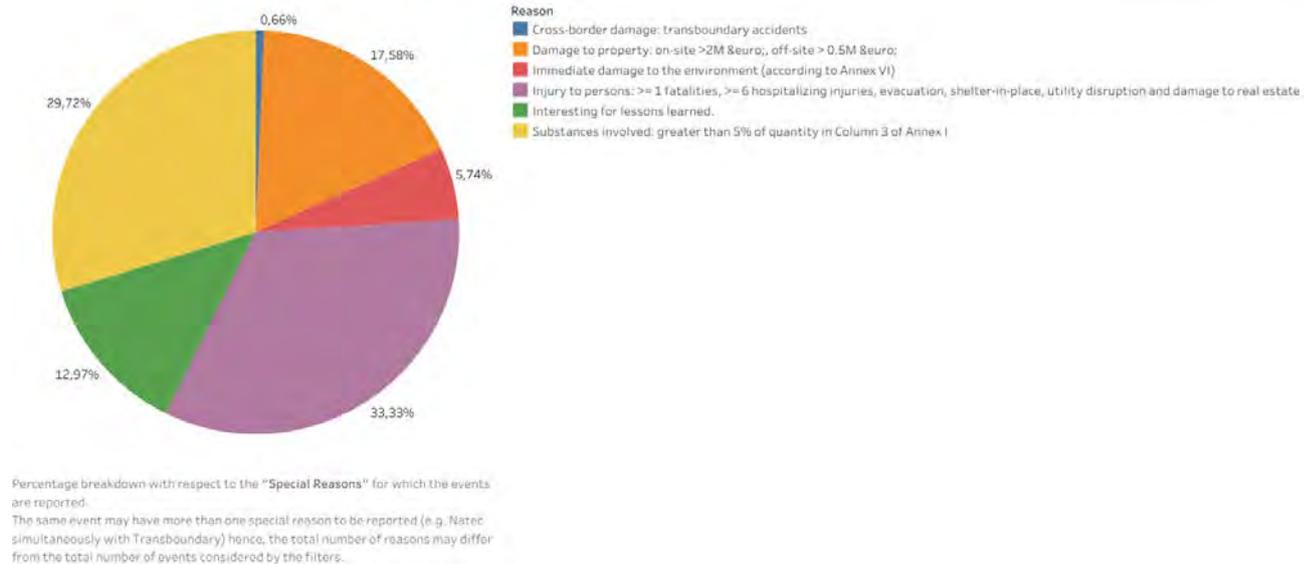


Figura 8. Reasons Reporting dalle statistiche Emars (Fonte: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/statistics/statistics>)

7. Conclusioni

Le tecniche di Information Retrieval cercano di soddisfare il bisogno informativo dell'utente partendo dall'analisi dell'informazione "nascosta" in specifici contesti.

Lo scopo di questo studio è stato quello di esplorare le potenzialità dell'ambiente di sviluppo R, per verificare la validità di queste tecniche anche in un ambiente particolare come quello della gestione del rischio in stabilimenti a rischio di incidente rilevante.

Piuttosto che esprimere opinioni sui rischi presenti in questi ambienti, l'analisi condotta finora è finalizzata solo a dare un riscontro oggettivo dei valori ottenuti mediante R con il confronto, a campione, dei record presenti nel export, mostrando che, questi metodi di analisi opportunamente supportati da ulteriori studi, possono essere adottati anche nel campo della prevenzione della sicurezza nei luoghi di lavoro.

I risultati ottenuti possono sembrare scontati.

Trattandosi infatti di stabilimenti che fanno uso di sostanze pericolose è prevedibile una dispersione delle stesse con conseguente danneggiamento dello stabilimento nel caso in cui si verifichi un incidente; l'obiettivo di questo studio è stato quello di valutare l'efficacia della comprensione semantica del contenuto di alcuni testi da parte di un calcolatore, il quale non ha percezione del contesto di riferimento ma riesce, mediante opportune tecniche di data mining ad effettuare delle correlazioni utili per ulteriori studi.

8. Bibliografia

- [1] E. Tosello, P.Sales, E.Racca, G. Marino. L'inventario provinciale delle emissioni. Provincia di Cuneo. 2012
- [2] D. Meyer, K. Hornik, I. Feinerer. "Text Mining Infrastructure in R." Journal of Statistical Software. 2008.
- [3] F. Delli Quadri, G. Capponi. Analisi del nuovo sistema informativo Mars (Major accident reporting system) sulla raccolta e valutazione degli incidenti rilevanti. VGR2006. Pisa. 2006.
- [4] I. Feinerer. Introduction to the tm package text mining in r. (2013). Disponibile in: <http://cren.r-project.org/web/packages/tm/index.html>

[5] M. Melucci. Information retrieval. Metodi e modelli per i motori di ricerca. Franco Angeli. Milano. 2013.

[6] P. Ceci, C. Cafaro, M.Mari. La risposta all'incidente di seveso: l'evoluzione normativa e la percezione del "rischio". Ingegneria dell'ambiente. 2017. V.4 N.1.

[7] Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC.

[8] <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content>

[9] <https://www.r-project.org/>

Utilizzo a pressione delle sabbiatrici nel settore edile e rischio ipoacusia: misure di prevenzione e protezione

C. De Toro¹, M.P. Gatto¹, P. Castellano², G. Solimene³, G. Licciardo⁴

¹ Inail - Uot di Avellino

² Inail Dimeila

³ CFS Avellino

⁴ Officine Giuliano S.p.A.

Sommario

Ai sensi dell'art. 190 del D. Lgs. 81/08 e s.m.i., la potenziale esposizione combinata ad agenti chimici e fisici dannosi per il sistema uditivo impone al datore di lavoro di prendere in considerazione, per quanto possibile a livello tecnico, gli effetti sulla salute e sicurezza dei lavoratori derivanti da interazioni fra rumore e/o vibrazioni e sostanze ototossiche connesse con l'attività svolta. Il contributo proposto ha esaminato i possibili effetti sinergici o additivi sull'apparato uditivo dovuti alla concomitante esposizione al rumore e alle vibrazioni prodotti dalle sabbiatrici. La sabbiatrice è un'attrezzatura di lavoro utilizzata nei cantieri, il cui utilizzo avviene mediante una valvola di regolazione con opportuna miscela di aria compressa con pressioni fino a 12 bar. Nelle operazioni di sabbiatura i lavoratori addetti possono essere esposti a diverse classi di agenti chimici potenzialmente ototossici, dovuti sia agli abrasivi esauriti sia ai residui dei materiali abrasivi. Attraverso una descrizione dettagliata delle fasi lavorative relative a tali operazioni, si è valutata la potenziale esposizione alle diverse classi di agenti chimici riconosciuti da studi epidemiologici sperimentali e osservazionali come ototossici certi o potenziali. L'effetto combinato dell'esposizione agli agenti fisici e a sostanze chimiche ototossiche, per inalazione o contatto cutaneo, è particolarmente dannoso per il sistema uditivo: la presenza di tali sostanze può essere causa, infatti, di alterazioni dell'orecchio interno, soprattutto a livello cocleare, rendendolo particolarmente vulnerabile ai danni meccanici dovuti a rumore e vibrazioni. La molteplicità di agenti chimici riconosciuti come certamente o potenzialmente ototossici e la concomitante esposizione a rumore e vibrazioni a cui possono essere esposti i lavoratori addetti alla sabbiatura rende necessaria una più approfondita conoscenza dei livelli espositivi ad agenti chimici e miscele, che di per sé stessi sono responsabili di danno tessutale al sistema uditivo, e dell'interazione che può aver luogo con rumore e vibrazioni, con particolare riferimento alle basse dosi.

1. Introduzione

Il problema della perdita di udito, con le conseguenze derivanti da questa malattia, è di grande preoccupazione nella comunità medica. La sordità è una delle più diffuse e costose disabilità nel mondo. Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) circa 250 milioni di persone, i due terzi dei quali vivono nei Paesi in via di sviluppo, presentano una perdita di udito invalidante. Milioni di persone perdono progressivamente i loro mezzi di comunicazione più importanti e diventano socialmente isolati, soprattutto negli ultimi anni della loro vita. Diversi studi hanno dimostrato che il deficit uditivo può anche contribuire all'aumento degli infortuni sul lavoro, anche se la maggior parte di questi sono valutati come lesioni traumatiche [1-3]. Le cause più comuni di perdita dell'udito sono i cambiamenti legati all'età, l'esposizione al rumore e il trauma cranico, ma vi è una crescente consapevolezza che anche diverse sostanze chimiche possano avere effetti ototossici e numerosi studi considerano "*rischio emergente*" la possibile sinergia tra esposizione al rumore ed a sostanze ototossiche in ambiente lavorativo [4]. Per quanto concerne la co-esposizione a

rumore e sostanze ototossiche, già la Direttiva Europea 2003/10/CE, del 6 febbraio 2003 *“sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all’esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (rumore)”*, all’articolo 4 *“Valutazione dei rischi”*, comma 6, lettera d, specificatamente prevedeva che il datore di lavoro in occasione della valutazione dei rischi dovesse prendere in particolare considerazione *“per quanto possibile a livello tecnico, tutti gli effetti sulla salute e la sicurezza dei lavoratori derivanti dall’interazione fra rumore e sostanze ototossiche connesse con l’attività svolta”* [5]. Il D. Lgs. 195 del 10 aprile 2006, che ha recepito la citata Direttiva, inserendola come Titolo V bis nel contesto del D. Lgs. 626/94, ha ripreso alla lettera il testo comunitario. Il D. Lgs. 81/08 e successive modifiche non hanno apportato variazioni [6]. La Commissione Europea promosse, già nel 2001, un progetto di ricerca denominato *NoiseChem* [7] che prevedeva, attraverso indagini epidemiologiche standardizzate, studi sull’animale allo scopo di identificare i meccanismi di danno ototossico dovuti all’interazione rumore-sostanze chimiche occupazionali [8]. Il Progetto *NoiseChem* identificò come prioritari alcuni composti organici volatili quali toluene, xileni (in particolare il p-xilene), stirene, n-esano, e poi piombo, gas asfissianti (monossido di carbonio e acido cianidrico con i suoi Sali), in presenza o meno di concomitante esposizione a rumore ed ebbe come fine ultimo quello di verificare l’adeguatezza dei valori limite di esposizione in caso di co-esposizione a diversi fattori di rischio e delle attuali strategie di valutazione e di protezione della funzione uditiva (compresa l’identificazione di soggetti ipersuscettibili); proponeva inoltre l’obiettivo di definire metodi per la valutazione del rischio da interazione fra due o più agenti tossici o fra sostanze chimiche e rumore. L’European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA) ha successivamente commissionato una revisione della letteratura, i cui risultati sono stati pubblicati nel 2009. Secondo il documento sviluppato dall’EU-OSHA *“Per i lavoratori co-esposti a rumore e sostanze ototossiche deve essere presa in considerazione una sorveglianza sanitaria più frequente, indipendentemente dal livello di esposizione al rumore.* Alla luce dello scenario appena indicato, il presente contributo si propone quale strumento utile per valutare la possibile esposizione sinergica ad agenti fisici e chimici potenzialmente ototossici nelle operazioni di sabbiatura con lo scopo di proporre adeguate misure di prevenzione e protezione al fine di eliminare, o comunque ridurre al minimo, il rischio di ipoacusia professionale nel comparto delle costruzioni.

