Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

Radiazioni ionizzanti da NORM e TENORM: misure sperimentali ed analisi della dose equivalente. Radioprotezione in ambienti industriali, pubblici e residenziali



Relatore:

Candidato:

Ing. Massimo Zucchetti

Lorenzo Stancampiano

A.A. 2020/2021 Sessione di Laurea: Luglio 2021



"A lie is just a great story that someone ruined with the truth."

"I realized that I'm searching, searching for what I really want in life. And you know what?" I have absolutely no idea what that is."

"Say goodbye to all the times you felt lost, to all the times it was a No instead of a Yes, to all the scrapes and bruises, to all the heartache. Say goodbye to everything you really want to do for the last time."

"Sometimes you realize the journey you've been taking, has reached its final stop. So, the question becomes: where do you go next?"

"...And most importantly, whatever you do in this life, it's not legendary unless your friends are there to see it."

Introd	uzione	5
1. Le	egislazione	8
1.1	Radionuclidi naturali	9
1.2	Definizioni	18
1.3	Limiti	20
1.4	Livelli di allontanamento e concetto di <i>clearance</i>	22
2. N	lateriale radioattivo trattenuto in discarica	24
2.1	Classificazione rifiuti	24
2.2	Cenere volante	27
2.3	Elettrofiltro (precipitatore elettrostatico)	29
2.4	Inertizzazione	30
3. Ca	alcolo dose	32
3.1	WISE Uranium Project Calculator	33
3.2	Strumentazione	35
3.3	Modello di Calcolo	37
3.4	Cenere Volante	38
3.5	Polvere da Elettrofiltro	43
3.6	Prove sperimentali su polvere da elettrofiltro	49
3.7	Conclusioni	62
4 Ca	aso studio: controllo dei livelli di radioattività presso i locali del Politecnico di Torino	64
4.1	Introduzione alle misurazioni	65
4.2	ECOTEST - TERRA Bluetooth	66
4.3	Radium Girls	69
4.4	Misurazioni su orologi	72
4.5	Misurazioni su campioni naturali	76
4.6	Misurazioni sul campo di radioattività presso il Politecnico di Torino	80
4.7	Conclusioni	89
5 Ca	aso studio: valutazione della concentrazione di radon all'interno di un'abitazione	costruita con
calcest	truzzo contenente cenere volante	95
5.1	Radon	96
5.2	Aspetti sanitari	100
5.3	Legislazione	101
5.4	Situazione Italiana	102

Sommario

	5.5	Cemento Portland	105
	5.6	WISE Uranium in Soil and Building Material Individual Dose Calculator	110
	5.7	Modello di calcolo	112
	5.8	Conclusioni	122
I	Ringrazia	imenti	128
I	Bibliogra	fia	129

Introduzione

In questa tesi verranno esposte tre diverse problematiche connesse alla radioattività naturale, appartenenti a diversi ambiti: la prima parte si focalizzerà sulla radioattività causata da radionuclidi naturali presenti in tipologie speciali di rifiuti pericolosi depositati in discarica, provenienti da impianti termoelettrici alimentati a carbone; la seconda parte del lavoro si concentrerà sul problema della radioprotezione in ambienti indoor, relativa all'alta concentrazione di radon in abitazioni e locali commerciali, rilasciato dai materiali da costruzione utilizzati nei muri degli immobili, contenenti prodotti di recupero provenienti dall'industria termoelettrica di cui si è discusso nella sezione precedente.

Nella terza sezione di questa tesi verranno riportati i risultati di misurazioni sperimentali dei livelli di radiazione presso il Politecnico di Torino, effettuate *in situ* dal sottoscritto e dall'Ing. Massimo Zucchetti in data 21 ottobre 2020, con lo scopo di valutare il rispetto dei livelli di radioattività consentiti dalla normativa vigente all'interno dei locali della sede centrale dell'istituto.

