



**ISPRA**  
Istituto Superiore per la Protezione  
e la Ricerca Ambientale

Dipartimento nucleare, rischio  
tecnologico e industriale



MINISTERO DELL'AMBIENTE  
E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE

Direzione per le valutazioni ambientali

Convenzioni tra ISPRA e ARPA, APPA, l'ENEA-INMRI,CRI, ISS nell'ambito della Convenzione del 29.12.2006 MATTM-ISPRA avente per oggetto "Supporto tecnico alla DSA all'elaborazione di linee guida ed indirizzi metodologici", linea di attività "Prevenzione dai rischi dell'esposizione a radiazioni ionizzanti", tematica "Implementazione di un sistema nazionale di monitoraggio della radioattività ambientale"

## Task n 03.02.01.

### VALUTAZIONE DI IMPATTI RADIOLOGICI DA NORM

Rev. 1		
Soggetti partecipanti	Verifica Coordinatore task (data e firma)	Approvazione (ISPRA) (data e firma)
ARPA Veneto	15/06/2015 Flavio Trotti (ARPA Veneto)	15/06/2015 Giancarlo Torri (ISPRA)
ARPA Friuli Venezia Giulia		
ARPA Lombardia		
ARPA Piemonte		
ARPA Toscana		
ARPA Puglia		
ISPRA		
Istituto Superiore di Sanità		
ENI	<i>Flavio Trotti</i>	<i>Giancarlo Torri</i>

---

Note

**Revisioni**

n.	data	Oggetto modifica
0	30/04/2014	
1	15/06/2015	refusi

---

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), le Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente (ARPA), le Agenzie Provinciali per la Protezione dell'Ambiente (APPA), l'Istituto superiore di sanità, l'ENI e le persone che agiscono per loro conto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute nel presente documento.

### **Autori**

Flavio Trotti (Arpa Veneto)  
Elena Caldognetto (Arpa Veneto)  
Massimo Garavaglia (Arpa Friuli Venezia Giulia)  
Concettina Giovani (Arpa Friuli Venezia Giulia)  
Rosella Rusconi (Arpa Lombardia)  
Enrico Chiaberto (Arpa Piemonte)  
Elena Serena (Arpa Piemonte)  
Mauro Magnoni (Arpa Piemonte)  
Silvia Bucci (Arpa Toscana)  
Ilaria Peroni (Arpa Toscana)  
Luigi Vitucci (Arpa Puglia)  
Giancarlo Torri (ISPRA)  
Giuseppe Menna (ISPRA)  
Jia Gougang (ISPRA)  
Cristina Nuccetelli (ISS)  
Giovanni Colombo (ENI)  
Roberto Fresca Fantoni (ENI)

### **Ringraziamenti**

Gli autori desiderano ringraziare i responsabili e i tecnici degli impianti che hanno consentito di effettuare i sopralluoghi, campionamenti e misure.

---

## Indice

Sommario esecutivo.....	6
Premessa.....	8
1 INTRODUZIONE.....	9
1.1 Punti di interesse della direttiva Europea 2013/59/Euratom.....	10
2 INDIVIDUI DELLA POPOLAZIONE.....	11
2.1 Generalità.....	11
2.2 Metodologia di screening per i materiali solidi.....	12
2.2.1 Radiation Protection 122 part II.....	12
2.3 Valutazioni di dose specifiche per i materiali solidi.....	15
2.4 Metodologia di screening per gli effluenti.....	15
2.4.1 Radiation Protection 135.....	15
2.4.2 Altri documenti a valenza internazionale.....	19
2.4.3 Dose efficace per i lavoratori del depuratore collegato allo scarico NORM.....	20
2.5 Valutazioni di dose specifiche per gli effluenti.....	22
3 LAVORATORI.....	22
3.1 Generalità.....	22
3.2 Irradiazione esterna.....	23
3.3 Inalazione.....	24
3.4 Inalazione da Rn-222.....	25
4 APPLICAZIONI DELLA METODOLOGIA DI SCREENING.....	26
4.1 Valutazione della dose degli individui della popolazione – Materiali solidi.....	26
4.1.1 Produzione di refrattari.....	26
4.1.2 Produzione delle piastrelle.....	27
4.1.3 Discarica di fosfogessi.....	28
4.1.4 Acciaierie a ciclo integrale.....	28
4.1.5 Produzione di allumina.....	29
4.1.6 Estrazione di petrolio.....	29
4.2 Valutazione della dose degli individui della popolazione – Effluenti.....	30
4.2.1 Produzione di refrattari.....	30
4.2.2 Produzione di piastrelle.....	31
4.2.3 Acciaierie a ciclo integrale.....	31
4.3 Valutazione della dose per i lavoratori (stime predittive).....	32
4.3.1 Industria di produzione fertilizzanti.....	32
4.3.2 Discarica di fosfogessi.....	33
4.3.3 Manutenzione a serbatoi del ciclo dell'estrazione di petrolio.....	33
4.3.4 Industria di produzione di refrattari.....	34
4.3.5 Industria di produzione di piastrelle.....	34
5 BIBLIOGRAFIA.....	36
Allegato A PRODUZIONE DI ENERGIA GEOTERMICA.....	38
1. Impianto geotermico a media entalpia.....	39
Allegato B PRODUZIONE DI CEMENTO.....	46
1 Cementificio Buzzi.....	47
Allegato C CENTRALI ELETTRICHE A CARBONE.....	54
1 Centrale Termoelettrica Federico II.....	55
Allegato D IMPIANTI PER LA FILTRAZIONE FALDE.....	67
1 Stazione dell'acquedotto di Metropolitana Milanese.....	68
2 Impianto captazione acque profonde.....	78
Allegato E CENTRALI ELETTRICHE A GAS.....	84
1 Sorgenia.....	85

---

## ACRONIMI

APAT – Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i Servizi tecnici (ora ISPRA)

APPA – Agenzie per la protezione dell’ambiente delle province autonome

ARPA, ARTA – Agenzie regionali per la protezione dell’ambiente

CE – Commissione Europea

CRI – Croce Rossa Italiana

DBRad – Data Base di radioattività ambientale

DSA – Direzione per la Salvaguardia Ambientale

EML – Environmental Measurements Laboratory

EN – Norme Europee

ENEA – Ente per le Nuove Tecnologie, l’Energia e l’Ambiente

EPA – Environmental Protection Agency

INMRI – Istituto di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti

IRSA – Istituto di Ricerca Sulle Acque

CNR – Consiglio Nazionale delle Ricerche

ISO – International Organization for Standardization

ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale

ISS – Istituto Superiore di Sanità

MATTM – Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare

MIDRad – Modulo Interscambio Dati di Radioattività

NORM – Naturally Occurring Radioactive Materials

RADIA – Sistema di trasferimento e archiviazione dati di radioattività ambientale

REM DB– Radioactivity Environmental Monitoring Data Base della Commissione Europea presso il Joint Research Center di Ispra (VA)

RESORAD – REte nazionale di SORveglianza della RADioattività ambientale

SINA – Sistema Informativo Nazionale Ambientale

UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione

SSNTD’s - Rivelatori a stato solido di tracce nucleari

---

## Sommario esecutivo

Nel **capitolo 1** è specificato l'obiettivo del lavoro, ossia valutare la dose per individui della popolazione e lavoratori interessati da materiali ed effluenti con presenza di NORM (*Naturally Occurring Radioactive Materials*), viene richiamata la normativa nazionale di settore e vengono date indicazioni generali sulla caratterizzazione radiometrica dei medesimi materiali ed effluenti. Infine è presentata una scheda di sintesi sui contenuti introdotti dalla nuova Direttiva Europea 2013/59 EURATOM del 5 dicembre 2013 che aggiorna la disciplina per la protezione dalle radiazioni ionizzanti.

Nel **capitolo 2** è trattata la metodologia per la valutazione della dose per gli individui della popolazione. Essa può essere eseguita, in una prima fase, con approccio di screening, secondo assunzioni conservative; ove in tal modo si stimassero valori di dose efficace prossimi al livello attuale di azione della legge italiana (0.3 mSv/anno), si dovrebbero poi sviluppare delle stime aderenti alla specifica condizione espositiva.

Per la metodologia di screening in merito all'allontanamento dei materiali solidi dalla lavorazione NORM, una buona base è costituita dal documento Radiation Protection 122 part II [1]. Esso fornisce dei livelli generalizzati di allontanamento (General Clearance Levels – GCLs) ossia concentrazioni di attività conformi al rispetto del criterio di dose efficace di 0.3 mSv/anno, utilizzabili per qualsiasi tipo di materiale (ad eccezione dei fondami dell'industria petrolifera, per i quali sono stabiliti livelli ad hoc) e a prescindere dagli scenari espositivi; non è tuttavia trattato l'incenerimento dei materiali in uscita (precludendo la possibilità di ricorrere ai GCLs in questa situazione). I GCLs concernono, peraltro, solo i residui/rifiuti della lavorazione NORM (non riguardano materie prime e prodotti). Nel presente documento i valori di RP 122 part II vengono proposti anche in termini di dose efficace individuale annua per unità di concentrazione di attività nel materiale (svincolandoli dal criterio di dose degli 0.3 mSv/anno).

Ove sia necessario/opportuno svolgere valutazioni specifiche di dose, si può ricorrere a modelli previsionali di calcolo (es. Resrad per le discariche [2]), o adattare le parametrizzazioni di RP 122 part II al caso in esame.

Per la metodologia di screening relativa al rilascio da parte della lavorazione NORM di effluenti liquidi e gassosi, un valido supporto è il documento RP 135 [3]. Esso fornisce le dosi efficaci individuali annue per unità di attività rilasciata (ovvero i livelli di attività annua scaricata corrispondenti al criterio di dose efficace di 0.3 mSv/anno) per le emissioni in atmosfera (per diverse altezze efficaci dei camini), in fiume (per diverse portate del corpo idrico), in mare (aperto o costiero). RP 135 non contempla lo scenario di convogliamento degli effluenti liquidi NORM verso depuratore pubblico. Ne tiene conto il rapporto IAEA 19 [4], in termini di esposizione dei lavoratori del depuratore ai fanghi contaminati; tuttavia IAEA 19 presenta stime solo per un certo numero di radionuclidi: ragion per cui, il presente documento introduce un semplice algoritmo che consente di sviluppare stime di dose individuale in uno scenario siffatto. Dell'esposizione derivante dall'eventuale uso in agricoltura dei fanghi del depuratore interessato dagli effluenti NORM, tiene conto il documento NRPB 13/2 [5] che, ancora, però si limita formulare previsioni per un numero ristretto di radionuclidi.

Ove necessario/opportuno svolgere valutazioni specifiche di dose, si può ricorrere a modelli previsionali di calcolo (PC Cream [6], ADMS [7], Poseidon [8]) o adattare le parametrizzazioni dei documenti di screening al caso in esame.

Nel **capitolo 3** si propone un'agile metodologia per la valutazione dell'esposizione dei lavoratori di un'azienda NORM. Sono contemplate le seguenti vie di esposizione: irradiazione esterna, inalazione di particolato radioattivo, inalazione di gas radon. La metodologia è pensata sia per determinazioni con misure in situ di rateo dose da irradiazione esterna, di concentrazione in aria di gas radon e particolato radioattivo, sia per stime previsionali (basate sulla conoscenza della concentrazione di attività nei materiali NORM). Possono essere conseguite valutazioni conservative adottando adeguate ipotesi sull'espressione degli algoritmi e sulla valorizzazione dei parametri in essi contenuti.

Infine, nel **capitolo 4** sono mostrate delle applicazioni della metodologia di valutazione della dose per gli individui della popolazione da materiali solidi (paragrafo 4.1), per gli individui della popolazione da effluenti (paragrafo 4.2) e per i lavoratori (paragrafo 4.3).

Al termine del documento vengono riportati come **allegati** alcuni casi studio in cui vengono applicate le metodologie di valutazione di dose esposte nei capitoli 2, 3 e 4. Benché riportati come allegati, questi studi

---

rappresentano una parte essenziale del presente lavoro. All'interno del gruppo di lavoro si è deciso infatti di prendere in considerazione le attività riportate nell'allegato VI della nuova direttiva 2013/59/EURATOM. In tale allegato viene riportato un elenco dei settori industriali che comportano l'impiego di materiali contenenti radionuclidi presenti in natura. Per alcune di queste attività si è deciso di condurre approfondimenti specifici prendendo in considerazione uno o più casi studio concreti. Le valutazioni di dose da esposizione sono state effettuate quindi utilizzando i risultati delle misure effettuate direttamente nel corso dei vari sopralluoghi o sui campioni prelevati nel corso dei sopralluoghi stessi.

Nel dettaglio gli allegati contengono:

**Allegato A** – Produzione di energia geotermica (un caso studio)

**Allegato B** – Produzione di cemento, manutenzione di forni per la produzione di clinker (un caso studio)

**Allegato C** – Centrali elettriche a carbone, manutenzione di caldaie (un caso studio)

**Allegato D** – Impianti per la filtrazione delle falde freatiche (due casi studio)

**Allegato E** – Centrali elettriche a gas (un caso studio)

Da ultimo si sottolinea che nel corso di svolgimento di tutte le attività, i cui risultati sono riportati negli allegati sono state effettuate una grande quantità di misure di irraggiamento, prelevamento di campioni, misure di spettrometria gamma e misure di spettrometria alfa e beta che hanno permesso di avere un primo quadro di attività di cui prima non si conosceva nulla.

---

## **PREMESSA**

Il Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare-Direzione Generale per le Valutazioni Ambientali (DVA) e l’ISPRA hanno stipulato una Convenzione avente per oggetto il supporto tecnico alla DSA (ora DVA) all’elaborazione di linee guida ed indirizzi metodologici.

La Convenzione include la linea di attività “Prevenzione dai rischi dell’esposizione a radiazioni ionizzanti”, che a sua volta include la tematica “Implementazione di un sistema nazionale di monitoraggio della radioattività ambientale”.

Nell’ambito della tematica sopra citata, attraverso una preventiva consultazione con tutte le Agenzie regionali e provinciali per la protezione ambientale e gli enti qualificati, quali l’Istituto Superiore di Sanità (ISS), l’Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l’energia e lo sviluppo economico sostenibile-Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (ENEA-INMRI) e la Croce Rossa Italiana (CRI), sono state individuate sedici specifiche attività prioritarie (task).

Per la realizzazione delle task sono state stipulate apposite convenzioni tra l’ISPRA e le ARPA, APPA, l’ENEA-INMRI e la CRI e un accordo con l’ISS. Nell’allegato tecnico alle convenzioni sono state individuate le compagini e i coordinatori delle task.

Il presente documento è stato elaborato nel contesto della Convenzione tra ISPRA e alcune ARPA (Veneto, Lombardia, Toscana, Friuli Venezia Giulia, Puglia, Piemonte) in materia di Implementazione di un Sistema nazionale di monitoraggio della radioattività ambientale, con specifico riferimento alla task 03.02.01 Valutazione di impatti radiologici da NORM. Al gruppo di lavoro (coordinato da ARPA Veneto) hanno partecipato anche l’Istituto Superiore di Sanità e l’ENI. La Convenzione con ARPA Veneto è in vigore dal 24.05.12 e con scadenza il 31.01.13 (poi prorogata prima al 31.01.14 e poi al 30.04.14).

Va segnalato che all’ambito di pertinenza di questa task è stato ricondotto il prodotto atteso dalla task 01.02.03 “Livelli di allontanamento, esenzione, riferimento (anche NORM)” relativamente alla materia dei NORM.

---

## 1 INTRODUZIONE

I NORM (*Naturally Occurring Radioactive Materials*) sono i materiali con elevato contenuto di radioattività naturale; si rinvencono nelle attività lavorative come materie naturali o come risultato dei processi lavorativi. E' opportuno rimarcare la distinzione tra questo tipo di materiale, non impiegato per le intrinseche proprietà radioattive, e le sostanze radioattive pure di origine naturale che, viceversa, vengono utilizzate proprio in virtù delle suddette proprietà radioattive.

La normativa nazionale (D. Lgs. 230/95 come modificato dal D.Lgs 241/00) disciplina l'esposizione di lavoratori e popolazione alle attività lavorative con NORM al Capo IIIbis. In particolare, individua un insieme di attività soggette agli adempimenti normativi. Esse sono:

- a) industria che utilizza **minerali fosfatici** e depositi per il commercio all'ingrosso dei fertilizzanti;
- b) **lavorazione di minerali** nella estrazione di stagno, ferro-niobio da pirocloro e alluminio da bauxite;
- c) lavorazione di **sabbie zirconifere** e produzione di materiali refrattari;
- d) lavorazione di **terre rare**;
- e) lavorazione ed impiego di **composti del torio** (elettrodi per saldatura, produzione di lenti, reticelle per lampade a gas);
- f) produzione di **pigmento al biossido di titanio**;
- g) **estrazione e raffinazione di petrolio e estrazione di gas**.

La legge prevede che, a cura di un Esperto Qualificato, venga eseguita una valutazione di dose per lavoratori e membri del pubblico interessati dalla singola azienda e stabilisce dei livelli di azione, superati i quali il datore di lavoro deve intervenire per riportare le esposizioni al di sotto di essi. In tale fattispecie (superamento dei livelli di azione), questi deve inviare una comunicazione agli Enti di controllo.

I livelli di azione, espressi in termini di dose efficace individuale, sono pari a 1 mSv/anno per i lavoratori e a 0.3 mSv/anno per i membri del pubblico.

Va sottolineato, in questo contesto, che per l'ambito normativo qui esaminato, agli individui della popolazione sono assimilati anche i lavoratori delle aziende diverse da quella ove si esercita l'attività NORM, pur se in qualche modo ad essa collegate (per l'allontanamento dei residui, per il riutilizzo dei medesimi, ...).

In questo documento si propone una metodologia per la valutazione della dose per lavoratori e membri del pubblico, adottabile per l'effettuazione delle stime richieste dalla legislazione nazionale. Va evidenziato, comunque, che la metodologia è utilizzabile anche al di fuori del puro dettato normativo, cioè a dire per attività lavorative non ricomprese nell'elenco sopra riportato, ma che magari hanno riscontro nella letteratura scientifica e nelle realtà di altri Paesi; inoltre, quella che si propone è una metodologia, dunque diverse altre possono essere adottate per adempiere alla domanda della normativa.

Ulteriori attività lavorative, rispetto a quelle della legislazione italiana, sono introdotte dalla nuova Direttiva Europea che aggiorna la disciplina per la protezione dalle radiazioni ionizzanti [9], recentemente emanata. Nel seguente paragrafo è presentata una scheda di sintesi che illustra alcuni punti di tale Direttiva d'interesse per la materia dei NORM.

Qualche considerazione generale e preliminare va fatta in ordine alla caratterizzazione radiometrica dei materiali, senza avere la presunzione di introdurre protocolli analitici e/o norme tecniche.

Caratterizzazione radiometrica dei materiali significa determinare le concentrazioni di attività dei radionuclidi delle serie naturali di U-238 e Th-232 e del K-40. In prima battuta si può trascurare la serie dell'U-235 dato il

minor peso relativo di abbondanza isotopica; ove, in questo documento, siano riportate informazioni su di essa, a parte i casi in cui si renda necessaria una trattazione specifica, ciò viene svolto a titolo di ulteriore contributo informativo.

I radionuclidi delle serie naturali di U-238 e Th-232 possono trovarsi in equilibrio secolare con il proprio capostipite (e questa è la condizione ricorrente quando si esaminano le materie prime) oppure no: in questi casi è comodo trattare le due serie in termini di semiserie, ovvero di segmenti di catene costituite da un progenitore di tempo di dimezzamento non breve e discendenti di emivita breve in equilibrio secolare con lo stesso. Da un punto di vista analitico è allora sufficiente misurare la concentrazione di attività di almeno un radionuclide per ciascuna semiserie per avere il controllo su tutta la serie. A seguire (tab. 1) la segmentazione delle catene di U-238 e Th-232 per semiserie:

**Tabella 1.1** - Semiserie delle catene naturali di U-238 e Th-232

Segmento catena	Nuclidi considerati in equilibrio secolare
U-238+	U-238, Th-234, Pa-234m
U-234	U-234
Th-230	Th-230
Ra-226+	Ra-226, Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214
Pb-210+	Pb-210, Bi-210
Po-210	Po-210
Th-232	Th-232
Ra-228+	Ra-228, Ac-228
Th-228+	Th-228, Ra-224, Po-216, Pb-212, Bi-212, Po-212 (diramazione), Tl-208 (diramazione)
Catena intera	Segmenti di catena in equilibrio secolare
U-238sec	U-238+, U-234, Th-230, Ra-226+, Pb-210+, Po-210
Th-232sec	Th-232, Ra-228+, Th-228+

Nota: per la serie dell'U-235 sono identificabili tre segmenti, con equilibrio secolare interno a ciascuno di essi: U-235+ (U-235, Th-231), Pa-231, Ac-227+ (Ac-227, Th-227, Fr-223, Ra-223, Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Po-211, Tl-207)

In giallo sono evidenziate le semiserie determinabili tramite spettrometria gamma.

La conoscenza sull'equilibrio secolare o meno della catena nel suo complesso discende dunque dall'attività sperimentale (esiti delle determinazioni sulle diverse semiserie in accordo l'una con l'altra) e/o da informazioni sul processo lavorativo (come detto le materie prime spesso denotano equilibrio secolare; è noto, viceversa, il disequilibrio che si realizza nei processi termici a causa della volatilizzazione di Pb-210 e Po-210, quello che occorre nella produzione di acido fosforico ove il radio nell'attacco chimico si concentra nel sottoprodotto fosfogesso, ...). Alcune considerazioni integrative: l'U-234 può essere trattato nel rapporto isotopico naturale con l'U-238 (se non sussistono processi chimici che agiscono selettivamente sulla massa del radionuclide); l'analisi radiochimica è opportuna o necessaria per Pb-210 e Po-210 (anche per Th-230/Th-232 ove specificamente significativi e non desumibili da assunzioni sull'equilibrio complessivo della catena).

## 1.1 Punti di interesse della direttiva Europea 2013/59/Euratom

La Direttiva, che dovrà essere recepita dalle legislazioni nazionali dei Paesi Membri entro il 6 Febbraio 2018, ricomprende le attività lavorative con NORM all'interno delle situazioni di esposizione pianificata, quelle per cui le aziende interessate devono instaurare un regime di radioprotezione (per lavoratori e popolazione) sin dall'avvio dell'attività, al pari di quanto è previsto per le attività con radionuclidi impiegati appositamente per le loro proprietà radioattive.

Viene stabilito un elenco di attività lavorative con NORM soggette alle disposizioni di legge che, rispetto a quanto già indicato nel D.Lgs 241/00, presenta alcune novità: i sistemi di filtrazione delle acque sotterranee, la produzione geotermica di energia, le centrali a carbone (manutenzione delle caldaie), la produzione di cemento (manutenzione dei forni clinker), la produzione di ferro primario.

E' previsto un approccio graduale al regime regolatorio per le aziende interessate.

---

Sono esenti (non devono cioè produrre una notifica iniziale alle Autorità competenti) le attività lavorative con materiali caratterizzati da concentrazioni di attività inferiori a 1 Bq/g (serie dell'U-238 e del Th-232 in equilibrio secolare) o 10 Bq/g (K-40). Questi sono anche i livelli di allontanamento, ossia i livelli per cui il materiale (residui/rifiuti) può essere rimosso senza vincoli di natura radiologica. Per segmenti delle serie naturali (es. Pb-210 e Po-210) si possono ipotizzare livelli di esenzione/allontanamento più alti.

L'esenzione dalla notifica e l'allontanamento sono perseguibili ove siano rispettati i criteri generali di esenzione e allontanamento, anche se le concentrazioni di attività in gioco superino le soglie sopra riportate. I criteri generali suddetti, in termini dosimetrici, corrispondono alla dose efficace individuale, per lavoratori e membri del pubblico, di 1 mSv/anno<sup>1</sup>. Gli Stati Membri hanno facoltà, per situazioni specifiche, di individuare soglie di esenzione dalla notifica/allontanamento più alte di 1 Bq/g (10 Bq/g) conformi a tale criterio generale dosimetrico.

Come per le altre pratiche lavorative rientranti nelle situazioni di esposizione pianificata, anche per i NORM, gli Stati Membri valutano in quali condizioni espositive il regime regolatorio sulle attività lavorative richieda il ricorso all'autorizzazione (in forma di registrazione o licenza) da parte dell'Autorità competente, in luogo della mera notifica.

La notifica è dovuta nei casi in cui vi sia la possibilità, riconosciuta dallo Stato Membro, che la pratica con NORM interessi l'approvvigionamento di acqua potabile. I livelli di esenzione dalla notifica precedentemente detti non possono essere utilizzati nei casi di incorporazione di residui NORM nei materiali da costruzione, nel qual caso vanno seguiti gli adempimenti e i valori protezionistici specificamente introdotti dalla Direttiva per i materiali da costruzione.

Infine, per i lavoratori delle aziende NORM si applicano gli stessi limiti di dose previsti per tutti i casi di situazione espositiva pianificata, ovvero, in termini di dose efficace: 1 mSv/anno per l'esposizione non professionale, 6 mSv/anno per i lavoratori esposti in categoria B, 20 mSv/anno per i lavoratori esposti in categoria A.

## 2 INDIVIDUI DELLA POPOLAZIONE

### 2.1 Generalità

Un individuo della popolazione può essere interessato da esposizione a NORM avendo a che fare con materiale solido che viene allontanato dall'azienda/attività che ha lavorato il NORM: per esempio vivendo in prossimità di una discarica che ha accolto rifiuti contenenti NORM oppure, in qualità di lavoratore non appartenente all'azienda NORM, ma che opera nel settore del trasporto di residui e rifiuti di aziende NORM, ... La seconda fonte di esposizione di rilievo per il cittadino dalle lavorazioni con NORM è costituita dall'emissione di effluenti gassosi (in atmosfera) e liquidi (in corpo idrico) ad opera dell'azienda del caso.

Per la valutazione della dose ai membri del pubblico si presenta, di seguito, una duplice opzione: il ricorso ad una metodologia di screening, più immediata, come primo approccio al problema, con successivo approfondimento ove la situazione lo richieda. Il computo di screening concerne, tipicamente, scenari non specifici e parametrizzazioni generali in un'ottica conservativa; l'eventuale approfondimento si sviluppa invece sugli specifici scenari e parametrizzazioni espositivi. L'approfondimento comincia a essere doveroso ove le stime derivate tramite la metodologia di screening si attestano vicino alla soglia di dose fissata dalla normativa (o indicata dalla documentazione scientifica di settore). Nel caso della legge italiana, come detto, tale soglia, per gli individui della popolazione, corrisponde al livello di azione pari a 0.3 mSv/anno (dose efficace individuale).

Un altro elemento di fondo riguarda le metodologie che vengono presentate, le quali si basano su tecniche modellistiche, più o meno complesse, sia per i materiali solidi che per gli effluenti, sia nell'opzione di screening che in quella di approfondimento. La previsione viene formulata a partire dallo strumento modellistico adottato e dalla caratterizzazione radiologica della sorgente (contenuto di radionuclidi delle serie naturali e K-40 nei materiali che vengono allontanati o negli effluenti prodotti dall'azienda NORM). Ciò perché la compatibilità con il livello di azione per i membri del pubblico andrebbe verificata in fase

---

<sup>1</sup> Gli Stati Membri possono, per gli individui della popolazione, indicare valori di dose efficace inferiori per specifiche pratiche/vie di esposizione

---

previsionale, prima cioè che l'azienda NORM cominci a rilasciare in ambiente residui/rifiuti o effluenti radiologicamente non conformi. C'è anche da dire, poi, che la determinazione sperimentale dell'esposizione degli individui della popolazione derivante dall'allontanamento di residui/rifiuti o dal rilascio di effluenti NORM è in molte situazioni difficilmente praticabile perché l'apporto di radioattività di origine naturale associato all'azienda con lavorazioni NORM può essere mascherato dalle oscillazioni del fondo naturale locale (si pensi ad esempio di voler analizzare la presenza nei suoli di radionuclidi rilasciati con le emissioni in aria da parte dell'azienda NORM, a fronte di radionuclidi dello stesso tipo quantitativamente assai più rilevanti come contenuto intrinseco del suolo).

## **2.2 Metodologia di screening per i materiali solidi**

### **2.2.1 Radiation Protection 122 part II**

Il documento, ad oggi, più significativo per valutazioni di conformità nell'allontanamento di materiali solidi da lavorazioni NORM è Radiation Protection 122 part II [1] dell'Unione Europea.

Esso fornisce dei Livelli di allontanamento generali (General Clearance Levels – GCLs), ovvero le concentrazioni di attività dei materiali al di sotto delle quali l'allontanamento è consentito in modo incondizionato: vale a dire che, qualunque sia il destino del materiale, sussiste il rispetto del criterio di dose adottato (pari a 0.3 mSv/anno di dose efficace agli individui della popolazione). Ove non vi fosse conformità con i GCLs, non è detto che il materiale interessato comporti il superamento del predetto criterio di dose: in queste situazioni vanno determinati i Livelli di allontanamento specifici, cioè le concentrazioni di attività che per gli specifici percorso e destinazione del rifiuto/residuo NORM configurano il raggiungimento della dose efficace individuale di 0.3 mSv/anno.

In sostanza, nel documento, si ipotizzano vari scenari di esposizione ai rifiuti/residui rilasciati dall'azienda NORM e per ciascuno di essi vengono valutate le dosi efficaci annue per unità di concentrazione di attività alle persone coinvolte nello scenario: può trattarsi di membri del pubblico o lavoratori a questi equiparati perché operano in aziende diverse da quella che ha prodotto il materiale NORM. Gli scenari consistono: nel trasporto (lavoratori), nell'immagazzinamento con volumi più o meno ampi (lavoratori), nella realizzazione di sottofondo stradale (lavoratori), nella sistemazione in discarica (lavoratori e popolazione), nel riutilizzo in materiali da costruzione (lavoratori e popolazione), nel livellamento del suolo di aree ricreative pubbliche (popolazione). Quando si parla di individui della popolazione ci si riferisce a soggetti delle diverse fasce di età (dai lattanti agli adulti, attraverso fasce intermedie).

Per ogni scenario, le stime vengono condotte con riferimento a diverse tipologie fisiche di materiale (scarto roccioso, scoria, sabbia, cenere), poiché le suddette caratteristiche fisiche incidono sulle modalità di dispersione aerea del materiale.

Le vie di esposizione che, vengono analizzate nei singoli scenari sono: l'irradiazione esterna, l'inalazione, l'ingestione (indiretta). Le dosi efficaci (per unità di concentrazione di attività) conseguenti alle differenti vie di esposizione vengono sommate per ciascuno scenario. Nello scenario più complesso, quello di permanenza residenziale di individui presso una discarica, è contemplata anche l'esposizione dovuta all'ingestione di alimenti prodotti sul terreno trattato con acqua di falda contaminata dal percolato radioattivo; l'ingestione diretta dell'acqua di falda contaminata non è considerata (viene detto di far riferimento, in questo caso, alla Direttiva Europea sull'acqua per il consumo umano [10], la quale, per inciso, indica come soglia di accettabilità – Dose Totale Indicativa – la dose efficace individuale di 0.1 mSv/anno). Così come, negli scenari pertinenti, non è cumulata la dose dovuta all'inalazione del radon e dei suoi figli di breve emivita, pur essendo stimata la concentrazione in aria del gas derivante dalla presenza dei materiali NORM.

Per il calcolo delle dosi efficaci per irradiazione esterna è stato fatto ricorso al modello di simulazione Microshield [11], impostando i fattori geometrici sorgente-ricettore del caso. I coefficienti di dose da inalazione e da ingestione sono stati tratti dalla Direttiva UE 96/29 [12]; per l'inalazione, in particolare, sono stati selezionati i coefficienti più cautelativi, sia per i membri della popolazione che per i lavoratori (valore relativo ad AMAD 5  $\mu$ m per questi ultimi).

I valori di dose efficace annua per unità di concentrazione di attività derivati nei vari scenari sono riferiti alle intere catene naturali di decadimento (U-238 e Th-232) nell'ipotesi di equilibrio secolare della serie, ovvero per segmenti di catena come da tab. 1 nei casi di rottura dell'equilibrio; vi è inoltre il dato del K-40.

Ancora in tema di aspetti metodologici, il documento tiene conto, nei diversi scenari, della dose efficace del fondo naturale che viene abbattuta per via della presenza del materiale NORM (schermatura della radiazione esterna, rimpiazzo di materiale naturale, ...).

Alla fine, per ciascun radionuclide (nell'accezione di cui sopra) è tenuto il valore unitario di dose efficace annua più alto tra quelli ottenuti per i diversi scenari, materiali, individui (lavoratori e membri della popolazione delle varie fasce d'età).

Il documento fa un'eccezione, in ordine alla tipologia di materiale considerato, per i fanghi provenienti dall'estrazione di petrolio e gas naturale. La distinzione nasce dal fatto che solitamente i residui/rifiuti di questa natura sono allontanati in quantitativi che risultano limitati (sono scarti di produzione) se confrontati con i quantitativi massivi di altri settori (sottoprodotti di lavorazione quali i fosfogessi, i fanghi rossi, ecc.); in quanto tali sono soggetti a diluizione con altri materiali, vengono trasportati/immagazzinati in contenitori chiusi, la permanenza dei lavoratori presso di essi è più breve, ... cosicché le dosi per unità di concentrazione si abbassano; peraltro taluni scenari non sono di fatto applicabili a suddetti residui/rifiuti (ad es. l'impiego nei materiali da costruzione).

Il valore di dose efficace annua per unità di concentrazione di attività dei singoli radionuclidi (distintamente per tutti i materiali e per i fanghi dell'industria del petrolio e gas naturale) è convertito in livello di allontanamento (in Bq/g) avendolo rapportato al criterio di dose (dose efficace di 0.3 mSv/anno); a valle della conversione è infine attuato un arrotondamento sulle cifre, per i cui dettagli si rimanda al documento stesso [1]. In tab. 2.1 sono presentati i valori dei livelli di allontanamento così ottenuti (General Clearance Levels), per singolo radionuclide e categoria di materiale (distintamente per tutti i materiali/fanghi dell'industria del petrolio e gas naturale). In tab. 2.2 sono, invece, mostrati i valori di dose efficace annua per unità di concentrazione di attività (per radionuclide e categoria di materiale), calcolati in base ai dati della tab. 2 e, ancora, il criterio di dose (dose efficace di 0.3 mSv/anno)

In molte situazioni, nei materiali si rinvenivano vari radionuclidi (segmenti delle due catene di decadimento), ovvero entrambe le catene naturali in equilibrio secolare, oltre al solito K-40. Va dunque eseguita una verifica complessiva di conformità del materiale.

Se il computo viene eseguito sulle dosi efficaci, naturalmente, va calcolata la dose efficace del singolo radionuclide coinvolto tramite moltiplicazione della propria concentrazione di attività con il rispettivo coefficiente della tab. 2.2 (dose efficace annua per unità di concentrazione di attività), sommando alla fine su tutti i radionuclidi.