2. Metodi

Sono stati stimati i potenziali rischi, sia di tipo fisico, rumore e vibrazioni, sia di tipo chimico, esposizione per via inalatoria e dermica ad agenti ototossici o potenzialmente tali, per il sistema uditivo dei lavoratori addetti alla sabbiatura. Procedimento industriale, meccanico ed edilizio, la sabbiatura consiste nell’erosione della parte più superficiale di uno specifico materiale mediante un getto di abrasivo metallico o non metallico (naturale o sintetico), con lo scopo di pulire, preparare, incidere materiali o manufatti. L’impiego di gran lunga più frequente è quello per la pulizia superficiale di metalli, tuttavia può essere usata anche per l’incisione di iscrizioni e immagini su marmo e pietre.

Si ricorre, dunque, all’utilizzo delle sabbiatrici per:

- pulire le superfici asportando vernici, ossido o calcificazioni, liberandola completamente dalle impurità prima di passare ad altre fasi di lavorazione;
- opacizzare superfici lucide, come il vetro;
- incidere su legno, marmo e pietre.

Per lucidare, pulire o rendere opaca una superficie come il vetro, si ha bisogno di sabbiatrici che utilizzano sull’oggetto da trattare l’azione combinata dell’aria compressa e dell’idoneo materiale abrasivo, che consiste il più delle volte in sabbia silicea ma anche, seppur più raramente, in graniglia metallica.

L'attrezzatura è composta sostanzialmente da un serbatoio a pressione installato con funzione di accumulatore di sabbia, dotato dei relativi dispositivi di sicurezza e protezione e alimentato da un compressore avente portata massima inferiore alla portata di scarico della valvola di sicurezza. Il serbatoio è costruito in conformità con la Direttiva PED (Pressure Equipment Directive) 2014/68/EU [9] ed è soggetto, secondo le modalità stabilite dall'art. 4 del D.M. 329/04 [10], alla verifica obbligatoria di primo impianto, ovvero di messa in servizio, di competenza Inail. Pertanto, nel quadro degli obblighi stabiliti dal D.M. 329/04 e del D. Lgs. 81/08, il datore di lavoro è tenuto:

- al censimento delle attrezzature e insiemi a pressione che ricadono nel regime del DM 329/04;
- alla classificazione di tutte le attrezzature e degli insiemi a pressione secondo la direttiva PED;
- all'individuazione del regime di verifiche (messa in servizio o periodiche) a cui deve sottoporsi da parte dell'INAIL;
- alla effettuazione della dichiarazione di messa in servizio quando previsto nonché invio della relativa documentazione tecnica all'INAIL e all'ASL o ARPA;
- alla sottoposizione delle attrezzature individuate al regime di verifiche obbligatorie imposte dal D.M. 329/04;
- alla denuncia delle tubazioni e dei recipienti per liquidi costruiti prima del 12/05/2002 e sottomissione alle verifiche periodiche.

In figura 1 sono rappresentate le componenti principali di una sabbiatrice:

- compressore, che comprime l'aria all'interno del serbatoio;
- serbatoio o tramoggia, dove viene caricata la sabbia;
- sabbiatrice, che ha il compito di miscelare la sabbia al getto d'aria e di regolarne le proporzioni rispetto all'oggetto da sabbiare.
- ugello, che permette la fuoriuscita della sabbia e ne regola il getto, la direzione e l'intensità;
- valvole di sicurezza, di scarico e valvole per la regolazione dell'aria e dell'abrasivo.

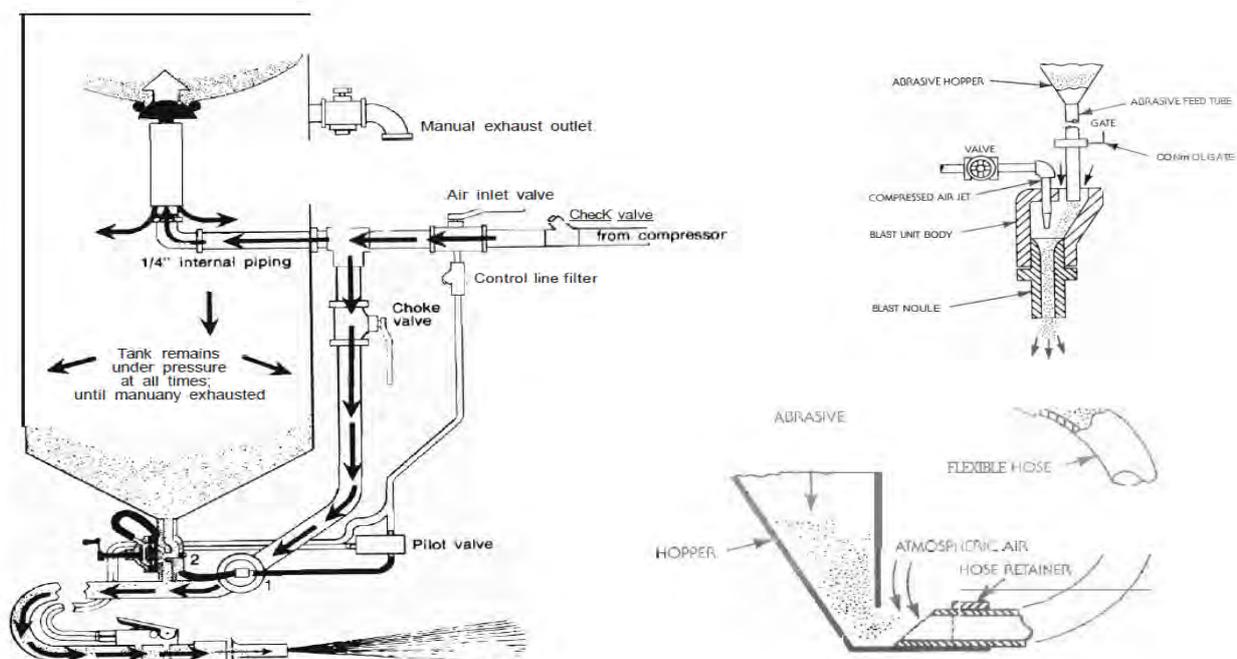


Figura 1. Principali parti operative e strutturali di una sabbiatrice

Immagine modificata tratta da: NIOSH, The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) Abrasive blasting operations engineering control and work practices Manual, Final Report Contract no. 210-75-0029).

Oltre ai rischi per la salute e sicurezza dei lavoratori addetti associabili soprattutto all'aria compressa e alla forza del getto di aria e sabbia, che, se raggiungesse parti del corpo del lavoratore addetto non protette, inciderebbe la pelle, creando abrasioni e lesioni anche piuttosto gravi, la sabbiatura potenzialmente espone il lavoratore a numerosi altri fattori di rischio tra i quali si segnalano:

- a. la movimentazione manuale dei carichi, con conseguenti rischi di lesioni a carico dell'apparato muscolo-scheletrico, aggravate anche dal lavoro ripetitivo;
- b. la esposizione al rumore, con possibili danni a carico dell'apparato uditivo (ipoacusia, perdita dell'udito);
- c. la inalazione e il contatto cutaneo con agenti chimici pericolosi derivanti dai materiali abrasivi e abrasivi, con il seguente potenziale sviluppo di malattie professionali, *in primis* quelle respiratorie e/o dermatologiche;
- d. le patologie dovute alle vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio;
- e. i traumi, le lacerazioni, le contusioni, le ferite e gli schiacciamenti provocati dalla movimentazione dei pezzi, cadute e scivolamenti;
- f. il rischio incendio.

Nel paragrafo 3. saranno approfonditi i punti b) c) e d) relativamente al rischio da ipoacusia occupazionale degli addetti al settore e le rispettive misure di prevenzione e protezione, nonché i possibili effetti sinergici o additivi tra tali fattori di rischio.

3. Risultati

3.1. Rischio rumore e vibrazioni

Il rischio ipoacusia occupazionale da agenti fisici, come definiti dall'art. 180 del D. Lgs. 81/08 e s.m.i, in relazione alle operazioni di sabbiatura consiste, essenzialmente, nella esposizione a livelli di rumore elevati, prodotti principalmente dalle attrezzature meccaniche, e nella esposizione a vibrazioni relativamente al sistema mano-braccio, come, ad esempio, a causa dell'utilizzo della pistola spara sabbia. Ai rumori dovuti alla sabbiatrice si sommano quelli di fondo, dovuti ad altri impianti; questi ultimi, oltre ad interferire con la capacità di concentrazione, possono indurre a comunicare con tono di voce alterato, incrementando conseguentemente il rumore di fondo dell'ambiente. Quanto invece alle vibrazioni meccaniche, queste, se trasmesse al sistema mano-braccio, comportano, altresì, disturbi vascolari, osteoarticolari, neurologici e muscolari. I valori limite di esposizione e i valori di azione, in relazione al livello di esposizione giornaliera al rumore e alla pressione acustica di picco, sono fissati a: 1) valori limite di esposizione rispettivamente $LEX = 87 \text{ dB(A)}$ e pressione acustica di picco ($p_{peak} = 200 \text{ Pa}$ (140 dB(C) riferito a $20 \mu\text{Pa}$); 2) valori superiori di azione: rispettivamente $LEX = 85 \text{ dB(A)}$ e pressione acustica di picco ($p_{peak} = 140 \text{ Pa}$ (137 dB(C) riferito a $20 \mu\text{Pa}$); 3) valori inferiori di azione: rispettivamente $LEX = 80 \text{ dB(A)}$ e pressione acustica di picco ($p_{peak} = 112 \text{ Pa}$ (135 dB(C) riferito a $20 \mu\text{Pa}$).