Prima di entrare nel vivo dell'analisi, saranno introdotti una serie di concetti utili, in modo da poter prendere confidenza con gli argomenti trattati nei paragrafi successivi, e fissare dei valori di riferimento con i quali saranno confrontati i risultati delle misurazioni effettuate *in loco*.

Le radiazioni ionizzanti saranno le vere protagoniste di questa tesi. Nel **D. Lgs 101/2020**, entrato da poco in vigore, esse sono definite come "*particelle o onde elettromagnetiche pari a una lunghezza d'onda non superiore a 100 nanometri o con frequenza non inferiore a 3x1015 Hz, in grado di produrre ioni direttamente o indirettamente, interagendo con la materia.*". Le sorgenti naturali sono responsabili della maggior parte delle radiazioni ionizzanti a cui è esposta la popolazione mondiale, le quali provengono dalla crosta terrestre o da corpi cosmici esterni all'atmosfera, come mostrato nella tabella qui di seguito [1].

Source	Worldwide average annual effective dose (mSv)	Typical range (mSv)
External exposure Cosmic rays Terrestrial gamma rays	0.4 0.5	$\begin{array}{ccc} 0.3\text{-}1.0 & {}^{a} \\ 0.3\text{-}0.6 & {}^{b} \end{array}$
Internal exposure Inhalation (mainly radon) Ingestion	1.2 0.3	$\begin{array}{c} 0.2\text{-}10 ^c \\ 0.2\text{-}0.8 ^d \end{array}$
Total	2.4	1-10

Tabella 1.1: Dose media radioattività naturale per sorgente

a) range da livello del mare ad altitudini considerevoli. c) in funzione della quantità di radon accumulato indoor. d) in funzione della percentuale di radionuclidi in cibi e bevande consumati. Passando alla radioattività naturale emessa dalla crosta terrestre, i principali attori sono elementi radioattivi pesanti come uranio naturale, torio, radio ed altri elementi che si originano dal decadimento di essi. Menzione particolare va al radon, responsabile del 50% della radioattività di fondo totale.

Volendo illustrare brevemente le casistiche analizzate, per quanto riguarda lo studio sulla radioattività naturale dei rifiuti speciali, è stata effettuata una serie di rilevamenti e misurazioni *in situ* presso l'impianto di trattamento e recupero dei rifiuti, che si trova nei pressi di Orbassano, di cui è proprietaria *Ambienthesis*. Questa azienda si occupa principalmente di opere di bonifica, di smaltimento, recupero, e trattamento di rifiuti speciali, in particolare di quelli pericolosi. L'impianto ha una importanza rilevante, di livello nazionale, riuscendo a trattare fino a 500.000 t/anno.

I rifiuti che andremo a considerare fanno parte di quell'insieme di materiali denominati **NORM** e **TENORM**, due acronimi che indicano rispettivamente:

- NORM: "Naturally Occuring Radioactive Materials", materiali che potrebbero contenere radionuclidi naturali che portano il livello di radioattività ad avere valori superiori a quelli che si registrano mediamente in ambiente, senza che abbiano subito particolari lavorazioni da parte dell'uomo. Tra questi radionuclidi troviamo l'uranio, nei suoi due isotopi più famosi (²³⁸U e ²³⁵U), il torio (²³²Th), il radio (²²⁶Ra), dalla cui serie deriva l'isotopo del radon più pericoloso e famoso (²²²Rn), che sarà uno dei protagonisti nei prossimi capitoli, ed un isotopo naturale radioattivo del potassio (⁴⁰K).
- TENORM: "Technological Enhanced Naturally Occuring Radioactive Materials", materiali che presentano una concentrazione di radioattività maggiore della media delle stesse tipologie di materiali, a causa di manipolazioni o trattamenti artificiali da parte dell'uomo. I materiali che hanno questa denominazione provengono da processi industriali di diversa natura, che hanno come filo conduttore la lavorazione di materie prime che di per sé presentano valori di radioattività molto ridotti. Tra questi processi figurano: estrazione di metalli e terre rare, produzione di fertilizzanti, industria mineraria dell'uranio, estrazione di idrocarburi, produzione di materiali da costruzione, produzione di potenza termoelettrica da carbone. [2]