**Tabella 2.1** – Livelli di allontanamento (Generale Clearance Levels) per i radionuclidi contenuti nei residui/rifiuti provenienti da lavorazioni NORM [1]

Radionuclide	Livello di allontanamento (Bq/g)	
	Tutti i materiali	Fanghi dell'industria petrolio/gas
Serie U-238 eq. Sec.	0.5	5
U-nat*	5	100
Th-230	10	100
Ra-226+	0.5	5
Pb-210+	5	100
Po-210	5	100
Serie Th-232 eq. Sec.	0.5	5
Th-232	5	100
Ra-228+	1	10
Th-228+	0.5	5
K-40	5	100

\* isotopi dell'uranio nel rapporto isotopico standard; confrontando con questo livello il dato misurato dell'U-238, viene automaticamente operato il confronto anche per U-235 e U-234 (in rapporto isotopico standard con U-238), oltreché per i prodotti di breve emivita di U-238 (Th-234 e Pa-234m)

**Tabella 2.2** – Dose efficace annua per unità di concentrazione di attività per gli individui della popolazione (lavoratori terzi inclusi), derivante da esposizione a residui/rifiuti allontanati da azienda NORM [1]

Radionuclide	Coefficienti di dose efficace	Coefficienti di dose efficace
	[(mSv/anno)/(Bq/g)] Tutti i materiali	[(mSv/anno)/(Bq/g)] Fanghi dell'industria petrolio/gas
Serie U-238 eq. Sec.	0.6	0.06
U-nat*	0.06	0.003
Th-230	0.03	0.003
Ra-226+	0.6	0.06
Pb-210+	0.06	0.003
Po-210	0.06	0.003
Serie Th-232 eq. Sec.	0.6	0.06
Th-232	0.06	0.003
Ra-228+	0.3	0.03
Th-228+	0.6	0.06
K-40	0.06	0.003

\* isotopi dell'uranio nel rapporto isotopico standard; confrontando con questo livello il dato misurato dell'U-238, viene automaticamente operato il confronto anche per U-235 e U-234 (in rapporto isotopico standard con U-238), oltreché per i prodotti di breve emivita di U-238 (Th-234 e Pa-234m)

Se, viceversa, si opera con i livelli di allontanamento della tab. 2.1, la conformità del materiale risulta se:

$$\sum_i (c_i/c_{li}) \leq 1 \quad \text{eq. (1),} \quad \text{ove}$$

$\sum_i (c_i/c_{li})$  = indice somma;

$c_i$  = concentrazione di attività del radionuclide i-esimo (Bq/g);

$c_{li}$  = livello di allontanamento del radionuclide i-esimo (Bq/g).

Va sottolineato che tra gli scenari sottesi al calcolo dei General Clearance Levels non vi è l'incenerimento del residuo/rifiuto NORM: ne consegue che essi non possono essere adottati in presenza della suddetta forma di allontanamento. A questo riguardo è utile anticipare il fatto che la valutazione dell'impatto prodotto dalle emissioni in atmosfera conseguenti l'incenerimento di rifiuti/residui NORM è trattata dai documenti descritti nel successivo paragrafo 2.4.

Gli scenari proposti da RP 122 part II riguardano tutti l'allontanamento di residui/rifiuti (per il successivo riuso/riciclo/smaltimento). Ovvero non sono descritte situazioni espositive inerenti i prodotti della lavorazione, situazioni che, evidentemente, concernono l'uso dei prodotti da parte della popolazione (fertilizzanti in agricoltura, piastrelle negli edifici, refrattari nei luoghi di lavoro, ...).

In questo senso i General Clearance Levels non possono essere applicati ai prodotti della lavorazione. La normativa nazionale, d'altro canto tratta la materia (art. 10 novies del D. Lgs. 230/95), ma in termini molto generali.

Va anche rimarcato che, nei casi in cui il prodotto abbia un impiego in edilizia, può essere richiamata la letteratura tecnico-normativa tematica per le stime di interesse (ad es. RP 112 [13]).

Un'altra fattispecie da analizzare è quella delle materie prime (non di scarto), quali i minerali fosfatici, le sabbie zirconifere, la bauxite, .... Anche in questo caso il procedimento complessivo organizzato da RP 122 part II non è adatto (pur se taluni scenari possono essere mutuati per la valutazione della dose; si pensi al trasporto e all'immagazzinamento). In realtà, le materie prime, essendo materiale che interviene nella lavorazione NORM soggetta a restrizioni radiologiche per legge, vanno esaminate nel contesto della valutazione a carico dell' esercente l'attività delle esposizione dei lavoratori, con riferimento al livello di azione di 1 mSv/anno (dose efficace individuale); si rimanda a tal fine al capitolo 3. Può accadere che a operare con le materie prime le cui lavorazioni sono ricomprese nella lista di attività NORM dell'Allegato I-bis del D. Lgs. 230/95 siano attività che su di esse non eseguono trattamenti (es. trasporto), così da non appartenere alla suddetta lista; in questo caso torna a presentarsi un'esposizione caratteristica di membri del pubblico con i riferimenti dosimetrici propri della categoria (0.3 mSv/anno – dose efficace individuale).

---

## 2.3 Valutazioni di dose specifiche per i materiali solidi

Laddove gli esiti delle stime di screening indicassero potenziali criticità o, in generale, ove se ne ravvisasse la necessità, le valutazioni di dose per gli individui possono essere condotte con riferimento alla specifica situazione interessata.

Si può utilizzare la stessa metodologia di cui al precedente paragrafo, adattati nello scenario e nelle parametrizzazioni al caso reale.

Si può, altresì, ricorrere a strumenti di calcolo più sofisticati, tipicamente modelli di simulazione fruibili come codici per computer. Aspetti salienti dei medesimi sono la caratterizzazione specifica dell'impianto e dei siti interessati dal trasferimento della contaminazione agli individui del gruppo di riferimento, l'impiego di algoritmi e parametri accurati.

Un software, in tal senso, significativo è Resrad [2], sviluppato dall'Argonne National Laboratory (USA) e scaricabile gratuitamente dalla rete. Esso simula gli effetti dovuti al rilascio di materiale NORM in discarica (conseguenza, anche della contaminazione della falda), contemplando i seguenti gruppi di riferimento della popolazione: i soggetti che esercitano attività ricreativa sulla discarica (caccia, pesca, jogging), i soggetti che abitano in una casa costruita sulla discarica (scenario poco attendibile), i soggetti che abitano in una casa posta nelle vicinanze della discarica (nuova versione del software). Il software ricostruisce con meticolosità le caratteristiche geometriche e geologiche del sito interessato dalla collocazione del rifiuto. Un'applicazione di Resrad al caso di confinamento di ceneri provenienti dalla combustione di fondame petrolifero (scenario considerato: attività ricreativa sulla discarica) è descritta nella ref. [14].

## 2.4 Metodologia di screening per gli effluenti

### 2.4.1 Radiation Protection 135

RP 135 [3] analizza la problematica degli effluenti (liquidi e gassosi) prodotti da lavorazioni NORM. Esso si articola in tre sezioni: la prima è costituita dalla rassegna delle occorrenze di rifiuti/effluenti da lavorazioni NORM in Europa, la seconda fornisce delle linee guida per eseguire un corretta valutazione della dose alla popolazione da effluenti (liquidi e gassosi) NORM, la terza elabora dei livelli di screening (in termini di attività rilasciata per anno) per sondare la conformità radiologica delle emissioni (liquide e gassose). A questa terza sezione si fa riferimento nel seguito.

La metodologia utilizzata per derivare i livelli di screening consiste nell'applicazione della modellistica di dispersione ambientale al dato di sorgente (la quantità di radionuclide immessa in atmosfera/corpo idrico in un anno) per calcolare le dosi agli individui dei gruppi di riferimento della popolazione. Gli scenari considerati sono le immissioni in atmosfera per diverse altezze del camino (10, 50, 100 e 200 m), in fiume per diverse portate del medesimo (2.5, 100, 500 m<sup>3</sup>/s), in mare (lungo la costa o in mare aperto). L'output della stima è un coefficiente di dose di screening, ovvero la dose efficace individuale annua per unità di attività annua rilasciata, per singolo radionuclide (o meglio per segmento di catena dell'U-238, del Th-232 e dell'U-235 – ovvero per la catena nel suo complesso in condizioni di equilibrio secolare – secondo tab. 1) e per singolo scenario; normalizzando questo valore al criterio di dose efficace di 0.3 mSv/anno, vengono ricavati i livelli di screening veri e propri.

Il documento sottolinea che, in generale, la via modellistica alla stima delle dosi prodotte dagli effluenti NORM nell'ambiente (previa caratterizzazione sperimentale del dato sorgente) è la più efficace/fattibile, essendo l'alternativa, di monitorare empiricamente le matrici ambientali per determinarne l'impatto dell'inquinante, sostanzialmente infattibile considerata la presenza nelle stesse del fondo di radioattività naturale.

Per le emissioni in atmosfera il documento utilizza i modelli di calcolo PC Cream [6] per altezze di rilascio fino a 100 m, ADMS [7] per l'altezza di rilascio di 200 m; per i fiumi si ricorre ancora a PC Cream, mentre per il mare il modello impiegato è Poseidon [8]. Si considera il rilascio in continuo annuo per un impianto che opera da 50 anni. Le vie di esposizione dei gruppi critici della popolazione sono: inalazione e irraggiamento nella nube, irraggiamento e inalazione del particolato risospeso a seguito della deposizione al suolo, ingestione degli alimenti prodotti sul terreno contaminato (atmosfera); ingestione di acqua e pesce, irraggiamento dai sedimenti lungo le rive (fiume), ingestione di pesce e frutti di mare, irraggiamento dai sedimenti della spiaggia (mare). Per pervenire ai coefficienti di dose/livelli di screening di cui sopra, assunzioni molto conservative sono fatte sulle condizioni di esposizione dei gruppi critici (distanze dalla sorgente, tempi di permanenza nelle aree critiche, abitudini alimentari, ...). Nelle stime modellistiche si tiene conto anche della crescita dei discendenti di lunga emivita nei comparti ove si presenta accumulo dei radiocontaminanti (suolo, sedimenti

fluviali e marini). Come fascia di età degli individui del gruppo critico è stata scelta quella degli adulti; i coefficienti di dose efficace per inalazione e ingestione dei radionuclidi sono tratti dalla Direttiva UE 96/29 [12], con l'opzione del dato più conservativo nella scelta della classe di assorbimento polmonare per i coefficienti da inalazione. Alcune considerazioni sui radionuclidi selezionati. Il K-40 è stato ignorato in base alle proprietà omeostatiche del potassio corporeo (determinanti in relazione alle vie di esposizione comportanti l'introduzione del radionuclide nell'organismo). L'U-234 viene dato, per default, in equilibrio radioattivo con l'U-238.

Un discorso a parte merita la serie dell'U-235. RP 135 ritiene che non ha molto senso (per tutte le lavorazioni NORM) includere i radionuclidi della serie dell'U-235 nella derivazione dei coefficienti di dose/livelli di screening, in virtù dell'esigua abbondanza relativa dell'isotopo 235 rispetto al 238 (nel materiale indisturbato, l'attività dell'U-235 in equilibrio con i suoi discendenti è 22 volte minore di quella dell'U-238 a sua volta in equilibrio con i propri discendenti).

Tuttavia va evidenziato il fatto che il coefficiente di dose di screening per l'Ac-227+ (discendente dell'U-235) in relazione alle emissioni in atmosfera è numericamente rilevante (crescente al diminuire dell'altezza del camino) se confrontato con i valori relativi agli altri radionuclidi/segmenti di catene, anche ove si tenga conto dell'abbattimento di un fattore 22 (dell'abbondanza relativa dell'U-235 rispetto all'U-238); ciò potrebbe indurre a valutare debitamente l'apporto della serie dell'U-235 negli impatti conseguenti ai rilasci in atmosfera (la cosa non si pone invece per gli effluenti liquidi).

In base a riscontri empirici si può, però, sostenere che:

- le rotture delle serie naturali in corrispondenza dell'elemento chimico radio (si pensi, ad es., ai fondami petroliferi) non vedono la presenza dell'isotopo 223 (discendente dell'U-235) data la breve emivita che lo contraddistingue;
- il distacco degli elementi chimici piombo e polonio nei processi termici (ed altri) non comporta la presenza di progenie dell'U-235 (ancora a causa della rispettiva breve emivita);
- se il distacco di Pb-210 e Po-210 nei processi termici (ed altri) è ragguardevole rispetto ai restanti radionuclidi della serie dell'U-238 (almeno 3 ordini di grandezza), la dose efficace complessiva è dominata da questi due radionuclidi e non ha significato andare a valutare l'apporto della serie dell'U-235;
- se il distacco di Pb-210 e Po-210 è modesto o insussistente, il contributo dell'U-235 è comparabile a quello della restante parte della serie dell'U-238, ma se le dosi in gioco sono modeste (al massimo decine di  $\mu\text{Sv}$ ), ha poco senso farne una determinazione quantitativa;
- in generale, particolarmente in sfavorevoli condizioni analitiche, la determinazione della serie dell'U-235 può essere eseguita assumendo l'equilibrio secolare della catena e l'abbondanza naturale relativa dell'isotopo 235 rispetto al 238 (attività 22 volte inferiore).

**Tabella 2.3** – Dose efficace annua per unità di attività rilasciata nell'anno [(Sv/anno)/(GBq/anno)], per gli individui del gruppo di riferimento, derivante da esposizione a effluenti NORM in atmosfera (in funzione dell'altezza del rilascio)\* [3]

Radionuclide	Camino 10 m	Camino 50 m	Camino 100 m	Camino 200 m
U-238+	$2.2 \cdot 10^{-6}$	$1.3 \cdot 10^{-7}$	$2.5 \cdot 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{-8}$
U-235+	$2.4 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$	$3.2 \cdot 10^{-8}$	$1.5 \cdot 10^{-8}$
U-234	$2.6 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{-7}$	$2.9 \cdot 10^{-8}$	$1.5 \cdot 10^{-8}$
Th-232	$2.1 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$4.1 \cdot 10^{-7}$	$1.6 \cdot 10^{-7}$
Th-230	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$5.9 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-7}$	$6.0 \cdot 10^{-8}$
Th-228+	$3.2 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$3.2 \cdot 10^{-7}$	$1.8 \cdot 10^{-7}$
Pa-231	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$6.3 \cdot 10^{-6}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$6.6 \cdot 10^{-7}$
Ra-228+	$2.6 \cdot 10^{-6}$	$2.0 \cdot 10^{-7}$	$7.3 \cdot 10^{-8}$	$2.4 \cdot 10^{-8}$
Ra-226+	$4.6 \cdot 10^{-6}$	$4.1 \cdot 10^{-7}$	$1.9 \cdot 10^{-7}$	$5.5 \cdot 10^{-8}$
Ac-227+	$4.2 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$	$4.1 \cdot 10^{-6}$	$2.3 \cdot 10^{-6}$
Rn-222	$2.0 \cdot 10^{-9}$	$1.1 \cdot 10^{-10}$	$1.9 \cdot 10^{-11}$	$1.1 \cdot 10^{-11}$
Rn-220	$1.5 \cdot 10^{-7}$	$8.2 \cdot 10^{-9}$	$1.4 \cdot 10^{-9}$	$8.2 \cdot 10^{-10}$
Pb-210+	$1.9 \cdot 10^{-6}$	$1.9 \cdot 10^{-7}$	$9.6 \cdot 10^{-8}$	$2.7 \cdot 10^{-8}$
Po-210	$4.3 \cdot 10^{-6}$	$3.8 \cdot 10^{-7}$	$1.8 \cdot 10^{-7}$	$5.2 \cdot 10^{-8}$
Serie U-238 eq. Sec.	$2.7 \cdot 10^{-5}$	$1.9 \cdot 10^{-6}$	$6.3 \cdot 10^{-7}$	$2.2 \cdot 10^{-7}$
Serie U-235 eq. Sec.	$5.3 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-5}$	$5.4 \cdot 10^{-6}$	$3.0 \cdot 10^{-6}$
Serie Th-232 eq. Sec.	$5.6 \cdot 10^{-5}$	$3.4 \cdot 10^{-6}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	$3.6 \cdot 10^{-7}$

\* da intendersi come altezza efficace del camino

**Tabella 2.4** – Dose efficace annua per unità di attività rilasciata nell'anno [(Sv/anno)/(GBq/anno)], per gli individui del gruppo di riferimento, derivante da esposizione a rilasci NORM in fiume (in funzione della portata del fiume) [3]

Radionuclide	Fiume piccolo (2.5 m <sup>3</sup> /s)	Fiume medio (100 m <sup>3</sup> /s)	Fiume grande (500 m <sup>3</sup> /s)
U-238+	3.6·10 <sup>-7</sup>	1.3·10 <sup>-8</sup>	2.6·10 <sup>-9</sup>
U-234	3.9·10 <sup>-7</sup>	1.4·10 <sup>-8</sup>	2.8·10 <sup>-9</sup>
Th-232	6.3·10 <sup>-8</sup>	1.9·10 <sup>-9</sup>	3.7·10 <sup>-10</sup>
Th-230	7.0·10 <sup>-8</sup>	2.0·10 <sup>-9</sup>	4.1·10 <sup>-10</sup>
Th-228+	6.1·10 <sup>-5</sup>	1.5·10 <sup>-6</sup>	3.1·10 <sup>-7</sup>
Ra-228+	7.2·10 <sup>-6</sup>	4.7·10 <sup>-7</sup>	9.4·10 <sup>-8</sup>
Ra-226+	4.0·10 <sup>-6</sup>	2.2·10 <sup>-7</sup>	4.3·10 <sup>-8</sup>
Pb-210+	9.5·10 <sup>-6</sup>	1.5·10 <sup>-6</sup>	3.0·10 <sup>-7</sup>
Po-210	8.1·10 <sup>-6</sup>	5.7·10 <sup>-7</sup>	1.1·10 <sup>-7</sup>
Serie U-238 eq. Sec.	2.2·10 <sup>-5</sup>	2.3·10 <sup>-6</sup>	4.6·10 <sup>-7</sup>
Serie Th-232 eq. Sec.	6.8·10 <sup>-5</sup>	2.0·10 <sup>-6</sup>	4.0·10 <sup>-7</sup>

**Tabella 2.5** – Dose efficace annua per unità di attività rilasciata nell'anno [(Sv/anno)/(GBq/anno)], per gli individui del gruppo di riferimento, derivante da esposizione a rilasci NORM in mare (costa/mare aperto) [3]

Radionuclide	Costa	Mare aperto
U-238+	3.3·10 <sup>-11</sup>	3.7·10 <sup>-12</sup>
U-234	1.9·10 <sup>-11</sup>	4.9·10 <sup>-13</sup>
Th-232	5.6·10 <sup>-8</sup>	4.6·10 <sup>-10</sup>
Th-230	1.2·10 <sup>-9</sup>	1.8·10 <sup>-11</sup>
Th-228+	3.2·10 <sup>-9</sup>	1.5·10 <sup>-11</sup>
Ra-228+	2.6·10 <sup>-8</sup>	2.6·10 <sup>-10</sup>
Ra-226+	1.3·10 <sup>-8</sup>	3.0·10 <sup>-10</sup>
Pb-210+	9.9·10 <sup>-9</sup>	2.0·10 <sup>-10</sup>
Po-210	3.4·10 <sup>-9</sup>	6.3·10 <sup>-11</sup>
Serie U-238 eq. Sec.	2.8·10 <sup>-8</sup>	5.9·10 <sup>-10</sup>
Serie Th-232 eq. Sec.	8.5·10 <sup>-8</sup>	7.4·10 <sup>-10</sup>

**Tabella 2.6** – Livelli di screening (GBq/anno), comportanti per gli individui del gruppo di riferimento una dose efficace annua pari a 0.3 mSv, per emissioni in atmosfera (in funzione dell'altezza del rilascio)\* [3]

Radionuclide	Camino 10 m	Camino 50 m	Camino 100 m	Camino 200 m
U-238+	1.4·10 <sup>2</sup>	2.3·10 <sup>3</sup>	1.2·10 <sup>4</sup>	2.3·10 <sup>4</sup>
U-235+	1.2·10 <sup>2</sup>	2.2·10 <sup>3</sup>	9.3·10 <sup>3</sup>	2.0·10 <sup>4</sup>
U-234	1.1·10 <sup>2</sup>	2.0·10 <sup>3</sup>	1.0·10 <sup>4</sup>	2.0·10 <sup>4</sup>
Th-232	1.4·10 <sup>1</sup>	2.1·10 <sup>2</sup>	7.3·10 <sup>2</sup>	1.9·10 <sup>3</sup>
Th-230	2.8·10 <sup>1</sup>	5.1·10 <sup>2</sup>	2.7·10 <sup>3</sup>	5.0·10 <sup>3</sup>
Th-228+	9.3·10 <sup>0</sup>	1.7·10 <sup>2</sup>	9.4·10 <sup>2</sup>	1.7·10 <sup>3</sup>
Pa-231	2.8·10 <sup>0</sup>	4.8·10 <sup>1</sup>	2.2·10 <sup>2</sup>	4.6·10 <sup>2</sup>
Ra-228+	1.2·10 <sup>2</sup>	1.5·10 <sup>3</sup>	4.1·10 <sup>3</sup>	1.2·10 <sup>4</sup>
Ra-226+	6.6·10 <sup>1</sup>	7.3·10 <sup>2</sup>	1.6·10 <sup>3</sup>	5.4·10 <sup>3</sup>
Ac-227+	7.1·10 <sup>1</sup>	1.3·10 <sup>1</sup>	7.3·10 <sup>1</sup>	1.3·10 <sup>2</sup>
Rn-222	1.5·10 <sup>5</sup>	2.7·10 <sup>6</sup>	1.6·10 <sup>7</sup>	2.8·10 <sup>7</sup>
Rn-220	2.0·10 <sup>3</sup>	3.7·10 <sup>4</sup>	2.1·10 <sup>5</sup>	3.7·10 <sup>5</sup>
Pb-210+	1.6·10 <sup>2</sup>	1.6·10 <sup>3</sup>	3.1·10 <sup>3</sup>	1.1·10 <sup>4</sup>
Po-210	7.0·10 <sup>1</sup>	8.0·10 <sup>2</sup>	1.7·10 <sup>3</sup>	5.8·10 <sup>3</sup>
Serie U-238 eq. Sec.	1.1·10 <sup>1</sup>	1.6·10 <sup>2</sup>	4.8·10 <sup>2</sup>	1.4·10 <sup>3</sup>
Serie U-235 eq. Sec.	5.6·10 <sup>-1</sup>	1.0·10 <sup>1</sup>	5.5·10 <sup>1</sup>	1.0·10 <sup>2</sup>
Serie Th-232 eq. Sec.	5.4·10 <sup>0</sup>	8.8·10 <sup>1</sup>	3.7·10 <sup>2</sup>	8.2·10 <sup>2</sup>

\* da intendersi come altezza efficace del camino

Nelle tabb. 2.3 ÷ 2.5 sono riportati i coefficienti di dose di screening (dose efficace individuale annua per unità di attività annua rilasciata) per i singoli radionuclidi (segmenti di catene o catene intere di U-238, Th-232 e U-235 – ove pertinente) e per scenario emissivo.

Nelle tabb. 2.6 ÷ 2.8 sono riportati i livelli di screening (attività annua rilasciata che comporta per l'individuo del gruppo di riferimento una dose efficace pari a 0.3 mSv/anno) per i singoli radionuclidi (segmenti di catene/catene intere di U-238, Th-232 e U-235 – ove pertinente) e per scenario emissivo.

**Tabella 2.7** – Livelli di screening (GBq/anno), comportanti per gli individui del gruppo di riferimento una dose efficace annua pari a 0.3 mSv, per emissioni in fiume (in funzione della portata del fiume) [3]

Radionuclide	Fiume piccolo (2.5 m <sup>3</sup> /s)	Fiume medio (100 m <sup>3</sup> /s)	Fiume grande (500 m <sup>3</sup> /s)
U-238+	8.3·10 <sup>2</sup>	2.3·10 <sup>4</sup>	1.2·10 <sup>5</sup>
U-234	7.7·10 <sup>2</sup>	2.1·10 <sup>4</sup>	1.1·10 <sup>5</sup>
Th-232	4.8·10 <sup>3</sup>	1.6·10 <sup>5</sup>	8.1·10 <sup>5</sup>
Th-230	4.3·10 <sup>3</sup>	1.5·10 <sup>5</sup>	7.4·10 <sup>5</sup>
Th-228+	4.9·10 <sup>0</sup>	2.0·10 <sup>2</sup>	9.8·10 <sup>2</sup>
Ra-228+	4.2·10 <sup>1</sup>	6.4·10 <sup>2</sup>	3.2·10 <sup>3</sup>
Ra-226+	7.5·10 <sup>1</sup>	1.4·10 <sup>3</sup>	6.9·10 <sup>3</sup>
Pb-210+	3.2·10 <sup>1</sup>	2.0·10 <sup>2</sup>	1.0·10 <sup>3</sup>
Po-210	3.7·10 <sup>1</sup>	5.3·10 <sup>2</sup>	2.6·10 <sup>3</sup>
Serie U-238 eq. Sec.	1.3·10 <sup>1</sup>	1.3·10 <sup>2</sup>	6.5·10 <sup>2</sup>
Serie Th-232 eq. Sec.	4.4·10 <sup>0</sup>	1.5·10 <sup>2</sup>	7.4·10 <sup>2</sup>

**Tabella 2.8** – Livelli di screening (GBq/anno), comportanti per gli individui del gruppo di riferimento una dose efficace annua pari a 0.3 mSv, per emissioni in mare (costa/mare aperto) [3]

Radionuclide	Costa	Mare aperto
U-238+	9.2·10 <sup>6</sup>	8.1·10 <sup>7</sup>
U-234	1.6·10 <sup>7</sup>	6.2·10 <sup>8</sup>
Th-232	5.4·10 <sup>3</sup>	6.6·10 <sup>5</sup>
Th-230	2.4·10 <sup>5</sup>	1.6·10 <sup>7</sup>
Th-228+	9.3·10 <sup>4</sup>	2.0·10 <sup>7</sup>
Ra-228+	1.2·10 <sup>4</sup>	1.1·10 <sup>6</sup>
Ra-226+	2.2·10 <sup>4</sup>	1.0·10 <sup>6</sup>
Pb-210+	3.0·10 <sup>4</sup>	1.5·10 <sup>6</sup>
Po-210	8.9·10 <sup>4</sup>	4.8·10 <sup>6</sup>
Serie U-238 eq. Sec.	1.1·10 <sup>4</sup>	5.1·10 <sup>5</sup>
Serie Th-232 eq. Sec.	3.5·10 <sup>3</sup>	4.1·10 <sup>5</sup>

Come per i materiali, anche nei rilasci può accadere di avere a che fare con diversi radionuclidi (segmenti delle tre catene di decadimento), ovvero le catene naturali in equilibrio secolare. RP 135, analogamente a RP 122 part II, indica di procedere a una verifica complessiva di conformità dell'effluente.

Se il computo viene eseguito sulle dosi efficaci, va calcolata la dose efficace del singolo radionuclide coinvolto tramite moltiplicazione della propria attività annua rilasciata per il rispettivo coefficiente delle tabb. 2.3 ÷ 2.5 (dose efficace annua per unità di attività rilasciata nel medesimo periodo), a seconda dello scenario emissivo, sommando alla fine su tutti i radionuclidi.

Se, viceversa, si opera con i livelli di screening delle tabb. 2.6 ÷ 2.8, la conformità dell'effluente risulta se:

$$\sum_i (a_i/a_{li}) \leq 1 \quad \text{eq. (2), ove}$$

$\sum_i (a_i/a_{li})$  = indice somma;

$a_i$  = attività rilasciata del radionuclide i-esimo (GBq/anno);

$a_{li}$  = livello di screening del radionuclide i-esimo (GBq/anno).

Per ultimo, si sottolinea il fatto che RP 135 non prende in considerazione, quale scenario per l'allontanamento degli effluenti liquidi, il rilascio in fogna con destino successivo degli scarichi nei depuratori urbani. In caso

questa fosse l'effettiva via di eliminazione dell'effluente i livelli di screening di RP 135 non potranno, dunque, essere utilizzati per valutarne la congruità radiologica.

#### 2.4.2 Altri documenti a valenza internazionale

Tra i documenti tecnici internazionali utili per valutare l'impatto radiologico di effluenti liquidi e gassosi dei NORM, certamente va citato il Report n. 19 della Safety Report Series IAEA del 2001 [4].

Il documento fornisce una metodologia di calcolo (completa di algoritmi e parametri da utilizzare) per valutare la dose efficace all'individuo del gruppo critico a seguito di rilasci di radionuclidi in atmosfera o corpo idrico (fiume, lago, mare, depuratore urbano), per molteplici radionuclidi (artificiali e naturali) e per impianti di limitata consistenza radiologica (ospedali, strutture di ricerca, ...), in condizioni tipicamente conservative.

Esso, inoltre, elabora dei coefficienti di dose di screening (dose efficace individuale annua per unità di attività scaricata, per singolo radionuclide), denominati "generic environmental factors", configurando degli scenari espositivi per gli individui dei gruppi critici standardizzati (in termini di caratteristiche dello scarico e di dislocazione dei gruppi critici) e assai cautelativi. Le vie di esposizione analizzate sono: inalazione e irradiazione dalla nube, inalazione del particolato risospeso e irradiazione a seguito della deposizione al suolo, ingestione di cibo prodotto sul suolo contaminato (atmosfera); ingestione di acqua e pesce di fiume, irradiazione dal sedimento sulle sponde (fiume), irradiazione e inalazione per i lavoratori del depuratore urbano nella cui rete è avvenuto il rilascio (depuratore).

Il rapporto IAEA risulta particolarmente utile per avere ricompreso, negli scenari relativi agli effluenti liquidi, anche l'esposizione dei lavoratori all'interno del depuratore civico; tuttavia il documento non è sempre di immediata fruibilità non essendo orientato espressamente ai NORM (i coefficienti di dose per introduzione corporea non riflettono la segmentazione della tab. 1.1, ...).

Un altro riferimento utile per la valutazione della dose agli individui della popolazione esposta a rilasci liquidi e gassosi di NORM è costituito dal rapporto n. 13/2 del 2002 del NRPB [5]. Viene fatta un'analisi per gli isotopi di uranio, radio, piombo e polonio, ancora considerando come sorgente impianti di limitata portata radiologica (aziende NORM, ospedali, ..), derivando (attraverso un modello misto composto da algoritmi e codici per computer), in condizioni fortemente cautelative, dei coefficienti di dose di screening (dose efficace individuale annua per unità di attività scaricata, per singolo radionuclide) per gli individui dei gruppi di riferimento. Le vie di esposizione analizzate sono: inalazione e irradiazione dalla nube, inalazione del particolato risospeso e irradiazione a seguito della deposizione al suolo, ingestione di cibo prodotto sul suolo contaminato (atmosfera); ingestione di acqua e pesce di fiume, irradiazione e inalazione dal sedimento sulle sponde, ingestione di cibo prodotto sul suolo irrigato con acqua di fiume (fiume); esposizione degli agricoltori che vivono in terre trattate coi fanghi del depuratore che ha raccolto gli effluenti NORM (depuratore)<sup>ii</sup>.

I coefficienti di dose vengono poi convertiti in "General Derived Constraints (GDC)", normalizzandone il valore al criterio di dose (efficace) di 0.3 mSv/anno. Nelle tabb. 2.9 e 2.10 sono mostrati i valori per i radionuclidi selezionati, nelle due modalità. Va osservato che nel documento sono solo presentati i dati della tab. 2.10 (quelli della tab. 2.9, da essi derivati, sono qui proposti per completezza).

**Tabella 2.9** – Dose efficace annua per unità di attività rilasciata nell'anno per gli individui del gruppo di riferimento, a seguito di scarichi di NORM, liquidi e gassosi [ $(\mu\text{Sv}/\text{anno})/(\text{Bq}/\text{anno})$ ] [5]

Radionuclide	Rilasci in atmosfera	Rilasci in fiume	Rilasci in fogna
U-238+	$6 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-7}$
U-235+	$8 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-6}$
U-234	$8 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-7}$
Ra-226	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Pb-210+	$4 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-5}$
Po-210	$1 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-6}$

Nota a): il simbolo + indica l'equilibrio secolare con i figli di breve emivita (cfr. tab.1.1)

Nota b): ove pertinente è stata considerata la crescita dei figli di lunga emivita (impianto in esercizio da 50 anni)

<sup>ii</sup> In realtà, sono analizzati anche gli scenari espositivi relativi ai lavoratori del depuratore e ai reflui in uscita dal trattamento presso il depuratore; tuttavia lo scenario più critico è quello dell'uso dei fanghi di depurazione in agricoltura (e su di esso sono valutati i coefficienti di dose di screening e i conseguenti livelli derivati)

Il riferimento offerto dal report per il caso dell'impiego in agricoltura dei fanghi del depuratore che ha raccolto gli effluenti NORM è molto opportuno, considerato che tale è effettivamente il destino dei fanghi dei depuratori che servono aziende NORM.

Il documento si limita tuttavia ad un insieme circoscritto di radionuclidi naturali.

Come in RP 122 part II e RP 135, esso segnala che, ove si tratti con più radionuclidi simultaneamente, la verifica di conformità radiologica dell'effluente va condotta sommando le dosi (tab. 2.9) ovvero tramite l'indice somma (tab. 2.10), del quale si è detto in precedenza.

**Tabella 2.10** – Livelli di screening (General Derived Constraints - GDC) comportanti per gli individui del gruppo di riferimento una dose efficace annua pari a 0.3 mSv, per emissioni in atmosfera e corpo idrico (Bq/anno) [5]

Radionuclide	Rilasci in atmosfera	Rilasci in fiume	Rilasci in fogna
U-238+	$5 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10^8$
U-235+	$4 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^8$
U-234	$4 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10^8$
Ra-226	$3 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^7$
Pb-210+	$8 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^6$
Po-210	$3 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^7$

Nota a): il simbolo + indica l'equilibrio secolare con i figli di breve emivita (cfr. tab.1)

Nota b): ove pertinente è stata considerata la crescita dei figli di lunga emivita (impianto in esercizio da 50 anni)

Va osservato che i valori rappresentati nelle tabb. 2.10 e 2.11 circa i rilasci in fogna sono basati sulla modellizzazione di un depuratore molto ridotto (500 abitanti serviti), sempre nella logica del carattere conservativo delle stime. E' possibile estrapolare i dati tabulati a casi di depuratori con più abitanti serviti e maggiore diluizione dunque della concentrazione dei radionuclidi nei fanghi di trattamento [15,16]. Le relazioni che seguono consentono di eseguire tale estrapolazione sui livelli di screening (GDC), per depuratori con utenza fino a 50000 abitanti:

$$GDC_1 = GDC \cdot W_{pe} / 500 \quad \text{eq. (3),}$$

$$GDC_2 = GDC \cdot W_{pe} \cdot 0.4 / 500 \quad \text{eq. (4),}$$

mentre per depuratori che servono più di 50000 abitanti i livelli di screening si calcolano nel seguente modo:

$$GDC_1 = GDC \cdot 100 \quad \text{eq. (5),}$$

$$GDC_2 = GDC \cdot 40 \quad \text{eq. (6), con}$$

$GDC_1$  = livello di screening per depuratore di dimensioni maggiori di quello di riferimento, valido per Ra-226, U-238+, U-234 (Bq/anno);

$GDC_2$  = livello di screening per depuratore di dimensioni maggiori di quello di riferimento, valido per Pb-210+, Po-210, U-235+ (Bq/anno);

GDC = livello di screening per depuratore di riferimento (Bq/anno) (cfr. tab. 2.10);

$W_{pe}$  = abitanti serviti dal depuratore di dimensioni maggiori di quello di riferimento.

In modo analogo si derivano i coefficienti di dose di screening per depuratori di utenza superiore alle 500 unità da quelli mostrati in tab. 2.9, ponendo i fattori di trasferimento delle eqq (3÷6) al denominatore anziché al numeratore.

### 2.4.3 Dose efficace per i lavoratori del depuratore collegato allo scarico NORM

Invece di ricorrere alle stime del documento IAEA n. 19/2001 [4], per i motivi predetti, si presenta di seguito uno schema di calcolo che consente di valutare (in via conservativa) la dose efficace per un lavoratore del depuratore urbano che raccoglie gli effluenti NORM.

Il lavoratore è esposto (tramite irradiazione esterna, inalazione di particolato risospeso e inalazione di radon) ai fanghi contaminati da NORM.