Ai sensi dell'articolo 192 comma 1 del D. Lgs. 81/08 – *Misure di prevenzione e protezione* – si afferma che il datore di lavoro elimina i rischi alla fonte o li riduce al minimo mediante le seguenti misure:

- a. adozione di altri metodi di lavoro che implicano una minore esposizione al rumore;
- b. scelta di attrezzature di lavoro adeguate, tenuto conto del lavoro da svolgere, che emettano il minor rumore possibile, inclusa l'eventualità di rendere disponibili ai lavoratori attrezzature di lavoro conformi ai requisiti di cui al titolo III, il cui obiettivo o effetto è quello di limitare l'esposizione al rumore;

- c. progettazione della struttura dei luoghi e dei posti di lavoro;
- d. adeguata informazione e formazione sull'uso corretto delle attrezzature di lavoro in modo da ridurre al minimo la loro esposizione al rumore;
- e. adozione di misure tecniche per il contenimento: 1) del rumore trasmesso per via aerea, quali schermature, involucri o rivestimenti realizzati con materiali fonoassorbenti; 2) del rumore strutturale, quali sistemi di smorzamento o di isolamento;
- f. previsione di opportuni programmi di manutenzione delle attrezzature di lavoro, del luogo di lavoro e dei sistemi sul posto di lavoro;
- g. riduzione del rumore mediante una migliore organizzazione del lavoro attraverso la limitazione della durata e dell'intensità dell'esposizione e l'adozione di orari di lavoro appropriati, con sufficienti periodi di riposo;
- h. adozione di apposita segnaletica per i locali ove le lavorazioni comportano un'esposizione personale superiore ai 90 decibel, ed eventualmente, qualora il rischio lo giustifichi, perimetrazione per limitarne l'accesso.

Il successivo articolo 193 del D. Lgs. 81/08, *Usa dei dispositivi di protezione individuale (DPI)*, afferma che, qualora i rischi derivanti dal rumore non possano essere evitati con le misure di prevenzione e protezione di cui all'articolo 192, il datore di lavoro fornisce i DPI per l'udito conformi alle disposizioni contenute nel Titolo III, capo II, e alle seguenti condizioni:

- a. nel caso in cui l'esposizione al rumore superi i valori inferiori di azione il datore di lavoro mette a disposizione dei lavoratori dispositivi di protezione individuale DPI dell'udito;
- b. nel caso in cui l'esposizione al rumore sia pari o al di sopra dei valori superiori di azione esige che i lavoratori utilizzino i DPI dell'udito;
- c. sceglie dispositivi di protezione individuale dell'udito che consentono di eliminare il rischio per l'udito o di ridurlo al minimo, previa consultazione dei lavoratori o dei loro rappresentanti;
- d. verifica l'efficacia dei DPI dell'udito: poiché gli otoprotettori devono essere messi a disposizione al superamento di definiti valori inferiori di azione, ossia superiori a 80 dB(A) (valore medio) e/o 135 dB(C) (valore di picco), la valutazione di efficacia deve essere condotta al superamento di tali valori. L'art.193, comma 2, del D. Lgs. 81/08 definisce i valori obiettivo della valutazione di efficienza dei DPI uditivi, precisando che sono considerati adeguati se, correttamente usati, rispettano le prestazioni richieste delle norme tecniche UNI-EN 458:2005 "Protettori dell'udito - Raccomandazioni per la selezione, l'uso, la cura e la manutenzione - Documento guida" e UNI 9432:2011 "Acustica - Determinazione del livello di esposizione personale al rumore nell'ambiente di lavoro".

Inoltre, in relazione alle vibrazioni mano-braccio nelle operazioni che prevedono l'utilizzo della sabbiatrice, le lance e le pistole per la proiezione di materiali solidi o liquidi a pressione, capaci di trasmettere vibrazioni al corpo dell'operatore, devono essere dotate delle soluzioni tecniche più efficaci per la protezione dei lavoratori (supporti, manici antivibrazione, dispositivi di smorzamento, ecc.) ed essere mantenute in stato di perfetta efficienza. È necessaria l'adozione di cicli di lavoro che consentano di alternare periodi di esposizione a vibrazioni a periodi in cui il lavoratore non sia esposto a vibrazioni. Deve, infine, essere valutata la necessità di sottoporre gli addetti a sorveglianza sanitaria specifica.

3.2. Rischio esposizione a sostanze ototossiche

L'ototossicità è un esempio di tossicità molto selettiva diretta verso un organo. Si definisce ototossica qualsiasi sostanza chimica o miscela che può compromettere le strutture e/o la funzione dell'orecchio interno (apparato uditivo e vestibolare) e le vie di collegamento connesse; una sostanza che può danneggiare l'udito e l'equilibrio interessando principalmente il sistema nervoso centrale (SNC) o periferico è invece considerata

neurotossica. Il rischio da agenti chimici pericolosi per l'addetto alla sabbiatura riguardano per lo più l'esposizione a polveri inalabili e respirabili prodotte dagli abrasivi e dai residui dei materiali abrasivi, come ad esempio vernici e/o pigmenti, nonché a sostanze a seguito delle operazioni di idropulitura, sottoforma di nebbie e acque di lavaggio. Dai dati di letteratura è emerso che l'esposizione a stirene, p-xilene, miscele di solventi, e piombo può causare perdita dell'udito. Per queste sostanze il numero di studi è relativamente grande e una varietà di approcci sono stati impegnati a testare il loro effetto sul sistema uditivo. Per altri agenti chimici, quali ad esempio alcuni metalli quali mercurio, cadmio e arsenico, e alcuni pesticidi neurotossici, i dati disponibili indicano una possibile azione ototossica, anche se in alcuni casi solo se in combinazione con il rumore. In tabella 1 è riportato un elenco (non esaustivo) di alcuni agenti chimici, ototossici o sospetti tali, a cui possono essere esposti gli addetti alla sabbiatura. Il meccanismo fisiopatologico con cui agiscono tali sostanze può essere di tipo irritativo, allergico o tossico. Le vie di assorbimento, previo raggiungimento dell'orecchio interno attraverso la via respiratoria, sono quella ematica, linfatica, liquorale e osmotica attraverso la cassa timpanica. Gli agenti chimici responsabili di patologie dell'orecchio possono essere classificati in aeriformi (gas, vapori), particellari o aerosol (polveri, fumi, nebbie).

3.2.1. Polveri

Nelle lavorazioni di sabbiatura che potenzialmente espongono a polveri i lavoratori addetti, come la rimozione di vernici, di rivestimenti, di ossidazioni, si deve ricorrere a metodi di lavoro che limitino al minimo l'emissione di polveri provvedendo, a seconda dei casi, all'inumidimento del materiale, alla aspirazione localizzata, alla frequente pulizia delle zone di lavoro, al trattamento e rimozione dei detriti. Nel caso di rischio residuo non altrimenti eliminabile con le misure tecniche preventive, mezzi di prevenzione collettiva e metodi organizzativi di cui sopra, il personale addetto deve fare uso degli apparecchi di protezione delle vie respiratorie (APVR). Nei lavori di sabbiatura di superfici si devono adottare preferibilmente procedimenti in umido, si deve procedere per zone di limitata entità e la zona di intervento deve essere delimitata e contenuta con protezioni che non permettano l'emissione esterna di polveri. L'addetto alla lancia deve fare uso di indumento protettivo completo del corpo e di adeguata maschera respiratoria isolante collegata ad una fonte esterna di aria pura e deve essere valutata l'opportunità di sottoporre gli addetti a sorveglianza sanitaria specifica. I detriti devono essere contenuti all'interno della zona delimitata e raccolti prima di rimuovere le protezioni.

3.2.2. Nebbie

Durante le operazioni che prevedono l'utilizzo della sabbiatrice per l'idropulitura delle superfici, sia a freddo sia a caldo, con acqua e/o altri solventi, i lavoratori addetti devono indossare idonei gambali, indumenti protettivi impermeabili e DPI adeguati all'agente, quali schermi facciali, occhiali, APVR. La pressione della pompa e la distanza dalla parete da trattare devono essere proporzionate alle caratteristiche del materiale. Il personale non strettamente necessario deve essere allontanato. La zona di lavoro deve essere opportunamente segnalata e, eventualmente, delimitata con barriere.

3.2.3. Getti, schizzi

I lavori di pulizia delle superfici mediante proiezione di materiali o getti d'acqua a pressione, quindi mediante l'uso di idrosabiatrici o idropultrici, devono essere eseguiti previa delimitazione delle zone di intervento con teli impermeabili atti a contenere i getti, gli schizzi ed i detriti di lavorazione. Nella zona interessata non devono, altresì, essere eseguite altre operazioni e non devono essere presenti altri lavoratori. L'addetto deve fare uso di indumenti impermeabili e protettivi dell'intero corpo, occhiali con protezione anche laterale, gambali ed

eventualmente maschera per le vie respiratorie (in relazione alla possibile presenza di sostanze pericolose). Le polveri e le acque di lavaggio devono essere contenute all'interno della zona delimitata e protetta e devono essere trattate e smaltite secondo criteri che tengano conto degli eventuali prodotti detergenti impiegati e di quelli asportati contenuti in sospensione.

SOSTANZA [CAS]	ACGIH TWA (STEL)*	PRINCIPALI USI INDUSTRIALI	CONCLUSIONI		RIFERIMENTI
			Modelli animali	Studi sull'uomo	
Miscele di Solventi ETILBENZENE, N- ESANO, DISOLFURO DI CARBONIO, MEK, ETILACETATO, BUTILACETATO		Nella pulitura a secco, come diluyente per vernici e solvente per colle	NE	O/PO	Hormozi <i>et al.</i> , 2017 [11];
OSSIDO DI ALLUMINIO [1344-28-1]	1 mg/m ³	Nell'Industria dei laterizi, dei refrattari e delle ceramiche, in elettronica, meccanica, e nel settore della biomedica	NC	PO	Polizzi <i>et al.</i> , 2002 [12]
CADMIO [7440-43-9]	0.01 mg/m ³	Batterie al nichel-cadmio, plastica PVC, pigmenti di vernice	O	PO	De Abreu & Suzuki, 2002 [13]; Kim <i>et al.</i> , 2008 [14]
CROMO [7440-47-3]	0.5 mg/m ³	Acciaio inossidabile, placcatura, finitura metallo, legno conservante, produzione di pigmenti	O/PO	PO	Muttamara & Leong, 2004 [15]; Zhan <i>et al.</i> , 2012 [16]
PIOMBO [7439-92-1]	0.05 mg/m ³	Batterie per auto, saldatura ed elettrodi nel processo di elettrolisi, vernici, tubature, vetri	O	O /PO	Galal <i>et al.</i> , 2011 [17]; Counter <i>et al.</i> , 2009 [18]

O: sostanza ototossica, PO: sostanza possibilmente ototossica, NC: nessuna conclusione possibile, NE: nessuna evidenza.