In particolare, gli ultimi due tra i processi elencati saranno centrali per gran parte del nostro studio. Tra i rifiuti presenti in discarica che considereremo in questa analisi, vi saranno infatti la cenere volante e la polvere da elettrofiltro, utilizzati in edilizia nella produzione di cemento Portland, per sfruttare le capacità leganti di questi residui, aventi proprietà pozzolaniche, in sostituzione ad altri materiali leganti come il clinker. Solo per il secondo tipo di rifiuto è stato possibile effettuare delle misurazioni di concentrazione, a causa delle difficoltà tecniche nel prelevare di campioni di cenere senza inalarne inavvertitamente una certa quantità, a causa della sua estrema volatilità. La seconda parte riguarderà il problema del radon. Il ²²²Rn è un gas nobile radioattivo, incolore, inodore a temperatura ambiente. Esso deriva dal decadimento del ²²⁶Ra. A sua volta il radon è un emettitore alfa, e decade in ²¹⁸Po con tempo di dimezzamento di 3,82 giorni. Il problema principale del radon deriva dalla sua inalazione, in quanto se il suo decadimento avviene durante la permanenza del gas all'interno dei polmoni, si ha un forte danneggiamento dei tessuti causato dai prodotti di decadimento dello stesso, specialmente polonio-218 e polonio-214, emettitori alfa e gamma ad alta energia. Periodi prolungati di esposizione a tali emettitori inducono il cancro ai polmoni. Il radon si accumula negli ambienti chiusi o scarsamente ventilati, specialmente nei locali interrati e quelli situati ai piani più prossimi al terreno. In tali ambienti la concentrazione può arrivare ad avere concentrazioni di oltre 500 Bq/m³. Da una stima fatta dall'ISIN (Istituto Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione) è emerso che la concentrazione media annuale di radon sia superiore a 300 Bq/m³ (valore che si vedrà essere il limite di concentrazione ammissibile, secondo le disposizioni del Decreto Legislativo di riferimento) in circa il 2% delle abitazioni italiane [3].

In questa tesi verrà modellato un edificio, costruito utilizzando cemento Portland contenente una percentuale significativa di cenere volante, con caratteristiche analoghe a quelle elencate nei paragrafi dedicati. Si ipotizzerà di costruire questo edificio in Piemonte, in provincia di Torino, località in cui i valori di concentrazione di attività media dovuti al radon sono in linea con i livelli medi nazionali di 70 Bq/m³ (cifra notevole, considerando che la concentrazione media mondiale è di 40 Bq/m³). Utilizzando appositi calcolatori, sarà possibile avere una stima del valore di radon rilasciato dalle stesse ceneri volanti, e si confronteranno i risultati ottenuti con quelli della normativa.

L'ultima parte del nostro studio parlerà delle misurazioni di radioattività effettuate in punti diversi del Politecnico di Torino, utilizzando il dosimetro-radiometro MKS-05 "TERRA". Dopo una parte introduttiva che illustrerà l'utilizzo di sostanze radioattive agli albori dell'industria dei prodotti di consumo, per conferire loro proprietà fisiche particolari, si passerà alla presentazione delle principali funzioni del radiometro, attraverso misurazioni esemplificative effettuate su diversi oggetti, naturali ed artificiali. Per questo studio è stato seguito fedelmente il protocollo adottato durante due rilevamenti analoghi effettuati presso la sede principale del Politecnico, pochi anni prima, ripercorrendo tragitti analoghi e avanzando in maniera analoga per ciò che riguarda le procedure di misurazione. Questi rilievi in situ ebbero come scopo quello di sconfessare diversi rumors circolati sui social media, sulla presenza di depositi di scorie radioattive e di macchinari a raggi X, presenti nei locali dell'istituto come cause principali del livello anomalo di dose equivalente rilevata dai principali accusatori. Infine, verranno esposti i risultati dell'analisi vera e propria, relativa alle misurazioni dei valori di radioattività in diverse aree del Politecnico di Torino. Questi risultati verranno confrontati con quelli ottenuti negli studi accennati in precedenza e con i livelli limite di riferimento, enunciati nelle normative, in modo da poter escludere situazioni di pericolo per gli occupanti dell'Istituto connesse alla presenza di radioattività proveniente da emettitori gamma dovuti all'impiego di materiali particolari.