La concentrazione di attività nei fanghi umidi, che si ottiene da quella nei fanghi secchi, a sua volta legata all'attività rilasciata in fogna e alla produzione di fango da parte degli utenti della rete, è data da:

$$C_{w,i} = C_{d,i} \cdot DW = q_i / (N_{eq} \cdot m), \quad \text{eq. (7), con}$$

- $C_{w,i}$  = concentrazione di attività dell'i-esimo radionuclide nei fanghi umidi (Bq/kg);  
 $C_{d,i}$  = concentrazione di attività dell'i-esimo radionuclide nei fanghi secchi (Bq/kg);  
 $DW$  = rapporto peso secco/peso fresco nei fanghi di depurazione (def. 0.05 [4]);  
 $q_i$  = attività annua dell'i-esimo radionuclide scaricata in fogna (Bq/anno);  
 $N_{eq}$  = abitanti equivalenti serviti dal depuratore (def. 20000 [4]);  
 $m$  = massa annua di fango secco prodotta da un abitante (kg) (def. 20 [4]).

L'ipotesi insita nell'eq. 3 è che tutta l'attività del singolo radionuclide sia trattenuta dal fango di depurazione (e non confluisca nel corpo idrico ricettore posto a valle del trattamento).

Cautelativamente si suppone che il lavoratore operi per tutto il tempo di lavoro presso i fanghi contaminati. La dose efficace risultante per singolo radionuclide (diverso dal radon) è dunque:

$$E_{t,i} = E_{in,i} + E_{irr,i} = C_{w,i} \cdot t_e \cdot (D_{irr,i} + C_{dust} \cdot B_r \cdot D_{in,i}) \quad \text{eq. (8), con}$$

- $E_{t,i}$  = dose efficace individuale annua totale per l'i-esimo radionuclide (Sv/anno);  
 $E_{in,i}$  = dose efficace individuale annua da inalazione per l'i-esimo radionuclide (Sv/anno);  
 $E_{irr,i}$  = dose efficace individuale annua da irradiazione esterna per l'i-esimo radionuclide (Sv/anno);  
 $t_e$  = tempo lavorativo (1800 h/anno);  
 $D_{irr,i}$  = coefficiente di dose per irradiazione esterna per l'i-esimo radionuclide [(Sv/h)/(Bq/kg)] [1];  
 $C_{dust}$  = fattore di risospensione ( $\text{kg/m}^3$ ) (def.  $1 \cdot 10^{-6}$  [1]);  
 $B_r$  = rateo di inalazione ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) (def. 1.2 [1]);  
 $D_{in,i}$  = coefficiente di dose per inalazione per l'i-esimo radionuclide (Sv/Bq) [1].

I coefficienti di dose sono tratti da RP 122 part II [1]; in particolare, quelli per irraggiamento esterno si riferiscono allo scenario "lavoratore in discarica" (distribuzione con volume seminfinito del materiale, senza fattore di schermo pari a 2 ivi presente considerando il lavoratore dentro una macchina operatrice), scenario ritenuto adeguato a descrivere anche la situazione esaminata.

Per quanto riguarda l'esposizione al radon esalato dai fanghi, si può far riferimento al modello riportato nella ref. [1], per cui la concentrazione in aria è pari a:

$$C_{Rn} = 11 \cdot \text{Bq/m}^3 \cdot J \cdot \ln(1 + 1.7 \cdot A) \quad \text{eq (9), ove}$$

$$J = \rho \cdot C_{wRa} \cdot E \cdot (\lambda_{Rn} \cdot D)^{-1/2} \quad \text{eq. (10), con}$$

- $C_{Rn}$  = concentrazione in aria di Rn-222 ( $\text{Bq/m}^3$ );  
 $J$  = rateo di esalazione del Rn-222 [ $\text{Bq/m}^2 \cdot \text{s}$ ];  
 $A$  = superficie del sito con presenza di fanghi ( $\text{m}^2$ ) (def. 500);  
 $\rho$  = densità dei fanghi ( $\text{kg/m}^3$ ) (def. 1000) [4];  
 $C_{wRa}$  = concentrazione di Ra-226 nel fango umido (Bq/kg) (cfr. eq. 7);  
 $E$  = frazione di emanazione del Rn-222 (def. 0.05, come per fondame petrolifero [14]);  
 $\lambda_{Rn}$  = probabilità di decadimento del Rn-222 ( $2.1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ );  
 $D$  = lunghezza di diffusione del Rn-222 ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) (def.  $2 \cdot 10^{-6}$  [1]);

La dose efficace per inalazione di Rn-222 risulta, dunque:

$$E_{Rn} = D_{Rn} \cdot t_e \cdot C_{Rn} \quad \text{eq. (11), con}$$

- $E_{Rn}$  = dose efficace per inalazione di Rn-222 (Sv/anno)  
 $D_{Rn}$  = coefficiente di dose efficace per inalazione di Rn-222 [ $\text{Sv}/(\text{Bq} \cdot \text{h}/\text{m}^3)$ ] (def.  $5 \cdot 10^{-9}$  [17]);  
 $t_e$  = tempo lavorativo (1800 h/anno).

A questo punto, è possibile derivare per ciascun radionuclide la dose efficace (inalazione di Rn-222, inalazione e irradiazione per gli altri radionuclidi) per unità di attività rilasciata in fogna, ossia  $E_i/q_i$ , la cui rappresentazione numerica è mostrata nella tab. 2.11.

**Tabella 2.11** – Dose efficace individuale annua per unità di attività rilasciata in fogna nell'anno, per i lavoratori del depuratore interessato dallo scarico [(Sv/anno)/(Bq/anno)]

Radionuclide	Dose efficace [(Sv/anno)/(Bq/anno)]
Serie U-238 eq. Sec.	$2.0 \cdot 10^{-13}$
U-nat*	$6.3 \cdot 10^{-15}$
Th-230	$2.0 \cdot 10^{-15}$
Ra-226+	$1.9 \cdot 10^{-13}$
Rn-222**	$8.6 \cdot 10^{-15}$
Pb-210+	$3.6 \cdot 10^{-16}$
Po-210	$5.9 \cdot 10^{-16}$
Serie Th-232 eq. Sec.	$2.9 \cdot 10^{-13}$
Th-232	$3.3 \cdot 10^{-15}$
Ra-228+	$1.0 \cdot 10^{-13}$
Th-228+	$1.8 \cdot 10^{-13}$
K-40	$1.7 \cdot 10^{-14}$

\* isotopi dell'uranio nel rapporto isotopico standard; confrontando con questo livello il dato misurato dell'U-238, viene automaticamente operato il confronto anche per U-235 e U-234 (in rapporto isotopico standard con U-238), oltreché per i prodotti di breve emivita di U-238 (Th-234 e Pa-234m)

\*\* da sommare al coefficiente del Ra-226

## 2.5 Valutazioni di dose specifiche per gli effluenti

Come per i materiali solidi, nei casi in cui le stime di screening conducessero a valori prossimi al criterio di dose, o in altre situazioni ritenute significative, la valutazione di dose va eseguita con maggiore aderenza alla specifica realtà. Possono dunque essere impiegati gli strumenti descritti nei paragrafi precedenti con scelta degli scenari/parametrizzazione specifici del caso reale, si può ricorrere a modelli di calcolo per computer che consentano la caratterizzazione puntuale della sorgente e dei siti interessati dal trasferimento della contaminazione agli individui del gruppo di riferimento.

Un modello assai versatile in tal senso (sia per le emissioni in aria che in fiume) è PC Cream [6], sviluppato dall'allora NRPB britannico (oggi parte del PHE, Public Health England); per le emissioni in atmosfera con altezze di rilascio superiori a 100 m un tool valido è ADMS [7], che utilizza il modello lagrangiano (e non gaussiano come PC Cream) per descrivere la dispersione della nube; per le emissioni in mare esiste il già citato Poseidon [8].

Applicazioni di PC Cream a rilasci in atmosfera da camini di aziende NORM sono state realizzate, con riferimento alla produzione di refrattari [18], di piastrelle [19], alla combustione di carbone per le centrali elettriche [20], alle ipotesi di incenerimento dei fondami dell'estrazione di petrolio e gas naturale [14].

## 3 LAVORATORI

### 3.1 Generalità

Per le valutazioni di dose ai lavoratori delle aziende NORM si propone di seguito una metodologia indicativa, che può essere rafforzata con scelte tecniche più mirate, particolarmente nelle situazioni in cui i relativi esiti si collocano non lontano dal livello di azione (che, si rammenta, per i lavoratori, ai sensi delle vigente normativa, è pari a 1 mSv/anno di dose efficace).

---

Le valutazioni condotte tramite la metodologia qui presentata assumono un carattere fortemente conservativo adottando adeguate ipotesi nell'espressione degli algoritmi (assenza, nel calcolo della dose da inalazione, di fattori di riduzione legati all'uso di mascherine protettive, ...) e nella valorizzazione dei parametri in gioco (tempi di permanenza nelle zone con presenza di NORM, coefficienti di emanazione del radon dal materiale, ...).

Il lavoratore nell'azienda NORM, tipicamente, è esposto per irraggiamento esterno dai materiali, per inalazione di polveri di materiale risospeso, per inalazione di radon esalato dai materiali:

$$E_{\text{tot},i} = E_{\text{irr},i} + E_{\text{in},i} + E_{\text{Rn}} \quad \text{eq. (12), ove}$$

$E_{\text{tot},i}$  = dose efficace individuale totale dovuta all'i-esimo radionuclide (Sv/anno);

$E_{\text{irr},i}$  = dose efficace individuale per irradiazione esterna dovuta all'i-esimo radionuclide (Sv/anno);

$E_{\text{in},i}$  = dose efficace individuale per inalazione dovuta all'i-esimo radionuclide (Sv/anno);

$E_{\text{Rn}}$  = dose efficace individuale per inalazione di Rn-222 (Sv/anno);

Le dosi secondo l'eq. (12), naturalmente, vanno sommate su tutti i radionuclidi coinvolti.

La valutazione della dose è realizzabile in via empirica e predittiva (quest'ultima utile nel dimensionamento generale e preventivo del problema).

Un aspetto generale della questione è come trattare il fondo naturale di radiazione, segnatamente per irradiazione esterna e radon, dato che il contributo di fondo per inalazione può ritenersi trascurabile. Nelle misure, il contributo di irradiazione esterna e di radon dovuto al fondo locale va quantificato e sottratto al totale rilevato: infatti la dose che si intende confrontare con il livello di azione è quella generata esclusivamente dal materiale NORM. Questa operazione si può svolgere determinando il fondo di radiazione in posizioni analoghe a quelle interessate dal materiale NORM, ma in assenza di esso. Va posta attenzione ai casi in cui la presenza del materiale NORM è dominante (discarica coperta interamente di materiale NORM, deposito di stoccaggio occupato completamente da cumuli NORM, ...); in tali situazioni l'irradiazione esterna e l'esalazione di radon sono dovuti totalmente al materiale NORM e non va scorporato il fondo naturale locale di radiazione.

Nelle stime predittive, ciò che viene computato è il contributo selettivo del materiale NORM (senza fondo naturale di radiazione); tuttavia, nei casi in cui la presenza di materiale NORM è dominante (si vedano gli esempi poc'anzi richiamati), si deve tenere conto della "riduzione della dose di fondo" del fatto cioè che la dose prodotta dalla sorgente NORM va ridotta della quota di dose di fondo che vi sarebbe stata in assenza della sorgente NORM. Va detto, peraltro, che trascurare tale correzione anche nelle situazioni ove essa fosse di entità non nulla va nella direzione della cautela.

### 3.2 Irradiazione esterna

La dose efficace individuale da irradiazione esterna per il lavoratore dell'azienda NORM è pari a:

$$E_{\text{irr}} = D_{\text{irr}} \cdot t_e \quad \text{eq. (13), con}$$

$E_{\text{irr}}$  = dose efficace individuale per irradiazione esterna dovuta all'i-esimo radionuclide (Sv/anno);

$D_{\text{irr}}$  = rateo di dose efficace per irradiazione esterna (Sv/h);

$t_e$  = tempo lavorativo (h/anno).

Il rateo di dose efficace  $D_{\text{irr}}$  può essere determinato sperimentalmente mediante misura della grandezza operativa "rateo di dose equivalente ambientale  $H^*(10)$ ", assumendo un fattore di conversione pari a 1 (sebbene, a rigore, esso vari a seconda della geometria sorgente-ricettore e dell'energia della radiazione).

In modalità predittiva, il rateo di dose efficace  $D_{irr}$  può essere stimato (a partire dalla concentrazione di attività del singolo radionuclide nel materiale NORM) sulla base di codici di calcolo (ad es. Microshield [11], Granis PHE-UK [21]) o di valori tabulati (ad es. Eckermann [22]).

In tab. 3.1 sono mostrati i valori di tale grandezza calcolati con Microshield per gli scenari di cumulo di materiale NORM di moderate dimensioni ed operatore posto nei paraggi e di discarica riempita di rifiuti NORM con lavoratore che vi staziona sopra dentro a macchina operatrice, valori adottati dal documento [1] nella trattazione degli analoghi scenari.

**Tabella 3.1** – Coefficienti di dose efficace da irradiazione esterna per unità di concentrazione di attività, per singolo radionuclide e per scenario (lavoratore presso cumulo di materiale NORM di moderata entità, lavoratore su discarica contenente rifiuti NORM dentro macchina operatrice) [1]

Radionuclide	Cumulo di moderata entità [(Sv/h)/(Bq/kg)]	Discarica** [(Sv/h)/(Bq/kg)]
Serie U-238 eq. Sec.	$3.19 \cdot 10^{-11}$	$4.31 \cdot 10^{-10}$
U-nat*	$4.50 \cdot 10^{-13}$	$6.23 \cdot 10^{-12}$
Th-230	$3.82 \cdot 10^{-15}$	$3.85 \cdot 10^{-14}$
Ra-226+	$3.12 \cdot 10^{-11}$	$4.20 \cdot 10^{-10}$
Pb-210+	$7.03 \cdot 10^{-15}$	$1.07 \cdot 10^{-13}$
Po-210	$1.48 \cdot 10^{-16}$	$2.07 \cdot 10^{-15}$
Serie Th-232 eq. Sec.	$4.74 \cdot 10^{-11}$	$6.21 \cdot 10^{-10}$
Ra-228+	$1.66 \cdot 10^{-11}$	$2.27 \cdot 10^{-10}$
Th-228+	$3.08 \cdot 10^{-11}$	$3.94 \cdot 10^{-10}$
K-40	$2.86 \cdot 10^{-12}$	$3.77 \cdot 10^{-11}$

\* isotopi dell'uranio nel rapporto isotopico standard; confrontando con questo livello il dato misurato dell'U-238, viene automaticamente operato il confronto anche per U-235 e U-234 (in rapporto isotopico standard con U-238), oltreché per i prodotti di breve emivita di U-238 (Th-234 e Pa-234m)

\*\* fattore di schermo 2 dovuto alla macchina operatrice

### 3.3 Inalazione

La dose efficace individuale da inalazione per il lavoratore dell'azienda NORM è pari a:

$$E_{in,i} = C_{m,i} \cdot t_e \cdot C_{dust} \cdot B_r \cdot D_{in,i} \quad \text{eq. (14), con}$$

$E_{in,i}$  = dose efficace individuale annua da inalazione per l'i-esimo radionuclide (Sv/anno);

$C_{m,i}$  = concentrazione di attività dell'i-esimo radionuclide nel materiale NORM (Bq/kg);

$t_e$  = tempo lavorativo (h/anno);

$C_{dust}$  = fattore di risospensione ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) (def.  $1 \cdot 10^{-6}$  [1]);

$B_r$  = rateo di inalazione ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) (def. 1.2 [1]);

$D_{in,i}$  = coefficiente di dose per inalazione per l'i-esimo radionuclide (Sv/Bq) [1].

Il fattore di risospensione può essere determinato empiricamente (con un campionamento del particolato atmosferico nell'ambiente lavorativo); l'attività dei vari radionuclidi per unità di volume d'aria si ottiene dunque moltiplicando questo fattore per le concentrazioni di attività nel materiale NORM presente a terra. In alternativa (metodologia più accurata, ma più onerosa), l'attività per unità di volume d'aria si ottiene dalla determinazione radiometrica eseguita sul particolato atmosferico campionato.

Le stime effettuate tramite l'eq. (14) possono essere raffinate introducendo dei fattori di modulazione da applicare al fattore di risospensione ove si ravvisasse la necessità di tenere conto di effetti di arricchimento/diluizione della radioattività nel particolato atmosferico rispetto al materiale di origine (ad es.: altri materiali non radioattivi partecipano alla dispersione aerea delle polveri – diluizione; la radioattività si concentra maggiormente nella frazione fine del materiale quindi tende a ritrovarsi in proporzione maggiore nel particolato aerodisperso – arricchimento).

In tab. 3.2 sono mostrati i coefficienti di dose per inalazione per i lavoratori relativi ai vari radionuclidi ( $D_{in,i}$ ).

**Tabella 3.2** – Coefficienti di dose efficace da inalazione, per i lavoratori, per singolo radionuclide (Sv/Bq) [1]

Radionuclide	Coefficiente di dose efficace (Sv//Bq)
Serie U-238 eq. Sec.	$2.91 \cdot 10^{-5}$
U-nat*	$1.28 \cdot 10^{-5}$
Th-230	$7.20 \cdot 10^{-6}$
Ra-226+	$2.23 \cdot 10^{-6}$
Pb-210+	$1.16 \cdot 10^{-6}$
Po-210	$2.20 \cdot 10^{-6}$
Serie Th-232 eq. Sec.	$4.82 \cdot 10^{-5}$
Th-232	$1.2 \cdot 10^{-5}$
Ra-228+	$1.71 \cdot 10^{-6}$
Th-228+	$3.45 \cdot 10^{-5}$

\* isotopi dell'uranio nel rapporto isotopico standard; confrontando con questo livello il dato misurato dell'U-238, viene automaticamente operato il confronto anche per U-235 e U-234 (in rapporto isotopico standard con U-238), oltreché per i prodotti di breve emivita di U-238 (Th-234 e Pa-234m)

### 3.4 Inalazione da Rn-222

La dose efficace per inalazione di gas radon si deriva dalla seguente relazione:

$$E_{Rn} = D_{Rn} \cdot t_e \cdot C_{Rn} \quad \text{eq. (15), con}$$

- $E_{Rn}$  = dose efficace per inalazione di Rn-222 (Sv/anno)  
 $D_{Rn}$  = coefficiente di dose efficace per inalazione di Rn-222 [Sv/(Bq·h/m<sup>3</sup>)] (def.  $5 \cdot 10^{-9}$  [17]);  
 $t_e$  = tempo lavorativo (h/anno);  
 $C_{Rn}$  = concentrazione di Rn-222 in aria (Bq/m<sup>3</sup>).

La concentrazione di Rn-222 in aria può essere misurata direttamente (utilizzando dosimetri passivi piuttosto che strumentazione attiva a seconda della strategia d'indagine) o stimata tramite specifici algoritmi.

Nel seguito se ne propongono due, che descrivono l'esalazione del gas dal materiale NORM (e la successiva concentrazione in aria) in altrettanti scenari: presenza outdoor del lavoratore su distribuzione piana del materiale (scarica), stazionamento indoor del lavoratore presso cumulo del materiale.

In realtà, il primo dei due scenari è stato già trattato nel paragrafo 2.4.3 e ad esso vi si rimanda, salvo aggiornare il valore di default di taluni parametri:

- $A$  = superficie della distesa di materiale (m<sup>2</sup>) (def.  $1 \cdot 10^4$  [1]);  
 $\rho$  = densità del materiale (kg/m<sup>3</sup>) (def. 1500 [1]);  
 $E$  = frazione di emanazione (def. 0.2 [1]).

Per quanto riguarda il secondo scenario, si ha che:

$$C_{Rn} = (J \cdot A) / [V \cdot (\lambda_{Rn} + \lambda_v)] \quad \text{eq. (16), e}$$

$$J = \rho \cdot C_m \cdot E \cdot (\lambda_{Rn} \cdot D)^{-1/2} \quad \text{eq. (17), con}$$

- $C_{Rn}$  = concentrazione in aria di Rn-222 (Bq/m<sup>3</sup>);  
 $\lambda_{Rn}$  = probabilità di decadimento del Rn-222 ( $2.1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ );  
 $\lambda_v$  = rateo di ventilazione (s<sup>-1</sup>) (def.  $5.56 \cdot 10^{-4}$  [1]);  
 $A$  = superficie del cumulo (m<sup>2</sup>) (def. 441 [1]);  
 $V$  = volume del cumulo (m<sup>3</sup>) (def. 4000 [1]);  
 $J$  = rateo di esalazione del Rn-222 [(Bq/m<sup>2</sup>·s)];  
 $\rho$  = densità del materiale (kg/m<sup>3</sup>) (def. 1500 [1]);  
 $C_m$  = concentrazione di Ra-226 nel materiale (Bq/kg);  
 $E$  = frazione di emanazione (def. 0.2 [1]);  
 $D$  = lunghezza di diffusione del Rn-222 (m<sup>2</sup>/s) (def.  $2.0 \cdot 10^{-6}$  [1]).

## 4 APPLICAZIONI DELLA METODOLOGIA DI SCREENING

### 4.1 Valutazione della dose degli individui della popolazione – Materiali solidi

#### 4.1.1 Produzione di refrattari

Le sabbie zirconifere e la farina di silicato di zirconio (ottenuta dalla macinazione delle sabbie) presentano elevati livelli di uranio e (talvolta) torio. Esse sono fuse (tipicamente con allumina e silice) ad alte temperature con volatilizzazione di Pb-210 e Po-210, che si rinvencono nelle polveri di abbattimento fumi. Le polveri di abbattimento della macinazione dei prodotti difettosi evidenziano una presenza sostenuta di radionuclidi naturali (diffusa, peraltro, in tutto il processo produttivo in considerazione dell'elevato contenuto di radioattività naturale della materia prima).

In tab. 4.1 sono mostrate le concentrazioni di attività dei vari radionuclidi in campioni di materie prime-prodotti-residui di un'azienda produttrice di refrattari [20]. Per snellezza della presentazione, sono omesse le incertezze analitiche e le informazioni sulle tecniche di misura.

**Tabella 4.1** – Concentrazione di attività dei radionuclidi naturali in campioni (materie prime, prodotti, residui) di un'industria di refrattari [20]

Campione	U-238 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Pb-210 (Bq/kg)	Po-210 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)
Sabbie zirconifere (materia prima)	3613	3219	2702	2748	517	-
Prodotto 1	1701	1400	951	1088	310	9
Prodotto 2	1751	1638	752	684	262	-
Prodotto 3	1714	1481	1343	1352	250	23
Prodotto 4 (senza sabbie zirconifere)	20	8	31	46	2	81
Polveri abbattimento fusione	358	147	21050	35000	27	10
Polveri macinazione scarti	1191	1046	1033	1294	178	255
Fanghi depurazione	1635	1496	1166	1176	238	27

In tab. 4.2 vengono confrontati i valori della tab. 4.1 con i Livelli Generali di Allontanamento di RP 122 part II [1]: vengono distinti i casi di equilibrio e di non equilibrio secolare della catena dell'U-238 (mentre la serie del Th-232 è considerata sempre in equilibrio secolare) e per i casi di equilibrio, alla serie è attribuito il valor medio delle concentrazioni dei radionuclidi interessati. Il Th-230 è assunto sempre in equilibrio con l'U-238.

Il confronto viene effettuato attraverso l'indice somma (come da medesimo documento [1]): se esso è > 1, vi è non conformità (evidenziata in grigio) ai Livelli Generali di Allontanamento.

I livelli si applicano a residui/rifiuti/materie prime di scarto. Per quanto riguarda i prodotti e le materie prime non di scarto valgono le considerazioni di cui al paragrafo 2.2.1.

**Tabella 4.2** – Confronto delle concentrazioni di attività di residui NORM dell'industria di refrattari con i Livelli generali di allontanamento di RP 122 part II [1]. Tra parentesi i singoli Livelli di allontanamento

Campione	U-238 (Bq/kg)	Th-230 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Pb-210 (Bq/kg)	Po-210 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	Indice somma
Polveri abbattimento fusione *	358 (5000)	358 (10000)	147 (500)	21050 (5000)	35000 (5000)	27 (500)	10 (5000)	11.6
Fanghi depurazione *	1635 (5000)	1635 (10000)	1496 (500)	1166 (5000)	1176 (5000)	238 (500)	27 (5000)	4.4
Polveri macinazione scarti **	1141 (500)					178 (500)	255 (5000)	2.7

\* serie U-238 non in equilibrio secolare

\*\* serie U-238 in equilibrio secolare

#### 4.1.2 Produzione delle piastrelle

La farina di silicato di zirconio (ottenuta dalla macinazione delle sabbie zirconifere) presenta elevati livelli di uranio e (talvolta) torio. Essa è impiegata nella realizzazione degli smalti delle piastrelle, effettuata in appositi settori delle fabbriche; talora è utilizzata anche nella costituzione della matrice della piastrella (ad es. nel gres porcellanato bianco). La piastrella viene cotta in forni che raggiungono temperature dell'ordine dei 1300° C, sufficienti a consentire la volatilizzazione del Po-210 (meno quella del Pb-210); i radionuclidi vengono poi intercettati dalla calce (trappola per catturare le impurità in uscita dai camini), che terminato il proprio ciclo, è destinata a smaltimento (calce idrata).

In tab. 4.3 sono mostrate le concentrazioni di attività dei vari radionuclidi in campioni di materie prime e residui prelevati presso aziende produttrici di piastrelle [23]. Per snellezza della presentazione, sono omesse le incertezze analitiche e le informazioni sulle tecniche di misura.

**Tabella 4.3** – Concentrazione di attività dei radionuclidi naturali in campioni (materie prime e residui) prelevati presso aziende produttrici di piastrelle [23]

Campione	U-238 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Pb-210 (Bq/kg)	Po-210 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)
Sabbie zirconifere (materia prima)*	3613	3219	2702	2748	517	-
Calce idrata 1	12	11	85	11600	1	115
Calce idrata 2	12	12	26	4660	1	16
Calce idrata 3	13	11	64	15000	3	39
Calce idrata 4	9	10	425	46100	3	369
Calce idrata 5	8	11	214	12700	1	53
Polveri impianto ventilazione generale	58	63	60	91	38	526
Fanghi depurazione	107	114	125	154	34	317

\* [20]

In tab. 4.4 vengono confrontati i valori della tab. 4.3 con i Livelli Generali di Allontanamento di RP 122 part II [1]: vengono distinti i casi di equilibrio e di non equilibrio secolare della catena dell'U-238 (mentre la serie del Th-232 è considerata sempre in equilibrio secolare) e per i casi di equilibrio, alla serie è attribuito il valor medio delle concentrazioni dei radionuclidi interessati. Il Th-230 è assunto sempre in equilibrio con l'U-238.

Il confronto viene effettuato attraverso l'indice somma (come da medesimo documento [1]): se esso è > 1, vi è non conformità (evidenziata in grigio) ai Livelli Generali di Allontanamento.

I livelli si applicano a residui/rifiuti/materie prime di scarto. Per quanto riguarda le materie prime non di scarto valgono le considerazioni di cui al paragrafo 2.2.1.

**Tabella 4.4** – Confronto delle concentrazioni di attività di residui NORM della aziende produttrici di piastrelle con i Livelli generali di allontanamento di RP 122 part II [1]. Tra parentesi i singoli Livelli di allontanamento

Campione	U-238 (Bq/kg)	Th-230 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Pb-210 (Bq/kg)	Po-210 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	Indice somma
Calce idrata *	9 (5000)	9 (10000)	10 (500)	425 (5000)	46100 (5000)	3 (500)	369 (5000)	9.4
Fanghi depurazione **	111 (500)					34 (500)	317 (5000)	0.4
Polveri impianto ventilazione generale **	61 (500)					38 (500)	526 (5000)	0.3

\* serie U-238 non in equilibrio secolare; campione 4 della tab. 4.3

\*\* serie U-238 in equilibrio secolare

### 4.1.3 Discarica di fosfogessi

Le fosforiti (minerali fosfatici), usate nel ciclo di produzione dei fertilizzanti, sono ricche di uranio. Nel processo umido (non bilanciato), esse vengono attaccate con acido solforico: ne risulta acido fosforico (prodotto) e fosfogesso (scarto); nel primo confluisce l'uranio, nel secondo il radio (con crescita di piombo e polonio). In Italia tale produzione è cessata da diversi anni, sussistono tuttavia delle discariche ove veniva stoccato lo scarto (fosfogesso).

In tab. 4.5 sono mostrate le concentrazioni di attività dei vari radionuclidi in campioni di fosfogessi presso una discarica italiana [24]. Per snellezza della presentazione, sono omesse le incertezze analitiche e le informazioni sulle tecniche di misura.

Nelle stessa tab. 4.5 i valori delle concentrazioni di attività rilevati nei fosfogessi vengono confrontati con i Livelli Generali di Allontanamento di RP 122 part II [1] (caso di non equilibrio secolare della catena dell'U-238).

Il confronto viene effettuato attraverso l'indice somma (come da medesimo documento [1]): se esso è > 1, vi è non conformità (evidenziata in grigio) ai Livelli Generali di Allontanamento.

**Tabella 4.5** – Concentrazioni di attività dei radionuclidi naturali in campioni da discarica di fosfogessi [24] a confronto con i Livelli generali di allontanamento di RP 122 part II [1]. Tra parentesi i singoli Livelli di allontanamento

Campione	U-238 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Pb-210 (Bq/kg)	Po-210 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	Indice somma
Fosfogessi *	-	1300-4000 (500)	1300-4000 (5000)	1300-4000 (5000)	-	-	3.1-9.6

\* serie U-238 non in equilibrio secolare

### 4.1.4 Acciaierie a ciclo integrale

I minerali di ferro hanno modesto contenuto di radionuclidi naturali; nei processi termici ad alta temperatura (sinterizzazione degli stessi minerali e successiva fusione in altoforno con altri componenti per la produzione della ghisa) volatilizzano Pb-210 e Po-210, che dunque si ritrovano nelle emissioni e nelle polveri dei sistemi di abbattimento.

In tab. 4.6 sono mostrate le concentrazioni di attività dei vari radionuclidi in campioni di residui di un'acciaieria a ciclo integrale [25]. Per snellezza della presentazione, sono omesse le incertezze analitiche e le informazioni sulle tecniche di misura.

Tali valori sono altresì confrontati con i Livelli Generali di Allontanamento di RP 122 part II [1] (caso di non equilibrio secolare della catena dell'U-238 - la serie del Th-232 è considerata sempre in equilibrio secolare). Il Th-230 è assunto sempre in equilibrio con l'U-238.

Il confronto viene effettuato attraverso l'indice somma (come da medesimo documento [1]): se esso è > 1, vi è non conformità (evidenziata in grigio) ai Livelli Generali di Allontanamento.

**Tabella 4.6** – Concentrazione di attività dei radionuclidi naturali in campioni di residui di un'acciaieria a ciclo integrale [25], a confronto con i Livelli generali di allontanamento di RP 122 part II [1]. Tra parentesi i singoli Livelli di allontanamento

Campione	U-238 (Bq/kg)	Th-230 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Pb-210 (Bq/kg)	Po-210 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	Indice somma
Polveri abbattimento sinterizzazione (tradizionale) *	27 (5000)	27 (10000)	32 (500)	1167 (5000)	1058 (5000)	8 (500)	180 (5000)	0.6
Polveri abbattimento sinterizzazione (weep) *	<15 (5000)	<15 (10000)	24 (500)	47249 (5000)	42867 (5000)	7 (500)	6219 (5000)	19.3
Polvere abbattimento altoforno *	18-20 (5000)	18-20 (10000)	22-26 (500)	665-1583 (5000)	632-1584 (5000)	11 (500)	83-242 (5000)	0.3-0.8
Catrame (produzione coke) *	3 (5000)	3 (10000)	<0.3 (500)	181 (5000)	177 (5000)	1 (500)	<3.0 (5000)	<0.1

\* serie U-238 non in equilibrio secolare

#### 4.1.5 Produzione di allumina

Facendo reagire la bauxite con la soda (con processo termico a seguire), si forma allumina, a sua volta impiegata per la produzione di alluminio. Nell'attacco con la soda si formano i cosiddetti fanghi rossi (scarto), tipicamente accantonati in discarica. In letteratura sono riportati valori non trascurabili di uranio e torio nella bauxite (e negli scarti di produzione dell'allumina).

In tab. 4.7 sono mostrate le concentrazioni di attività dei vari radionuclidi in campioni di materie prime-residui di un'azienda produttrice di allumina a partire dalla bauxite refrattari [20]. Per snellezza della presentazione, sono omesse le incertezze analitiche e le informazioni sulle tecniche di misura.

**Tabella 4.7** – Concentrazione di attività dei radionuclidi naturali in campioni (materie prime, residui) di un'industria che produce allumina [20]

Campione	U-238 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)
Bauxite	97	91	129	2
Fanghi rossi	104	90	118	15
Polveri sistema di abbattimento n. 1	9	0.1	0.5	3
Polveri sistema di abbattimento n. 2	<10	<0.2	0.5	<1.4

In tab. 4.8 vengono confrontati i valori della tab. 4.7 con i Livelli Generali di Allontanamento di RP 122 part II [1] (caso di equilibrio secolare della catena dell'U-238 - mentre la serie del Th-232 è considerata sempre in equilibrio secolare); alla serie dell'U-238 è attribuito il valore del capostipite. Il Th-230 è assunto sempre in equilibrio con l'U-238.

Il confronto viene effettuato attraverso l'indice somma (come da medesimo documento [1]): se esso è > 1, vi è non conformità (evidenziata in grigio) ai Livelli Generali di Allontanamento.

I livelli si applicano a residui/rifiuti/materie prime di scarto. Per quanto riguarda le materie prime non di scarto valgono le considerazioni di cui al paragrafo 2.2.1.

**Tabella 4.8** – Confronto delle concentrazioni di attività di residui NORM dell'industria di produzione dell'allumina (a partire dalla bauxite) con i Livelli generali di allontanamento di RP 122 part II [1]. Tra parentesi i singoli Livelli di allontanamento

Campione	U-238 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	Indice somma
Fanghi rossi *	97 (500)		118 (500)	15 (5000)	0.4
Polveri sistema di abbattimento n. 1 *	9 (500)		0.5 (500)	3 (5000)	<0.1

\* serie U-238 in equilibrio secolare

#### 4.1.6 Estrazione di petrolio

Nell'estrazione di petrolio si formano delle incrostazioni nei condotti e nei serbatoi di lavorazione contenenti elevati livelli di radio. Anche nei fondami che si depositano all'interno dei serbatoi utilizzati per l'immagazzinamento del petrolio si rileva presenza di radio (tipicamente Ra-226 con Pb-210 e Po-210 spesso in equilibrio secolare). Simili evenienze, legate a Pb-210, si hanno per gli impianti di estrazione di gas naturale.

In tab. 4.9 sono mostrate le concentrazioni di attività nei fondami dell'estrazione di petrolio di alcuni pozzi [26]. Per snellezza della presentazione, sono omesse le incertezze analitiche e le informazioni sulle tecniche di misura.

Tali valori sono altresì confrontati con i Livelli Generali di Allontanamento di RP 122 part II [1] (caso di non equilibrio secolare della catena dell'U-238).

Il confronto viene effettuato attraverso l'indice somma (come da medesimo documento [1]): se esso è > 1, vi è non conformità (evidenziata in grigio) ai Livelli Generali di Allontanamento.

**Tabella 4.9** – Concentrazione di attività dei radionuclidi naturali in campioni di fondame dell'estrazione di petrolio [26], a confronto con i Livelli generali di allontanamento di RP 122 part II [1]. Tra parentesi i singoli Livelli di allontanamento

Campione	U-238 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Pb-210 (Bq/kg)	Po-210 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	Indice somma
Fondame petrolifero *	trascurabile	600-2000 (5000)	140 (100000)	140 (100000)	trascurabile	trascurabile	0.4

\* serie U-238 non in equilibrio secolare

## 4.2 Valutazione della dose degli individui della popolazione – Effluenti

### 4.2.1 Produzione di refrattari

Per l'inquadramento generale del settore si rimanda all'omologa scheda del paragrafo 4.1.