Tabella 1. Agenti chimici verosimilmente presenti nei luoghi di lavoro che prevedono operazioni di sabbiatura come materiale abrasivo o abraso con i relativi effetti sull'apparato uditivo umano e animale

3.3. Interazione sinergica tra fattori di rischio

Tra i principali obiettivi della ricerca in ambito protezionistico rientra sicuramente la valutazione della possibile interazione sinergica fra differenti fattori di rischio. Nel fascicolo relativo ai TLV 2011, l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), alla voce rumore, ritiene che la esposizione a talune sostanze chimiche può comportare anche una compromissione delle capacità uditive. Ove possano verificarsi esposizioni a rumore e a monossido di carbonio, piombo, manganese, stirene, toluene o xilene, sono consigliati periodici esami audiometrici. Ancora, l'ACGIH afferma che poiché il livello di soglia per l'ototossicità non è, generalmente, conosciuto, l'unico modo per capire se una data sostanza ha un effetto sulla funzione uditiva è quello di eseguire controlli audiometrici. Audiogrammi annuali sono altamente raccomandati per i lavoratori le cui esposizioni risultano pari o superiori al 20% del TLV per le sostanze elencate. Ed ancora, se il lavoratore partecipa d'abitudine ad un programma di sorveglianza sanitaria per il rumore, i valutatori delle audiometrie devono essere in grado di rilevare i possibili effetti sinergici fra l'esposizione al rumore e quella ad agenti chimici e, se necessario, suggerire la riduzione dell'esposizione ad uno o ad ambedue i fattori di rischio. Aspetto particolare delle sostanze

ototossiche è, pertanto, che esse possono interagire quando utilizzate simultaneamente e il danno complessivo da più agenti può eccedere la semplice somma di danni che i singoli agenti producono. Dunque, possiamo avere un effetto sommatorio dei singoli fattori di rischio, un effetto amplificativo rispetto alla previsione della somma, un effetto sinergico in cui nessuno degli agenti è efficace individualmente, un effetto sinergico in cui separatamente i singoli agenti sono efficaci, un effetto sinergico in cui solo un agente è efficace individualmente. In ogni modo, in virtù del principio di precauzione, la pratica standard per la valutazione dell'esposizione occupazionale a composti chimici potenzialmente ototossici e rumore e/vibrazioni non può non tener conto della probabile relazione tra l'esposizione e i danni al sistema uditivo.

Si ritiene perciò utile riportare i seguenti suggerimenti nel caso di esposizione sinergica ad agenti chimici e fisici ototossici o potenzialmente tali:

- i. dovrebbero essere incoraggiate misure di gestione dei rischi volte a ridurre l'esposizione a sostanze ototossiche;
- ii. deve essere considerata una sorveglianza sanitaria più frequente per i lavoratori co-esposti a rumore e sostanze ototossiche, a prescindere dal livello di esposizione al rumore;
- iii. dovrebbero essere sviluppati strumenti adeguati per la diagnosi precoce di ipoacusia indotta chimicamente;
- iv. nei luoghi di lavoro caratterizzati dalla esposizione simultanea a rumore e sostanze ototossiche, sulla base del principio di precauzione, dovrebbe essere raccomandato l'uso di DPI dell'udito a partire da livelli di esposizione inferiori a quelli previsti per la sola esposizione al rumore;
- v. infine, è indispensabile non trascurare l'importanza della formazione e dell'informazione sul possibile effetto sinergico di esposizione a sostanze chimiche ototossiche e di rumore e quindi sulle opportune misure di prevenzione e protezione.

4. Conclusioni

Particolare rilievo, negli ultimi anni, ha assunto il tema della ototossicità di differenti agenti chimici, associabile, spesso, alla concomitante presenza di rumore. Le interazioni tra questi fattori di rischio, potendo contemplare effetti sinergici, additivi e sub-additivi, sono complesse e difficili da prevedere. Studi sulla esposizione sinergica ad agenti chimici ototossici e rumore/vibrazioni riportano dati contrastanti, ma in alcuni casi indicano una possibile interazione, se non altro per livelli elevati di esposizione. L'azione prevedibilmente sinergica dell'esposizione a sostanze chimiche ototossiche, o potenzialmente tali, e al rumore e vibrazioni generate dalle operazioni di sabbiatura rende necessari ulteriori approfondimenti al fine di meglio definire le caratteristiche di ototossicità, dei meccanismi sinergici con il rumore, e stabilire limiti efficaci di esposizione ed ottimizzare i programmi di conservazione dell'udito degli addetti al settore.

Bibliografia

- [1] Choi S.W., Peek-Asa C., Sprince N.L., Rautiainen R.H., Donham K.J., Flamme G.A., Whitten P.S., Zwering C. Hearing loss as a risk factor for agricultural injuries. *Am. J. Ind. Med.*, 2005, 48 (4), 293-301.
- [2] Hetu R., Getty L., Quoc H.T. Impact of occupational hearing loss on the lives of workers. *Occup. Med.*, 1995, 10 (3), 495-512.
- [3] Sprince N.L., Zwering C., Lynch C.F., Whitten P.S., Thu K., Logsdan-Sackett N., Burmeister L.F., Sandler D.P., Alavanja M.C. Risk factors for agricultural injury: a

casecontrol analysis of Iowa farmers in the Agricultural Health Study. *J. Agric. Safety Health*, 2003, 9, 5–18.

[4] Golmohammadi R, Darvishi E. The combined effects of occupational exposure to noise and other risk factors - a systematic review. *Noise Health*, 2019, 21(101):125-141.

[5] Direttiva 2003/10/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 6 febbraio 2003 sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (rumore).

[6] D. Lgs. 9 aprile 2008, n. 81. Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro pubblicato nella Gazzetta ufficiale n. 101 del 30 aprile 2008 - Supplemento ordinario n. 108.

[7] Prasher D., Morata T, Campo P., Fechter L., Johnson A.C., Lund S.P., Pawlas K., Starck J., Sliwinska-Kowalska M., Sulkowski W. NoiseChem: A European Commission research project on the effects of exposure to noise and industrial chemicals on hearing and balance. *Noise Health*, 2002, 4, 41-48.

[8] Discalzi G., Accomazzo V., Banchio M. Il rumore e le sostanze ototossiche. Lo stato delle conoscenze, le implicazioni operative. *G Ital Med Lav Erg*, 2011, 33:3, Suppl 126-129.

[9] Direttiva 2014/68/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 15 maggio 2014, concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione.

[10] D.M. 1 dicembre 2004, n. 329. Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.

[11] Hormozi M., Ansari-Moghaddam A., Mirzaei R., Haghighi J.D, Eftekharian F. The risk of hearing loss associated with occupational exposure to organic solvents mixture with and without concurrent noise exposure: A systematic review and meta-analysis. *Int J Occup Med Environ Health* 2017, 30(4):521–535.

[12] Polizzi S., Pira E., Ferrara M., Bugiani M., Papaleo A., Albera R., Palmi S. Neurotoxic effects of aluminium among foundry workers and Alzheimer's disease. *Neurotoxicology*, 2002, 23: 761–774

[13] De Abreu M.T., Suzuki F.A. Audiometric evaluation of workers exposed to noise and cadmium. *Rev. Bras. Otorinolaringol*, 2002, 68 (4), 488-494.

[14] Kim S.J., Jeong H.J., Myung N.Y., Kim M.C., Lee J.H., So H.S., Park R.K., Kim H.M., Um J.Y., Hong S.H. The protective mechanism of antioxidants in cadmium-induced ototoxicity in vitro and in vivo. *Environ. Health Perspect.*, 2008, 116 (7), 854-862.

[15] Muttamara S, Leong S.T. Health implication among occupational exposed workers in a chromium alloy factory, Thailand. *J. Environ. Sci. (China)*, 2004, 16 (2),181-186.

[16] Zhan K., Wu S., Ji X., Li N., Yu J., Gao, X. Chromium-induced hearing loss in rats and the protective effect of copper and manganese. *Trace Elem. Electroly.*, 2012, 29 (1), 72-77.

[17] Galal S., El-Samra G.H., Mazhar M., El-Kholy F., Hegazy, A. Risk Behaviour of lead-exposed Workers and Hearing Impairment. *Int. J. Collab. Res. Internal Med. Public Health*, 2011, 3 (2), 132-142.

[18] Counter S.A., Buchanan L.H., Ortega F. Neurophysiologic and neurocognitive case profiles of Andean patients with chronic environmental lead poisoning. *J. Toxicol. Environ. Health A*, 2009, 72 (19), 1150-1159.

Verso un dosimetro chimico per valutare l'esposizione allo stirene dei lavoratori nei cantieri navali: una breve panoramica della letteratura

F. Vivaldi^{1,2}, G. Rosi¹, A. Cerchiai¹, N. Poma¹, A. Bonini¹, B. Melai¹, C. Fanizza³, F. Di Francesco¹

¹ Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale, Università di Pisa

² Istituto di Fisiologia Clinica- Consiglio Nazionale delle Ricerche

³ Inail – Dit

Sommario

Lo stirene, nonostante sia ampiamente impiegato in molti processi industriali, può rappresentare un rischio per la salute dei lavoratori. In questo contesto, i dosimetri chimici possono rivelarsi strumenti efficaci per il monitoraggio delle condizioni lavorative. Sebbene il primo prototipo di dosimetro risalga all'inizio del ventesimo secolo, lo sviluppo e il miglioramento di dosimetri chimici è ancora un attivo campo di ricerca, grazie al loro importante ruolo per la sicurezza dei lavoratori sul luogo di lavoro. Lo scopo di questo articolo è quello di fornire al lettore una panoramica sui concetti di base necessari per lo sviluppo di un dosimetro chimico e ciò che è possibile reperire in letteratura e in commercio.

1. Introduzione

Lo stirene è un idrocarburo aromatico (formula bruta C_8H_8) che si presenta a temperatura ambiente come un liquido incolore dall'odore dolce e penetrante tipico degli aromatici; esso solidifica a $-31^\circ C$ e bolle a $145^\circ C$. Questo composto venne isolato per la prima volta nel diciannovesimo secolo dalla pianta *Styrax officinalis*, da cui prese il nome, ma viene oggi prodotto industrialmente quasi esclusivamente attraverso l'idrogenazione dell'etilbenzene. Caratterizzato da una notevole reattività grazie alla presenza di un legame vinilico, è per questa ragione ampiamente usato come monomero per la produzione di polimeri di notevole importanza industriale quali polistirene: Polistirene (PS), acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS), o gomma stirene-butadiene (SBR).