1. Legislazione

La normativa legata all'inquinamento radioattivo è stata storicamente trattata in più leggi, che nel corso degli anni sono state modificate, integrate ed abrogate, data la natura stessa dell'argomento, molto ampio e di non facile interpretazione. Non vi era fino a qualche mese fa una legge univoca che ponesse dei limiti alle quantità di radon indoor ed alla radioattività dei materiali da costruzione, specie per le abitazioni civili.

In Italia, fino a poco prima dell'inizio della scrittura di questa tesi, la normativa che disciplinava l'ambito della radioprotezione dei lavoratori e della popolazione dal pericolo delle radiazioni ionizzanti era costituita unicamente dal D.lgs. 230/95 del 17 marzo 1995 (modificato dai decreti D.lgs. 241/2000, D.lgs. 257/2001, D.lgs. 100/2011 e D.lgs. 45/2014).

Ad oggi, grazie ad una nuova direttiva europea di riferimento (**2013/59/EURATOM**), la quale contempla tutte le principali situazioni di esposizione possibili alle radiazioni ionizzanti, intese come esposizioni *esistenti, pianificate* (mediche) e *di emergenza,* riferite sia a situazioni di esposizione professionale che di esposizione dei civili, è stato recepito un **nuovo decreto legislativo**, entrato ufficialmente in vigore il **27 agosto 2020**.

Il decreto in questione è il **D.lgs. 101/2020** del **31 luglio 2020**. Si può finalmente affermare che anche in Italia vi sia un <u>decreto unico che regola tutti gli aspetti collegati al tema delle radiazioni ionizzanti</u>, trattando nel dettaglio principi generali di protezione, definizioni, limiti, autorità competenti, problematiche connesse al radon, e regole ben precise riguardanti diversi campi di applicazione (esposizioni mediche, della popolazione, dei lavoratori, regolamenti per gli impianti nucleari, rifiuti radioattivi ecc.), le quali verranno brevemente esposte nei paragrafi seguenti. Questo decreto, trattando in maniera approfondita e completa tutti questi argomenti, è composto da 245 articoli e 35 allegati. Per non appesantire la trattazione in maniera eccessiva, verranno menzionati solamente i punti salienti di articoli e allegati utili per la nostra analisi.

Analizzando più nel dettaglio il Decreto, notiamo che nei primissimi articoli vengono elencati una serie di principi generali, atti al contenimento dell'emissione in ambiente di radiazioni ionizzanti, ancor prima di entrare nel vivo della discussione. Nel suddetto articolo, viene implicitamente introdotto uno dei concetti alla base di tutta la filiera del nucleare, che si può riassumere molto efficacemente con l'acronimo inglese *ALARA ("as low as reasonably achievable")*.

L'articolo in questione sottolinea l'importanza di giustificare e riconsiderare periodicamente ogni tipo di attività che comporti esposizione alle radiazioni ionizzanti, alla luce dei benefici derivanti da esse. Le esposizioni provocate devono essere mantenute al livello più basso possibile, considerando fattori economici e sociali. Inoltre viene stabilito l'obbligo di rimanere al di sotto dei limiti stabiliti nei paragrafi successivi del decreto. Non viene mai menzionato un valore nullo di esposizione, in quanto non sarebbe ragionevole, da un punto di vista di logica (essendo esposti in ogni situazione a livelli di radiazione naturali), e da un punto di vista economico.