Si stimano, di seguito, le emissioni dei vari radionuclidi in atmosfera e nel corpo idrico recettore (scarichi liquidi) dell'azienda produttrice di refrattari trattata nel paragrafo 4.1. Tali stime vengono poi confrontate con i rispettivi livelli di screening di RP 135 [3], per la valutazione di conformità. Nella fattispecie, avendo a che fare con più radionuclidi, il confronto viene eseguito attraverso l'indice somma [3], che deve essere < 1 per la congruità radiologica.

Le emissioni in atmosfera sono valutate a partire dalle concentrazioni di attività delle polveri abbattute nel camino del forno fusorio e in quello della macinazione scarti (tab. 4.10), moltiplicandole per il rispettivo quantitativo annuo di polvere rilasciata in atmosfera (198 kg e 191 kg); per il Rn-222 si assume che tutto il gas contenuto nel quantitativo annuo di sabbie zirconifere trattate (2320 t) fuoriesca.

**Tabella 4.10** – Concentrazione di attività dei radionuclidi naturali nelle polveri dei sistemi di abbattimento di un'industria di refrattari [20]

Campione	U-238 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Pb-210 (Bq/kg)	Po-210 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)
Polveri abbattimento fusione	358	147	21050	35000	27	10
Polveri macinazione scarti	1191	1046	1033	1294	178	255

In tab. 4.11 vengono presentate le attività annue rilasciate dai radionuclidi in aria e ne viene operato il confronto con l'indice somma di RP 135 [3]; è importante (ai fini della scelta del corretto valore dei livelli di screening da utilizzare) indicare l'altezza efficace dei camini interessati: 70 m (forno fusorio) e 15 m (macinazione scarti – altezza geometrica). L'indice somma complessivo risulta dalla somma degli indici dei due camini ( $4.1 \cdot 10^{-5}$ ).

**Tabella 4.11** – Confronto delle attività rilasciate in atmosfera dall'industria di refrattari con i livelli di screening di RP 135 [3]. Tra parentesi i livelli di screening dei singoli radionuclidi.

Campione	U-238 + (Bq/anno)	U-234* (Bq/anno)	Th-230* (Bq/anno)	Ra-226+ (Bq/anno)	Rn-222 (Bq/anno)	Pb-210+ (Bq/anno)	Po-210 (Bq/anno)	Th-232 sec** (Bq/anno)	Indice somma
Polveri abbattimento fusione	$6.9 \cdot 10^4$ ( $2.3 \cdot 10^{13}$ )	$6.9 \cdot 10^4$ ( $2.0 \cdot 10^{13}$ )	$6.9 \cdot 10^4$ ( $5.1 \cdot 10^{11}$ )	$2.8 \cdot 10^4$ ( $7.3 \cdot 10^{11}$ )	$7.5 \cdot 10^9$ ( $2.7 \cdot 10^{15}$ )	$4.0 \cdot 10^6$ ( $1.6 \cdot 10^{13}$ )	$6.7 \cdot 10^6$ ( $7.9 \cdot 10^{11}$ )	$5.2 \cdot 10^3$ ( $8.8 \cdot 10^{10}$ )	$1.4 \cdot 10^{-5}$
Polveri macinazione scarti	$2.4 \cdot 10^5$ ( $1.4 \cdot 10^{11}$ )	$2.4 \cdot 10^5$ ( $1.2 \cdot 10^{11}$ )	$2.4 \cdot 10^5$ ( $2.7 \cdot 10^{10}$ )	$2.1 \cdot 10^5$ ( $6.5 \cdot 10^{10}$ )		$2.1 \cdot 10^5$ ( $1.6 \cdot 10^{11}$ )	$2.6 \cdot 10^5$ ( $7.0 \cdot 10^{10}$ )	$3.5 \cdot 10^4$ ( $5.4 \cdot 10^9$ )	$2.7 \cdot 10^{-5}$

\* assunto l'equilibrio con U-238

\*\* serie in equilibrio secolare

Le emissioni in corpo idrico (nella fattispecie fiume piccolo) sono valutate a partire dalle concentrazioni di attività delle acque di scarico (tab. 4.12 [20]), moltiplicandole per il quantitativo annuo di scarico idrico (30000 m<sup>3</sup>). In tab. 4.13 ne è riportato il confronto con l'indice somma di RP 135 (fiume piccolo) [3].

**Tabella 4.12** – Concentrazione di attività dei radionuclidi naturali nelle acque di scarico di un'industria di refrattari [20]

Campione	Pb-210 (Bq/l)	Po-210 (Bq/l)
Acque scarico impianto depurazione	0.08	0.0044

**Tabella 4.13** – Confronto delle attività rilasciate in fiume dall'industria di refrattari con i livelli di screening di RP 135 (fiume piccolo) [3]. Tra parentesi i livelli di screening dei singoli radionuclidi.

Campione	Pb-210+ (Bq/anno)	Po-210 (Bq/anno)	Indice somma
Acque scarico impianto depurazione	2.40·10 <sup>6</sup> (3.2·10 <sup>10</sup> )	1.3·10 <sup>5</sup> (3.7·10 <sup>10</sup> )	7.8·10 <sup>-5</sup>

#### 4.2.2 Produzione di piastrelle

Per l'inquadramento generale del settore si rimanda all'omologa scheda del paragrafo 4.1.

Si stimano, di seguito, le emissioni dei vari radionuclidi (Pb-210 e Po-210) in atmosfera delle aziende produttrici di piastrelle trattate nel paragrafo 4.1. Tali stime vengono poi confrontate con i rispettivi livelli di screening di RP 135 [3], per la valutazione di conformità. Nella fattispecie, avendo a che fare con più radionuclidi, il confronto viene eseguito attraverso l'indice somma [3], che deve essere < 1 la congruità radiologica.

Le emissioni in atmosfera del Po-210 sono valutate a partire dalla sua concentrazione di attività nelle materie prime (sabbie zirconifere/farina di silicato di zirconio), cfr. tab. 4.3, moltiplicandola per il quantitativo annuo di materia prima trattata (2977 t di sabbie zirconifere/farina di silicato di zirconio), nell'ipotesi dunque che tutto il polonio inizialmente presente nella materia prima venga convogliato nel forno di cottura, applicando comunque poi un abbattimento del 99% a tenere conto del sistema di filtrazione fumi.

Le emissioni in atmosfera del Pb-210 sono valutate a partire da quelle del Po-210, applicando un fattore di riduzione pari al rapporto di concentrazione di attività del Pb-210 rispetto al Po-210 nella calce idrata (cfr. tab. 4.3), a tenere conto del fatto che il piombo ha una minore frazione di volatilizzazione rispetto al polonio, date le temperature in gioco.

In tab. 4.14 vengono presentate le attività annue rilasciate in aria di Pb-210 e Po-210 e ne viene operato il confronto con l'indice somma di RP 135 [3]; è importante, ai fini della scelta del corretto valore dei livelli di screening da utilizzare, indicare l'altezza efficace del camino interessato (60 m).

**Tabella 4.14** – Confronto delle attività rilasciate in aria dalle aziende produttrici di piastrelle con i livelli di screening di RP 135 [3]. Tra parentesi i livelli di screening dei singoli radionuclidi

Campione	Pb-210+ (Bq/anno)	Po-210 (Bq/anno)	Indice somma
Polveri emesse in atmosfera	7.5·10 <sup>5</sup> (1.6·10 <sup>12</sup> )	8.2·10 <sup>7</sup> (7.9·10 <sup>11</sup> )	1.0·10 <sup>-4</sup>

#### 4.2.3 Acciaierie a ciclo integrale

Per l'inquadramento generale del settore si rimanda all'omologa scheda del paragrafo 4.1.

Si stimano, di seguito, le emissioni dei vari radionuclidi (Pb-210 e Po-210) in atmosfera dell'acciaieria a ciclo integrale trattata nel paragrafo 4.1. Tali stime vengono poi confrontate con i rispettivi livelli di screening di RP 135 [3], per la valutazione di conformità. Nella fattispecie, avendo a che fare con più radionuclidi, il confronto viene eseguito attraverso l'indice somma [3], che deve essere < 1 la congruità radiologica.

Le emissioni in atmosfera sono valutate a partire dalle concentrazioni di attività nei gas di uscita [27] (tab. 4.15), moltiplicandole per la portata annua media del camino (3·10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/h).

**Tabella 4.15** – Concentrazione di attività di Pb-210 e Po-210 nei gas d'uscita dal camino di un'acciaieria a ciclo integrale [27]

Campione	Pb-210 (Bq/m <sup>3</sup> )	Po-210 (Bq/m <sup>3</sup> )
Polveri nei gas d'uscita	0.901	2.165

In tab. 4.16 vengono presentate le attività annue rilasciate dai radionuclidi in aria e ne viene operato il confronto con l'indice somma di RP 135 [3]; è importante (ai fini della scelta del corretto valore dei livelli di screening da utilizzare) indicare l'altezza efficace del camino interessato (210 m).

**Tabella 4.16** – Confronto delle attività rilasciate in aria dall'acciaieria a ciclo integrale con i livelli di screening di RP 135 [3]. Tra parentesi i livelli di screening dei singoli radionuclidi

Campione	Pb-210+ (Bq/anno)	Po-210 (Bq/anno)	Indice somma
Polveri emesse in atmosfera	2.4·10 <sup>10</sup> (1.1·10 <sup>13</sup> )	5.7·10 <sup>10</sup> (5.8·10 <sup>13</sup> )	1.2·10 <sup>-2</sup>

### 4.3 Valutazione della dose per i lavoratori (stime predittive)

#### 4.3.1 Industria di produzione fertilizzanti

Si tratta di un'azienda ove vengono accatastati cumuli di materie prime (fosforiti, acido fosforico, superfosfati, fosfati mono ammoniaci – MAP) all'interno di un capannone; le materie prime vengono lavorate, con deposito in cumuli dei prodotti, sempre all'interno di un capannone.

Si ipotizza la presenza di un lavoratore a tempo pieno presso i cumuli di materie prime e di un altro, sempre a tempo pieno, presso i cumuli dei prodotti ( $t_e = 1800$  h/anno).

Le esposizioni che vengono stimate sono: l'irradiazione esterna (eq. 13), l'inalazione di radionuclidi (eq. 14), l'inalazione di Rn-222 (eq. 15).

Per l'irradiazione esterna sono utilizzati i coefficienti di tab. 3.1 (geometria "cumulo"). La concentrazione di Rn-222 in aria è calcolata tramite le eqq. 16-17.

**Tabella 4.17** – Dati di input: concentrazioni di attività dei vari radionuclidi in materie prime e prodotti di un'industria di fertilizzanti [20]

Materiale	Cm (Bq/kg)	Cm (Bq/kg)	Cm (Bq/kg)
	U-238	Ra-226	K-40
Fosforite – materia prima	1000 <sup>a)</sup>	1070 <sup>a)</sup>	42
Acido fosforico – materia prima	1600 <sup>b)</sup>	0.7 <sup>c)</sup>	19
MAP – materia prima	2741 <sup>b)</sup>	39 <sup>c)</sup>	28
Superfosfato – materia prima	450 <sup>a)</sup>	500 <sup>a)</sup>	17
Superfosfato – prodotto	450 <sup>a)</sup>	500 <sup>a)</sup>	17
Fertilizzante complesso - prodotto	410 <sup>a)</sup>	310 <sup>a)</sup>	3350

<sup>a)</sup> equilibrio secolare <sup>b)</sup> U-nat, Th-230 <sup>c)</sup> Ra-226+, Pb-210+, Po-210

**Tabella 4.18** – Dosi efficaci individuali ai lavoratori nei due settori

Settore	Via di esposizione	Dose efficace (mSv/anno)
Materie prime	Irradiazione esterna	0.02
	Inalazione	0.05
	Inalazione Rn-222	0.44
	<b>TOTALE</b>	<b>0.51</b>
Prodotti	Irradiazione esterna	0.03
	Inalazione	0.03
	Inalazione Rn-222	0.44
	<b>TOTALE</b>	<b>0.50</b>

### 4.3.2 Discarica di fosfogessi

Si ipotizza la presenza di un lavoratore a tempo pieno sulla discarica all'interno di una macchina operatrice ( $t_e = 1800\text{h/anno}$ ).

Le esposizioni che vengono stimate sono: l'irradiazione esterna (eq. 13), l'inalazione di radionuclidi (eq. 14), l'inalazione di Rn-222 (eq. 15).

Per l'irradiazione esterna sono utilizzati i coefficienti di tab. 3.1 (geometria "discarica"). La concentrazione di Rn-222 in aria è calcolata tramite le eqq. 9-10 con la parametrizzazione del paragrafo 3.3.

**Tabella 4.19** – Dati di input: concentrazioni di attività dei vari radionuclidi nel fosfogesso [20]

Materiale	Cm (Bq/kg) Ra-226+	Cm (Bq/kg) Pb-210+	Cm (Bq/kg) Po-210
Fosfogesso	1600	1600	1600

**Tabella 4.20** – Dosi efficaci individuali ai lavoratori

Settore	Via di esposizione	Dose efficace (mSv/anno)
Discarica	Irradiazione esterna	1.21
	Inalazione	0.02
	Inalazione Rn-222	0.42
	<b>TOTALE</b>	<b>1.65</b>

### 4.3.3 Manutenzione a serbatoi del ciclo dell'estrazione di petrolio

Si tratta di interventi straordinari per rimuovere il fondame dai serbatoi di raccolta dell'olio estratto. Nei fondami si concentra il Ra-226+ (con Pb-210+ e Po-210) associato alle acque di formazione.

Si ipotizzano interventi di lavoratori con palatura manuale del fondame per un tempo complessivo pari a  $t_e = 250\text{ h/anno}$ .

Le esposizioni che vengono stimate sono: l'irradiazione esterna (calcoli specifici effettuati con Microshield [28]), l'inalazione di radionuclidi (eq. 14), l'inalazione di Rn-222 (eq. 15).

La concentrazione di Rn-222 in aria è calcolata tramite le eqq. 16-17, con:

rateo di ventilazione  $\lambda_v = 6.94 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  (estrattore meccanico di alto flusso)

superficie del cumulo di fondame  $A = 591 \text{ m}^2$

volume del cumulo di fondame  $= 1182 \text{ m}^3$

densità del fondame  $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$

frazione di emanazione  $E = 0.05$  [14]

**Tabella 4.21** – Dati di input: concentrazioni di attività dei vari radionuclidi nel fondame [28]

Materiale	Cm (Bq/kg) Ra-226+	Cm (Bq/kg) Pb-210+	Cm (Bq/kg) Po-210
Fondame petrolifero	2226	2226	2226

**Tabella 4.22** – Dosi efficaci individuali ai lavoratori della manutenzione

Settore	Via di esposizione	Dose efficace (mSv/anno)
Materie prime	Irradiazione esterna	0.28
	Inalazione	0.004
	Inalazione Rn-222	0.001
	<b>TOTALE</b>	<b>0.285</b>

#### 4.3.4 Industria di produzione di refrattari

Si tratta di un'azienda ove vengono accumulate le materie prime (allumina, sabbie zirconifere, silice) al chiuso, dove poi le miscele di materie prime vengono fuse ad alta temperatura, i prodotti finiti vengono depositati all'aperto, mentre quelli difettati vengono sottoposti a macinazione per la successiva ricottura.

Le fasi lavorative indagate sono le operazioni presso i cumuli di materie prime, la gestione delle polveri di abbattimento del forno fusorio, le gestione delle polveri di macinazione degli scarti, con presenza di operatori per tutto il tempo lavorativo ( $t_e = 1800\text{h/anno}$ ).

Le esposizioni che vengono stimate sono: l'irradiazione esterna (eq. 13), l'inalazione di radionuclidi (eq. 14), l'inalazione di Rn-222 (eq. 15).

Per l'irradiazione esterna sono utilizzati i coefficienti di tab. 3.1 (geometria "cumulo"). La concentrazione di Rn-222 in aria è calcolata tramite le eqq. 16-17 con densità del materiale  $\rho = 2800 \text{ kg/m}^3$  e frazione di emanazione  $E = 0.05$  [29].

**Tabella 4.23** – Dati di input: concentrazioni di attività dei vari radionuclidi nelle sabbie zirconifere e nelle polveri di abbattimento del forno fusorio e della macinazione scarti [17]

Materiale/settore	Cm (Bq/kg)	Cm (Bq/kg)	Cm (Bq/kg)	Cm (Bq/kg)	Cm (Bq/kg)
	U-238	Ra-226	Pb-210	Po-210	Th-232
Sabbie zirconifere – materia prima	3613 <sup>a)</sup>	3219 <sup>a)</sup>	2707 <sup>a)</sup>	2748 <sup>a)</sup>	517 <sup>a)</sup>
Polvere abbattimento fornace	358 <sup>b)</sup>	147 <sup>c)</sup>	21050 <sup>d)</sup>	35000	27 <sup>a)</sup>
Polvere abbattimento macinazione scarti	1191 <sup>a)</sup>	1046 <sup>a)</sup>	1033 <sup>a)</sup>	1293 <sup>a)</sup>	178 <sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> equilibrio secolare <sup>b)</sup> Unat, Th-230 <sup>c)</sup> Ra-226+ <sup>d)</sup> Pb-210+

**Tabella 4.24** – Dosi efficaci individuali ai lavoratori nei tre settori

Materiale/settore	Via di esposizione	Dose efficace (mSv/anno)
Sabbie zirconifere – materia prima	Irradiazione esterna	0.25
	Inalazione	0.28
	Inalazione Rn-222	1.64
	<b>TOTALE</b>	<b>2.17</b>
Polvere abbattimento fornace	Irradiazione esterna	0.01
	Inalazione	0.24
	Inalazione Rn-222	0.07
	<b>TOTALE</b>	<b>0.32</b>
Polvere abbattimento macinazione scarti	Irradiazione esterna	0.08
	Inalazione	0.09
	Inalazione Rn-222	0.53
	<b>TOTALE</b>	<b>0.71</b>

#### 4.3.5 Industria di produzione di piastrelle

Si tratta di un'azienda ove vengono accumulate le materie prime, tra le quali le sabbie zirconifere (base degli smalti e degli impasti di alcuni prodotti) al chiuso; c'è un reparto apposito per le smaltature; "biscotti" (matrice delle piastrelle) e smalti vengono "cotti" in forno a temperatura sufficiente per la volatilizzazione del Po-210; la depurazione dei fumi di cottura avviene tramite calce ("idrata" a fine processo).

La fase lavorativa indagata è la gestione della calce idrata, con presenza di operatori per tutto il tempo lavorativo ( $t_e = 1800\text{h/anno}$ ).

L'esposizione che viene stimata è l'inalazione di radionuclidi (eq. 14).

---

**Tabella 4.25** – *Dati di input: concentrazioni di attività di Pb-210 e Po-210 nella calce idrata a seguito di cottura piastrelle [19]*

Materia	Cm (Bq/kg) Pb-210+	Cm (Bq/kg) Po-210
Calce idrata	425	46100

**Tabella 4.26** – *Dosi efficaci individuali ai lavoratori*

Materiale/settore	Via di esposizione	Dose efficace (mSv/anno)
Calce idrata	Inalazione	0.22

---

## 5 BIBLIOGRAFIA

1. European Commission. Radiation Protection n. 122 part 2 “Practical use of the concepts of clearance and exemption – Application of the concepts of exemption and clearance to natural radiation sources” (2002).
2. RESRAD version 6.4 (Argonne, IL: Argonne National Laboratory), (2007).
3. European Commission. Radiation Protection 135 “Effluent and dose control from European Union NORM industries: assessment of current situation and proposal for a harmonised Community approach” (2003).
4. IAEA. “Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment”, Safety Report Series n. 19, Vienna (2001).
5. National Radiological Protection Board. “Generalised Derived Constraints for Radioisotopes of Polonium, Lead, Radium and Uranium”, Documents of the NRPB, vol. 13 n. 2, UK (2002).
6. PC-Cream, Public Health England, Chilton, Didcot, Oxon OX11 0RQ.
7. ADMS – Urban, Cambridge Environmental Research Consultants UK.
8. POSEIDON model, Centre d'étude sur l'Evaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire (CEPN) BP 48, 92263 Fontenay-aux-Roses, France.
9. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. Official Journal of the European Union, L 13, vol. 57, 17 January 2014.
10. Direttiva 2013/51/Euratom del Consiglio del 22.10.13 che stabilisce requisiti per la tutela della salute della popolazione relativamente alle sostanze radioattive presenti nelle acque destinate al consumo umano. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea L 296/12 del 7.11.13.
11. Microshield version 6.20 (Grove Software, inc.); <http://www.radiationsoftware.com/mshield.html>
12. Direttiva 96/29/Euratom del Consiglio del 13.05.96, che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea L 159/96 del 29.06.96.
13. European Commission. Radiation Protection n. 112 “Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials” (1999).
14. De Zolt S., Trotti F., Zampieri C., Colombo G., Fresca Fantoni R. “Radiological impact to the public of the incineration of oil sludge of an Italian oil company”. Proceedings of the International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity. Bergen, June 2008. Oral and poster presentations part 1, 334-337 (2008).

- 
15. National Radiological Protection Board. "Generalised Derived Constraints for Radioisotopes of Strontium, Ruthenium, Iodine, Caesium, Plutonium, Americium and Curium - Generalised Derived Limits for Radioisotopes of Polonium, Lead, Radium and Uranium", Documents of the NRPB, vol. 11 n. 2, UK (2000).
  16. Harvey Mike (Public Health England – Regno Unito) , Comunicazione personale (2014).
  17. ICRP. Statement on Radon (2009).
  18. Zampieri C., Trotti F., Andreoli F., Ballarin Denti A. "NORM in Italian tile and refractories industries". Proceedings of the Fifth International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Materials – NORM V. Seville, March 2007. IAEA, 141-148 (2008).
  19. Trotti F., Zampieri C., De Zolt S. "Dose to the public due to air emissions from a tile factory". Proceedings of the International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity. Bergen, June 2008. Oral and poster presentations part 1, 88-91 (2008).
  20. Zampieri C., Trotti F. et al. "Attività lavorative con materiali ad elevato contenuto di radioattività naturale (NORM: Naturally Occurring Radioactive Materials)", ANPA, RTI CTN\_AGF 3/2004.
  21. Kowe R., Carey A.D., Jones J.A., Mobbs S.F. "GRANIS: a model for the assessment of external photon irradiation from contaminated media of infinite lateral extent", HPA-RPD-032, UK (2007).
  22. Eckermann K.F., Ryman J.C. "External exposure to radionuclides in air, water, and soil", EPA, Federal Guidance Report n. 12, EPA-402-R-93-081, USA (1993).
  23. Trotti F., Zampieri C., Caldognetto E., Magro L., Jia G. "Environmental aspects of norm industry in Italy". Proceedings of the 2nd International Conference on Radioactivity in the Environment. Nice, October 2005, pp 119-123 (2005).
  24. Belli M. et al. "Le discariche di fosfogessi nella laguna di Venezia: valutazioni preliminari dell'impatto radiologico", ANPA, Serie Stato dell'Ambiente 8/2000.
  25. Trotti F., Zampieri C., Caldognetto E., Ocone R., Di Lullo A., Magro L., Jia G., Torri G. "A study concerning NORM in integrated steelworks". Proceedings of the Fifth International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Materials – NORM V. Seville, March 2007. IAEA, 351-354 (2008).
  26. Trotti F., Liziero F., Zampieri C., De Zolt S. "Impact to public and environment of NORM industries in Italy". Radiation Protection Dosimetry, vol. 137, No. 3-4, pp 310-313 (2009).
  27. ISPRA, Comunicazione personale (2011).
  28. De Vecchi F., Colombo G., Fresca Fantoni R., De Zolt S., Trotti F., Zampieri C. "Management of NORM-containing processing residuals from hydrocarbons extraction and treatment plants". Radiation Protection Dosimetry, vol. 137, No. 3-4, pp 314-317 (2009).
  29. Kümmel M., Döring J., Beck T., Mielcarek J., Schkade U.K. "Dose assessment for working areas in zircon-sand and oil & gas industries", EAN Norm Round-Table Workshop "Scenarios for Dose Assessments in the NORM industry" Nov. 23rd - 25th 2010, Dresden (Germany), [http://www.ean-norm.net/lenya/ean\\_norm/live/roundtableworkshop.html](http://www.ean-norm.net/lenya/ean_norm/live/roundtableworkshop.html)

---

## **ALLEGATO A**

# **PRODUZIONE DI ENERGIA GEOTERMICA**

## ALLEGATO A. Produzione di Energia Geotermica

### 1. IMPIANTO GEOTERMICO A MEDIA ENTALPIA

a cura di Giovanni Colombo e Roberto Fresca Fantoni gruppo ENI

#### 1.1 Descrizione dell'impianto

L'impianto geotermico sfrutta la temperatura del fluido geotermico di circa 100 °C come fonte primaria per una rete di teleriscaldamento cittadina. Il fluido caldo viene pompato verso la superficie dalla profondità di circa 2.000 m attraverso due pozzi di prelievo e, una volta ceduta l'energia termica alla rete di teleriscaldamento attraverso una serie di scambiatori, viene re-iniettato tramite un pozzo di reiniezione, onde garantire la stabilità geotecnica del sottosuolo. Con una portata di circa 400 m<sup>3</sup>/h di acqua alla temperatura di ca. 100°C, la fonte geotermica contribuisce per una potenza di 14 MW alla potenza totale erogabile attraverso la rete di teleriscaldamento.

Dati di esercizio della fonte Geotermica:

- Portata complessiva 400 m<sup>3</sup>/h
- Temperatura fluido geotermico 100-105°C
- Temperatura fluido di teleriscaldamento in mandata 90-95°C
- Temperatura fluido teleriscaldamento in ritorno 60-65°C
- Potenza termica nominale 14 MW
- Disponibilità di utilizzazione continua
- Energia prodotta fino a 75.000 MWh/anno

Figura 1.1 - schema geologico sorgente geotermica

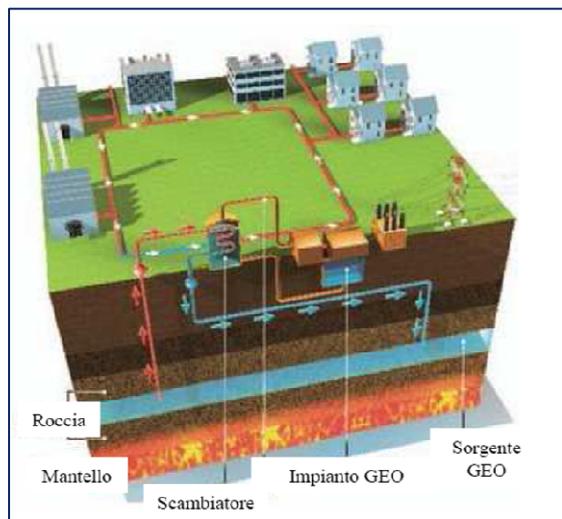
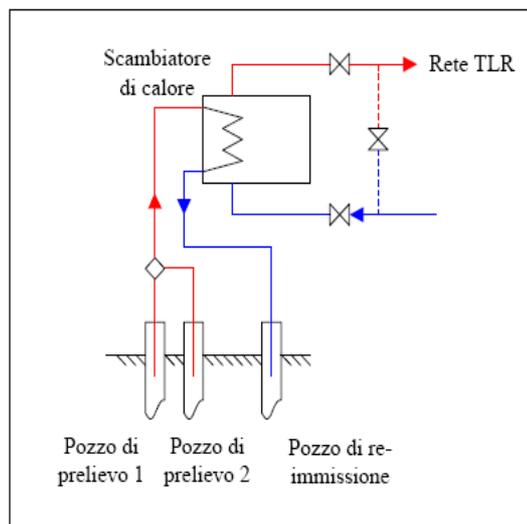


Figura 1.2 - schema di funzionamento impianto<sup>3</sup>



L'elevato volume del fluido geotermico che fluisce nell'impianto nonché le variazioni di pressione e temperatura che lo stesso subisce producono in alcuni punti la deposizione di radionuclidi naturali sotto forma di solidi sospesi (nei filtri) o di incrostazioni.

#### 1.2 Valutazione delle vie di esposizione

Le vie di esposizione riguardano primariamente i lavoratori impegnati in interventi di manutenzione e secondariamente i lavoratori addetti al controllo dell'impianto nelle normali condizioni di esercizio. Per quanto riguarda la popolazione occorre tener presente che il fluido proveniente dai pozzi di

<sup>3</sup> Immagini da Geotherm Expo 2009

emungimento circola esclusivamente nel circuito primario. Il circuito secondario, ad anello chiuso, è del tutto analogo a quello degli impianti di teleriscaldamento non geotermici.

E' possibile pertanto escludere la formazione di NORM<sup>4</sup> al di fuori delle strutture della Centrale Geotermica. I seguenti paragrafi riportano le informazioni funzionali alla formulazione delle valutazioni di rischio radiologico, acquisite nel corso di misurazioni sia in fase di esercizio che in occasione di fermate dell'impianto per interventi di manutenzione.

### 1.2.1 Misurazioni di rateo di dose gamma in prossimità dei componenti

Sono state effettuate misurazioni dell'intensità dell'equivalente di dose ambientale, associato primariamente all'emissione di radiazione gamma del Ra-226 e dei suoi prodotti di decadimento Pb-214 e Bi-214, a contatto dei componenti di produzione e a distanze crescenti. I valori, comprensivi del fondo ambientale di radiazione, pari a circa 80 nSv/h, sono riportati nella tabella 1.1.

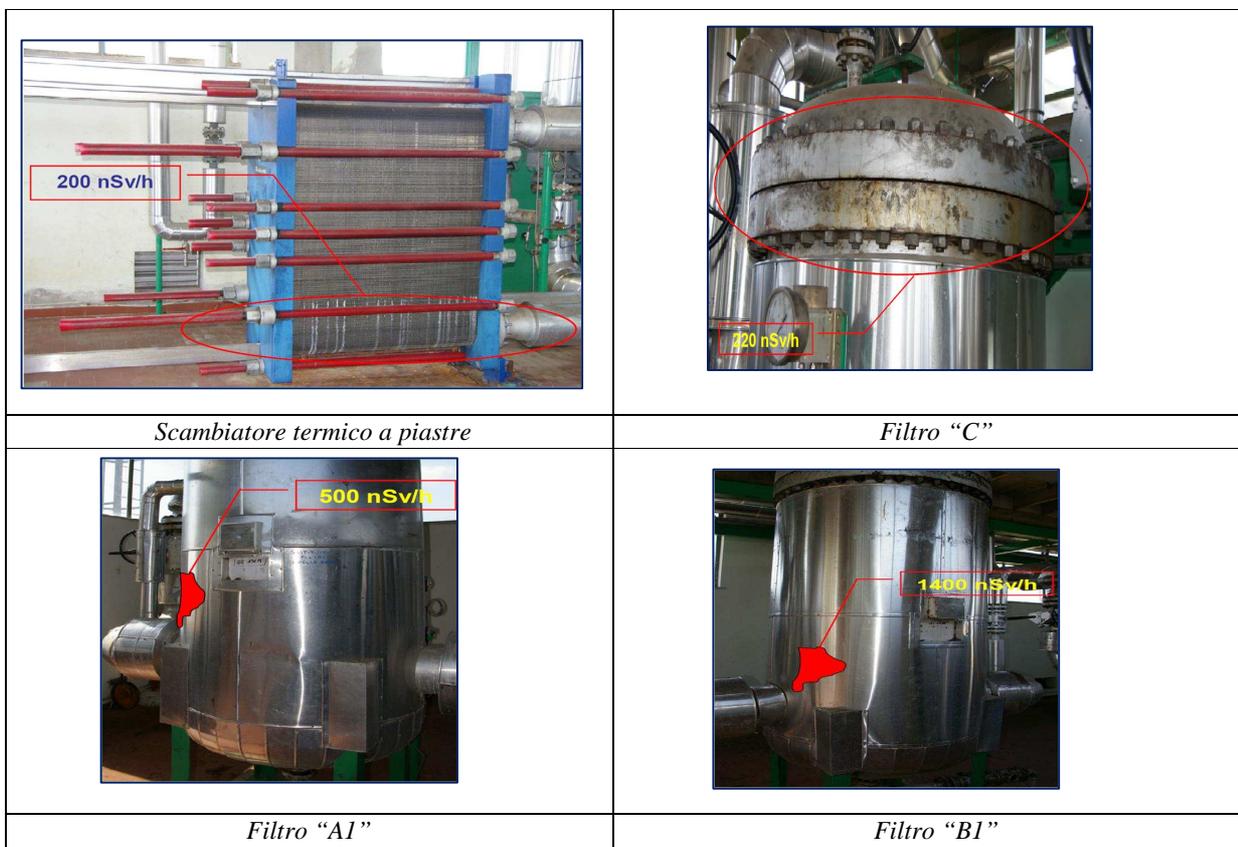
**Tabella 1.1** – Rateo di dose a contatto dei filtri del fluido geotermico e dello scambiatore

Componente / Elemento	Misurazioni espresse in nSv/h			
	Contatto	50 cm	1 m	1,5 m
Scambiatore a piastra	200	FA <sup>(*)</sup>	-	-
Filtro "A"	350	220	160	FA <sup>(*)</sup>
Filtro "B"	200	190	120	FA <sup>(*)</sup>
Filtro "C"	220	180	120	FA <sup>(*)</sup>
Filtro "A 1"	600	200	140	FA <sup>(*)</sup>
Filtro "B 1"	1400	400	300	180
Filtro "C 1"	220	200	180	FA <sup>(*)</sup>

\*fondo ambientale

Nella figura seguente sono evidenziati i punti di massima intensità di dose a contatto.

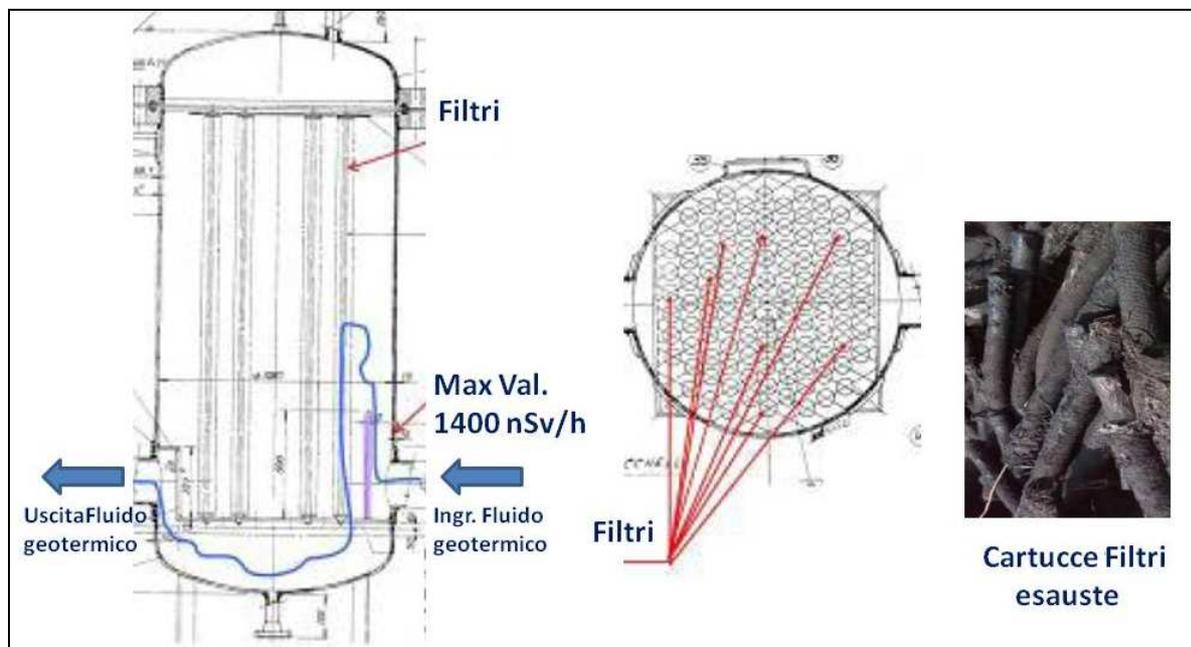
**Figura 1.3** Punti di massima intensità di dose a contatto



<sup>4</sup> Naturally Occurring Radioactive Material

I filtri sono costituiti da una serie di elementi a cartuccia composti da un'anima in acciaio zincato forato avvolta da una maglia di filamenti di cotone. Questi filtri sono ancorati sul fondo del componente e il fluido geotermico segue il percorso schematizzato nel disegno riportato in fig.1.4. Ogni unità filtrante contiene circa 100 cartucce filtranti.