Lo stirene è impiegato anche come componente di resine industriali. Tra le più comuni troviamo le resine di poliesteri (UPR, Unsaturated Polyestere Resin), cioè polimeri di esteri contenenti stirene, che addizionate a fibre di vetro consentono la produzione di materiali compositi, come la vetroresina. Solitamente nella produzione di vetroresina, le resine vengono spalmate su tessuti di fibre di vetro oppure vengono iniettate in uno stampo assieme al materiale vetroso solido. Quando la resina solidifica, le fibre vengono inglobate dando luogo a un materiale meccanicamente robusto ma al contempo solido e leggero, che viene utilizzato per la produzione di velivoli, piscine, pale eoliche, carri armati, tubi e materiale sportivo. Inoltre, per le eccezionali doti di impermeabilità e resistenza agli agenti atmosferici e chimici come l'acqua salmastra, la vetroresina è molto impiegata nella fabbricazione di scafi di imbarcazioni anche di grande dimensione.

Nonostante l'ampio utilizzo, lo stirene rimane un composto volatile, infiammabile e nocivo per inalazione. In aggiunta, è stato classificato dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) come composto nefrotossico, epatotossico, capace di provocare gravi irritazioni oculari e danni al sistema nervoso e respiratorio in caso di esposizione prolungata, nonché

potenzialmente cancerogeno. Date queste premesse, è facile immaginare come l'uso di un dosimetro chimico in grado di quantificare l'esposizione a questo composto e verificare il rispetto delle dosi massime permesse potrebbe rappresentare un prezioso strumento per la protezione della salute dei lavoratori. Per quanto detto prima, i cantieri navali rappresentano un ambiente di lavoro caratterizzato da un elevato rischio chimico poiché la lavorazione della vetroresina comporta un forte rilascio di stirene da parte delle resine liquide. Le procedure operative, spesso di natura artigianale a causa dei costi troppo elevati di sistemi automatizzati, prevedono tecniche come la spruzzatura diretta delle resine o l'uso di stampi, che comportano consistenti rilasci di stirene e relativa esposizione dei lavoratori.

Il termine dosimetro viene comunemente utilizzato nell'ambito del monitoraggio dell'esposizione a radiazioni ionizzanti, in riferimento ad un dispositivo in grado di quantificare l'esposizione di chi lo indossa in un determinato periodo di tempo. I dosimetri radiometrici sono generalmente piccoli elettroscopi calibrati che vengono fatti indossare al personale esposto per valutare la dose di radiazioni assunte [1]. Allo stesso modo, un dosimetro chimico è progettato per misurare l'esposizione a sostanze chimiche pericolose in un determinato intervallo di tempo, in genere il turno lavorativo di 8 ore, e ideato per essere utilizzato dai lavoratori come parte di un sistema integrato di monitoraggio e sicurezza.

In letteratura sono descritte diverse tipologie di dosimetri; sebbene molti dispositivi siano disponibili in commercio, nessuno è mai stato specificatamente progettato per lo stirene. Nei seguenti paragrafi verrà fatta una breve panoramica relativa a questi dispositivi per illustrare al lettore i principi base di funzionamento ed i possibili approcci allo sviluppo di un dosimetro per lo stirene.

1.1 Campionatori passivi

L'esposizione a sostanze chimiche volatili può essere misurata con precisione mediante tubi di adsorbimento, ovvero contenitori di metallo o plastica aperti ad un'estremità e riempiti con una certa quantità di fase stazionaria capace di adsorbire le molecole di analita durante la diffusione passiva di quest'ultime all'interno del tubo. Tuttavia, al fine di ottenere un'informazione analitica, rappresentata dalla media ponderata nel tempo (TWA), è necessario il desorbimento termico dei composti assorbiti, una separazione gas cromatografica accoppiata ad un'analisi in spettrometria di massa (TD-GC/MS). Queste operazioni possono solo essere effettuate in un laboratorio specializzato da parte di personale con una formazione specifica, per cui il lavoratore non ha alcuna conoscenza in tempo reale della concentrazione di gas nell'ambiente e non è protetto da esposizioni acute in caso di perdite o rilasci di sostanze tossiche. Tuttavia, i dati sulla concentrazione giornaliera possono essere utilizzati per monitorare i gas di interesse negli impianti industriali e, cosa più importante, per verificare il rispetto dei limiti e delle linee guida di esposizione professionale [2].

Un esempio di questi dispositivi, ideato dall'Istituto nazionale francese per la ricerca e la sicurezza (INRS), è attualmente venduto da Tecora [3]; esso consiste in una fase stazionaria di carbone attivo racchiusa in una custodia di plastica e in grado di campionare fino a 175 tipi di composti organici volatili (VOCs) [4], con un'affidabilità garantita dal rispetto del protocollo relativo alla norma europea EN 838. Il dispositivo è chiamato GABIE (Gas Adsorbent Badge for Individual Exposure) e può essere facilmente indossato in corrispondenza della zona di respirazione dei lavoratori grazie al suo peso ridotto (di soli 26 grammi). Le molecole volatili vengono adsorbite sul carbone attivo e, dopo l'esposizione, le stesse vengono desorbite termicamente e analizzate mediante GC/MS.

Mentre i dosimetri descritti finora sono dispositivi passivi, per rilevare basse concentrazioni di gas e particolato è necessario un campionamento attivo dell'aria. In questo caso, il dispositivo di campionamento è collegato ad una pompa, come quella commercializzata da Gilian Air [5], che consente di controllare la portata nell'intervallo 20 - 5000 mL/min e di collegare due tubi di campionamento nel caso in cui debbano essere misurate contemporaneamente le concentrazioni di analiti con proprietà chimiche diverse [6]. Vari campionatori sono compatibili con la pompa, per esempio i campionatori a ciclone per rilevare e quantificare il particolato, campionatori con filtri per amianto e fumi o tubi assorbenti caricati con carbone per composti organici volatili ed altre sostanze chimiche [7]. A differenza dei campionatori passivi, che richiedono informazioni sul coefficiente di diffusione delle sostanze chimiche per calcolare le concentrazioni di gas nell'aria ambiente (non sempre disponibili), in caso di campionamento attivo è sufficiente determinare il rapporto di massa su volume d'aria aspirato.

1.2 Dispositivi elettronici portatili

Un approccio completamente diverso viene utilizzato dai rilevatori che consentono un monitoraggio continuo dei gas tossici, in modo che se la concentrazione dell'analita raggiunge livelli pericolosi, possono essere prese misure preventive o il personale può lasciare il posto di lavoro. Un tipico esempio è costituito da dispositivi elettronici portatili, che sfruttano sensori elettrochimici alimentati da batterie ricaricabili in grado di assicurare fino a 12 ore di utilizzo continuativo. Questi strumenti possono essere dotati di uno o più rilevatori di gas che misurano la concentrazione in pochi secondi, ed illustrano i risultati delle misure per mezzo di un grafico della concentrazione in funzione del tempo continuamente aggiornato su uno schermo. Alcuni dispositivi emettono un suono di avviso nel caso venga superata una soglia massima impostata, mentre i valori misurati possono essere registrati in una memoria interna per calcolare il TWA. Nonostante le buone prestazioni, il costo relativamente elevato nonché il peso e le dimensioni scoraggiano un uso diffuso di tali sistemi.

Un esempio di questa tipologia è il rilevatore di gas venduto da Draeger Inc. [8], che può ospitare fino a cinque moduli diversi per monitorare contemporaneamente più analiti, con un tempo di vita previsto di 4 anni. In particolare, nel caso dell'acido solfidrico, l'azienda dichiara un limite di rilevamento pari a 0,4 ppm, una risoluzione di 0,1 ppm e una precisione di $\pm 5\%$ nell'intervallo 0-100 ppm per il suo rilevatore di gas X-am 5000. Lo strumento misura la concentrazione di gas con un tempo di risposta di 15 secondi e non risente della presenza di gas interferenti.

Un dispositivo elettronico più recente riportato in letteratura è il monitor personale portatile della qualità dell'aria (PAM) [9], [10], che utilizza sensori amperometrici miniaturizzati per monitorare ossidi di azoto (NO_x), monossido di carbonio (CO), ozono (O₃) e particolato (PM). Il dispositivo registra anche informazioni relative a temperatura, umidità relativa, accelerazione, rumore e posizione. Il meccanismo di rilevamento si basa su un sistema a quattro elettrodi, uno dei quali è necessario per compensare le variazioni di potenziale dovute alla temperatura per consentirne l'utilizzo sia all'interno che all'esterno, in ogni stagione e con grande precisione. La combinazione con un software di post-elaborazione permette una linearizzazione della risposta e una sostanziale riduzione delle interferenze. Questo dispositivo è relativamente leggero (400 g) e deve essere collegato alla sua base ogni giorno per ricaricare le batterie e scaricare i dati.

1.3 Dosimetri colorimetrici

I dosimetri colorimetrici forniscono una risposta analogica leggibile facilmente in tempo reale; non richiedono quindi né analisi di laboratorio né hanno bisogno di uno strumento ausiliario o una pompa, poiché gli analiti entrano in un tubo di vetro aperto e diffondono passivamente attraverso un letto impaccato con un reagente in grado di cambiare colore. L'esposizione può essere facilmente valutata dalla quantità di reagente reagito misurata da una scala graduata stampata sul tubo e il TWA può essere ottenuto dal rapporto tra l'esposizione totale e il tempo di utilizzo.

Uno dei primi dosimetri colorimetrici basati su questo principio è stato brevettato da McConnaughey alla fine degli anni Sessanta per il monossido di carbonio [11]. Nel 1985, l'inventore ha esteso lo stesso concetto a dosimetri per ammoniaca, anidride carbonica, acido solfidrico, e anidridi di zolfo e azoto [12]. Questi dispositivi, chiamati "Vapor Gards", consistono in tubi di vetro sigillati contenenti una striscia di carta impregnata. Il tubo di vetro è a sua volta posizionato all'interno di un supporto di plastica per ridurre l'effetto dalle turbolenze causate dai movimenti d'aria. Il dosimetro può essere applicato ai vestiti del lavoratore.

Questa semplice e robusta tecnologia è ancora in uso e ampiamente utilizzata per rilevare sostanze chimiche tossiche. Attualmente, Gastec offre fino a 41 diversi dosimetri [13].

Una variante di questi dosimetri colorimetrici è rappresentata da dispositivi in cui la reazione chimica provoca un progressivo cambiamento nell'intensità del colore dell'area del dosimetro. In questo caso, l'esposizione viene valutata confrontando il colore del dosimetro con una tonalità di colore di riferimento. Questi dispositivi sono generalmente venduti come badge circolari in cui il reagente si diffonde su una superficie piatta, garantendo una grande area colorata.

I badge chiamati ChromAir forniscono una risposta colorimetrica in seguito all'esposizione ad una specifica sostanza chimica, che viene valutata per confronto con una scala colorata prestampata per determinare l'esposizione totale (ppm·ora). Ogni dosimetro è specifico per uno fra sette sostanze chimiche (ammoniaca, monossido di carbonio, cloro, formaldeide, glutaraldeide, mercurio e ozono). Questi badge sono venduti negli Stati Uniti da Morphix Technologies e sono conformi alle principali certificazioni americane [14].