1.1 Radionuclidi naturali

Nel decreto attualmente in vigore, vengono nominati principalmente tre isotopi naturali radioattivi. Essi sono l'uranio naturale (inteso come ²³⁸U), il torio naturale (²³²Th) ed il potassio (⁴⁰K), con i loro prodotti di decadimento. Oltre a questi elementi, menzione particolare merita il radon, che verrà trattato in maniera specifica nei capitoli successivi poiché, pur facendo parte della catena di decadimento della serie dell'uranio-238, rivestirà un ruolo centrale in gran parte della nostra trattazione. In questo paragrafo introdurremmo questi elementi e le loro principali caratteristiche, oltre a riportarne le rispettive serie di decadimento.

I tre elementi appena elencati sono i principali responsabili della radiazione naturale di fondo. La maggior parte delle sorgenti di questi elementi è andata diminuendo, a causa del decadimento degli stessi. L'attività di uranio-238 che si riscontra nella radiazione di fondo è la metà di quella che si sarebbe misurata in origine, durante i primi anni dalla "nascita" della Terra, a causa del tempo di dimezzamento pari a 4,5 miliardi di anni. Discorso analogo per il ²³²Th, la cui emivita è di oltre 14 miliardi di anni. Sebbene in origine non fossero i principali responsabili della radiazione di fondo, allo stato attuale lo sono diventati.

Questo perché i due principali emettitori, nei primi anni dalla formazione della Terra, hanno tempi di dimezzamento inferiori. Il potassio-40, che inizialmente era il principale responsabile di radioattività di fondo rivelabile, ora resta poco più dell'8% dell'attività originale (tempo di dimezzamento pari a circa 1.250 milioni di anni). Lo stesso vale per l'uranio-235, unico isotopo fissile presente in natura, con un'emivita di circa 700 milioni di anni.



Figura 1.1: Evoluzione del contributo dei principali radionuclidi naturali presenti nella crosta terrestre [4]

Nelle pagine seguenti si parlerà più dettagliatamente dei tre elementi introdotti. Verranno indicate proprietà fisiche e chimiche, caratteristiche, catene di dimezzamento ed interesse nei principali isotopi, concentrandoci in particolare su quelli i quali hanno un peso specifico maggiore ai fini della nostra trattazione.

Uranio

L'uranio è l'elemento chimico con simbolo U e numero atomico 92, il secondo elemento con più alto peso atomico degli elementi primordiali, più leggero solo del plutonio. È un metallo, di colore bianco-argenteo, facente parte della serie degli attinidi della tavola periodica. Naturalmente presente in basse concentrazioni nel suolo (poche parti per milione), roccia e acqua, è commercialmente estratto da minerali ricchi di uranio, come l'uraninite. L'uranio è debolmente radioattivo, tutti i suoi isotopi sono instabili (con emivita dei 6 isotopi noti, dall'uranio-233 all'uranio-238, che variano tra i 69 anni e 4,5 miliardi di anni).

Gli isotopi più comuni sono ²³⁸U (146 neutroni), il quale rappresenta circa il 99,3% dell'uranio presente in natura e ²³⁵U (143 neutroni), pari al 0,7%.

²³⁸U è l'isotopo più stabile, con una emivita di circa 4.468×10^9 anni, circa l'età della Terra, mentre ²³⁵U ha una emivita di circa $7,13 \times 10^8$ anni. Per l'uranio naturale, circa il 49% della sua radiazione alfa è emessa da ciascuno degli atomi di ²³⁸U, ed il 49% dalle emissioni di ²³⁴U (formato per decadimento a partire dal primo) e circa il 2,0% dal ²³⁵U. È solitamente un emettitore α (talvolta può subire fissione spontanea). Decade seguendo la "Serie uranio", la quale comprende 18 isotopi, ciascuno dei quali alla fine decade in ²⁰⁶Pb, passando per percorsi di decadimento differenti. ²³⁸U non è fissile, bensì fertile, in quanto tramuta in ²³⁹Pu, fissile, in seguito ad attivazione neutronica. Il nucleo dell'uranio è in grado di assorbire un neutrone per produrre l'isotopo radioattivo ²³⁹U, il quale decade per emissione beta in ²³⁹Np, anch'esso un emettitore beta, il quale a sua volta decade dopo pochi giorni in ²³⁹Pu.