**Figura 1.4** - schema tecnico del filtro e cartucce



### 1.2.2 Misurazioni di rateo di dose all'esterno del cassone contenente le cartucce filtro esauste

I filtri esausti, normalmente sostituiti su base triennale, sono stati collocati all'interno di un cassone della capienza di circa  $7 \text{ m}^3$ . A contatto del cassone il valore d'intensità di dose massimo rilevato è risultato essere  $400 \text{ nSv/h}$ , a 3 metri di distanza dalla superficie esterna del cassone l'intensità di dose era confrontabile con il fondo ambientale locale. E' stata definita un'area di rispetto ad una distanza di 3 m intorno al cassone. Sotto al cassone è stato steso cautelativamente un telo di plastica di contenimento e l'intero cassone è stato avvolto con lo stesso materiale, Infine è stato predisposto un piccolo bacino di contenimento con della sabbia. (v. Figg. 1.5 e 1.6).

**Figura 1.5** - stesura telo protettivo sotto cassone



**Figura 1.6** - Cassone cartucce filtro



### 1.2.3 Campionamenti e analisi spettrometriche gamma

All'interno dell'impianto sono stati prelevati tre campioni (uno di fluido geotermico, uno di sedimenti accumulatisi sulle cartucce filtranti e uno di incrostazioni presenti sugli scambiatori a piastre). Tali campioni sono stati sottoposti ad analisi spettrometrica gamma. I risultati sono riportati nella tabella 1.2. La conformazione della struttura interna delle unità filtranti in manutenzione non ha purtroppo consentito il prelievo delle incrostazioni che davano origine alle anomalie radiometriche riscontrate in alcuni punti posti in prossimità del condotto di ingresso del fluido geotermico.

**Tabella 1.2** – Risultati dell'analisi spettrometrica gamma delle matrici tecnologiche. (\*)Bq/l

Denominazione campioni	Pb-210 [Bq/kg]	Ra-226 [Bq/kg]	Th-228 [Bq/kg]	Ra-228 [Bq/kg]	K-40 [Bq/kg]
Fluido geotermico (*)	< 12,1	41,7 ± 4,3	< 2,39	< 1,25	32,0 ± 1,9
Materiale filtrante esausto	18924 ± 1753	7180 ± 502	< 168	< 94,5	< 247
Incrostazioni su scambiatori	< 55,9	620 ± 48	< 34,3	< 18,3	599 ± 30

Le analisi radiometriche del fluido geotermico evidenziano la presenza predominante di Ra-226 (serie dell'U-238) rispetto a quella del Ra-228 (serie del Th-232). Nei filtri predomina invece nettamente l'accumulo di Pb-210 che si trova all'interno di una matrice bituminosa derivante dalla presenza nel fluido geotermico di tracce di idrocarburi.

Nelle incrostazioni solfatiche presenti sulla superficie interna dello scambiatore il radionuclide predominante, come peraltro atteso, è il Ra-226.

### 1.2.4 Scenari lavorativi di esposizione

Nell'ambito delle attività routinarie condotte nell'impianto sono stati individuati i seguenti scenari espositivi:

- Ispezione visiva dell'impianto e registrazione dei parametri di esercizio;
- Interventi di manutenzione straordinaria (sostituzione cartucce filtranti):
  - allestimento e smontaggio ponteggi;
  - installazione/disinstallazione dei dischi ciechi e bullonatura e successivo serraggio del cappello superiore delle unità filtranti;
  - sostituzione filtri /operazioni ad apparecchiature aperte;
  - movimentazione cassone contenente cartucce filtro esauste.

#### **Ispezione visiva dell'impianto e registrazione dei parametri di esercizio**

All'operatore incaricato di effettuare quotidianamente il controllo visivo dell'impianto e la registrazione dei parametri di esercizio, è stato fornito un dosimetro elettronico preventivamente azzerato; contemporaneamente un secondo dosimetro è stato assegnato a un lavoratore che ha svolto attività d'ufficio all'esterno dell'area impianti, al fine di disporre di un valore di fondo di radiazione di riferimento.

Al termine delle operazioni i due strumenti sono stati confrontati, rilevando che il valore di Equivalente di Dose Personale Hp(10) riportato da entrambi è risultato essere identico e pari a 0,09 µSv per un tempo di misura pari ad 1 ora, da cui è possibile ipotizzare cautelativamente un'esposizione incrementale media, all'interno dell'edificio della Centrale, di 0,01 µSv/h.

E' ragionevole pertanto asserire che la dose per un operatore che permanesse per 2 ore al giorno all'interno della Centrale ed effettuasse i controlli per 250 volte nel corso di un anno riceverebbe un'esposizione incrementale pari a 5 µSv all'anno. Tale risultato conferma che l'attività quotidiana di

---

controllo visivo dell'impianto e di rilievo dei parametri strumentali non comporta esposizione avente rilevanza radiologica.

### **Interventi di manutenzione straordinaria (sostituzione cartucce filtranti)**

#### ***Allestimento e smontaggio del ponteggio.***

L'accesso alla parte superiore delle unità filtranti avviene tramite l'installazione di un ponteggio. Per l'attività di allestimento e smontaggio dello stesso si considera un'esposizione derivante dal solo irraggiamento esterno.

➤ **Scenario espositivo cautelativo**

Si adotta ai fini del calcolo, in un'ottica cautelativa, il valore di rateo di dose rilevato a 50 cm più alto tra quelli relativi alle unità filtranti (v. tabella 1.1) e si ipotizza che tutto il tempo delle operazioni sia trascorso nel punto di massima esposizione. Sulla base delle predette ipotesi, il rateo di dose ai lavoratori per queste attività è di 0.4  $\mu\text{Sv/h}$ .

➤ **Scenario espositivo realistico**

In un'ottica più realistica ma pur sempre cautelativa, si considera come rateo di dose il valor medio tra quelli misurati a 50 cm dai componenti in oggetto, pari quindi a 0.23  $\mu\text{Sv/h}$ .

Ipotizzando una durata delle operazioni di 18 ore per il montaggio e lo smontaggio dei ponteggi attorno alle sei unità filtranti, ne deriva una dose efficace compresa tra 7,2  $\mu\text{Sv}$  e 4,1  $\mu\text{Sv}$ .

#### ***Installazione/disinstallazione dei dischi ciechi e sbullonatura e successivo serraggio del cappello superiore delle unità filtranti.***

Tale attività viene svolta a contatto dei componenti ma espone il personale al solo irraggiamento esterno in quanto, a causa della presenza di acido solfidrico nel fluido geotermico anche le operazioni di inserimento di flange cieche (per ragioni di sicurezza) sui condotti di ingresso e uscita del circuito primario, sono condotte da personale dotato di autorespiratori.

➤ **Scenario espositivo cautelativo**

In un'ottica cautelativa si adotta, ai fini del calcolo, il valore di rateo di dose più elevato rilevato a contatto delle unità filtranti e si ipotizza che tutte le ore di lavoro indicate siano trascorse in tale punto di massima esposizione. Sulla base delle predette ipotesi, il rateo di dose ai lavoratori per queste attività è di 1.4  $\mu\text{Sv/h}$ .

➤ **Scenario espositivo realistico**

In un'ottica più realistica, si considera come rateo di dose il valor medio di quelli misurati a contatto dei componenti in oggetto, pari quindi a 0,50  $\mu\text{Sv/h}$ .

Ipotizzando una durata delle operazioni di 12 ore ne deriva una dose efficace compresa tra 16,8  $\mu\text{Sv}$  e 6,0  $\mu\text{Sv}$ .

#### ***Sostituzione filtri /operazioni ad apparecchiature aperte***

Per tali attività, che comprendono l'apertura delle apparecchiature, la pulizia interna, lo smontaggio filtri da alienare e l'inserimento di nuovi filtri, si considera un'esposizione derivante sia dall'irraggiamento esterno che da irraggiamento interno derivante dall'introduzione per inalazione di particolato contenente TENORM<sup>5</sup>.

#### ***Irraggiamento esterno***

Non essendo stato possibile effettuare misurazioni a diretto contatto delle concrezioni formatesi sulla superficie interna della struttura metallica dell'unità filtrante ma solo all'esterno della stessa, l'intensità di dose è stata determinata tenendo conto dell'attenuazione generata dalla parete di acciaio del componente.

---

<sup>5</sup> Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material

---

Lo spessore emivalente dell'acciaio, con riferimento al Ra-226 è pari a 2,13 cm. Ipotizzando cautelativamente che lo spessore della parete sia pari a tale valore, si ottiene che la sua presenza riduce l'intensità della radiazione gamma misurabile all'esterno alla metà di quella che si avrebbe al suo interno.

➤ Scenario espositivo cautelativo

Si considera che il rateo di dose ambientale a contatto della parte interna del componente sia di circa 2,80 µSv/h, doppio del massimo valore a contatto rilevato sul luogo delle operazioni;

➤ Scenario espositivo realistico

Si utilizza il doppio del valor medio dei ratei a contatto dei filtri, pari a 1,0 µSv/h;

#### *Contaminazione interna*

Relativamente alla contaminazione interna, si assume che questa sia dovuta all'inalazione di particolato sulla base delle seguenti ipotesi cautelative:

- la concentrazione di particolato P nell'aria sia di 1 mg/m<sup>3</sup>;
- gli operatori non indossino dispositivi di protezione delle vie aeree;
- il rateo di volume respiratorio V sia quello medio pari a 1200 litri/ora;
- la concentrazione dei radionuclidi nel particolato sia quella rilevata nel campione di filtro analizzato:
  - Radio-226: concentrazione di 7180 Bq/kg;
  - Piombo-210: concentrazione di 18924 Bq/kg
  - Polonio-210 supposto in equilibrio con il Pb-210

La dose efficace impegnata si ottiene dalla formula seguente:

$$\sum_i h(g)_i \cdot C_i \cdot P \cdot V$$

in cui  $h(g)_i$ , espresso in Sv/Bq, è il corrispondente coefficiente di conversione di dose efficace impegnata per unità di introduzione per inalazione per i lavoratori, riferito ad un diametro delle particelle di 5 µm (Radiation Protection 122 Parte II, Table 23) del generico radionuclide e vale:

- Ra-226:  $2.2 \times 10^{-6}$  Sv/Bq.
- Pb-210:  $1.1 \times 10^{-6}$  Sv/Bq
- Po-210:  $2.2 \times 10^{-6}$  Sv/Bq

➤ Scenario espositivo cautelativo

La dose impegnata per un'ora di esposizione risulta, secondo le ipotesi predette, pari a 0.096 µSv.

➤ Scenario espositivo realistico

Si tiene conto che gli operai abbiano lavorato con mascherina naso/bocca usa e getta con grado di protezione FFP3.

Pertanto, alla formula precedente si applica un fattore di abbattimento pari a 1/30, ottenendo un valore pari a 0.003 µSv.

La dose efficace ricevuta si ottiene dalla somma delle dosi ricevute per irraggiamento esterno e per contaminazione interna.

Ipotizzando una durata delle operazioni di 24 ore ne deriva una dose efficace compresa tra 69,5 µSv e 24,1 µSv.

#### *Movimentazione cassone contenente cartucce filtro esauste*

Per tale attività che comprende la copertura del cassone con un telo in plastica e lo spostamento dello stesso dall'area di manutenzione all'area di deposito in attesa dell'invio a smaltimento, è prevista un'esposizione derivante sia dall'irraggiamento esterno che dalla contaminazione interna.

---

### *Irraggiamento esterno*

A contatto del cassone esterno in cui sono state depositate le cartucce esauste del filtro il rateo di dose gamma rilevato è di 400 nSv/h, a 3 metri di distanza si registra un valore assimilabile al fondo ambientale di radiazione.

➤ Scenario espositivo cautelativo

In un'ottica cautelativa il personale risulta essere esposto ad una dose da irraggiamento esterno pari a 400 nSv/h

➤ Scenario espositivo realistico

Nel corso dell'attività di movimentazione del cassone, per ragioni di sicurezza industriale, il personale non si tratterà nei pressi del cassone che verrà spostato da una gru, pertanto l'esposizione dovuta ad irraggiamento esterno è da considerarsi trascurabile.

### *Contaminazione interna*

Relativamente alla contaminazione interna, si assumono gli stessi valori di dose impegnata per un'ora di esposizione, ricavati per l'attività "sostituzione filtri/operazioni ad apparecchiature aperte".

La dose efficace ricevuta si ottiene dalla somma delle dosi ricevute per irraggiamento esterno e per contaminazione interna.

Ipotizzando una durata delle operazioni di 2 ore ne deriva una dose efficace inferiore a 1 µSv, pertanto trascurabile.

Per quanto riguarda l'esposizione della popolazione occorre evidenziare che l'unica possibilità di trasferimento di radioattività all'ambiente esterno risulterebbe essere lo smaltimento delle cartucce esauste che peraltro vengono inviate ad appositi impianti al di fuori del territorio nazionale, espressamente autorizzati al trattamento/smaltimento di rifiuti contenenti TENORM.

## **1.3 Considerazioni generali**

*Sulla base del caso preso in esame si possono formulare alcune considerazioni di carattere generale:*

- a) negli impianti geotermici si possono accumulare TENORM nei quali la concentrazione dei radionuclidi eccede i livelli di clearance riportati nella pubblicazione RP 122 part II, Table 2;*
- b) la potenziale presenza di TENORM deve essere adeguatamente presa in considerazione soprattutto nel caso in cui parti di impianto siano oggetto di interventi di manutenzione sia in sito che presso terzi (es. officine meccaniche, ecc);*
- c) nel caso specifico l'esposizione a radiazioni ionizzanti, espressa in termini di dose efficace e valutata sulla base di ipotesi cautelative, per i lavoratori impegnati nelle operazioni di controllo dell'impianto nelle normali condizioni di esercizio e per quelli che effettuano operazioni di manutenzione ordinaria e straordinaria dell'impianto risulta essere sensibilmente inferiore (quasi sempre in modo sensibile) ai livelli d'azione fissati dalla vigente normativa sia per i lavoratori che per gli individui della popolazione.*
- d) per quanto riguarda l'allontanamento di rifiuti è opportuno procedere ad una preventiva caratterizzazione radiometrica oltre che chimica e individuare le modalità di allontanamento coerentemente con gli esiti di tale caratterizzazione.*

---

## **ALLEGATO B**

### **PRODUZIONE DI CEMENTO**

---

## ALLEGATO B. Produzione di cemento

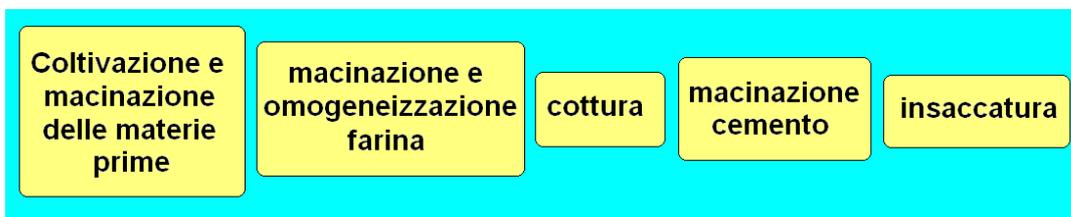
### 1. CEMENTIFICIO BUZZI

a cura di Elena Serena e Enrico Chiaberto – ARPA Piemonte

#### 1.1 Descrizione dell'impianto

Il caso studio prende in esame il cementificio Buzzi Unicem - Stabilimento di Robilante (CN) . Il cementificio produce legante idraulico con il processo detto per “via secca”: le materie prime omogeneizzate e miscelate vengono introdotte nel forno allo stato di polvere (farina cruda). Dal forno esce un semilavorato detto clinker che nuovamente viene miscelato principalmente con gesso e calcare come regolatori dei tempi di presa.

Figura 1.1 – Ciclo per la produzione del cemento



Il cemento prodotto a Robilante è di tipo Portland. La differenza tra il cemento di tipo portland e quello pozzolanico è nel tipo di materiale aggiunto al clinker nella fase post “cottura”: principalmente gesso e calcare nel primo, pozzolana e cenere volante nel secondo. Tale differenza riguarda la lavorazione “fredda” del processo.

Diversi sono gli ingredienti della farina cruda utilizzata per la produzione del cemento che vengono opportunamente miscelati in modo da ottenere una composizione chimica omogenea pronta per la lavorazione a caldo.

Figura 1.2 – Campionamento degli ingredienti utilizzati per la produzione del cemento



Le fasi del processo di produzione della farina cruda “lavorazione fredda” sono illustrate in figura 1.3

Figura 1.3 – Ingredienti e procedimenti

Ingredienti:	Procedimenti:
1. Scisto	1. estrazione
2. Calcare	2. frantumazione
3. Scorie alluminose	3. ricevimento
4. Scorie ferrose	4. deposito
5. Silici	5. macinazione
6. Bauxite	6. miscelazione
7. Minerale di ferro	7. omogeneizzazione
8. Ceneri di pirite	

---

Le fasi che interessano la “lavorazione calda”, in cui la farina cruda subisce il processo di de-carbonatazione del carbonato di calcio, sono in sintesi tre:

- 1) inizio del processo per lenta caduta in flusso di aria calda nell’impianto “cicloni” (800°);
- 2) completamento del processo per cottura nel forno rotante alimentato da fiamma viva (1500° - 1800° fase liquida)
- 3) raffreddatore in zona di scarico del clinker prodotto (recupero calore e blocco reazioni endotermiche).

### ***1.2 Valutazione delle vie di esposizione***

La prima causa di esposizione può essere dovuta alla presenza di cumuli di materie prime che possono determinare irraggiamento e inalazione di polveri, prodotte durante le varie fasi di movimentazione e frantumazione dei costituenti primi del cemento. I tempi di permanenza sia vicino ai cumuli che durante i processi di lavorazione del materiale per produrre la cosiddetta “farina cruda” sono però minimi, data l’elevata meccanizzazione dell’impianto.

È noto poi che il possibile accumulo di NORM nel processo di fabbricazione del cemento si ha nella fase detta a caldo, in cui, per la preparazione del clinker, gli ingredienti polverizzati (farina cruda) entrano e subiscono la reazione chimica di de-carbonatazione. Le parti dell’impianto interessate sono in questo caso il gruppo dei cicloni, in cui la farina cruda subisce la prima reazione a caldo (800°C) e il forno, in cui vi è un passaggio dalla farina a una fase liquida, fino alla formazione del clinker, dall’aspetto solido “pallottolare”. Il forno è scaldato da un enorme getto di fuoco uscente da un particolare ugello alimentato da combustibile (petrolcoke, farine animali e RSU polverizzati). Le emissioni aeriformi avvengono attraverso un camino di altezza effettiva pari 60 metri. Le emissioni da camino, anche se possono contenere radionuclidi volatili, sono in realtà minime e inferiori a 2Nmg/m<sup>3</sup>, grazie ad un efficiente sistema di abbattimento delle polveri.

Oltre alle emissioni dal camino una sicura causa di esposizione é determinata dalla formazione internamente al forno di un’incrostazione a maggior contenuto di Pb-210 e Po-210 che periodicamente deve essere rimossa. Occorre quindi conoscere la permanenza internamente al forno durante le fasi di manutenzione e di manipolazione delle incrostazioni (figura 1.4). I tempi di permanenza all’interno degli impianti, durante tali operazioni, sono comunque inferiori alle 8 ore/giorno. I lavoratori non compiono, infatti, la stessa mansione per tutti i giorni della fermata del forno: le varie specializzazioni manutentive del personale (refrattaristi o meccanici) impongono l’alternarsi degli addetti nelle varie attività (in tutto circa 40 lavoratori). Mediamente le fermate durano dai 20 ai 50 giorni e avvengono indicativamente 2 volte all’anno. Il materiale che costituisce le incrostazioni interne al forno rotante é inoltre reintrodotta nel ciclo produttivo, come anche le polveri di abbattimento degli impianti di filtrazione e, pertanto, non può essere considerato una fonte di esposizione per il pubblico.

**Figura 1.4** – *Interno del forno rotante in cui viene prodotto il clinker*



### 1.3 Campionamenti e misure

#### 1.3.1 Materie prime

Nel settore di stoccaggio o movimentazione degli ingredienti primari utilizzati per la produzione del clinker e del cemento sono presenti cumuli di materie prime. Per questo motivo occorre una prima valutazione del rateo di dose in aria, tipicamente ad un metro (tabella 1.1). Nello stesso tempo è di utilità conoscere il contenuto di radionuclidi delle catene di torio e uranio e del potassio per ogni ingrediente. A tal fine una spettrometria gamma è sufficiente a fornire le prime indicazioni (tabella 1.2).

**Tabella 1.1** – Rateo di dose in aria in vicinanza dei cumuli

Materiale di cui è costituito il cumulo	Provenienza	Rateo di dose nSv/h
Scisto	Cava Tetti Noisa - Piemonte	170
Calcare	Cava di Roaschio - Piemonte	85
Minerale ferroso	India	95
Silicato di ferro	Spagna	110
Bauxite	Cina	160
Bauxite	Sardegna	370
Silice di recupero	industriale	110
Gesso minerale	Monferrato (Piemonte)	90
Gesso Chimico Rochwood	industriale	90
Gesso da desolfurazione	industriale	100

**Tabella 1.2** – Spettrometria gamma sui costituenti del cemento

Materie prime costituenti del cemento											
Serie	Radionuclide	Concentrazione di attività Bq/kg (incertezza 2σ)									
		Costituenti farina cruda destinata al forno che produce il clinker							Aggiunti al clinker per formare il cemento		
		Scisto cava Tetti Noisa Piemonte	Calcare Cava Roaschio	Minerale ferroso India	Silicato di ferro Spagna	Bauxite Cina	Bauxite Sardegna	Silice di recupero	Gesso minerale	Gesso chimico Rochwood	Gesso da desolfurazione
<sup>238</sup> U	<sup>234m</sup> Pa	78±38	22±10	47±20	63±28	98±20	138±22	22±14	< 28	16±12	< 13
	<sup>226</sup> Ra	36±8	15±4	30±10	20±4	69±10	117±16	13±2	4±3	< 2	< 1,4
	<sup>214</sup> Pb	28±4	14±2	38±10	25±4	62±8	96±12	13±2	13±2	1,3±0,6	1,1±0,2
	<sup>214</sup> Bi	26±4	13±2	31±10	25±4	57±6	89±10	12±2	12±2	1,2±0,4	1,0±0,4
<sup>232</sup> Th	<sup>228</sup> Ac	43±6	1,9±0,4	33±8	21±4	58±6	176±18	11±2	2,1±1,0	<0,4	< 0,4
	<sup>212</sup> Pb	43±6	1,6±0,4	47±14	22±4	64±8	188±24	11±2	4,9±1,1	0,6±0,2	0,2±0,2
	<sup>212</sup> Bi	27±4	2,1±1,0	25±6	14±2	39±4	115±12	6,9±1,2	4,2±1,8	< 0,9	1,2±0,8
<sup>235</sup> U	<sup>208</sup> Tl	13±2	0,5±1,2	12±4	7,1±1,0	20±2	58±8	3,7±0,8	1,6±0,4	0,2±0,1	< 0,1
	<sup>235</sup> U	< 3	< 6	5±4	1,6±1,2	< 2	< 3	<	< 2	< 0,7	<0,6
	<sup>40</sup> K	885±80	20±6	57±10	204±22	45±6	25±4	498±40	82±12	< 4	<2,4

### 1.3.2 Forno rotante per la produzione del clinker

Nel caso studio qui trattato è stato possibile effettuare prelievi internamente al forno di cottura in diversi punti lungo la sua estensione (lunghezza 80 metri e diametro 4). Il forno è accessibile solo nel caso di manutenzioni che avvengono con frequenza non inferiore ad un paio di volte all'anno.

**Tabella 1.3** – Ratei di dose interni al forno

Rateo di dose in aria misurato al centro della sezione trasversale del forno rotante		
Distanza dalla bocca d'uscita del clinker	Temperatura °C	Rateo di dose in aria nSv/h
74 metri	870	580
65 metri	900	400
40 metri	1800 (fase liquida)	160
11 metri	1300	230
esterno	-	120

**Tabella 1.4** – Misure di spettrometria gamma e radiochimica (in corsivo) sulle incrostazioni interne al forno

Serie	Radionuclide	Concentrazione di attività dell'incrostazione della parete interna del forno rotante Bq/kg (incertezza 2σ)				
		Distanza dalla bocca d'uscita del clinker				
		11 metri	40 metri	65 metri	74 metri	Farina residua
<i><sup>238</sup>U</i>	<i><sup>234m</sup>Pa</i>	< 27	34 ± 19	19 ± 13	< 28	25 ± 18
	<i><sup>226</sup>Ra</i>	35 ± 5	43 ± 5	32 ± 4	26 ± 4	15 ± 3
	<i><sup>214</sup>Pb</i>	21 ± 2	23 ± 2	15 ± 2	15 ± 2	23 ± 3
	<i><sup>214</sup>Bi</i>	20 ± 2	22 ± 2	14 ± 2	15 ± 2	23 ± 2
	<i><sup>210</sup>Pb</i>	55,4 ± 5,9	104 ± 11	98 ± 10	135 ± 14	-
	<i><sup>210</sup>Po</i>	48,2 ± 5,9	91 ± 11	89 ± 10	291 ± 33	-
<i><sup>232</sup>Th</i>	<i><sup>228</sup>Ac</i>	16 ± 2	17 ± 2	12 ± 1	13 ± 1	16 ± 2
	<i><sup>212</sup>Pb</i>	17 ± 2	19 ± 2	19 ± 2	16 ± 2	17 ± 2
	<i><sup>212</sup>Bi</i>	14 ± 3	12 ± 2	12 ± 2	10 ± 2	11 ± 3
	<i><sup>208</sup>Tl</i>	7,6 ± 1,2	6,0 ± 0,6	6,0 ± 0,6	5,0 ± 0,5	5,8 ± 0,7
<i><sup>235</sup>U</i>	<i><sup>235</sup>U</i>	< 1,2	< 0,9	< 0,9	2,0 ± 1,0	1,6 ± 1,2
	<i><sup>40</sup>K</i>	499 ± 41	705 ± 60	591 ± 48	1157 ± 94	751 ± 67

### 1.3.3 Camino

Per campionamento a camino intendiamo il prelievo delle emissioni in atmosfera sia umide che secche. Per valutare il contenuto di radioattività delle emissioni a camino si è proceduto con un campionamento isocinetico, in modo da ottenere la massima rappresentatività della misura per il calcolo dell'emissione complessiva. Il campionamento isocinetico si ha quando il vettore velocità nell'orifizio della sonda di prelievo è lo stesso del flusso gassoso nel punto campionato: un elaboratore regola automaticamente e dinamicamente il flusso di campionamento sulla base della misura in continuo del flusso gassoso. Durante il campionamento un particolare dispositivo permette la raccolta della parte umida, pertanto al termine del prelievo si hanno due campioni: uno di particolato secco su filtro di vetro e uno di liquido ottenuto dalle emissioni umide tramite una trappola per condensa.

Le informazioni di maggior rilevanza acquisite durante il campionamento sono riportate in tabella 1.5. Oltre alle emissioni in atmosfera sono state prelevate le polveri di abbattimento fumi, il clinker e le incrostazioni della parete interna del camino. I risultati delle misure sono riportati in tabella 1.6 e 1.7.

**Tabella 1.5** – Informazioni raccolte contestualmente al campionamento da camino

Scheda campionamento a camino	
Punto di campionamento	Camino forno 3 - stabilimento Buzzi Rrobilante
Diametro camino	4,53 metri
Altezza fisica	60 metri
Portata	468500 m <sup>3</sup> /h
Temperatura media fumi	133 °C
Pressione	936 Bar
Data e ora inizio campionamento	10/7/2013 9:00
Durata campionamento	246 minuti
Volume aspirato	6001 litri
Velocità media	13 m/s
Polveri	0,43 Nmg/m <sup>3</sup>
Condizioni di funzionamento impianto (l'impianto è a regime se compreso tra 160 e 230)	200 ton/ora

**Tabella 1.6** – Misure di spettrometria gamma e radiochimica (in corsivo) sui campioni prelevati attorno al camino.

Campionamento a camino						
Serie	Radionuclide	Concentrazione di attività (incertezza 2σ)				
		Incrostazioni della superficie interna del camino Bq/kg	Polveri di abbattimento Bq/kg	Clinker Bq/kg	Emissioni particolato Bq/m <sup>3</sup>	Emissioni vapore Bq/m <sup>3</sup>
<i><sup>238</sup>U</i>	<i><sup>234m</sup>Pa</i>	< 1459	122 ± 92	< 81	< 0,5	< 4,5
	<i><sup>226</sup>Ra</i>	< 177	< 18	47 ± 12	0,05 ± 0,04	< 0,6
	<i><sup>214</sup>Pb</i>	< 23	3,1 ± 1,6	10 ± 2	< 0,008	< 0,08
	<i><sup>214</sup>Bi</i>	< 26	7 ± 2	8,0 ± 1,6	< 0,008	< 0,08
	<i><sup>210</sup>Pb</i>	42,1 ± 4,5	31,1 ± 3,5	12,9 ± 1,6	< 0,03	< 9
	<i><sup>210</sup>Po</i>	36,9 ± 4,5	32,9 ± 4,0	7,1 ± 1,1	0,00046±0,00052	0,00054±0,0018
<i><sup>232</sup>Th</i>	<i><sup>228</sup>Ac</i>	< 37	7,6 ± 1,6	< 3	< 0,01	< 0,14
	<i><sup>212</sup>Pb</i>	< 15	4,1 ± 1,2	14 ± 1	< 0,005	< 0,05
	<i><sup>212</sup>Bi</i>	76 ± 44	5,8 ± 5,0	12 ± 9	< 0,006	< 0,14
	<i><sup>208</sup>Tl</i>	19 ± 1	2,1 ± 0,8	5,0 ± 1,0	< 0,004	0,067 ± 0,006
<i><sup>235</sup>U</i>	<i><sup>235</sup>U</i>	< 4	< 4	< 4	< 0,01	< 0,16
	<i><sup>40</sup>K</i>	569 ± 190	117 ± 10	< 28	0,1 ± 0,1	< 0,89

**Tabella 1.7** – Misure con scintillazione liquida.

Campionamento a camino	
Concentrazione di attività Bq/kg	
Emissioni vapore	
Alfa totale	< 0,14
Beta totale	< 0,88

#### 1.4 Valutazioni di dose per lavoratori e persone del pubblico

Le stime di dose, sono svolte per i lavoratori (nella fase di manutenzione del forno clinker e per l'attività lavorativa ordinaria) e per il pubblico relativamente alle sole emissioni da camino (tramite RPI35), dato che i materiali solidi non vengono allontanati dalla fabbrica in quanto sono tutti riciclati all'interno dell'impianto.

##### 1.4.1 Dose ai lavoratori addetti alla manutenzione straordinaria del forno

La dose efficace ai lavoratori addetti al forno rotante è stata valutata in via cautelativa ipotizzando che un addetto sia impiegato per 8 ore al giorno per 50 giorni, quando, in un anno, siano necessarie due manutenzioni straordinarie (totale 800 ore). Gli scenari ipotizzati sono quelli del trasporto di materiale e di piccolo cumulo. I valori di dose efficace, ottenuti a partire dalle misure riportate in tabella 1.4, e mostrati in tabella 1.8, risultano per ciascuna delle vie di esposizione ipotizzate, irraggiamento esterno (12  $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ ) e inalazione (4  $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ ) e per il loro totale (16  $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ ) inferiori ad 1 mSv/anno, livello d'azione indicato nella normativa. Un valore più elevato, ma sempre inferiore a 1 mSv/anno, si ha nel caso si consideri il solo rateo di esposizione medio interno al forno rotante che porta ad un valore di dose efficace medio per irraggiamento (sottratto il fondo) pari a 178  $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ , valutato con un'esposizione cautelativa di 800 ore. Esso comprende, oltre al contributo dei NORM presenti nelle incrostazioni, anche il contributo dei materiali refrattari che rivestono l'interno del forno. Tale valore va, infine, mediato con la dose ricavata in precedenza riferita alla sola presenza di cumuli e al trasporto del materiale risultante dalle operazioni di rimozione delle incrostazioni e della farina residua. Il valore complessivo che si ottiene per un addetto alla manutenzione straordinaria è quindi di 97  $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ .

Tabella 1.8 – Dose efficace ai lavoratori (manutenzione straordinaria forno)

Fase di manutenzione forno rotante	
Dose da:	Dose $\mu\text{Sv}/\text{anno}$
irraggiamento (trasporto e cumulo)	12
inalazione (trasporto e cumulo)	4
irraggiamento (internamente al forno)	178
media	97

##### 1.4.2 Dose ai lavoratori addetti alle attività ordinarie

La dose efficace attribuita ai lavoratori che svolgono l'ordinaria attività di controllo e manutenzione degli impianti e movimentazione delle materie prime è stata valutata secondo gli scenari lavorativi descritti in RPI22 utilizzando i dati di tabella 1.2, considerando cautelativamente le esposizioni dovute alla presenza dei cumuli e al trasporto delle materie prime da un settore all'altro dell'impianto, per un totale di 1800 ore lavorative all'anno. In via cautelativa è stato considerato sempre il materiale che fornisce valori di dose più elevati.

Anche in questo caso la dose efficace ai lavoratori ottenuta a partire da tali dati risulta inferiore a 1 mSv/anno (tabella 1.9).

Tabella 1.9 – Dose efficace ai lavoratori impiegati nell'attività di controllo e manutenzione impianti

Attività lavorativa ordinaria	
Dose da:	Dose $\mu\text{Sv}/\text{anno}$
irraggiamento esterno	33
inalazione	25
totale	58

---

### 1.4.3 Dose al pubblico

La dose per il pubblico attribuibile alle emissioni da camino è stata invece stimata pari a 2,9  $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ , applicando in via cautelativa i coefficienti di dose della *RPI35* riferiti ad un camino di 50 metri. Il valore ottenuto (tabella 1.10) è di molto inferiore a 0,3  $\text{mSv}/\text{anno}$ , livello d'azione indicato dalla normativa.

**Tabella 1.10** – Dose alla popolazione da effluenti gassosi

Dose alla popolazione*
Dose alla popolazione dovuta alle emissioni in atmosfera $\mu\text{Sv}/\text{anno}$
2,9

\* sono stati utilizzati i dati misurati di tabella 1.6 (non le MDA) sommando le emissioni su particolato e quelle in vapore e attribuendo i valori mancanti ai rispettivi radionuclidi delle due serie naturali.

### 1.5 Commenti e osservazioni

Un cementificio, in definitiva, è costituito da un insieme di impianti, oggi giorno, quasi integralmente automatizzati, eccetto che per i lavori di manutenzione ordinaria e straordinaria per altro poco frequenti. Ad esempio i fermi del forno rotante, di notevole interesse per quanto riguarda l'accumulo di NORM o la manutenzione dei cicloni avvengono con cadenza di norma non inferiore a 6 mesi e spesso capitano in modo non prevedibile, perché sono associati a guasti e a interruzioni improvvise del processo. Tali circostanze costituiscono, oltretutto, una difficoltà dal punto di vista organizzativo nel caso in cui si vogliano pianificare eventuali sopralluoghi.

Nel caso del campionamento delle incrostazioni che ricoprono la superficie interna del forno, dato che il processo di formazione del clinker avviene progressivamente a temperature variabili, è consigliabile effettuare più campionamenti a diverse distanze dalla bocca d'uscita del forno. Se si misura il rateo di dose in aria interno al forno, per valutare l'irraggiamento degli addetti alla manutenzione, bisogna poi tener conto anche del materiale refrattario presente in grande quantità. È pertanto utile valutare il rateo prima e dopo la rimozione delle incrostazioni, in modo da ricavare sia una stima della dose imputabile alla sola presenza di NORM nelle incrostazioni che la dose imputabile al materiale refrattario.