Chemsee produce dosimetri con un design simile per un'ampia gamma di composti tossici come ammine aromatiche, cloro, monossido di carbonio, anidride solforosa, formaldeide, acido solfidrico, idrogeno, idrazina, metil idrazina, ammoniaca e diossido d'azoto [15]. Inoltre, il colore di controllo è sempre visibile sul dosimetro e un lettore elettronico è disponibile per migliorare la precisione, evitare letture errate e registrare le misurazioni giornaliere [16].

2. Conclusioni

Come riportato in questo lavoro, lo sviluppo di dosimetri chimici è tuttora un campo di ricerca di ampio interesse. L'enorme numero dei possibili analiti combinato con i differenti meccanismi di rilevamento porta ogni anno allo sviluppo di nuovi dispositivi, necessari per tenere il passo della continua evoluzione dei processi industriali e le mutevoli tecniche di produzione e procedure operative. Da parte del mercato, la richiesta prevalente rimane orientata verso dispositivi economici ma dotati di buona accuratezza e di facile utilizzo, in grado di garantire al contempo una crescente sicurezza ai lavoratori, il rispetto delle normative e la sostenibilità economica.

3. Bibliografia

- [1] Britannica encyclopedia, «dosimeter definition». [Online]. Disponibile su: <https://www.britannica.com/science/dosimeter>
- [2] Honeywell, «Gas book». 2013.
- [3] Tecora, «VOC PASSIVE SAMPLER GABIE». [Online]. Disponibile su: <https://www.tecora.com/en/produit/6415/>
- [4] Tecora, «Product sheet GABIE». [Online]. Disponibile su: <https://www.tecora.com/wp-content/uploads/2020/01/HS-3.202.01GabiIIGB-V2.pdf>
- [5] Gilian air, «Personal Air Sampling Pump». [Online]. Disponibile su: <https://www.sensidyne.com/air-sampling-equipment/gilian-air-sampling-pumps/gilair-plus/>
- [6] A. Fleck *et al.*, «Parallel personal measurements of diesel engine exhaust and crystalline silica using dual sampling port», *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 30, n. 3, pagg. 313–319, mag. 2020, doi: 10.1016/j.ijmst.2020.04.004.
- [7] Gilian air, «Gillian air samplers». [Online]. Disponibile su: <https://www.sensidyne.com/air-sampling-equipment/sampling-media-accessories/>
- [8] Draeger, «https://www.draeger.com/library/content/hydrogen_sulfide_white_paper_81297.pdf».
- [9] L. Chatzidiakou *et al.*, «Characterising low-cost sensors in highly portable platforms to quantify personal exposure in diverse environments», pag. 27, 2019.
- [10] M. I. Mead *et al.*, «The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks», *Atmospheric Environment*, vol. 70, pagg. 186–203, mag. 2013, doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.11.060.
- [11] McConnaughey, «Article for the determination of carbon monoxide», 3507623, 1970
- [12] P. W. McCONNAUGHEY, E. S. McKEE, e I. M. Pritts, «Passive Colorimetric Dosimeter Tubes for Ammonia, Carbon Monoxide, Carbon Dioxide, Hydrogen Sulfide, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide», *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 46, n. 7, pagg. 357–362, lug. 1985, doi: 10.1080/15298668591394978.
- [13] GASTEC, «Dosi-tubes». [Online]. Disponibile su: <https://www.skcltd.com/products2/gas-detection-tubes/gastec-passive-dosi-tubes.html#dosi-tubes>
- [14] Chromair, «Direct Read Colorimetric Badges». [Online]. Disponibile su: <https://afcintl.com/p/chromair-direct-read-colorimetric-badges-from-morphix-technologies/>
- [15] ChemSee, «ChemSee toxic gas dosimeters». [Online]. Disponibile su: <https://www.chemsee.com/commercial/toxic-gas/available-products/dosimeters/>
- [16] ChemSee, «Eyal system - electronic reader». [Online]. Disponibile su: <https://www.chemsee.com/commercial/toxic-gas/available-products/electronic-readers/>

Analisi dell'efficacia di formazione, informazione e addestramento nelle attività a rischio di incidente rilevante

V. Prete¹, G. Gorrino², A. De Palma³, R. Acerboni³, M. Buonanno⁴

¹ Inail - Uot di Alessandria

² Inail - Uot di Roma

³ Inail - Uot di Venezia

⁴ Studio Buonanno Srl

Sommario

L'informazione, la formazione e l'addestramento (IFA) assumono un ruolo fondamentale nel processo di gestione della sicurezza all'interno degli impianti a rischio di incidente rilevante.

Il presente lavoro, oltre a quanto previsto dal D.Lgs. n. 105/15 s.m.i. per le attività di informazione, formazione e addestramento, tiene in considerazione anche norme UNI di settore, linee guida e normative nazionali in materia di salute e sicurezza sui luoghi di lavoro.

Sono stati inoltre presi in esame esperienze operative, rapporti finali delle ispezioni dei Sistemi di Gestione della Sicurezza (SGS) ai sensi dell'art. 27 dell'Allegato H del D.Lgs. n.105/15 e audit specifici.

Nella trattazione sono stati sviluppati criteri di valutazione dell'adeguatezza del piano di IFA in relazione all'ambiente di lavoro, alle esigenze del processo produttivo e ai casi di esperienza operativa e un metodo per la valutazione dell'efficacia di IFA.

Il documento fornisce strumenti utili per il monitoraggio e il mantenimento nel tempo dell'efficacia della formazione, che rendano più agevole il tracciamento periodico degli obiettivi e dei risultati ottenuti dai percorsi formativi effettuati, rispetto a quelli prefissati.

Lo studio sarà di supporto ai Gestori per individuare una corretta metodologia per la valutazione dell'efficacia dell'Informazione, della Formazione e dell'Addestramento organizzata in attuazione del D.Lgs. 105/15 s.m.i. nel proprio stabilimento.

1. Introduzione

A seguito dell'attività ispettiva condotta dalle commissioni previste dal D.Lgs. 105/15 e dai Comitati Tecnici Regionali (CTR) al livello nazionale, è stato possibile raccogliere una serie di evidenze che hanno consentito al gruppo di lavoro di individuare i punti comuni tra le diverse prescrizioni e raccomandazioni relative all'attuazione del processo IFA. Si è evidenziata un'uniformità a livello nazionale, sia su alcune carenze nelle varie organizzazioni ispezionate sia sulle opportunità evidenziate dal processo di analisi. Spesso, anche in funzione dell'analisi dell'esperienza operativa delle organizzazioni oggetto di ispezione o di semplici audit è stato possibile verificare le cause all'origine degli eventi indesiderati. Dall'analisi è emerso che molti interventi compensativi o opportunità di miglioramento riguardano azioni da attuare sul programma IFA. Questo ulteriore aspetto ha corroborato all'interno del gruppo di lavoro, la necessità di individuare un metodo utile alla reale verifica dell'efficacia formativa. Nell'individuazione del metodo, da applicare all'intero processo IFA, si è fatto riferimento alla normativa vigente, con particolare riferimento a quanto emanato negli ultimi 10 anni.

2. Requisiti normativi

Partendo dall'analisi dei casi studio presi a riferimento, si è fatto riferimento alla normativa italiana in materia, in particolare a:

- D.Lgs. 105/15 s.m.i. ed il relativo allegato B per l'appendice 1 dello stesso allegato
- D.Lgs. 81/08 s.m.i. con un focus sugli articoli specifici ed in particolare il 2, 36, 37, 73, 164, 184, 210-bis, 227, 239 e 294 bis
- Accordi Stato Regioni (ASR):
 - n. 221, per la formazione dei lavoratori del 21 dicembre 2011 (ASR-221/11)
 - n. 128, per la formazione degli A/RSPS del 7 luglio 2016 che aggiorna e completa in parte il n. 221 da cui è stato possibile individuare in maniera strutturata ed analitica gli elementi del processo e fare valutazioni semi quantitative rispetto a punti specifici del programma IFA. (ASR-128/16)
- Decreto Interministeriale del 06 marzo 2013: Criteri di qualificazione della figura del formatore per la salute e sicurezza sul lavoro
- DM 10 marzo 1998 Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro
- Decreto 2 maggio 2001: Criteri per l'individuazione e l'uso dei dispositivi di protezione individuale (DPI)

Nel dettaglio dell'analisi si è fatto riferimento allo strumento indicato dalla normativa nell'allegato IV all'ASR-128/16.

3. Definizioni

3.1 Informazione (D.Lgs. 81/08 – Allegato B Appendice 1 - D.Lgs. 105/15)

L'informazione è il complesso delle attività dirette a fornire conoscenze utili alla identificazione, alla riduzione e alla gestione dei rischi di incidente rilevante.

Informare, significa comunicare a tutti i lavoratori le necessarie cognizioni sulle implicazioni della loro attività sulla sicurezza e l'ambiente.

Questo presuppone la conoscenza dei rischi relativi sia alla specifica mansione che all'ambiente in cui i lavoratori si trovano ad operare, con particolare riguardo ai rischi di incidente rilevante e ambientali, nonché le misure di prevenzione e protezione da adottarsi singolarmente o collettivamente, per ridurre e controllare i rischi presenti.

L'informazione deve giungere con efficacia a ciascun lavoratore e quindi va scelto il mezzo di informazione o l'insieme di mezzi più adatti a questo scopo.

Il gestore deve inoltre informare i visitatori occasionali degli aspetti essenziali del Piano di emergenza interna, prima che questi siano ammessi all'interno dello stabilimento.

3.2 Formazione (D.Lgs. 81/08 – Allegato B Appendice 1 - D.Lgs. 105/15)

La formazione è un processo educativo attraverso il quale trasferire ai lavoratori e agli altri soggetti del sistema di gestione della sicurezza conoscenze e procedure utili all'acquisizione di competenze per lo svolgimento in sicurezza dei rispettivi compiti in azienda e alla identificazione, alla riduzione e alla gestione dei rischi di incidente rilevante.

La formazione relativamente ai temi di salute, sicurezza e ambiente è un'attività finalizzata a favorire la strutturazione, in ciascun individuo, di un sistema stabile di atteggiamenti

favorevoli alla ricerca ed al mantenimento di un comportamento che salvaguardi la salute e sicurezza propria e dei propri colleghi, e la tutela dell'ambiente interno ed esterno. La formazione deve tendere a far crescere l'individuo all'interno dell'organizzazione di appartenenza, attraverso un cambiamento del comportamento che porti a considerare la sicurezza, la salute e l'ambiente obiettivi di primaria importanza.