²³⁹Pu ha un'importanza storica rilevante, essendo stato utilizzato come materiale fissile nella prima bomba atomica prodotta dall'uomo, fatta esplodere nel "Trinity test" del 15 luglio 1945 in New Mexico. [5]

²³⁵U è un isotopo dell'uranio che costituisce circa lo 0,72% dell'uranio naturale. Diversamente dall'uranio-238, è fissile, in grado cioè di sostenere una reazione a catena di fissione. Inoltre è l'unico isotopo fissile tra i nuclidi primordiale ad essere presente in quantità significativa in natura. La sua serie di decadimento, la "Serie Attinio", è composta da 15 membri, i quali decadono infine in piombo-207. I tassi di decadimento di questa serie di decadimento sono molto utili se usati per compiere una datazione radiometrica, il confrontando i rapporti tra genitori e discendenti. Di seguito verrà brevemente presentata la "Serie Uranio", catena di decadimento de dell'uranio-238 e gli spettri di emissione energetica caratteristici di diversi materiali contenenti questo isotopo.



Figura 1.2: Catena di decadimento uranio-238 ("Serie dell'Uranio") [6]

Nell'immagine seguente (Figura 1.3) è mostrato lo spettro tipico del decadimento dell'uranio-238, con evidenziati i picchi caratteristici di esso e degli isotopi della sua catena di decadimento. Nei minerali di uranio sono presenti tutti i principali isotopi radioattivi elencati in precedenza nella "Serie uranio", poiché nel tempo si è instaurato un equilibrio, e quindi l'attività è la medesima per tutti gli isotopi. Questo non accade negli oggetti "recenti", di produzione antropica, ottenuti partendo da uranio purificato: il tempo trascorso non è stato sufficiente perché si raggiungesse questo equilibrio. Non saranno quindi presenti alcuni picchi, tipici di isotopi che non si sono ancora formati in quantità sufficiente. Difficilmente sarà possibile ritrovare in particolare i massimi nel grafico causati dagli ultimi isotopi della progenie, (ad esempio ²²⁶Ra, ²¹⁴Pb e ²¹⁴Bi).



Figura 1.3: Spettro di emissione; uranio-238 e suoi isotopi di decadimento [7]

La linea rossa (*Uranium Ore*) corrisponde allo spettro gamma dell'uranite, un minerale di uranio. Sono evidenti i picchi gamma di tutti gli isotopi discendenti di ²³⁸U, in particolare si notano gli isotopi ²¹⁴Pb e ²¹⁴Bi che discendono dal ²²⁶Ra.

La linea verde identifica lo spettro gamma dello smalto all'uranio. Sono evidenti i foto-picchi del ²³⁴Th e dell'²³⁵U, mentre sono praticamente assenti quelli dei discendenti del ²²⁶Ra (²¹⁴Pb e ²¹⁴Bi). Il foto-picco che si trova in corrispondenza del ²²⁶Ra nello spettro gamma dello smalto all'uranio è relativo all'isotopo ²³⁵U.

Questo tipo di smalto (*Uranium Glaze*) ebbe molta popolarità a metà de secolo scorso, essendo utilizzato per donare lucentezza a molti oggetti in ceramica, di uso quotidiano, specialmente in cucina (piatti, tazzine ecc.). I Fiesta Ware, questo è il nome con cui vennero commercializzati questi prodotti, vennero prodotti dal 1936 fino al 1972. In origine venne utilizzato ossido di uranio, fino a quando nel 1943 la produzione eliminò questo additivo, che ebbe in quegli anni un uso esclusivamente bellico. All'inizio degli anni Cinquanta, l'azienda tornò ad utilizzare l'uranio, in una forma diversa da quella utilizzata in precedenza; si passò infatti all'utilizzo di uranio impoverito. [8]

Torio-232

Il torio è un elemento chimico con simbolo Th e numero atomico 90. Assieme a bismuto ed uranio, è uno dei tre elementi radioattivi presenti ancora in natura come elemento primordiale, in quantità significative. È un metallo debolmente radioattivo della serie degli attinidi, di colore argenteo, diventa nero se esposto all'aria.