Altre difficoltà in fase di campionamento si hanno nelle fasi di prelievo del particolato atmosferico emesso dal camino. La tecnica consigliata è quella del campionamento isocinetico che però impone una determinata velocità del flusso di aspirazione, mai abbastanza elevata da consentire nell'arco di una giornata il filtraggio del numero di metri cubi necessari per ottenere delle MAR adeguate. Le emissioni del particolato da camino sono, infatti, minime ( $< 2 \text{ Nmg}/\text{m}^3$ ) e occorre perciò dilatare enormemente la durata del prelievo con le ovvie criticità che ne conseguono. La presenza di emissioni umide rende, per giunta, necessaria la costante presenza del tecnico durante il prelievo per il mantenimento in efficienza delle trappole per la condensa.

Dal punto di vista analitico è fondamentale eseguire una spettrometria gamma su tutti i campioni prelevati da cui si traggono notevoli informazioni. Per quanto riguarda le emissioni da camino, le quantità minime di particolato impongono però lunghi tempi di misura ( $> 200000 \text{ s}$ ).

Relativamente ai materiali utilizzati nell'impianto, incluse le incrostazioni, per le misure di spettrometria gamma trattandosi di campioni con densità superiore all'unità è opportuno correggere per l'autoassorbimento, tenendo conto della composizione chimica che è nota in tutte le fasi di produzione del cemento.

L'utilizzo della radiochimica è, inoltre, indispensabile per la determinazione dell'attività del Po-210, ma anche del Pb-210 quando, come nel caso della raccolta del particolato su filtro, la massa del campione raccolto è insufficiente da consentirne la determinazione con la spettrometria gamma.

Per quanto riguarda le dosi efficaci valutate per i lavoratori e per il pubblico, esse sono risultate sempre inferiori ai livelli di azione indicati nel D.Lgs. 241/00. Va ricordato, tuttavia, che l'attività lavorativa trattata in questo caso studio non è tra quelle incluse come soggette al dispositivo di legge nell'allegato I-Bis del suddetto decreto.

---

## **ALLEGATO C**

### **CENTRALI ELETTRICHE A CARBONE**

---

## ALLEGATO C. Centrali elettriche a Carbone

### 1. CENTRALE TERMOELETTRICA Federico II ENEL di Brindisi (Loc. Cerano)

a cura di Luigi Vitucci, Giuseppe Roselli e Claudia Monte – ARPA Puglia

#### 1.1 Descrizione della pratica/impianto

La centrale termoelettrica FEDERICO II dell'Enel S.p.A. sorge nel territorio del Comune di Brindisi in Località Masseria Cerano, a circa 12 km a Sud della città di Brindisi e 30 km a Nord della città di Lecce. Essa occupa un'area di circa 270 ettari che si affaccia sul litorale brindisino, nel tratto di costa che va da Località Masseria Cerano al confine sud del Comune stesso.

**Figura 1.1** – Vista dall'alto (satellite) dell'area in cui sorge la centrale termoelettrica di Brindisi (Località Cerano)



L'impianto è costituito da quattro sezioni identiche alimentate a carbone (come combustibile primario), olio combustibile e gasolio per una potenza nominale complessiva di 2640 MWe (MegaWatt elettrici). Al 2005, la capacità produttiva complessiva dichiarata risulta essere di 6.560 MWt (MegaWatt termici) - circa 1700 MWt per gruppo), corrispondente a una produzione effettiva di 16.361.405 MWh (MegaWatt ora).

I quattro gruppi sono stati avviati negli anni 1991 (Gruppo 1), 1992 (Gruppo 2 e Gruppo 3), 1993 (Gruppo 4). Nel corso del 1998 su tutti e quattro i gruppi a fronte dell'ambientalizzazione, sono entrati in funzione gli impianti di abbattimento di NOx (denitrificazione di tipo catalitico selettivo SCR), SOx (Desolforazione ad umido del tipo calcare-gesso). Dal 2010 sul Gruppo 3 e dal 2012 sul Gruppo 4 i captatori elettrostatici sono stati sostituiti con filtri a maniche [1].

Il processo di produzione di una centrale termoelettrica a combustibile fossile e ciclo termodinamico a vapore si basa sulla trasformazione del calore, prodotto dalla combustione dei combustibili, in energia meccanica e quindi in energia elettrica. Queste trasformazioni avvengono mediante un "ciclo" termodinamico in cui il fluido (acqua) subisce un ciclico cambiamento di stato, da liquido a vapore e quindi di nuovo a liquido, permettendo la trasformazione del calore in energia meccanica quando il vapore espande nella turbina. L'energia meccanica generata in turbina si trasforma in energia elettrica tramite l'alternatore trascinato dalla stessa turbina. Per la chiusura del ciclo termodinamico è necessario disporre di una sorgente fredda cui cedere il calore per condensare il vapore al termine dell'espansione in turbina.

---

## Impianti di combustione [1]

I quattro gruppi che costituiscono l'impianto sono identici e sono costituiti ciascuno da:

- un generatore di vapore che produce vapore a 540 °C e ad una pressione di 247 bar.
- una turbina a vapore comprendente una sezione ad Alta Pressione (AP), una a Media Pressione (MP) e due sezioni di Bassa Pressione (BP).
- un alternatore coassiale ad ogni turbina della potenza nominale di 750 MVA (MegaVolt Ampère) con una tensione elettrica di 20 kV, raffreddato ad acqua demineralizzata e idrogeno.
- un condensatore a fascio tubiero refrigerato con acqua di mare.
- un sistema di rigenerazione del condensato per il rinvio in caldaia.

In ciascun gruppo, nella prima fase di avviamento con caldaia fredda (temperatura dei gas in uscita inferiore a 180 °C), si utilizza gasolio che viene successivamente sostituito dall'olio combustibile denso che a sua volta viene sostituito dal carbone al termine della fase di avviamento (raggiungimento del minimo tecnico pari a 230 MWe).

L'olio combustibile denso si utilizza inoltre, in casi limitati, in occasione di problematiche legate all'indisponibilità delle apparecchiature del sistema bruciatori a carbone di uno o più gruppi logici.

Il carbone è stoccato in un'area, carbonile, di circa 125.000 m<sup>2</sup> con capacità massima di stoccaggio di 750.000 tonnellate di carbone.

## Sistemi di abbattimento[1]

L'impianto è dotato dei seguenti sistemi di abbattimento per NO<sub>x</sub>, polveri e SO<sub>x</sub>:

- Impianti Denitrificazione (DeNO<sub>x</sub>). Si tratta di impianti di tipo catalitico selettivo (SCR), posti a valle del processo di combustione.
- Abbattimento polveri. Per la rimozione del particolato sono presenti degli elettrofiltri, per due sezioni, e dei filtri a manica, per le altre due sezioni, in grado di abbattere sia la frazione minerale costituente le ceneri sia le particelle incombuste.
- Impianto DeSO<sub>x</sub>. Ogni sezione della centrale è dotata di un impianto di desolforazione dei fumi, basato sulla tecnica di abbattimento ad umido degli ossidi di zolfo che utilizza calcare come reagente con produzione di gesso.  
I fumi in uscita dai captatori elettrostatici dopo essere stati raffreddati, vengono lavati e ulteriormente raffreddati a 50°C con acqua di mare (prescrubber), quindi inviati nella torre di assorbimento dove la SO<sub>2</sub> presente reagisce con una soluzione acquosa di calcare per formare solfiti di calcio e quindi solfati tramite l'immissione di aria. Una volta desolforati, i fumi vengono aspirati e convogliati al camino. A titolo informativo si precisa che i consumi di calcare, per l'anno 2013, sono risultati pari a 4 t/h. La corrispondente produzione di gesso pari a 7 t/h.

## Impianti di trattamento acque reflue e scarichi idrici [1]

Le acque reflue presenti nella centrale sono tecnicamente e funzionalmente suddivise in base alla natura del potenziale inquinante in:

1. Acque potenzialmente inquinabili da oli minerali
2. Acque acide e/o alcaline
3. Acque sanitarie
4. Acque rivenienti dai processi di denitrificazione
5. Acque rivenienti dai processi di desolforazione
6. Acque potenzialmente inquinabili da polveri
7. Acque meteoriche "chiare"

Il trattamento di tali acque dà origine a due tipi di fanghi di depurazione denominati fanghi ITAR e fanghi ITSD che vengono stoccati in aree di stoccaggio per poi essere allontanati dallo stabilimento.

---

## 1.2 Valutazione delle vie di esposizione

La combustione di materiali estratti dal sottosuolo per la produzione di energia elettrica è un'attività di interesse dal punto di vista dei NORM, perché può causare processi di concentrazione dei radionuclidi naturali nei residui della combustione e nelle emissioni.

Il processo di formazione di un giacimento di carbone è caratterizzato dal fenomeno dell'inglobamento, da parte delle sostanze vegetali in trasformazione, di materiali inorganici ivi presenti come le rocce lapidee o i terreni sciolti di diversa natura. Poiché tutti i materiali della crosta terrestre contengono elementi radioattivi naturali, è ben comprensibile che la radioattività sia poi riscontrata nei carboni che da essi derivano. Il carbone contiene pertanto tutti i radionuclidi primordiali ed i loro prodotti di decadimento. I radionuclidi più significativi sono il K-40 e le serie di decadimento che fanno capo all'uranio e al torio.

Le centrali termoelettriche a combustibile fossile (centrali a carbone), che sfruttano come principale combustibile proprio il carbone, potenzialmente producono un aumento della dose alla popolazione per più vie di esposizione:

- rilascio in atmosfera (tramite ciminiera) di radon e polveri arricchite in radionuclidi naturali;
- stoccaggio di ceneri arricchite in radionuclidi naturali;
- conferimento a recupero di ceneri arricchite in radionuclidi naturali, soprattutto come materiale per l'edilizia.

Nel processo di combustione, all'interno della caldaia, le sostanze inorganiche restano sotto forma di ceneri, mentre il calore viene prodotto da reazioni esotermiche di carbonio e idrogeno con ossigeno. Le sostanze che alle temperature di esercizio, che vanno fino a 1700 °C, evaporano sono dette 'materie volatili' e sono costituite principalmente dalle sostanze volatili organiche e dall'umidità.

Una parte delle ceneri di combustione, dal 5 al 10% a seconda del tipo di fornace, resta sul fondo (ceneri pesanti), mentre il resto segue il flusso di gas e attraversa diversi depuratori prima di uscire dalla ciminiera (ceneri leggere).

Nel processo di combustione i radionuclidi presenti nel carbone di tipo non gassoso tendono a concentrarsi nelle ceneri, mentre quelli gassosi (come ad esempio il Pb-210, il Po-210 e il Rn-222) possono sfuggire ai filtri e vengono rilasciati, seguendo il flusso degli altri gas lungo la ciminiera.

In particolare, nella centrale ENEL di Brindisi, le emissioni in aria di interesse sono le emissioni convogliate, ossia i fumi della combustione che, dopo l'attraversamento dei dispositivi di abbattimento, sono emessi in atmosfera attraverso un camino alto 200 m, costituito da 4 canne interne del diametro di 6,7 m ciascuna (ceneri leggere)

Per quanto concerne la produzione di rifiuti, il funzionamento dell'impianto (ivi incluse le attività tecnicamente connesse) dà luogo alla generazione di rifiuti quali i sottoprodotti generati dal processo di combustione dei combustibili fossili utilizzati nell'impianto e dal trattamento di depurazione dei fumi di combustione, costituiti dalle ceneri di combustione del carbone e dai gessi di desolfurazione fumi. Significativa quantità è anche rappresentata dai fanghi di trattamento delle acque reflue e tra questi, in primis, quelli del trattamento spurghi di desolfurazione. L'insieme di queste tipologie di rifiuto rappresentano più del 95% della produzione annua di rifiuti dell'intero impianto.

Nella centrale di Brindisi, sono presenti aree di stoccaggio come indicato nella Autorizzazione Integrata Ambientale vigente [1]. I principali rifiuti prodotti e stoccati in attesa di essere smaltiti/recuperati sono:

- *Ceneri pesanti da carbone*
- *Ceneri leggere da carbone*
- *Gesso da desolfurazione fumi*
- *Fanghi trattamento acque*

Come indicato nella politica ambientale della Centrale, per tutte le tipologie di rifiuto (in particolare ceneri e gessi), laddove possibile per disponibilità di impianti sul territorio, viene privilegiato il recupero.

---

## POPOLAZIONE

Per la popolazione, la valutazione delle dosi cui sono esposti gli individui tiene conto non solo delle vie di esposizione tramite effluenti gassosi, inclusi i fenomeni di deposizione al suolo di polveri e risospensione delle stesse, nonché di contaminazione del terreno circostante e dei cibi coltivati, ma anche delle vie derivanti dal recupero industriale dei residui solidi.

In sostanza, per la valutazione delle vie d'esposizione per la popolazione si considerano l'esposizione ad effluenti gassosi in atmosfera e l'esposizione a materiali solidi.

### Esposizione ad effluenti gassosi in atmosfera

La valutazione dell'esposizione ad effluenti gassosi in atmosfera effettuata da RP135 [4] tiene conto dei tre seguenti scenari:

- ingestione di alimenti (ortaggi, cereali, carne, latte e derivati, frutta) contaminati, ovvero provenienti da piante coltivate o da animali pascolati in campi investiti dalle ceneri radioattive. In funzione della distanza il contributo alla dose dovuta all'alimentazione diminuisce leggermente.
- inalazione delle polveri sottili (contenenti anche radionuclidi) emesse dalle ciminiere. Si noti che, data l'altezza delle ciminiere degli impianti a carbone (per la centrale di Brindisi il camino è alto 200 m), il contributo dovuto all'inalazione potrebbe essere apprezzato a distanze superiori a 500 m dalla centrale.
- irraggiamento gamma dai radionuclidi depositati al suolo (contributo minimo).

Per tale valutazione è necessario conoscere l'altezza efficace del camino, che, a sua volta dipende da:

- velocità di fuoriuscita dei fumi dal camino (m/s);
- diametro del camino (m);
- velocità del vento all'altezza fisica del camino (m/s);
- differenza di temperatura tra interno ed esterno del camino;
- temperatura dell'aria all'altezza fisica del camino (K).

L'altezza efficace del camino varia, quindi, a seconda dei parametri sopra riportate e non è costante. Tuttavia l'altezza fisica del camino è sempre inferiore a quella efficace. Per le valutazioni di dose riportate nei paragrafi successivi, è stata utilizzata l'altezza fisica del camino (200 m per la centrale di Brindisi), che è la più cautelativa dal punto di vista radioprotezionistico.

### Esposizione a materiali solidi

Come già detto in precedenza, i principali residui/rifiuti provenienti dalla centrale ENEL di Brindisi, che vengono allontanati al di fuori dell'azienda per essere recuperati e/o smaltiti sono: le ceneri pesanti da carbone, le ceneri leggere, il gesso da desolfurazione fumi e i fanghi di trattamento delle acque.

Per valutazioni di conformità nell'allontanamento di materiali solidi da lavorazioni NORM, il documento di riferimento è il "Radiation Protection 122 part II" [3], a cura dell'Unione Europea. Esso fornisce dei Livelli di allontanamento generali (*General Clearance Levels – GCLs*), ovvero le concentrazioni di attività dei materiali al di sotto delle quali l'allontanamento è consentito in modo incondizionato.

## LAVORATORI

Per i lavoratori è possibile individuare le seguenti vie di esposizione [3]:

- Inalazione di polveri durante le varie fasi lavorative;
- Irraggiamento dai cumuli di materiale presenti all'interno dello stabilimento;
- Ingestione di polveri generate durante le varie fasi di lavorazione (trascurabile ai fini della presente valutazione)

---

Quindi, la dose efficace individuale totale dovuta all'i-esimo radionuclide (Sv/anno) sarà data da:

$$E_{tot,i} = E_{irr,i} + E_{in,i} \quad \text{Eq. 1}$$

dove:

- $E_{tot,i}$  = dose efficace individuale totale dovuta all'i-esimo radionuclide (Sv/anno);
- $E_{irr,i}$  = dose efficace individuale per irradiazione esterna dovuta all'i-esimo radionuclide (Sv/anno);
- $E_{in,i}$  = dose efficace individuale per inalazione dovuta all'i-esimo radionuclide (Sv/anno);

### **Esposizione per irradiazione esterna gamma**

La dose efficace individuale da irradiazione esterna per il lavoratore dell'azienda NORM è calcolata secondo il metodo descritto nel capitolo 3, paragrafo 3.2.

In Tabella 21 del documento RP-122 parte II [3] "Dose coefficients for the calculation of effective doses caused by external  $\gamma$ -radiation for worker scenarios (in (Sv/h)/(kBq/kg))" sono mostrati i valori dei coefficienti di conversione della concentrazione di attività in rateo di dose efficace per differenti scenari di esposizione. In particolare sono considerate le seguenti situazioni:

1. Trasporto di materiale NORM,
2. Piccolo cumulo;
3. Grande cumulo;
4. Sito di smaltimento;
5. Costruzione di strada;
6. Building 1;
7. Building 2.

Per quanto riguarda la centrale termoelettrica Enel Federico II di Brindisi, è stato preso in considerazione solo il caso di "grande cumulo", ipotizzando per i lavoratori l'esposizione per irradiazione esterna gamma dovuta unicamente ai grandi cumuli di materie prime depositate nelle diverse aree della centrale. Gli altri scenari sono stati trascurati in quanto non pertinenti.

### **Esposizione per inalazione**

La dose efficace individuale da inalazione per il lavoratore dell'azienda NORM è calcolata secondo il metodo descritto nel capitolo 3, paragrafo 3.3.

In Tabella 23 del documento RP-122 parte II [3] "Dose coefficients for inhalation" sono mostrati i valori dei coefficienti di conversione dell'attività in dose efficace (in Sv/Bq) per i lavoratori.

### **1.3 Campionamenti e misure**

In data 19/12/2012 sono stati effettuati da parte di ARPA Puglia i campionamenti delle seguenti matrici:

#### **A. Materie Prime**

1. Olio combustibile, gasolio (vengono utilizzati nella fase di avviamento della caldaia)
2. Carbone Americano
3. Carbone Indonesiano
4. Carbone Americano miscelato con Carbone Africano
5. Calcare ("materia prima", questo è utilizzato in soluzione acquosa per la desolfurazione dei fumi)

#### **B. Prodotti**

1. Polveri a camino
2. Ceneri Pesanti
3. Ceneri Leggere
4. Gesso chimico da desolfurazione fumi
5. Fanghi ITSD (impianto trattamento acque provenienti dall'impianto di desolfurazione)
6. Fanghi ITAR (impianto trattamento acque provenienti dal lavaggio delle caldaie, dei piazzali ecc.)

---

**Figura 1.2** – *Campionamento gesso chimico*



**Figura 1.3** – *Campionamento di carbone dal parco di stoccaggio (sinistra) e ITAR (destra)*



**Figura 1.4** – *Campionamento calcare (sinistra) e olio combustibile denso (destra)*



**Figura 1.5** – Campionamento ceneri leggere.



I risultati delle analisi di spettrometria gamma effettuata da ARPA Puglia sui campioni prelevati sono riportati nella tabella 1.1.

**Tabella 1.1** – Risultati della Spettrometria gamma effettuata da ARPA Puglia su tutte le matrici campionate.

SPETTROMETRIA GAMMA – ARPA PUGLIA (incertezza estesa k=2)					
Centrale ENEL 19/12/12	ATTIVITA' [Bq/kg]				
	Th-234 (U-238)	Bi-214 (Ra-226)	K-40	Ac-228 (Th-232)	Pb-214 (Ra-226)
Olio Combustibile Denso	5,1 ± 4,7	1,7 ± 0,4	< 2,7	0,9 ± 0,5	1,8 ± 0,4
Gasolio	9,4 ± 6,8	1,8 ± 0,4	4,1 ± 0,0	1,1 ± 0,5	1,6 ± 0,4
Carbone Indonesiano	12,9 ± 4,0	4,7 ± 0,4	36,6 ± 3,1	4,7 ± 0,6	4,8 ± 0,4
Carbone Americano	12,6 ± 4,6	7,0 ± 0,5	13,3 ± 1,7	6,3 ± 0,5	7,2 ± 0,5
Carbone Americano Africano Indonesiano	14,1 ± 4,7	7,5 ± 0,6	39,6 ± 3,2	7,4 ± 0,7	7,9 ± 0,5
Calcare	33,6 ± 6,9	13,4 ± 0,8	23,1 ± 1,9	1,7 ± 0,2	14,0 ± 0,9
Gesso Chimico	11,2 ± 4,3	5,1 ± 0,4	6,7 ± 1,4	0,9 ± 0,3	4,8 ± 0,4
Ceneri Pesanti	104,6 ± 20,4	122,6 ± 7,1	333,8 ± 20,8	113,5 ± 6,9	130,6 ± 7,7
Ceneri Leggere Secche	77,7 ± 15,3	79,6 ± 4,6	496,6 ± 29,2	82,8 ± 5,0	82,6 ± 4,9
Fanghi ITAR	33,1 ± 5,8	11,8 ± 0,7	26,5 ± 2,3	9,1 ± 0,7	12,0 ± 0,8
Fanghi ITSD	60,0 ± 7,1	24,1 ± 1,4	16,8 ± 1,5	5,9 ± 0,5	25,3 ± 1,6

I campioni di ceneri pesanti e ceneri leggere sono stati inviati ad ARPA Veneto per essere sottoposti ad una ulteriore analisi di spettrometria gamma. I risultati ottenuti sono riportati nella tabella 1.2.

**Tabella 1.2** – Risultati della Spettrometria gamma effettuata da ARPA Veneto solo sui campioni di Ceneri Pesanti e Ceneri Leggere

SPETTROMETRIA GAMMA – ARPA VENETO (incertezza estesa k=2)								
Centrale ENEL 19/12/12	ATTIVITA' [Bq/kg]							
	Pb-210	K-40	Ra-226	U-235	U-238 (Th-234)	U-238 (U-235)	Th-232	Cs-137
Ceneri Pesanti	56 ± 13	282 ± 29	109 ± 13	6 ± 3	121 ± 52	140 ± 0	100 ± 11	< 0,21
Ceneri Leggere	71 ± 13	429 ± 44	70 ± 8	3 ± 1	72 ± 33	75 ± 0	72 ± 8	< 0,19

I campioni di ceneri leggere e pesanti, gesso chimico, fanghi ITSD e fanghi ITAR sono stati trasmessi ad ISPRA per essere sottoposti ad analisi radiochimiche.

I risultati ottenuti sono riportati nelle tabelle 1.3 A e B.

**Tabelle 1.3A e 1.3B** – Risultati delle misure radiochimiche effettuate da ISPRA solo sui campioni di Gesso Chimico, Ceneri Pesanti, Ceneri Leggere, Fanghi ITAR e Fanghi ITSD.

<b>1.3A</b> Concentrazione di radionuclidi [Bq/Kg] determinata da ISPRA con incertezza estesa $k=2$ su matrici campionate da ARPA-Puglia presso la Centrale ENEL di Brindisi - Cerano				
<i>Centrale ENEL</i> 19/12/12	ATTIVITA' [Bq/kg]			
	U-238	U-234	U-235	Th-232
Gesso Chimico	4,87 ± 0,54	5,20 ± 0,56	0,26 ± 0,15	0,42 ± 0,13
Ceneri Pesanti	136,30 ± 7,80	135,50 ± 7,70	5,80 ± 0,67	136,00 ± 10,00
Ceneri Leggere	81,70 ± 4,70	82,80 ± 4,80	4,17 ± 0,50	79,00 ± 6,00
Fanghi ITAR	109,10 ± 6,30	115,20 ± 6,60	4,78 ± 0,59	19,70 ± 1,80
Fanghi ITSD	42,20 ± 2,60	44,4 ± 2,70	2,10 ± 0,34	7,41 ± 0,63

<b>1.3B</b> Concentrazione di radionuclidi [Bq/Kg] determinata da ISPRA con incertezza estesa $k=2$ su matrici campionate da ARPA-Puglia presso la Centrale ENEL di Brindisi - Cerano				
<i>Centrale ENEL</i> 19/12/12	ATTIVITA' [Bq/kg]			
	Th-230	Th-228	Po-210	Pb-210
Gesso Chimico	6,76 ± 0,57	0,63 ± 0,23	7,14 ± 1,03	8,11 ± 1,00
Ceneri Pesanti	143,00 ± 11,00	135,00 ± 10,00	31,30 ± 3,60	52,20 ± 4,50
Ceneri Leggere	79,50 ± 6,10	82,30 ± 6,30	84,60 ± 9,50	78,80 ± 6,80
Fanghi ITAR	38,50 ± 3,10	20,20 ± 1,90	48,80 ± 5,40	51,7 ± 4,4
Fanghi ITSD	43,20 ± 2,70	7,74 ± 0,71	51,10 ± 6,20	47,5 ± 4,1

Oltre alle matrici elencate sopra, sempre nella stessa data (19/12/2012), è stato effettuato un campionamento di polveri a camino utilizzando due filtri in microfibra di quarzo (filtro F7/158 e filtro F19/158). I risultati delle analisi effettuate da ISPRA (in data 27/03/2013) sono riportati in tabella 1.4:

**Tabella 1.4** – Risultati delle misure radiochimiche effettuate da ISPRA su filtri di aspirazione polveri a camino F7/158 e F19/15 (N.D. = Non determinato).

<b>Concentrazione di radionuclidi [Bq/Kg] determinata da ISPRA con incertezza estesa (<math>k=2</math>) su filtri di aspirazione di polveri a camino campionati da ARPA-Puglia presso la Centrale ENEL di Brindisi - Cerano</b>		
<i>Centrale ENEL</i> 19/12/12	FILTRO F7/158 Volume aspirato 3,59 m <sup>3</sup>	FILTRO F19/158 Volume aspirato 5,20 m <sup>3</sup>
Radionuclide	ATTIVITA' [Bq/m <sup>3</sup> ]	ATTIVITA' [Bq/m <sup>3</sup> ]
U-238	Non Determinato (N.D.)	N.D.
U-234	N.D.	N.D.
U-235	N.D.	N.D.
Th-232	N.D.	N.D.
Th-230	N.D.	N.D.
Th-228	N.D.	N.D.
Po-210	< 0,00030	< 0,00022
Pb-210	< 0,0011	< 0,0008

A Maggio 2013 è stato effettuato da parte di ARPA Puglia un nuovo campionamento di polveri a camino utilizzando un nuovo filtro in microfibra di quarzo (filtro 1213/164), successivamente inviato ad ISPRA. I risultati delle analisi effettuate da ISPRA (in data 20/05/2013) sono riportati in tabella 1.5:

**Tabella 1.5** – Risultati delle misure radiochimiche effettuate da ISPRA sul filtro di aspirazione polveri a camino 1213/164.

Concentrazione di radionuclidi [Bq/Kg] determinata da ISPRA con incertezza estesa (k=2) su filtri di aspirazione di polveri a camino campionati da ARPA-Puglia presso la Centrale ENEL di Brindisi - Cerano	
Centrale ENEL 09/05/13	FILTRO 1213/164 Massa/volume 2.804 mg/m <sup>3</sup> Volume aspirato 3,17 m <sup>3</sup>
Radionuclide	ATTIVITA' [Bq/m <sup>3</sup> ]
U-238	< 0,00023
U-234	< 0,00023
U-235	< 0,00015
Th-232	< 0,00006
Th-230	< 0,00011
Th-228	< 0,00020
Po-210	< 0,0043
Pb-210	< 0,0013

#### 1.4 Confronto con i livelli di allontanamento/emissione (RP122 - RP135)

##### Popolazione

Come descritto nei paragrafi precedenti, per la popolazione sono state valutate due vie d'esposizione, ovvero l'esposizione da effluenti gassosi rilasciati in atmosfera e l'esposizione da materiali solidi (residui/rifiuti prodotti dalla centrale).

Per quanto riguarda l'esposizione da effluenti gassosi, sono stati considerati i coefficienti di dose di screening (dose efficace individuale annua per unità di attività annua rilasciata) per i singoli radionuclidi (segmenti di catene o catene intere di U-238, Th-232 e U-235 – ove pertinente), riportati in Tabella 43 "Doses per unit discharge rate of 1GBq\*y-1 of atmospheric release at different effective stack heights" nella pubblicazione RP-135 [4]. Tali coefficienti sono distinti per tipo di radionuclide e per altezza efficace del camino.

A partire dai risultati ottenuti, dall'analisi effettuata da ISPRA, sul Filtro 1213/164 è stato possibile valutare la dose efficace annua complessiva per ciascun radionuclide ( $D_i$ ) tramite la seguente formula:

$$D_i [Sv / y] = A_i [(Sv / y) / (GBq / y)] \cdot C_i [GBq / m^3] \cdot V_i [m^3 / y] \quad \text{Eq. 2}$$

dove:

$A_i$  = coefficienti relativi all'i-esimo radionuclide, così come riportati nella su citata Tabella 43 (RP-135 [4]) relativi ad una altezza efficace del camino pari a 200 metri (l'altezza fisica del camino della centrale ENEL di Brindisi è pari ad 200 metri)

$C_i$  = concentrazioni di attività dell'i-esimo radionuclide, ottenute tramite analisi radiochimica sui singoli radionuclidi e riportate nel paragrafo precedente;

$V_i$  = volume totale annuo di gas immesso in atmosfera  $8,4096E+10 \text{ m}^3$ , calcolato a partire dalla portata del singolo camino pari a  $2,4000E+06 \text{ Nm}^3/\text{h}$  [1] e nell'ipotesi cautelativa, che l'impianto funzioni per 24 ore e per 365 giorni l'anno con tutti e quattro i camini attivi contemporaneamente.

Nella tabella 1.6 sono mostrati i risultati ottenuti.

**Tabella 1.6** – Risultati di dosi efficaci annue complessive per singolo radionuclide e totale considerando la via d'esposizione da effluenti gassosi rilasciati in atmosfera per la popolazione

Dosi annue complessive per singolo radionuclide per esposizione da effluenti gassosi immessi in atmosfera [ $\mu\text{Sv}/\text{y}$ ]								
	DOSI [ $\mu\text{Sv}/\text{y}$ ]							
	U-238	U-234	Th-230	Ra-226*	Th-232**	Po210	Pb210	Totale
Dose Annua	2,51E-04	2,90E-04	5,55E-04	1,06E-03	6,05E-03	1,88E-02	2,95E-03	3,00E-2

\* Assunto all'equilibrio con U-238

\*\* All'equilibrio secolare con tutta la catena utilizzando cautelativamente la MAR del Th-228

Per quanto riguarda l'esposizione da materiali solidi (residui/rifiuti prodotti dalla centrale), sono state fatte le seguenti assunzioni:

- 1 Sono state considerate solo le matrici che da un punto di vista radioprotezionistico potessero avere una qualche rilevanza radiologica NORM. In particolare sono state scartate tutte le materie prime che non costituiscono un rischio radiologico in quanto a basso contenuto NORM, tra cui: Olio Combustibile, Carbone di varia origine e Calcare;
- 2 Nel caso dell'U-238, confrontando le concentrazioni di attività di tale radionuclide con il valore del livello di allontanamento relativo agli isotopi dell'uranio nel rapporto isotopico standard, automaticamente viene operato il confronto anche per U-235 e U-234 oltreché per i prodotti di breve emivita di U-238 (Th-234 e Pa-234m);
- 3 Nel caso dei radionuclidi in equilibrio della serie di Th-232, di cui erano disponibili i risultati di concentrazione in Bq/kg (ottenuti sia da ARPA Puglia che da ISPRA), è stato considerato il valore di concentrazione maggiore (cautelativo dal punto di vista radioprotezionistico). Il livello di allontanamento utilizzato è quello relativo al Th-232 in equilibrio secolare.

Si è proceduto al confronto delle concentrazioni di attività dei diversi radionuclidi con i valori dei livelli di allontanamento per singolo radionuclide e tipo di materiale, così come descritto nel capitolo 2 paragrafo 2.2.

Nella tabella 1.7 sono riportati i valori ottenuti calcolando il rapporto tra le concentrazioni di attività ed i valori dei livelli di allontanamento per ogni singolo radionuclide e tipo di materiale e, nell'ultima colonna, il totale ottenuto per ciascun materiale.

**Tabella 1.7** – Confronto con i livelli di allontanamento per singolo radionuclide e per ciascun materiale, considerando la via d'esposizione da materiali solidi.

Matrici	Confronto con i livelli di allontanamento							Totale
	U-238	Ra-226	K-40	Th-232	Th-230	Po-210	Pb-210	
Gesso Chimico	2,24E-03	1,02E-02	1,34E-03	1,80E-03	6,76E-04	1,43E-03	1,62E-03	1,9E-02
Ceneri Pesanti	2,09E-02	2,61E-01	6,68E-02	2,72E-01	1,43E-02	6,26E-03	1,04E-02	6,5E-01
Ceneri Leggere Secche	1,55E-02	1,65E-01	9,93E-02	1,66E-01	7,95E-03	1,69E-02	1,58E-02	4,9E-01
Fanghi ITAR	6,62E-03	2,40E-02	5,30E-03	4,04E-02	3,85E-0	9,76E-03	1,03E-02	1,0E-01
Fanghi ITSD	1,20E-02	5,06E-02	3,36E-03	1,55E-02	4,32E-03	1,02E-02	9,50E-03	1,1E-01

## Lavoratori

Per il calcolo delle dosi ai lavoratori della centrale ENEL di Brindisi, sono state fatte le seguenti assunzioni:

1. Le valutazioni di esposizione radiologica riguardano unicamente i seguenti scenari: irradiazione esterna gamma e inalazione per risospensione.
2. Sono state considerate solo le matrici che da un punto di vista radioprotezionistico potessero avere una qualche rilevanza radiologica NORM. In particolare sono state scartate tutte le materie prime che non costituiscono un rischio radiologico in quanto a basso contenuto NORM, tra cui: Olio Combustibile, Carbone di varia origine e Calcare.
3. Le ore complessive in un anno di lavoro considerate sono 1800.
4. Nel caso dell'U-238, utilizzando nel calcolo le concentrazioni di attività di tale radionuclide ed usando il coefficiente di dose relativo agli isotopi dell'uranio nel rapporto isotopico standard, automaticamente vengono considerati anche U-235 e U-234 oltreché i prodotti di breve emivita di U-238 (Th-234 e Pa-234m).
5. Nel caso dei radionuclidi in equilibrio della serie di Th-232, di cui erano disponibili i risultati di concentrazione in Bq/kg (ottenuti sia da ARPA Puglia che da ISPRA), è stato considerato il valore di concentrazione maggiore (cautelativo dal punto di vista radioprotezionistico). Il coefficiente di conversione utilizzato è quello relativo al Th-232 in equilibrio secolare.

Per il calcolo delle dosi efficaci annue per irradiazione esterna gamma, sono stati utilizzati i coefficienti della Tabella 21 (RP-122 parte 2) seguendo il metodo di calcolo descritto nel capitolo 3, paragrafo 3.2 ed in particolare utilizzando la formula (13).

In tal modo è stato possibile ottenere i risultati di dose in  $\mu\text{Sv}$  per anno [ $\mu\text{Sv/y}$ ], per singola matrice, radionuclide e relativi valori complessivi, considerando, come detto precedentemente, l'ipotesi dello scenario di grande cumulo: i risultati ottenuti sono riportati nella tabella 1.8. dove in grassetto è riportato il valore totale massimo di esposizione ottenuto tra le varie matrici.

**Tabella 1.8** – Dosi efficaci estrapolate per singolo radionuclide e relativi totali per esposizione ad irradiazione gamma esterna per i lavoratori.