3.3 Addestramento (D.Lgs. 81/08 – Allegato B Appendice 1 - D.Lgs. 105/ 15)

L'addestramento è il complesso delle attività dirette a fare apprendere ai lavoratori l'uso corretto di attrezzature, macchine, impianti, sostanze, dispositivi, anche di protezione individuale e collettiva, le procedure di lavoro, con particolare riferimento alle procedure di sicurezza e di emergenza previste dal SGS.

Questa particolare attività didattica è rivolta a soddisfare il bisogno di creare esperienza e confidenza, con prove pratiche, verso situazioni lavorative:

- normali, come l'uso di apparecchiature e attrezzature di lavoro;
- periodiche, come all'atto di avvenuta assunzione, cambio mansione;
- di emergenza, come le prove di simulazione.

L'addestramento avviene prevalentemente attraverso affiancamento a personale esperto/istruttore.

4. Punti di forza e criticità dell'attività formativa

Il Sistema di Gestione della Sicurezza è il mezzo attraverso il quale il gestore stabilisce gli obiettivi della propria Politica di Prevenzione, identifica in modo chiaro ed univoco la Struttura Organizzativa, le Responsabilità, le Procedure e i Procedimenti e fissa Risorse adeguate al raggiungimento degli obiettivi della Politica.

Un punto cardine dell'attuazione del SGS è proprio l'IFA, ma ancora oggi in questo campo si riscontrano delle incertezze nell'implementazione. L'IFA è intrinsecamente correlata e tarata sull'organizzazione aziendale, sulla tipologia delle attività effettuate e sui rischi specifici presenti nello stabilimento.

In questo studio sono stati presi in esame esperienze operative, rapporti finali delle ispezioni dei SGS ai sensi dell'art. 27 dell'Allegato H del D. Lgs. n.105/15 della Regione Piemonte, della Regione Veneto, della Regione Lombardia, della regione Sicilia e audit specifici, analizzando punti di forza e criticità dell'attività formativa.

4.1 Attività di informazione

Si rileva a volte una certa incertezza tra l'obbligo di informazione dei lavoratori, per cui occorre prevedere l'organizzazione di incontri trimestrali con tutti i lavoratori (Punto 1 dell'Appendice 1 dell'Allegato B del D.Lgs. 105/15) e gli obblighi di formazione e addestramento previsti dal Punto 2 della stessa Appendice, finalizzati a garantire un'adeguata capacità operativa del personale in relazione ai propri compiti.

Si raccomanda di integrare la documentazione per l'informativa ai visitatori occasionali e alle ditte terze con i contenuti minimi di cui dell'Appendice 1 dell'allegato B del D.Lgs. 105/15, quali ad esempio informazioni di dettaglio sui segnali di allarme per l'attivazione del Piano di Emergenze Interne (PEI), una planimetria dello stabilimento con l'indicazione dei percorsi degli automezzi e del punto di raccolta per l'evacuazione in caso di emergenza e di prevedere una registrazione dell'avvenuta informazione ai visitatori.

4.2 Attività di formazione

4.2.1 Verifica efficacia della formazione e grado di apprendimento

Per quanto riguarda l'attività di formazione, i punti di debolezza si riscontrano principalmente nel far scendere la comunicazione lungo la catena gerarchica e nella modalità di verifica dell'efficacia della formazione impartita e del grado di apprendimento, per ogni attività erogata.

Spesso non è contemplata una metodica chiara per la valutazione finale dei test e relative azioni da intraprendere in base al punteggio ottenuto; a fronte di deficienze nei risultati delle prove di verifica, non sono previste ulteriori attività di recupero. Allo stesso modo, anche i criteri per la valutazione dell'efficacia della formazione non sono sempre definiti univocamente. Il Gestore deve inoltre produrre e conservare evidenza del riscontro degli esiti dei test di valutazione.

È necessaria una verifica dell'effettiva partecipazione ai corsi di IFA previsti nel Programma annuale da parte del personale convocato, programmando eventuali momenti di recupero per gli assenti e tenendo costantemente aggiornate le schede formative sui corsi svolti.

Si rileva che oltre alla formazione e-learning in auto-apprendimento, sia importante effettuare momenti di formazione collettivi, favorendo gli scambi anche direttamente sul campo, prevedendo momenti di confronto con i docenti sugli aspetti risultati carenti in modo da garantire che situazioni di formazione inadeguata non si protraggano nel tempo.

Le risultanze delle verifiche di efficacia devono poi essere raccolte, analizzate, elaborate anche in termini statistici, in modo da permettere l'individuazione di specifici argomenti che potranno costituire oggetto di ulteriore attività formativa.

4.2.2 Piano della formazione annuale

Un altro punto di debolezza individuato dall'analisi è il piano di formazione annuale: gli argomenti di massima da proporre nel corso delle sessioni formative trimestrali non sono sempre programmati o integrati/modificati nel corso dell'anno sulla base delle esigenze emergenti dello stabilimento o dei casi di esperienza operativa. Si raccomanda di coinvolgere i Rappresentanti dei Lavoratori per la Sicurezza (RLS), nella definizione delle specifiche esigenze formative, dandone evidenza con opportuna verbalizzazione a riguardo.

Talvolta si lamenta la mancanza di argomenti innovativi per le attività di formazione/informazione del personale; è importante quindi prevedere una procedura per l'identificazione del fabbisogno formativo necessario alla stesura del Piano della formazione annuale.

La programmazione annuale dei contenuti dovrà contribuire ad inserire nel piano argomenti qualificanti quali gli obiettivi della Politica e del Sistema di Gestione della Sicurezza, che nell'attuazione dei suoi diversi elementi costitutivi, tocca i diversi aspetti della conduzione operativa dello stabilimento. Questa attività potrà rendere più consapevoli gli operatori del loro ruolo, della loro responsabilità e delle possibili conseguenze di inosservanze e deviazioni dalle procedure di sicurezza.

4.2.3 Requisiti e qualifica dei formatori

Un altro aspetto a volte carente riguarda i requisiti e i criteri per la qualificazione dei formatori sia esterni sia interni allo stabilimento, anche nel rispetto di quanto stabilito nel Decreto Interministeriale 6/03/2013. Si raccomanda regolare attraverso procedura, le modalità e i parametri di scelta dei formatori.

Per il ruolo fondamentale che assume la formazione ai fini della prevenzione dei rischi di incidente rilevante e della sicurezza in generale, si raccomanda un'adeguata qualificazione dei soggetti formatori con una comprovata esperienza, dotati di un'adeguata comunicazione formativa, con particolare riferimento al campo specifico della normativa discendente dalla cosiddetta Direttiva Seveso.

4.2.4 Scarsa motivazione, maggiore consapevolezza

Sono state riscontrate alcune criticità dalle interviste condotte agli operatori sia dipendenti, che di ditte terze che non hanno dimostrato una piena consapevolezza delle procedure del SGS, entrando talvolta in confusione tra D.Lgs. 105/15 e Dlgs 81/08. In alcuni casi la scarsa motivazione del personale ha disperso la finalità formativa.

E' necessario ampliare i contenuti della formazione erogata in modo che tutto il personale coinvolto nella gestione, nell'esercizio e nella manutenzione degli impianti possieda cognizione sulla implicazione della propria attività sulla sicurezza e sulla prevenzione degli incidenti rilevanti e conosca i benefici conseguibili attraverso la rigorosa applicazione delle misure e delle procedure di sicurezza e prevenzione, con particolare necessità di una tempestiva segnalazione dell'insorgenza di situazioni potenzialmente pericolose.

Per il ruolo fondamentale che assume la formazione ai fini della prevenzione dei rischi di incidente rilevante e della sicurezza in generale, occorre garantire una maggiore consapevolezza del Gestore, del Responsabile del Servizio di Prevenzione e Protezione e in cascata a tutti i livelli dello stabilimento, sulle problematiche connesse con l'attuazione del SGS, condividendo impegni, obiettivi e programmi.

4.2.5 Analisi situazioni incidentali: cause di tipo tecnico, organizzativo e gestionale

Si è rilevato che, in termini di formazione, il personale incaricato non viene formato all'attività di analisi delle situazioni incidentali, per l'individuazione delle cause di tipo tecnico, organizzativo e gestionale.

Per quanto riguarda le attività di analisi del rischio si raccomanda di effettuare specifica formazione anche in relazione all'analisi dell'esperienza operativa di sito e di eventuali altri stabilimenti del gruppo o similari, illustrando le cause più comuni di incidenti e mancati incidenti registrati, i fattori gestionali critici, le misure correttive e preventive intraprese.

I discenti dovranno essere a conoscenza delle risultanze dell'analisi degli eventi incidentali ipotizzati, delle possibili cause e conseguenze, della correlazione tra la possibile mitigazione degli scenari incidentali e per contro le ricadute dei comportamenti scorretti.

4.2.6. Qualifica e Formazione Personale Ditte Terze

Per il ruolo fondamentale che assume la qualifica e la formazione del personale delle Ditte Terze ai fini della prevenzione dei rischi di incidente rilevante e della sicurezza nel stabilimento, da molteplici verifiche Ispettive, si riscontrano principalmente delle carenze nella modalità di verifica del SGS dell'efficacia formativa e del grado di apprendimento sui rischi presenti nello stabilimento dei dipendenti delle Ditte Terze, a qualunque titolo entrino nel sito a Rischio di Incidente Rilevante (RIR).

Si sono talvolta riscontrati generici attestati di abilitazione o formazione e la mancanza nel SGS di un archivio informatico o cartaceo della qualifica della Ditta terza e del loro personale.

Di rimando al punto formazione ed addestramento, il Gestore deve sviluppare una metodica per la valutazione della formazione e addestramento del personale delle Ditte Terze anche attraverso test interni, per verificarne l'apprendimento conservando il riscontro degli esiti dei test di valutazione ed riproponendo il test con cadenza annuale.

4.3 Addestramento

Dall'analisi delle ispezioni prese in considerazione nello studio si è riscontrata la necessità di rafforzamento metodico delle attività addestrative ed esercitative al fine di definire i reali tempi d'intervento in emergenza, con verifica sistematica del rispetto di tali tempi in ogni situazione (diurna, notturna, fermo impianto, etc.). Si ricorda di tenere conto dei risultati delle prove di addestramento al fine di valutare eventuali modifiche da apportare all'analisi dei rischi e migliorare i fattori tecnici, organizzativi e gestionali interessati.

Per migliorare i comportamenti degli operatori si raccomanda di programmare esercitazioni semestrali ai sensi del DM 16/03/98 che si configurino come effettive simulazioni di uno stato di emergenza, attraverso l'ipotesi di uno scenario in atto, la messa in sicurezza degli impianti, l'evacuazione del personale non impegnato nelle operazioni di intervento, l'intervento della squadra di emergenza fino al ripristino delle condizioni normali e la fine dello stato di emergenza.

5. Individuazione del metodo

Lo studio effettuato ha l'intento di fornire un supporto ai Gestori per individuare una corretta metodologia per la valutazione dell'efficacia dell'Informazione, Formazione e Addestramento nel proprio stabilimento.

Individuare un metodo attuabile dal gestore per analizzare l'efficacia della formazione, significa dare consapevolezza degli elementi da tenere sotto controllo per ottenere l'effetto e i risultati voluti o sperati.

Facendo riferimento all'allegato IV dell'ASR-128/16 si è considerato che per lo sviluppo di un progetto formativo, è possibile predisporre un confronto con le parole guida in esso riportate e la possibilità di tracciamento di:

- obiettivi
- risultati attesi

per ogni unità didattica del programma IFA nel contesto della programmazione periodica dello stabilimento in attuazione del SGS-PIR.

5.1 Individuazione degli obiettivi

Valutare l'efficacia della formazione implica in primo luogo verificare la coerenza degli obiettivi formativi proposti.

Particolare attenzione va posta su questo aspetto, in quanto gli obiettivi di tipo professionale basati sulla definizione del profilo tecnico, sono diretta conseguenza del fabbisogno formativo aziendale. Non è infatti semplice capire con precisione di che cosa l'azienda necessita dal punto di vista formativo; occorre saper individuare e conoscere esattamente quali siano le criticità, le carenze interne aziendali da correggere e i punti da migliorare, per poi riuscire ad intervenire attraverso obiettivi specifici.

Vi sono inoltre altri aspetti che devono essere presi in considerazione per raggiungere gli obiettivi; sono quelli legati esclusivamente all'individuo e al cambiamento che il singolo operatore dovrà affrontare secondo processi di natura psicologica, necessari a concettualizzare le informazioni ricevute. Questi obiettivi possono essere definiti come obiettivi di approccio senza dei quali la proposta formativa può risultare inadeguata.



Figura 1. Schema di verifica degli obiettivi

Andranno identificati gli obiettivi specifici relativi alla singola unità didattica; tipicamente gli obiettivi vengono declinati mediante parole chiave come:

- trasferire,
- illustrare,
- far conoscere,
- far acquisire,
- fornire,
- definire,
- delineare

Tali obiettivi potranno essere individuati nel progetto formativo e monitorati da indici specifici da prendere in considerazione nello sviluppo degli strumenti di verifica dell'efficacia.

Strettamente correlati agli obiettivi sono i "risultati attesi" dall'azione formativa che dovranno essere coerenti con tali obiettivi, conseguibili con la partecipazione al percorso formativo. Il raggiungimento dei risultati attesi dipende in buona misura dalla coerenza e adeguatezza progettuale, in termini di contenuti didattici e strategia formativa. I risultati attesi non dovranno limitarsi alla semplice acquisizione di nozioni, ma dovranno riflettere gli aspetti relativi al sapere agire, alla soluzione dei problemi e agli aspetti relazionali durante le attività che si è chiamati a svolgere. Tipicamente i risultati attesi possono essere declinati mediante parole chiave che possano descrivere sinteticamente il tipo di competenze e abilità (nella dimensione del saper fare e del saper essere) che dovranno possedere i discenti in uscita dal percorso formativo, come ad esempio:

- essere in grado di,
- saper individuare,
- saper svolgere,
- conoscere,
- acquisire metodi, criteri e strumenti

5.2 Progettazione degli interventi formativi

La progettazione degli interventi formativi dovrà cercare di trovare il giusto equilibrio tra le esigenze dell'organizzazione (azienda) e le posizioni aziendali alle quali gli interventi sono dedicati. La definizione dei ruoli, dei compiti e delle competenze effettivamente possedute dal lavoratore sono fondamentali per adeguare gli interventi. Una volta individuato quali siano le figure professionali che vogliamo formare si stabilisce quali risorse impiegare affinché gli interventi siano mirati.

La progettazione degli interventi, una volta fissati obiettivi coerenti sulla base del fabbisogno formativo, dovrà predisporre un planning dei punti da affrontare, ordinando gli argomenti secondo una sequenza logica. Come tutte le pianificazioni particolare attenzione va riposta ai tempi da dedicare ai vari argomenti trattati e alle esercitazioni/addestramenti. Infine, vanno individuati gli strumenti necessari al raggiungimento del risultato. La progettazione comprende la definizione della strategia formativa ossia le metodologie e gli strumenti più idonei in relazione alla specificità del percorso formativo e al target previsto, considerando che l'azione formativa è rivolta ad adulti in un contesto di formazione continua sul lavoro. È necessario dunque adottare un approccio di tipo andragogico che tenga conto della specificità dei processi di apprendimento e di coinvolgimento tipici degli adulti. In tal senso non si può prescindere dall'adozione di metodologie didattiche attive che saranno adottate nell'intero percorso formativo e in ciascuna unità didattica.

5.3 Adeguatezza delle risorse

Un elemento essenziale per valutare l'efficacia, è l'adeguatezza delle risorse messe a disposizione dall'azienda. Tra le risorse impiegate possiamo individuare quelle economiche, logistiche, gli strumenti impiegati, le attrezzature utilizzate e la scelta del docente/formatore.

5.4 Metodo formativo

Il metodo formativo dovrà tener presente oltre agli elementi fin qui esposti anche delle aspettative degli individui ai quali la formazione è rivolta. Il buon risultato degli interventi, sono legati alla soddisfazione personale dei discenti, che di conseguenza oltre alle conoscenze riusciranno a sviluppare atteggiamenti propositivi riguardo le indicazioni ricevute. Mentre le conoscenze possono essere valutate attraverso l'utilizzo di test finali di apprendimento e le abilità attraverso le esercitazioni, più difficile è comprendere se l'individuo abbia sviluppato e interiorizzato le informazioni ricevute. Per ottenere dei buoni risultati e per migliorare questo aspetto si può ricorrere al coinvolgimento degli addetti in momenti successivi all'attività di formazione, attraverso audit interni che portino al confronto gli stessi operatori. Il confronto durante la vita lavorativa è un ottimo strumento per elaborare i concetti e le nozioni viste, determinante per migliorare l'efficacia del percorso IFA.

ELEMENTI DA CONTROLLARE



Figura 2. Rappresentazione degli elementi di valutazione dell'efficacia

La verifica dell'apprendimento rappresenta la prima evidenza circa il raggiungimento degli obiettivi e dei risultati attesi in termini di conoscenze e competenze acquisite durante il corso.

In particolare:

- le conoscenze tecniche e metodologiche
- la capacità di analisi e di decisione
- la capacità di trasferimento delle conoscenze e competenze in ambito lavorativo

La verifica dell'apprendimento potrà essere sviluppata somministrando i test di verifica in itinere, sugli argomenti affrontati precedentemente nel corso, formulando anche domande che non siano solo di carattere teorico, mnemonico, ma anche di natura pratica e applicativa.

Tale momento favorisce anche la memorizzazione di nozioni, concetti, principi e pertanto l'uso integrato e appropriatamente variato delle modalità di verifica, in fasi diverse del processo di apprendimento, può dar modo ai discenti non solo di riscontrare l'utilità di quanto appreso in aula ai fini dell'esercizio delle proprie competenze professionali, ma anche permette loro di collegare i vari argomenti formativi in un unicum di esperienza.

La verifica dovrà essere esaustiva e completa in modo da permettere una valutazione di tutti gli argomenti affrontati nel modulo, sempre con riferimento agli obiettivi scelti.

In caso di utilizzo nella prova finale della simulazione, questa dovrà riprodurre un contesto aziendale in modo tale da rendere possibile la trasposizione dei concetti e dei metodi acquisiti riguardo alla salute e sicurezza negli ambienti di lavoro presi in esame.

Per ogni unità didattica, dal progetto formativo, si ricava lo strumento di verifica e i relativi indici per il monitoraggio.

6. Conclusioni

Lo studio proposto potrà essere utilizzato dai gestori per stabilire i criteri di valutazione dell'adeguatezza del piano formativo e individuare gli elementi per il controllo dell'efficacia dell'IFA. In particolare l'adeguatezza del piano formativo dovrà essere valutato considerando i seguenti criteri:

- corretta programmazione/integrazione sulla base delle esigenze emergenti;
- coinvolgimento dei Rappresentanti dei Lavoratori per la Sicurezza;
- scelta accurata di argomenti da trattare che devono essere qualificanti e innovativi;
- equilibrio fra didattica e coinvolgimento degli operatori in particolare sull'analisi e valutazione delle situazioni incidentali.

Per quanto riguarda la valutazione dell'efficacia dell'Informazione, Formazione e Addestramento, gli elementi fondamentali tra loro interconnessi da controllare sono:

- una progettazione specifica e mirata;
- l'individuazione del metodo formativo adeguato alle esigenze aziendali;
- la valutazione dell'adeguatezza delle risorse;
- la verifica continua nel tempo della coerenza degli obiettivi individuati con la proposta formativa.

7. Bibliografia

- [1] D.Lgs. 105/15, 26/06/2015, Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.
- [2] D.Lgs. 81/08, 9/04/2008, Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.
- [3] Accordo Stato Regioni (ASR) n. 221 21/12/ 2011 (ASR-221/11), Accordo tra il Ministro del lavoro e delle politiche sociali, il Ministro della salute, le Regioni e le Province autonome di Trento e Bolzano sui corsi di formazione per lo svolgimento diretto, da parte del datore di lavoro, dei compiti di prevenzione e protezione dai rischi, ai sensi dell'articolo 34, commi 2 e 3, del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81
- [4] Accordo Stato Regioni (ASR) n. 128 07/07/ 2016 (ASR-128/16), Accordo finalizzato alla individuazione della durata e dei contenuti minimi dei percorsi formativi per i responsabili e gli addetti dei servizi di prevenzione e protezione, ai sensi dell'articolo 32 del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81 e successive modificazioni.
- [5] Decreto Interministeriale del 06 marzo 2013: Criteri di qualificazione della figura del formatore per la salute e sicurezza sul lavoro.
- [6] D.M. 10/03/1998, Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro.
- 7] Decreto 02/05/2001, Criteri per l'individuazione e l'uso dei dispositivi di protezione individuale (DPI)
- [8] Decreto 16/03/1998, Modalità con le quali i fabbricanti per le attività industriali a rischio di incidente rilevante devono procedere all'informazione, all'addestramento e all'equipaggiamento di coloro che lavorano in situ.