Dosi estrapolate per singolo radionuclide, per esposizione ad irradiazione esterna gamma [ $\mu\text{Sv/y}$ ]								
Matrici	U-238	Ra-226	K-40	Th-232	Th-230	Po-210	Pb-210	Totale
<i>Gesso Chimico</i>	3,89E-03	2,88E-01	3,45E-02	7,73E-02	4,14E-05	1,90E-06	3,12E-05	4,04E-01
<i>Ceneri Pesanti</i>	1,09E-01	7,38E+00	1,72E+00	1,17E+01	8,75E-04	8,34E-06	2,01E-04	<b>2,09E+01</b>
<i>Ceneri Leggere Secche</i>	6,53E-02	4,67E+00	2,56E+00	7,11E+00	4,87E-04	2,25E-05	3,04E-04	1,44E+01
<i>Fanghi ITAR</i>	8,72E-02	6,78E-01	1,36E-01	1,73E+00	2,36E-04	1,30E-05	1,99E-04	2,63E+00
<i>Fanghi ITSD</i>	3,37E-02	1,43E+00	8,65E-02	6,65E-01	2,64E-04	1,36E-05	1,83E-04	2,22E+00

Analogamente, per il calcolo delle dosi annue per inalazione, è stato seguito il metodo di calcolo descritto nel capitolo 3, paragrafo 3.3. ed in particolare utilizzando la formula (14). In tal modo è stato possibile ottenere i risultati di in  $\mu\text{Sv}$  per anno [ $\mu\text{Sv/y}$ ], per singola matrice, radionuclide e relativi valori complessivi: i risultati ottenuti sono riportati in tabella 1.9. dove in grassetto è riportato il valore totale massimo di esposizione ottenuto tra le varie matrici.

**Tabella 1.9** – Dosi efficaci estrapolate per singolo radionuclide e relativi totali per inalazione per i lavoratori.

Dosi estrapolate per singolo radionuclide, per inalazione [ $\mu\text{Sv/y}$ ]								
Matrici	U-238	Ra-226	K-40	Th-232	Th-230	Po-210	Pb-210	Totale
<i>Gesso Chimico</i>	1,35E-01	2,46E-02	0,00E+00	9,37E-02	1,05E-01	3,39E-02	2,03E-02	4,13E-01
<i>Ceneri Pesanti</i>	3,77E+00	6,29E-01	0,00E+00	1,42E+01	2,22E+00	1,49E-01	1,31E-01	<b>2,11E+01</b>
<i>Ceneri Leggere Secche</i>	2,26E+00	3,98E-01	0,00E+00	8,62E+00	1,24E+00	4,02E-01	1,97E-01	1,31E+01
<i>Fanghi ITAR</i>	3,02E+00	5,78E-02	0,00E+00	2,10E+00	5,99E-01	2,32E-01	1,30E-01	6,14E+00
<i>Fanghi ITSD</i>	1,17E+00	1,22E-01	0,00E+00	8,06E-01	6,72E-01	2,43E-01	1,19E-01	3,13E+00

### 1.5 Commenti e osservazioni

Sulla base dei risultati ottenuti, nelle ipotesi più cautelative possibili, anche se poco realistiche, possiamo concludere che:

1. Il valore di dose efficace estrapolato per la popolazione, per quanto riguarda l'immissione di effluenti gassosi rilasciati in atmosfera, è pari a  $3,00\text{E}-02 \mu\text{Sv/anno}$ , circa quattro ordini di grandezza inferiore rispetto al livello di azione di  $0,3 \text{ mSv/anno}$ , fissato per la popolazione dalla normativa italiana vigente (Art. 10-ter e Allegato I-bis del D.Lgs. 230/95 s.m.i.).
2. I materiali di scarto prodotti, allontanati dalla centrale ENEL, risultano tutti conformi al criterio di dose efficace ( $0,3 \text{ mSv/anno}$ ). Infatti, per ciascuna matrice considerata, il totale della somma dei rapporti tra concentrazione e valore del livello di allontanamento è inferiore ad 1 in tutti i casi.

- 
3. Il valore di dose efficace estrapolato per i lavoratori è pari a 42  $\mu\text{Sv}/\text{anno}$  (sommando i contributi massimi di esposizione dati da irradiazione esterna gamma e inalazione) ed è circa 20 volte inferiore rispetto al livello di azione di 1  $\text{mSv}/\text{anno}$ , fissato per i lavoratori dalla normativa Italiana vigente (Art. 10-ter e Allegato I-bis del D.Lgs. 230/95 s.m.i.).
  4. Va considerato, tuttavia, che l'attività lavorativa trattata in questo caso studio non è tra quelle incluse come soggette a disposizioni di legge nell'allegato Ibis del D.Lgs. 241/00.

### **1.6 Bibliografia**

[1] "Autorizzazione integrata ambientale per l'esercizio della centrale termoelettrica della società Enel Produzione S.p.A. ubicata a Brindisi" – Provvedimento di Autorizzazione Integrata Ambientale Protocollo n. DVA-DEC-2012-0000253 del 08/06/2012 rilasciata dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare

[2] "Attività lavorative con materiali ad elevato contenuto di radioattività naturale (NORM: Naturally Occurring Radioactive Materials)" - RTI CTN\_AGF 3/2004 – APAT

[3] Radiation Protection 122 "Practical use of the concepts of clearance and exemption" - Part II "Application of the concepts of exemption and clearance to natural radiation sources", Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2002 - ISBN 92-894-3315-9

[4] Radiation Protection 135 "Effluent and dose control from European Union NORM industries: Assessment of current situation and proposal for a harmonised Community approach", Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003 - ISBN 92-894-6361-9

---

## **ALLEGATO D**

### **IMPIANTI PER LA FILTRAZIONE DI FALDE**

---

## **ALLEGATO D. Impianti per la filtrazione falde**

### **1. STAZIONE DELL'ACQUEDOTTO DI METROPOLITANA MILANESE**

*a cura di Rosella Rusconi, Maurizio Forte, Giuseppe Abbate, Pietro Badalamenti, Stefania Costantino, Gianni Gadaleta e Daniela Lunesu – ARPA Lombardia*

#### ***1.1 Descrizione dell'impianto***

Il caso studio prende in esame la stazione di Gorla dell'Acquedotto pubblico di Milano.

Le informazioni di seguito riportate sull'impianto sono state gentilmente fornite da Metropolitana Milanese, ente gestore dell'acquedotto, che ringraziamo per la disponibilità e la collaborazione dimostrate.

L'Acquedotto assicura l'approvvigionamento idrico della città attingendo al 100% dalla falda sotterranea; è infatti dalla falda acquifera sotterranea che viene prelevata l'acqua per i fabbisogni della città fin dal 1888, quando a Milano nasce il primo impianto di pompaggio.

L'acqua di falda ha il grande vantaggio di essere depurata naturalmente dalla filtrazione attraverso gli strati permeabili del terreno. In molti casi, se prelevata correttamente e a sufficiente profondità, è già potabile dal punto di vista fisico-chimico e batteriologico e pertanto può essere distribuita senza alcun trattamento e senza l'aggiunta di disinfettanti.

Le falde sotterranee sono inoltre maggiormente protette da contaminazioni accidentali; quando queste si verificano, per la lenta velocità di scorrimento della falda, possono essere tempestivamente "avvistate" e vi è più tempo per l'adozione di provvedimenti. L'approvvigionamento potabile della città di Milano avviene esclusivamente da acqua di falda.

Il problema relativo alla qualità dell'acqua della falda si è sviluppato a partire dagli anni Sessanta.

La falda venne infatti pesantemente contaminata da scarichi industriali non depurati. Alla fine degli anni Ottanta l'acquedotto inizia ad introdurre tecnologie di potabilizzazione per garantire la qualità dell'acqua e assolvere agli adempimenti sempre più restrittivi della normativa europea in tema di limiti alla concentrazione di sostanze inquinanti nell'acqua. Il primo impianto di filtrazione a carbone attivo è stato costruito nella centrale Vialba ed è entrato in funzione nel febbraio del 1992. Nel maggio del 1994 entrano in funzione le torri di aerazione nelle centrali Novara, Comasina, Suzzani, Chiusabella e Cimabue.

E' del settembre 2007 l'introduzione dell'impianto a osmosi inversa presso la centrale Gorla.

#### **Come funziona l'acquedotto**

Il ciclo dell'acqua comincia con la captazione dalla falda acquifera e la successiva potabilizzazione allo scopo di rendere l'acqua idonea al consumo. Per garantire la qualità, l'ente gestore sottopone l'acqua ad attenti controlli. Segue la distribuzione alle utenze finali.

##### Captazione

La captazione di acqua dalla falda avviene attraverso i pozzi, che fanno capo alle 29 stazioni di rilancio. Ogni stazione opera attraverso 12 - 24 pozzi, per un totale di circa 400 pozzi mediamente attivi che alimentano la rete di adduzione e distribuzione, per un totale di 230 milioni di metri cubi di acqua potabile distribuita all'anno. La rete di distribuzione idrica ha una lunghezza complessiva di circa 2.295 km.

Le centrali utilizzano la tecnica del doppio sollevamento: l'acqua viene attinta dai pozzi mediante elettropompe sommerse che la inviano attraverso una rete di tubi alla vasca di accumulo delle centrali e quindi successivamente la immettono nella rete di distribuzione.

Le vasche di accumulo fungono da serbatoi e consentono l'eventuale sedimentazione della sabbia che può essere presente nei pozzi. Le pompe sommerse sono posizionate a circa 40-50 metri di profondità e hanno una portata di 25-35 litri al secondo. Il numero dei pozzi che vengono attivati varia in base alle richieste idriche nelle varie ore della giornata e a seconda delle stagioni.

##### Potabilizzazione

Dove sono presenti contaminazioni, come spesso accade nei territori antropizzati, Metropolitana Milanese sottopone l'acqua a trattamenti prima della distribuzione. I metodi di potabilizzazione più utilizzati a Milano sono la filtrazione su carboni attivi e le torri di aerazione.

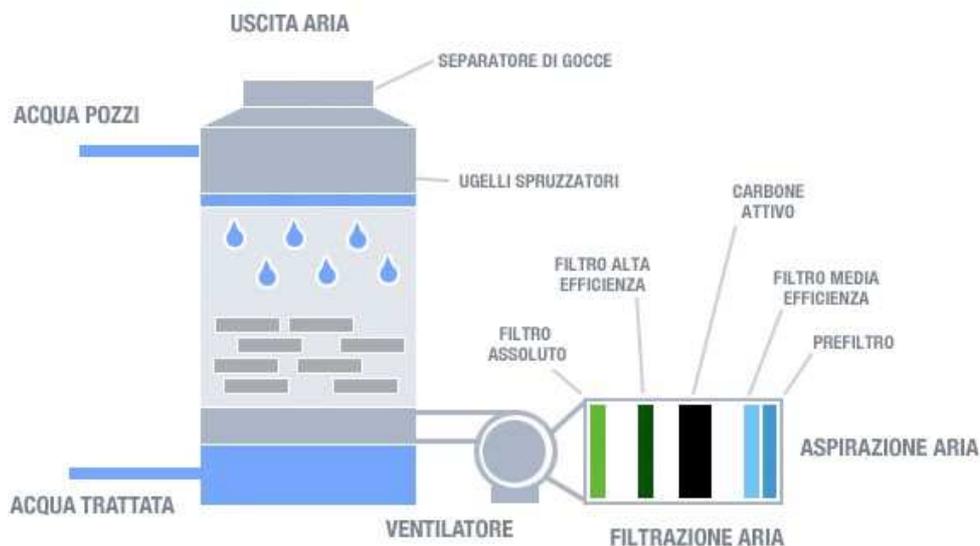
La disinfezione, dove necessario, è effettuata tramite ipoclorito di sodio e con raggi U.V.. In alcuni casi, per abbattere inquinanti di differenti tipologie, si utilizzano sia le torri di aerazione, sia i filtri a carboni attivi. Presso una Centrale è stato inserito da qualche anno (2007) anche un impianto ad osmosi inversa.

#### *Torri d'aerazione*

Le torri d'aerazione sono utili per abbattere i solventi clorurati o composti organici volatili (V.O.C.); attualmente sono in uso in 4 stazioni su 29.

Trattandosi di composti volatili, i solventi clorurati sono facilmente eliminabili con un procedimento di aerazione: nelle torri l'acqua viene spruzzata dall'alto e entra a contatto con l'aria pulita e filtrata insufflata dal basso da potenti ventilatori. In questo modo, le sostanze volatili indesiderate si trasferiscono dall'acqua all'aria. L'aria immessa in torre è aspirata dall'esterno e opportunamente filtrata prima del ventilatore di immissione. Il trattamento ha un'efficacia del 95% e oltre. L'azione di "strippaggio" dell'aria si sviluppa anche nei confronti di altre sostanze presenti nell'acqua, come l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), la quale viene in parte ripristinata con un'apposita iniezione prima della distribuzione di acqua in rete.

**Figura 1.1** – Torri d'aerazione



#### *La filtrazione su carboni attivi*

I granuli di carboni attivi, ottenuti da carboni minerali o vegetali portati ad alta temperatura (oltre 900°C), hanno un'elevata porosità interna ed acquisiscono la capacità di trattenere le grandi molecole dei composti organici come solventi clorurati e pesticidi. Sono efficaci sia per eliminare i composti volatili che quelli non volatili; attualmente sono in uso in 24 stazioni su 29.

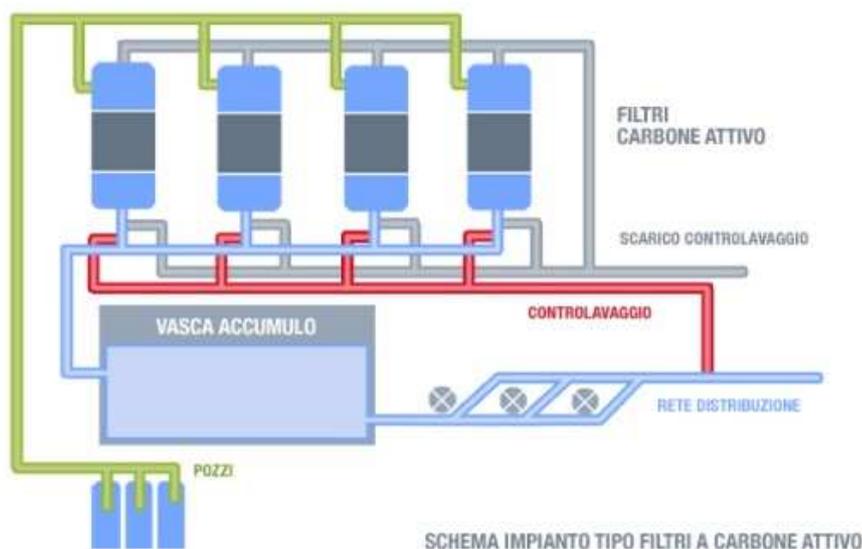
Il carbone attivo subisce un processo di esaurimento di efficacia di assorbimento chimico. Negli impianti dell'acquedotto la durata del carbone attivo varia da 10 ad oltre 24 mesi, in funzione della concentrazione delle sostanze inquinanti. Il carbone attivo può essere nuovamente rigenerato in appositi forni. Dopo alcuni cicli di rigenerazione, il carbone deve essere sostituito.

#### *Osmosi inversa*

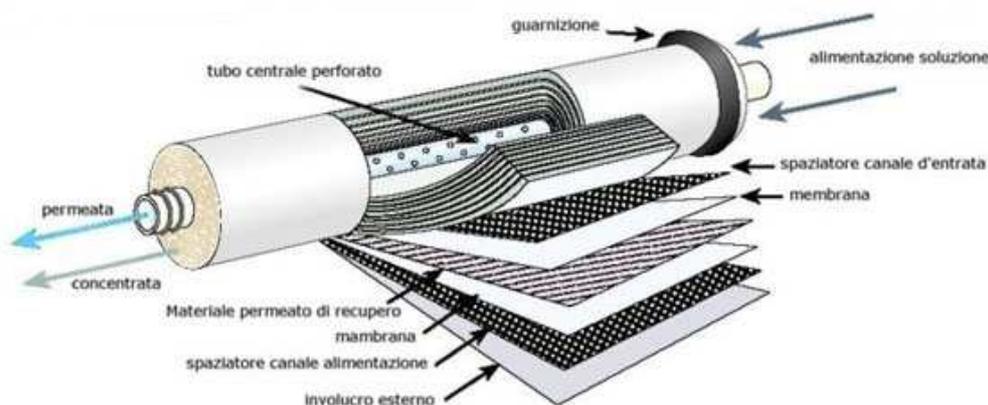
L'osmosi inversa è un procedimento che permette di ridurre il contenuto di sali nell'acqua fino alla loro completa eliminazione; assieme ai sali vengono eliminati anche virus e batteri. Il processo avviene tramite utilizzo di speciali membrane sintetiche in grado di "setacciare" l'acqua a livello molecolare mediante l'applicazione di elevate pressioni differenziali fra le due facce della membrana. Il processo è applicato per l'eliminazione dei nitrati e del cromo esavalente. L'acqua che si ottiene dal processo di osmosi è estremamente pura e priva di sali tanto da dover essere miscelata con acqua non trattata per ricostituire un contenuto salino idoneo per il consumo umano.

Attualmente il trattamento per osmosi inversa è in uso in una sola stazione.

**Figura 1.2** – Filtrazione su carboni attivi



**Figura 1.3** – Schema membrana filtrante a osmosi inversa



## La Centrale di Gorla

La Centrale Gorla, situata in via Aristotele 28 nel settore nord-orientale della città, è un impianto di media potenzialità, entrato in funzione il 16 giugno 1932 e completamente rifatto nel 1966.

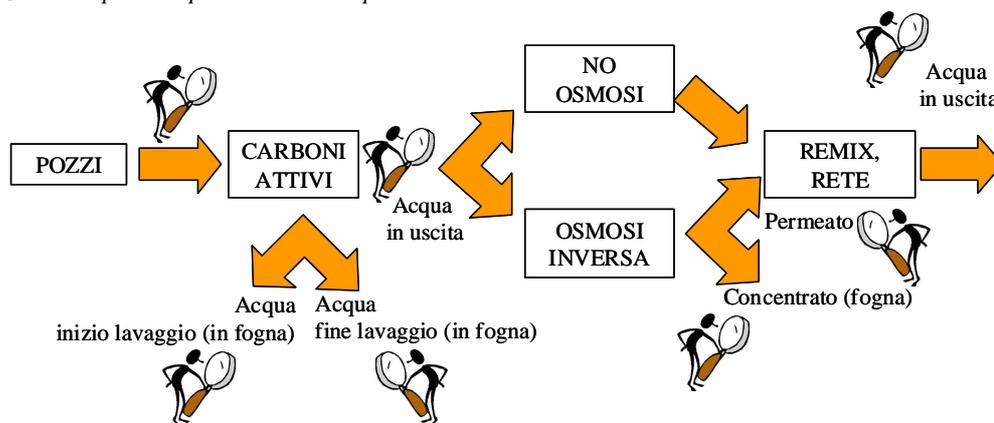
La centrale è alimentata da 20 pozzi con elettropompe sommerse che attingono dalla falda acquifera sotterranea a circa 27 metri sotto al livello di campagna; la portata di base di tali pozzi è complessivamente di 700 litri al secondo.

La vasca di accumulo e di decantazione della sabbia ha una capacità di 4.475 metri cubi.

Nel luglio 1997 è entrato in funzione un impianto di trattamento composto da 10 filtri a carbone attivo. Per ovviare ai successivi problemi di inquinamento da nitrati e cromo esavalente, nel febbraio del 2007 è entrato in funzione un impianto di trattamento composto da cinque linee ad osmosi inversa che funzionano in serie all'impianto a carbone attivo.

Le fasi del processo di trattamento dell'acqua presso la Centrale di Gorla sono illustrate schematicamente in figura 1.4. Nella stessa figura sono mostrati i punti in cui è stata effettuata l'esecuzione di accertamenti analitici tramite il prelievo di campioni e la successiva analisi di laboratorio.

**Figura 1.4** – Centrale di Gorla – Schematizzazione delle fasi del processo di trattamento dell'acqua e indicazione dei punti di prelievo dei campioni



**Figura 1.5** – Centrale di Gorla – Ingresso impianto e filtri a carbone attivo



**Figura 1.6** – Centrale di Gorla – Ingresso impianto a osmosi



**Figura 1.7** – Centrale di Gorla – Impianto a osmosi



**Figura 1.8** – Centrale di Gorla – Dettaglio delle membrane ad osmosi



### **1.2 Valutazione delle vie di esposizione**

E' stata considerata la possibilità che i processi di potabilizzazione dell'acqua abbiano come effetto secondario la riconzentrazione della radioattività, sia sui sistemi filtranti utilizzati che sugli effluenti dei processi stessi.

La principale via di esposizione è stata identificata nel refluo risultante dal processo di osmosi inversa, che viene smaltito in fognatura e convogliato ad un impianto di trattamento delle acque reflue con conseguente possibile esposizione sia dei lavoratori presso l'impianto che della popolazione.

### **1.3 Campionamenti e misure**

L'elenco dei campioni prelevati, presentato schematicamente in figura 1.4, è riportato di seguito:

- acque in ingresso alla Centrale (prelievo pozzi) – ingresso filtri a carboni attivi
- acque in uscita dai filtri a carboni attivi – ingresso impianto osmosi inversa
- acque in uscita dall'osmosi – permeato
- acque in uscita dall'osmosi – concentrato
- acque in uscita dalla Centrale – ingresso rete di distribuzione
- acque di lavaggio dei filtri a carbone attivo – inizio e fine lavaggio

In tutti i campioni è stata effettuata la misura del contenuto di attività alfa e beta totale e dell'uranio, mediante pretrattamento radiochimico e successiva misura in scintillazione liquida.

I risultati analitici sono riportati nella Tabella 1.1.

In tutti i campioni, con l'eccezione del permeato, è stata individuata la presenza in quantità misurabili di radioattività attribuibile in via esclusiva (tenuto conto dell'incertezza analitica) all'uranio naturale ed al potassio 40, entrambi radionuclidi di origine primordiale normalmente presenti nelle acque di falda. I valori misurabili sono confrontabili a quanto normalmente misurato nelle acque lombarde e sono conformi alla normativa vigente sulla qualità delle acque destinate al consumo umano.

Nel campione di permeato non è stata rilevata la presenza di radioattività in quantità misurabili; questo dato è atteso in quanto i filtri ad osmosi hanno esattamente lo scopo di rimuovere qualunque tipo di sostanza presente nell'acqua, con l'eccezione dell'acqua stessa.

**Tabella 1.1** – Risultati analitici (dati ARPA Lombardia). L'incertezza è riportata in termini di incertezza estesa. La minima attività rivelabile è espressa al livello di confidenza del 95%.

<i>Descrizione campione</i>	<b>Alfa totale</b> mBq/kg	<b>Beta totale</b> mBq/kg	<b>Uranio totale</b> mBq/kg	<b>U-234</b> mBq/kg	<b>U-238</b> mBq/kg
Acqua in ingresso alla Centrale (ingresso carboni attivi)	60 ± 15	< 60	73,0 ± 8,2	41,2 ± 5,1	31,8 ± 4,2
Acqua in uscita carboni attivi (ingresso osmosi)	66 ± 15	< 51	69,7 ± 7,8	37,2 ± 4,7	32,5 ± 4,2
Acqua in uscita osmosi (permeato)	< 9,7	< 44	< 1,5	n.d.	n.d.
Acqua in uscita osmosi (concentrato)	213 ± 37	252 ± 87	290 ± 32	159 ± 18	132 ± 15
Acqua in uscita Centrale (ingresso rete di distribuzione)	54 ± 14	< 44	62,7 ± 7,1	34,9 ± 4,4	27,8 ± 3,7
Acqua lavaggio carboni attivi (inizio lavaggio)	91 ± 19	< 46	76,2 ± 8,5	42,6 ± 5,3	33,6 ± 4,4
Acqua lavaggio carboni attivi (fine lavaggio)	49 ± 13	< 44	48,8 ± 5,6	26,4 ± 3,5	22,3 ± 3,1

Un'analisi più di dettaglio dei dati analitici permette di esprimere le seguenti ulteriori osservazioni, in particolare rispetto alla possibilità che i sistemi filtranti in uso possano introdurre problemi di accumulo della radioattività:

- l'acqua in ingresso ed in uscita dai carboni attivi contiene quantità di radioattività confrontabili: la presenza dei carboni non ha quindi influenze significative sul contenuto di radioattività dell'acqua, e non vi è evidenza dell'esistenza di alcun fenomeno di accumulo o riconzentrazione (vedi anche esito analisi sulle acque di lavaggio);
- il permeato in uscita dall'impianto ad osmosi non contiene radioattività in quantità misurabili: l'impianto ad osmosi è quindi completamente efficace nel rimuovere la radioattività presente nell'acqua in ingresso e si conferma come il punto potenzialmente critico dell'impianto di trattamento in cui si possono verificare fenomeni di accumulo che in effetti sono evidenti nel concentrato, che viene smaltito in fognatura;
- l'acqua in uscita dall'impianto ed immessa nella rete di distribuzione, ottenuta miscelando  $\frac{3}{4}$  di acqua trattata dall'impianto ad osmosi e  $\frac{1}{4}$  di acqua non trattata, ha concentrazioni di radioattività simili a quella dell'acqua in ingresso.

Le valutazioni che seguono saranno quindi limitate ai reflui prodotti dall'impianto ad osmosi inversa, che sono immessi in fognatura e inviati ad uno dei depuratori delle acque reflue della città di Milano.

#### **1.4 Confronto con i livelli di allontanamento/emissione (RP122 - RP135)**

Tutte le valutazioni che seguono sono relative alle conseguenze dell'immissione in fognatura e invio al depuratore del concentrato dell'impianto ad osmosi inversa, che è il refluo in cui si concentra maggiormente la radioattività.

Sono stati considerati i tre seguenti casi:

- Caso 1: si valuta l'esposizione della popolazione nell'ipotesi che tutta la radioattività inviata al depuratore sia immessa in corpo idrico superficiale a valle del processo di depurazione (nessun trattenimento dai fanghi di depurazione).  
La valutazione è stata effettuata utilizzando sia i valori di screening stabiliti da RP 135 (Tab. 2.7 testo principale) che quelli stabiliti dal documento NRPB (Tab. 2.10 documento principale), in quanto entrambi i documenti considerano questo scenario.
- Caso 2: si valuta l'esposizione della popolazione nell'ipotesi che tutta la radioattività inviata al depuratore sia trattenuta dai fanghi di depurazione, che sono successivamente utilizzati come fertilizzante in agricoltura.  
La valutazione è stata effettuata utilizzando i valori di screening stabiliti dal documento NRPB (Tab.2.10 documento principale).
- Caso 3: si valuta l'esposizione dei lavoratori dell'impianto di depurazione.  
La valutazione è effettuata utilizzando i valori di screening definiti secondo la procedura delineata al paragrafo 2.4.3 del documento principale (Tab. 2.11 documento principale). Si evidenzia che i lavoratori del depuratore sono considerati popolazione e quindi per essi il vincolo di dose pertinente è il medesimo della popolazione (0,3 mSv/anno).

La tabella seguente riporta i dati necessari per l'esecuzione delle valutazioni.

**Tabella 1.2** – *Dati in ingresso alle valutazioni di dose*

<i>Descrizione campione</i>	
Quantità di concentrato in uscita dall'impianto ad osmosi e immesso in fognatura - m <sup>3</sup> /a (dati anno 2012)	77044
Quantità totale di radioattività inviata al depuratore - Bq/a	Uranio tot: 2,23E+07 U-234: 1,23E+07 U-238: 1,00E+07
Quantità fanghi prodotti dall'impianto di depurazione che riceve il concentrato - t/a (dati anno 2011)	12200
Concentrazione media di radioattività nei fanghi in uscita dal depuratore (Hp: tutta la radioattività si concentra nei fanghi) - Bq/kg	Uranio tot: 1,83 U-234: 1,01 U-238: 0,82

Caso per caso, i risultati delle valutazioni di dose sono riportati nelle tabelle seguenti.

**Tabella 1.3** – *Valutazione di dose – CASO 1*

<i>CASO 1 – Esposizione popolazione residente – Scarico in corpo idrico superficiale</i>	U-234	U-238
Quantità totale di radioattività scaricata dal depuratore in corpo idrico superficiale (Bq/a)	1,23E+07	1,00E+07
Coefficiente di screening RP135 – fiume piccolo (Tab. 2.7 testo principale) (Bq/a)	7,70E+11	8,3E+11
Indice	1,60E-05	1,21E-05
<b>Indice somma</b>	<b>2,81E-05</b>	
<b>Dose corrispondente</b>	<b>8,4 nSv/a</b>	
Coefficiente di screening NRPB (Tab. 2.10 testo principale) (Bq/a)	2,00E+11	2,00E+11
Indice	6,16E-05	5,01E-05
<b>Indice somma</b>	<b>1,12E-04</b>	
<b>Dose corrispondente</b>	<b>33,5 nSv/a</b>	

**Tabella 1.4 – Valutazione di dose – CASO 2**

<b>CASO 2 – Esposizione popolazione residente – Scarico in fognatura e uso fanghi in agricoltura</b>	U-234	U-238
Quantità totale di radioattività inviata al depuratore e reimpressa in agricoltura a seguito dell'uso dei fanghi come fertilizzante (Bq/a)	1,23E+07	1,00E+07
Coefficiente di screening NRPB (Tab. 2.10 testo principale) (Bq/a)	5,00+08	5,00E+08
Indice	2,47E-02	2,00E-02
<b>Indice somma</b>	<b>4,47E-02</b>	
<b>Dose corrispondente</b>	<b>13,4 µSv/a</b>	

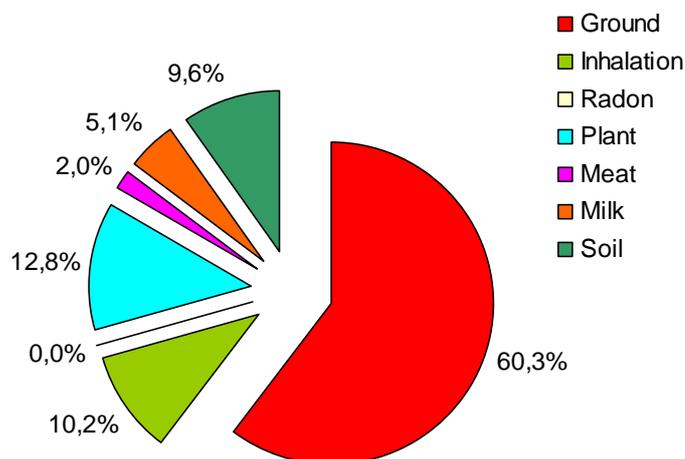
**Tabella 1.5 – Valutazione di dose – CASO 3**

<b>CASO 3 – Esposizione lavoratori impianto di depurazione</b>	U-234	U-238
Quantità totale di radioattività inviata al depuratore (Bq/a)	1,23E+07	1,00E+07
Coefficiente di screening (Tab. 2.11 testo principale) (Sv/a per Bq/a)	6,30E-15	
<b>Dose corrispondente</b>	<b>0,14 µSv/a</b>	

#### 1.4.1 Applicazione di ResRad

La valutazione della dose conseguente all'uso dei fanghi in agricoltura è stata effettuata anche attraverso l'applicazione del software ResRad 6.5, assumendo per la concentrazione di radioattività nei fanghi i valori riportati in Tabella 1.2. e adottando le condizioni per lo spargimento dei fanghi in agricoltura vigenti in Lombardia (D.L.vo 99/1992<sup>6</sup>, D.G.R. 30 dicembre 2003 n. 7/15944<sup>7</sup>). I risultati sono riassunti in Figura 1.9 e 1.10.

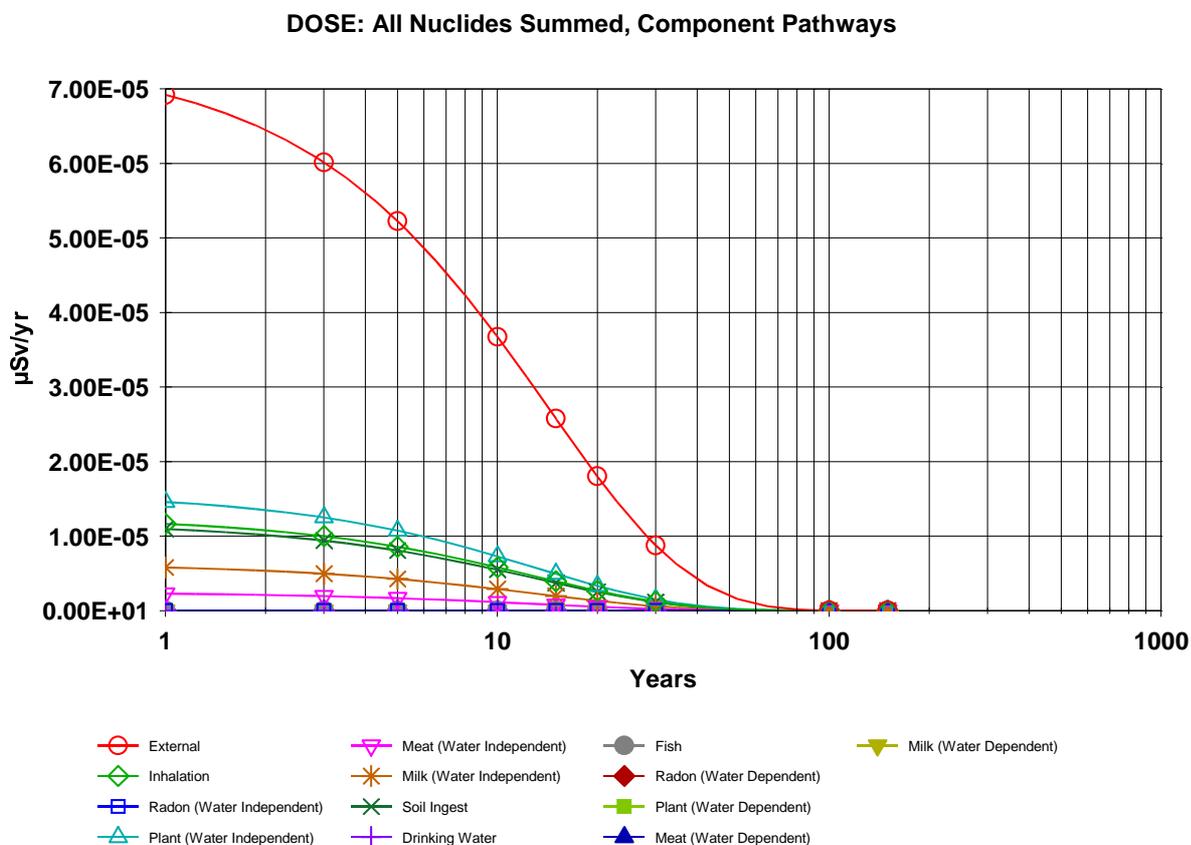
**Figura 1.9 – Stime di dose per uso fanghi in agricoltura (1 anno) - Contributo % delle diverse vie di esposizione**



<sup>6</sup> D.L.vo 99/1992, Attuazione della direttiva 86/278/CEE concernente la protezione dell'ambiente, in particolare del suolo, nell'utilizzazione dei fanghi di depurazione in agricoltura.

<sup>7</sup> D.G.R. 30 dicembre 2003 n. 7/15944. Delega alle province delle funzioni amministrative, ai sensi degli artt. 27 e 28 del D.L.vo 22/1997 e s.m.i., in materia di approvazione dei progetti ed autorizzazione alla realizzazione degli impianti ed all'esercizio delle inerenti operazioni di messa in riserva (R13), trattamento/condizionamento (R3) e spandimento sul suolo a beneficio dell'agricoltura (R10) di rifiuti speciali non pericolosi.

**Figura 1.10** – Stime di dose per uso fanghi in agricoltura (1 anno di pratica) - Output ResRad con valutazione puntuale del contributo delle diverse vie di esposizione



C:\RESRAD\_FAMILY\RESRAD\6.5\USERFILES\STIME GDL NORM FANAGRIC-DAFILEPERCMOD.RAD 01/30/2014 10:33 GRAPHICS.ASC

Complessivamente la dose conseguente allo spargimento di fanghi ad uso agricolo, contestualizzata rispetto al caso del depuratore che riceve il permeato scaricato dalla Centrale di Gorla, è dell'ordine di  $1E-04 \mu\text{Sv}/\text{anno}$  per ogni anno di esecuzione della pratica. Alla dose contribuisce per il 60 % l'irraggiamento dal suolo e per quote dell'ordine del 10% ciascuna l'inhalazione di particolato risospeso, l'ingestione di suolo e il consumo di prodotti vegetali coltivati nell'area (Figura 1.9).

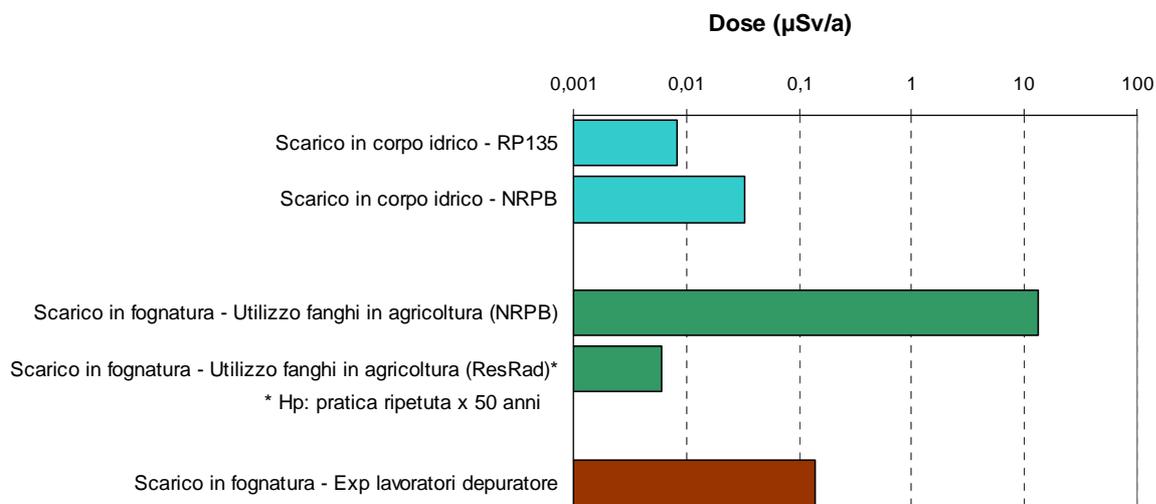
### 1.5 Commenti e osservazioni

Il grafico in Figura 1.11 riassume i risultati delle valutazioni di dose.

Si osserva che nel grafico in figura 1.11 la stima di dose ottenuta tramite ResRad è stata rivalutata assumendo il medesimo scenario adottato dal documento NRPB, che prevede che la pratica sia ripetuta per 50 anni: la dose massima stimata per ogni anno di esecuzione della pratica valutata al paragrafo precedente è stata quindi moltiplicata per 50, adottando l'ulteriore approssimazione cautelativa di considerare sempre il valore massimo di dose (che si ottiene in realtà nel primo anno dopo lo spargimento dei fanghi). La dose che ne risulta è dell'ordine di  $5E-03 \mu\text{Sv}/\text{anno}$ .

In valore assoluto tutti gli scenari restituiscono valori di dose irrilevanti; questo è ovviamente correlato al contenuto iniziale di radioattività nelle acque in ingresso all'impianto (inferiore a  $0,1 \text{ Bq}/\text{kg}$ , completamente attribuibile all'uranio, essendo il radio pressoché assente).

**Figura 1.11** – Riassunto stime di dose



Rispetto allo scarico in corpo idrico i due documenti utilizzati restituiscono risultati confrontabili, nell'ambito dell'approssimazione che caratterizza questi strumenti a-priori.

Rispetto allo scarico in fognatura, invece, l'uso del documento NRPB piuttosto che di un codice di calcolo specifico (ResRad) porta a risultati drasticamente diversi per i motivi discussi nel seguito.

L'uso di ResRad implica la definizione numerica di diversi parametri e consente quindi di contestualizzare le valutazioni ai casi reali. In particolare in questo caso i fattori critici che portano ad un ridimensionamento delle dosi, quando si adottano le ipotesi più realistiche, sono due:

- la dimensione dell'impianto di depurazione che riceve i reflui: il numero di abitanti equivalenti reali è pari circa a 200000, valore molto più grande di quanto supposto nel documento NRPB (circa 500 abitanti equivalenti): ne segue una notevole diluizione della concentrazione di radioattività nei fanghi;
- la quantità di fango sparsa in agricoltura, che in Italia è regolamentata da normative ad hoc ed ha un limite superiore annuale pari a  $0,75 \text{ kg/m}^2$ , mentre il documento NRPB assume un valore circa 10 volte maggiore.

Per lo stesso scenario quindi il documento NRPB restituisce una dose stimata pari a  $13,4 \text{ µSv/anno}$ , mentre ResRad anche nell'ipotesi che la pratica si ripeta per 50 anni valuta una dose dell'ordine di  $5E-03 \text{ µSv/anno}$  (stima cautelativa).

Questa differenza evidenzia l'estrema cautela che caratterizza gli scenari adottati dai documenti, come il rapporto NRPB, che si propongono di definire strumenti idonei per valutazioni di screening, svincolate dai casi specifici. Tali valutazioni devono necessariamente essere approfondite nel caso in cui si ottengano valori prossimi ai vincoli di dose (non per il caso in esame), allo scopo di ottenere stime più realistiche.

## 2. IMPIANTO DI CAPTAZIONE DI ACQUA PROFONDA

### Comune di Castelletto Cervo

a cura di Elena Serena e Enrico Chiaberto – ARPA Piemonte

#### 2.1 Descrizione dell'impianto

Il caso studio prende in esame un impianto di trattamento a pirolusite di un'acqua profonda sito nel Comune di Castelletto Cervo (BI). Castelletto Cervo fa parte della Riserva Naturale Orientata delle Baragge ed è situato sulla sponda sinistra orografica del torrente Cervo su una altura che si incunea tra il corso di quest'ultimo e quello di un suo affluente, l'Ostola. Sul confine sud-orientale del comune scorre invece il torrente Guarabione, anch'esso affluente del Cervo. La zona è formata da depositi fluvioglaciali e fluviali accumulatisi (da 750.000 a 135.000 anni fa - Pleistocene medio) e da depositi deltizi e marini, testimoni della presenza, in tutta la zona, di un grande golfo marino, risalente a circa 5,2-1,8 milioni di anni fa.

L'acquedotto al servizio dell'abitato di Castelletto Cervo è alimentato da un pozzo situato in prossimità del Municipio. L'acqua viene captata a 42 m da una falda profonda situata a circa 122 m ed è fatta passare attraverso un filtro a pirolusite prima di essere immessa nella rete e distribuita all'utenza. L'impianto tratta circa 150 m<sup>3</sup> di acqua al giorno a servizio di un utenza di circa 900 abitanti. In figura 2.1 è riportato in modo schematico il processo di trattamento.



Figura 2.1 – Schema impianto di trattamento a pirolusite a Castelletto Cervo

L'acqua captata è sottoposta ad un processo di aerazione tramite l'iniezione e la miscelazione di ossigeno fornito da un compressore in modo da creare le condizioni per lo strippaggio del ferro e del manganese che possono provocare sapore sgradevole, colorazione dell'acqua e depositi nelle tubazioni. Inoltre la degassazione favorisce l'allontanamento dei gas disciolti in acqua come l'idrogeno solforato ed eventualmente il radon. Durante l'operazione di ossidazione e degassazione, il tempo di contatto minimo dell'acqua con l'aria è di 10 minuti.

Successivamente per la rimozione del Fe e del Mn l'acqua viene fatta passare attraverso dei filtri di pirolusite (biossido di manganese) (figura 2.2) e successivamente clorata.

Per impedire l'intasamento del filtro, l'impianto è dotato di un sistema di controlavaggio automatizzato e temporizzato.

Il controlavaggio viene fatto con acqua potabile e avviene di notte, generalmente due volte a settimana o al raggiungimento della saturazione dei filtri. Durante questa operazione si blocca la captazione, i filtri vengono svuotati dall'acqua presente in essi e nuova acqua potabile viene spinta entro le cisterne

---

contenenti la pirolusite in modo da smuovere e ripulire il materiale filtrante. Per ogni lavaggio dei filtri è necessario circa 1 m<sup>3</sup> di acqua.

L'acqua di lavaggio viene poi scaricata direttamente in fognatura. L'impianto fognario che raccoglie le acque di lavaggio del filtro è costituito da vasche tipo Imhoff.

La fossa settica tipo Imhoff si compone di un compartimento superiore ove avviene la sedimentazione e da un compartimento inferiore per la digestione anaerobica.

Il comune di Castelletto Cervo è suddiviso in diversi agglomerati ognuno dei quali dotato di fosse tipo Imhoff, mentre è assente il depuratore, per cui il refluo finale, in uscita dalla fossa settica, è scaricato direttamente nei corsi d'acqua limitrofi (rogge o torrenti). La pulizia delle fosse settiche è effettuata da ditte specializzate ed i fanghi sono smaltiti in discarica o riutilizzati in agricoltura.



**Figura 2.2** – Immagine impianto a pirolusite per il trattamento acque

## **2.2 Valutazione delle vie di esposizione**

Alcuni radionuclidi naturali possono essere presenti nell'acqua potabile quando essa è captata da falde profonde, dopo essere stata a contatto con rocce contenenti torio e uranio. Nelle acque destinate al consumo umano, pertanto, si possono trovare uranio, radio, radon e i loro prodotti di decadimento che si accumulano nei filtri degli impianti di trattamento.

Per quanto riguarda gli effluenti prodotti dal contro lavaggio filtri, nell'ipotesi che tutti i radionuclidi vengano riversati nella rete fognaria, che nel caso specifico di Castelletto Cervo non ha il depuratore, occorre considerare due possibili scenari: il caso in cui tutta la contaminazione sia associata alla sola fase liquida e poi immessa nel corpo idrico ed il caso in cui invece tutta la contaminazione sia associata ai fanghi con eventuale loro utilizzo in agricoltura.

Nel primo caso l'esposizione riguarda unicamente gli individui della popolazione residenti lungo le rive dei fiumi in cui sono stati riversati gli effluenti liquidi della rete fognaria. Le probabili vie di esposizione dei gruppi critici della popolazione sono:

- irradiazione interna per ingestione di acqua di fiume
- irradiazione interna per consumo di pesce
- irradiazione esterna per irraggiamento gamma dai sedimenti depositati lungo le rive del fiume.

Nel secondo caso l'esposizione riguarda i gruppi di popolazione che usufruiscono dei cibi coltivati o di alimenti (carne e latte) da bestiame allevato nei terreni trattati ripetutamente (per 50 anni) con i fanghi dello stesso impianto.

L'esposizione dei gruppi critici della popolazione dovuta all'impiego dei fanghi in agricoltura può avvenire per:

- irradiazione esterna dal terreno
- irradiazione interna da ingestione accidentale
- irradiazione interna da inalazione della parte risospesa dal terreno
- irradiazione interna da ingestione di radionuclidi negli alimenti.

Per quanto riguarda i lavoratori addetti all'impianto fognario l'esposizione può essere causata da:

- irradiazione esterna dai radionuclidi contenuti nei fanghi
- irradiazione interna per inalazione della parte risospesa
- irradiazione interna da ingestione accidentale.

Un'altra possibile esposizione a lavoratori potrebbe riguardare gli operatori addetti al cambio del materiale filtrante che viene trattato come rifiuto speciale, operazione che nel caso dell'impianto di Castelletto Cervo viene fatta ogni 4-5 anni.

### 2.3 Campionamenti e misure

Sono stati eseguiti i seguenti prelievi e analisi:

- 1) due campioni di acqua prelevati in ingresso e all'uscita dall'impianto di filtrazione che sono stati sottoposti ad analisi di scintillazione liquida per la determinazione dell'attività alfa e beta totale;
- 2) analisi di concentrazione di attività radon con metodo emanometrico sull'acqua alla captazione e in uscita dall'impianto di trattamento;
- 3) due campioni di acqua da 30 l, prelevati in ingresso ed in uscita dall'impianto di trattamento, che concentrati ad 1 l sono stati sottoposti a spettrometria gamma;
- 4) un campione di 5 l di acqua di lavaggio dei filtri a pirolusite dal quale si è ottenuto un quantitativo di 3 g di residuo secco per le analisi di spettrometria gamma e le analisi di radiochimica;
- 5) un campione di pirolusite, nuova, per analisi di spettrometria gamma.

Le tabelle che seguono riassumono i dati ottenuti:

**Tabella 2.1** – misure di concentrazione di attività radon su campioni di acqua prima e dopo la filtrazione

Concentrazione di attività radon su campioni di acqua prelevati prima e dopo l'impianto di filtrazione	
Acqua alla captazione	Acqua in uscita impianto filtrazione
Rn-222 (Bq/l)	CRn (Bq/l)
5,8 ± 0,5	3,8 ± 0,4

**Tabella 2.2** – misure di alfa e beta totale su campioni di acqua prima e dopo la filtrazione

Attività alfa e beta totale su campioni di acqua prelevati prima e dopo impianto filtrazione			
Attività Totale Acqua alla captazione		Attività totale acqua in uscita impianto filtrazione	
αTot (Bq/kg)	βTot (Bq/kg)	αTot (Bq/kg)	βTot (Bq/kg)
0,057 ± 0,037	<0,153	<0,071	<0,196

**Tabella 2.3** – misure di spettrometria gamma

Serie	Radionuclide	Concentrazione di attività			
		Spettrometria gamma su campioni di acqua, di residuo secco e di pirolusite (nuova)			
		Acqua alla captazione Bq/l (incertezza 2σ)	Acqua in uscita impianto filtrazione Bq/l (incertezza 2σ)	Residuo secco ottenuto da acqua lavaggio filtri Bq/kg (incertezza 2σ)	Campione di pirolusite (nuovo) Bq/kg (incertezza 2σ)
<sup>238</sup> U	<sup>234</sup> Pam	< 1,28E-1	< 1,90E-1	< 1,82E+3	< 1,51E+2
	<sup>226</sup> Ra	< 3,21E-2	< 2,86E-2	< 1,38E+2	2,06E+1 ± 1,58E+1
	<sup>214</sup> Pb	< 3,75E-3	< 4,86E-3	132 ± 29	1,99E+1 ± 4,7E+00
	<sup>214</sup> Bi	< 3,47E-3	< 4,84E-3	157 ± 37	2,35E+1 ± 5,1E+00
	<sup>210</sup> Pb	< 0,0	< 2,76E-2	< 1,37E+2	< 3,50E+1
	<sup>210</sup> Po	/	/	/	/
<sup>232</sup> Th	<sup>228</sup> Ac	< 5,47E-3	< 6,90E-3	< 6,15E+1	1,14E+1 ± 4,1E+00
	<sup>212</sup> Pb	< 2,51E-3	< 2,30E-3	3,08E+1 ± 1,26E+1	1,12E+1 ± 2,7E+00
	<sup>212</sup> Bi	/	/	1,11E+2 ± 8,1E+1	/
	<sup>208</sup> Tl	< 1,58E-3	< 1,71E-3	2,62E+1 ± 1,17E+1	4,78E+00 ± 1,68E+00
<sup>235</sup> U	<sup>235</sup> U	< 9,01E-3	< 8,89E-3	< 1,45E+1	< 6,19E+00
	<sup>40</sup> K	< 3,21E-2	5,12E-2 ± 2,63E-2	9,25E+2 ± 2,46E+2	4,11E+2 ± 6,0E+1

**Tabella 2.4** – misure di radiochimica

Misure di radiochimica su residuo secco dell'acqua del controlavaggio filtri	
Radionuclide	Concentrazione di attività Bq/kg
<sup>210</sup> Po	133 ± 17
<sup>238</sup> U	28 ± 4
<sup>234</sup> U	31 ± 5

#### 2.4 Confronto con i livelli di allontanamento/emissione (RP122 - RP135)

Per il caso studio dell'impianto di trattamento acque profonde in questione sono stati ipotizzati due casi di rilascio in ambiente dei NORM:

- a) *Stime di dose alla popolazione ipotizzando che tramite la rete fognaria tutta la contaminazione da NORM sia rilasciata in un corpo idrico superficiale (RP135)*

Per il calcolo della dose alla popolazione si è utilizzato il modello proposto dall'RP135 che tiene conto della portata del corso d'acqua in cui viene riversato il refluo con l'assunzione che lo scarico dei radionuclidi nell'ambiente si protragga per un periodo di 50 anni. Il gruppo di riferimento è quello degli adulti e nel calcolo non si considera la dose da ingestione da cibi coltivati sui terreni irrigati con l'acqua di fiume. Il quantitativo di attività totale da NORM nell'acqua, che attraverso la rete fognaria è riversata in fiume, è calcolato considerando che, portando a secco 5l di acqua utilizzata per la pulizia dei filtri si ricavano 3 g di residuo ai quali corrispondono 62,4 kg di residuo secco prodotto annualmente.

Per il calcolo della dose viene considerata l'attività dell'U-238, mentre l'U-234 è considerato in equilibrio radioattivo con U-238 e si trascura il contributo dell'U-235 in virtù della sua esigua abbondanza.

Pertanto, assumendo una portata media del fiume Cervo pari a 22 m<sup>3</sup>/s e utilizzando la tabella 2.4 del documento principale che riporta i coefficienti di dose di screening in funzione di tre portate del fiume, si ricava, interpolando per il segmento di catena dell'U-238+, un coefficiente  $D_{U238+} = 5,2E-8$  [(Sv/anno)/(GBq/anno)].

Con un'attività totale calcolata di U-238+ pari a 1,75E-6 GBq/anno, si ottiene una dose efficace annua alla popolazione di  $E_{U238} = 9E-11$  mSv/anno.

Per quanto riguarda il Po-210 che conta un'attività totale annua di 8,3E-6 GBq/anno si ricava invece un coefficiente  $D_{Po210} = 1,7E-6$  [(Sv/anno)/GBq/anno] da cui si evince una dose  $E_{Po210} = 1,42E-11$  Sv/anno. La dose imputabile al Ra-226+ è invece  $E_{Ra226+} = 6,03E-12$  Sv/anno. Per il Th-232 (in equilibrio secolare) è  $E_{Th232sec} = 1,2E-10$  Sv/anno. I valori di dose calcolati, riassunti in tabella 2.5, risultano decisamente inferiori al livello di azione di 0,3 mSv/anno stabilito per i membri del pubblico dalla normativa nazionale (ancorché la lavorazione in esame non sia tra quelle incluse nell'elenco riportato nell'allegato Ibis del D.Lgs 241/10).

**Tabella 2.5** – Stima dose efficace alla popolazione (rilascio in fiume)

Dose efficace annua alla popolazione da rilascio in fiume				
	U-238+	Po-210	Ra-226+	Th-232 sec
Concentrazione di Attività (Bq/kg)	28	133	144	30
Attività totale annua (GBq/anno)	1,747E-6	8,299E-6	8,986E-6	1,872E-6
Coefficiente di dose per portata di 22m <sup>3</sup> /s [(Sv/anno)/(GBq/anno)]	5,2E-8	1,7E-6	6,7E-7	6,8E-5
Dose efficace annua (nSv/anno)	9E-5	1,4E-2	6E-3	1,2E-1

b) stime di dose alla popolazione ipotizzando che l'impianto produca solamente dei fanghi secchi, poi utilizzati in agricoltura, in cui si accumula l'attività da NORM (rapporto 13/2 NRPB)

Nell'ipotesi che l'attività NORM si concentri esclusivamente nei fanghi secchi, utilizzati ripetutamente per un periodo di 50 anni su terreni agricoli, si può stimare la dose alla popolazione utilizzando il modello descritto nel rapporto n.13/2 del NRPB. Esso prevede un impianto di trattamento reflui dimensionato per 500 abitanti con produzione di 10000 kg/anno di fanghi secchi. Anche in questo caso il gruppo di riferimento è quello degli adulti.

L'impianto di trattamento acque di Castelletto è a servizio di circa 900 abitanti per cui si stima che siano prodotti dall'impianto fognario 18000 kg/anno di fanghi. La tabella 2.6 riassume i valori di dose efficace calcolati utilizzando i coefficienti della tabella 2.10 del documento principale modificati tenendo conto del numero effettivo di abitanti serviti.

**Tabella 2.6** – Stima dose efficace alla popolazione (produzione fanghi secchi e loro impiego in agricoltura)

Dose efficace annua alla popolazione da utilizzo fanghi secchi su terreni agricoli			
	U238+	Po210	Ra226+
Attività totale annua (GBq/anno)	1,747E-6	8,299E-6	8,986E-6
Coefficiente di dose [(µSv/anno)/( Bq/anno)]	6E-7	4E-6	3E-5
Coefficiente di dose effettivo relativo a 900 abitanti* [(µSv/anno)/( Bq/anno)]	3,3E-7	5,6E-6	1,7E-5
Dose efficace annua (µSv/anno)	5,8E-4	4,6E-2	1,5E-1

\* Il coefficiente è stato ricavato utilizzando le equazioni (3) e (4) del documento principale

## 2.5 Commenti e osservazioni

È stata osservata la presenza di concentrazioni di attività da NORM solo nel residuo ottenuto portando a secco 5 litri di acqua utilizzata per la pulizia dei filtri a pirolusite e pertanto sarebbe interessante l'analisi su un campione di pirolusite esausta. Purtroppo tale campionamento non è facilmente programmabile perché la rimozione del materiale filtrante esausto avviene con cadenza pluriennale (4-5 anni) e richiede una manutenzione straordinaria dell'impianto di trattamento acque.

---

In entrambi i casi ipotizzati per il calcolo delle dosi ai membri della popolazione si sono ottenuti valori di dose del tutto insignificanti, molto inferiori al livello d'azione di 0,3 mSv/anno previsto dalla normativa nazionale (ancorché la lavorazione in esame non sia tra quelle incluse nell'elenco riportato nell'allegato Ibis del D.Lgs 241/10).

L'impianto preso in esame non tratta acque captate di rilevante contenuto di radioattività naturale, tuttavia il caso studio ha lo scopo di indicare una metodologia per la stima delle dosi.

---

## **ALLEGATO E**

### **CENTRALI ELETTRICHE A GAS**

---

## ALLEGATO E. Centrali elettriche a gas

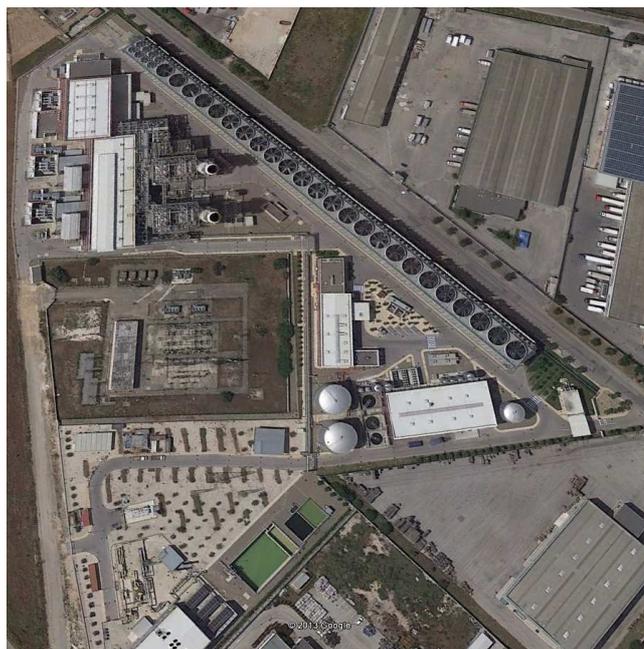
### 1. SORGENIA Spa – Modugno (BA)

a cura di Luigi Vitucci, Giuseppe Roselli e Claudia Monte – ARPA Puglia

#### 1.1 Descrizione della pratica/impianto

La centrale elettrica in questione è a ciclo combinato. Essa è costituita da due turbine a gas con alternatori raffreddati ad aria, da una turbina a vapore con un alternatore raffreddato a idrogeno e da tutti i sistemi ausiliari necessari al funzionamento della centrale.

**Figura 1.1** - Vista dall'alto della centrale Sorgenia SpA di Modugno



Il funzionamento della centrale viene gestito dall'operatore secondo i requisiti della rete.

La struttura è in grado di funzionare in un intervallo di temperatura ambiente compreso tra  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Le condizioni ambientali di progetto sono:

- $17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatura ambiente,
- $1.004\text{ mbar}$  pressione ambiente
- $78\%$  umidità relativa

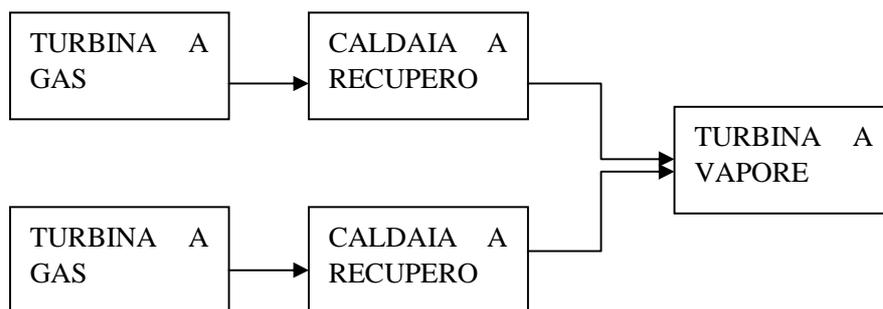
#### Produzione di energia

In condizioni di progetto (combustibile: gas naturale) la centrale elettrica eroga una potenza netta di  $802,13\text{ MW}$  con un consumo specifico netto di  $6.450\text{ kJ/kWh}$  ( $55,81\%$  di rendimento netto). L'energia elettrica fornita alla rete è una corrente alternata trifase a  $50\text{ Hz}$ , a tensione nominale di  $400\text{ kV}$  sul lato AT del trasformatore elevatore. La potenza erogata è regolata tramite il controllo del carico delle turbine a gas in base ai requisiti di output dell'intera centrale.

#### Schema a blocchi dei sistemi e componenti principali

Come mostrato in Figura 1, la centrale elettrica è costituita da due turbine a gas con alternatori raffreddati ad aria, da una turbina a vapore con un alternatore raffreddato a idrogeno e da tutti i sistemi ausiliari necessari al funzionamento della centrale. La potenza erogata è regolata tramite il controllo del carico delle turbine a gas in base ai requisiti di output dell'intera centrale.

**Figura 1.2 - Schema del ciclo combinato**



Nelle centrali termoelettriche a ciclo combinato sono presenti due macchine termiche in serie che permettono di aumentare il rendimento termodinamico rispetto ad entrambi i cicli isolati. Una centrale a ciclo combinato può essere pensata come l'accoppiamento di due sottocentrali: una centrale a gas e una centrale termoelettrica tradizionale. Nella centrale a gas il fluido operativo (aria) opera a temperature molto elevate, e quindi nello scarico del calore verso l'esterno i prodotti della combustione emessi hanno ancora una temperatura molto elevata, e possono essere ulteriormente sfruttati. In una centrale a ciclo combinato i gas di scarico della turbina a gas vengono convogliati all'interno di uno scambiatore di calore e utilizzati quindi per effettuare la fase di evaporazione dell'acqua che avviene a temperature inferiori a quella dei gas di scarico della turbina a gas. Il vapore ottenuto da tale ciclo viene poi espanso in una successiva turbina a vapore producendo ulteriore lavoro meccanico e quindi produzione di energia elettrica. Questa tecnologia permette un minor consumo di gas naturale a parità di energia prodotta, in quanto solo il funzionamento delle turbine a gas avviene per mezzo della combustione del gas naturale, mentre il successivo funzionamento della turbina a vapore avviene per mezzo del recupero del calore disponibile nei gas di scarico della turbina a gas. Impiegando una minor quantità di combustibile aumenta quindi il rendimento dell'impianto e cioè il rapporto tra lavoro ottenuto e energia consumata (sotto forma di combustibile). Per una centrale termoelettrica tradizionale, infatti, il rendimento oscilla intorno a valori del 40% mentre in una moderna centrale a ciclo combinato il rendimento supera sempre il 50% con punte del 60%.

**Figura 1.3 - Vista Camini (sinistra) - Filtri di ingresso (destra)**



## 1.2 Valutazione delle vie di esposizione

Le principali vie di esposizione da NORM per la popolazione e lavoratori (per i lavoratori è possibile individuare medesime vie di esposizione previste per la popolazione), sono:

### Esposizione ad effluenti gassosi in atmosfera

Tale valutazione tiene conto dei seguenti scenari ed in particolare:

- Inalazione ed irraggiamento dalla nube;
- Irraggiamento e risospensione dopo la deposizione al suolo;
- Ingestione cibo cresciuto sul suolo contaminato circostante.

E' necessario considerare l'altezza efficace del camino, il quale a sua volta dipende da:

- velocità di fuoriuscita dei fumi dal camino (m/s);
- diametro del camino (m);
- velocità del vento all'altezza fisica del camino (m/s);
- differenza di temperatura tra interno ed esterno del camino;
- temperatura dell'aria all'altezza fisica del camino (K).

Per le valutazioni di dose mostrate nei paragrafi successivi, è stata utilizzata l'altezza fisica del camino, cautelativa dal punto di vista radioprotezionistico.

### Esposizione a materiali solidi

Nella centrale Sorgenia SpA non sono prodotti residui/rifiuti solidi rilevanti dal punto di vista radiologico.

## 1.3 Campionamenti e misure

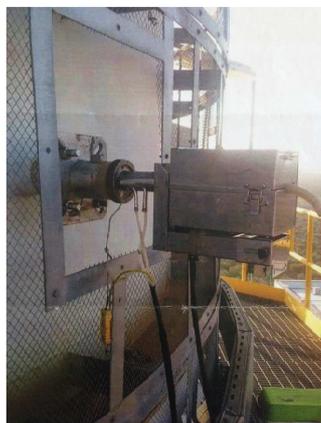
La materia prima è composta da solo gas. Dal sopralluogo effettuato non sono state individuate materie di scarto. L'unica matrice campionabile è risultata la polvere a camino, con un tasso di accumulo compreso tra [0.05 – 0.125] mg/h. Le operazioni di campionamento delle polveri a camino su filtro, sono state concluse il 17/12/2013 (con annessi dati di aspirazione e gravimetrici).

Nella tabella seguente sono riportati i risultati ottenuti da ISPRA, mediante analisi radiochimica su filtro campione.

**Tabella 1.1** – Misure radiochimiche effettuate da ISPRA su filtro di aspirazione polveri a camino

Concentrazione di radionuclidi [Bq/m <sup>3</sup> ] con incertezza estesa (k=2) su filtri di aspirazione polveri a camino campionati da ARPA-Puglia presso la centrale Sorgenia di Modugno										
Massa [mg/m <sup>3</sup> ]	Vol. [m <sup>3</sup> ]	Data Analisi	238U	234U	235U	232Th	230Th	228Th	210Po	210Pb
0.13	10,730	12/03/14	< 3,4*10 <sup>-5</sup>	< 3,4*10 <sup>-5</sup>	< 2,1*10 <sup>-5</sup>	< 3,1*10 <sup>-5</sup>	< 4,2*10 <sup>-5</sup>	< 6,2*10 <sup>-5</sup>	< 2,2*10 <sup>-4</sup>	< 3,6*10 <sup>-4</sup>

**Figura 1.4** – Stazione di campionamento delle polveri a camino (sinistra) - Immagine del camino e del punto di campionamento delle polveri (destra)



Nella Figura 1.4 sono mostrati due differenti punti di vista della posizione della stazione di campionamento delle polveri a camino.

#### 1.4 Confronto con i livelli di allontanamento/emissione (RP122 – RP135)

Per la popolazione e i lavoratori è stata fatta una stima di dose unicamente nel caso di esposizione da effluenti gassosi rilasciati in atmosfera.

Sono stati considerati i coefficienti di dose di screening (dose efficace individuale annua per unità di attività annua rilasciata) per i singoli radionuclidi (segmenti di catene o catene intere di U-238, Th-232 e U-235 – ove pertinente), riportati nella pubblicazione [2] e in particolare in Tabella 43 “Doses per unit discharge rate of 1GBq\*y-1 of atmospheric release at different effective stack heights”. Tali coefficienti sono distinti per tipo di radionuclide e per altezza efficace del camino.

I coefficienti di conversione utilizzati, all’interno della singola semiserie, tengono conto dell’equilibrio tra capostipite e discendenti di breve emivita. Nel caso di concentrazioni inferiori alle MCR (Minima Concentrazione Rilevabile) è stato considerato il valore della MCR stessa.

A partire dai risultati ottenuti, dall’analisi effettuata da ISPRA sul filtro, è stato possibile valutare la dose efficace annua complessiva tramite la seguente formula:

$$D \text{ [Sv/y]} = A_i \text{ [(Sv/y)/(GBq/y)]} * C_i \text{ [GBq/m}^3\text{]} * V_t \text{ [m}^3\text{/y]} \quad \text{Eq. 3}$$

Dove:

- “Ai” sono i coefficienti della su citata Tabella 43 [2] relativi ad una altezza efficace del camino pari a **55,0** metri (fornita dalla ditta Sorgenia SpA);
- “Ci” sono i risultati di concentrazione in Bq/m<sup>3</sup>, ottenuti tramite analisi radiochimica sui singoli radionuclidi e riportati nel paragrafo precedente;
- Vt è il volume totale annuo di gas immesso in atmosfera **3,6125E+10** m<sup>3</sup> (volume complessivo dei due camini) determinato a partire dalla portata del singolo camino pari a **2,0619E+06** Nm<sup>3</sup>/h (dati forniti dalla ditta Sorgenia SpA) e nell’ipotesi, estremamente cautelativa, che l’impianto funzioni per 24h e per 365 giorni l’anno.

Nella Tabella 1.2 sono mostrati i risultati ottenuti.

**Tabella 1.2** – Risultati di esposizione a effluenti gassosi rilasciati in atmosfera per la popolazione

	Dosi efficaci estrapolate per singolo radionuclide per esposizione a effluenti gassosi immessi in Atmosfera [uSv/y]							
	U238	U234	Th230	Ra226*	Th232**	Po210	Pb210	Totale
<i>Dose Annuia</i>	1,60E-04	1,84E-04	8,95E-04	5,04E-04	7,62E-03	3,02E-03	2,47E-03	<b>1,49E-02</b>

\* Assunto all’equilibrio con U238

\*\* All’equilibrio secolare con tutta la catena utilizzando cautelativamente la MAR del Th228

La dose efficace annua totale calcolata è al di sotto del livello di azione di 0.3 mSv/anno per la popolazione.

#### 1.5 Commenti e osservazioni

Sulla base dei risultati ottenuti, nelle ipotesi più cautelative, si può concludere che il valore di dose efficace stimato per la popolazione e per i lavoratori, a seguito di immissioni di gas in atmosfera (unico scenario possibile di esposizione) è pari a **1,49E-02** uSv/anno, circa quattro ordini di grandezza inferiore rispetto al livello di azione di 0.3 mSv/anno, fissato per la popolazione dalla normativa Italiana vigente e di 1 mSv/anno fissato per i lavoratori.

Va considerato, tuttavia, che l’attività lavorativa trattata in questo caso studio non è tra quelle incluse come soggette a disposizioni di legge nell’allegato Ibis del D.Lgs. 241/00.

---

## **1.6 Bibliografia**

- [1] - M.S. Al-Masri, Kh. Haddad, NORM emissions from heavy oil and natural gas fired power plants in Syria, *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 104, February 2012, Pages 71-74, ISSN 0265-931X, 10.1016/j.jenvrad.2011.09.008. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X11002190>
- [2] - Radiation Protection 135 "Effluent and dose control from European Union NORM industries: Assessment of current situation and proposal for a harmonized Community approach", Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003 - ISBN 92-894-6361-9.
- [3] - Radiation Protection 122 "Practical use of the concepts of clearance and exemption" - Part II "Application of the concepts of exemption and clearance to natural radiation sources", Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2002 - ISBN 92-894-3315-9.