Tutti i suoi isotopi noti sono instabili, sei di loro sono naturali (²²⁷Th, ²²⁸Th, ²³⁰Th, ²³¹Th, ²³²Th, e ²³⁴Th) e presentano un tempo di dimezzamento compreso tra 25,52 ore e 14.050 milioni anni. Il ²³²Th, che dispone di 142 neutroni, è l'isotopo più stabile e rappresenta quasi la totalità del torio presente in naturale. Il suo decadimento è estremamente lento (emivita di oltre 14 miliardi di anni): in seguito al primo decadimento alfa in ²²⁸Ra, ha inizio la cosiddetta "serie torio", la quale termina con il ²⁰⁸Pb.

Si stima che il torio sia presente con un'abbondanza pari a circa tre o quattro volte quella dell'uranio nella crosta terrestre, ed è principalmente raffinato da sabbie di monazite, e come un sottoprodotto di estrazione di metalli delle terre rare.

L'uso del torio nell'industria ha molte sfaccettature. In passato, esso trovava impiego come fonte di luce nelle reticelle Auer, e come elemento per creare diverse leghe metalliche. Dietro alle preoccupazioni circa la sua radioattività, questi utilizzi non ebbero seguito. Ai giorni nostri esso viene ancora ampiamente utilizzato come elemento di lega per realizzare elettrodi per la saldatura TIG (presente all'1-2%, in lega con il tungsteno). Tra le altre applicazioni è usato come materiale per l'ottica di fascia alta. [9]

Tra le ipotesi riguardo a possibili impieghi nel futuro, vi è quella secondo la quale il torio possa essere impiegato in sostituzione dell'uranio come combustibile nucleare nei reattori, a causa del suo comportamento fertile (è in grado di trasmutare in ²³³U in seguito a cattura di un neutrone termico). Tuttavia, al giorno d'oggi sono stati costruiti solamente pochi reattori che sfruttano il torio direttamente come combustibile.

Anche per quanto riguarda il torio, verrà brevemente presentata la "Serie del Torio", catena di decadimento del ²³²Th e gli spettri di emissione energetica caratteristici di diversi materiali contenenti questo isotopo.



Figura 1.4: Catena di decadimento torio-232 ("Serie del Torio) [10]

Di seguito si può notare la curva caratteristica di emissione del ²³²Th. Nel grafico riportato in basso figurano, naturalmente con il torio, i picchi caratteristici di altri elementi radioattivi della serie quali: ²²⁸Ac, ²¹²Bi, ²¹²Pb, ²⁰⁸Tl. Questi isotopi sono presenti, almeno in modo transitorio, in qualsiasi campione contenente torio naturale, che esso sia metallico, composto, o minerale. La serie termina con il ²⁰⁸Pb.

L'energia totale, rilasciata durante tutta la Serie del Torio (dal ²³²Th fino al ²⁰⁸Pb) è 42,6 MeV (se si considera anche l'energia persa tramite neutrini).



Figura 1.5: **Spettro di emissione: torio-232 e suoi isotopi di decadimento [7]** (*N.B.: a differenza del grafico precedente, la scala delle ascisse è logaritmica*)

Potassio-40

Il potassio è l'elemento chimico di numero atomico 19, con simbolo K (dall'iniziale del nome latino kalium). È un metallo alcalino tenero, bianco-argenteo, molto leggero, secondo solo al litio tra i metalli. In natura non si trova in forma pura, a causa della rapida ossidazione, bensì combinato con altri elementi. È il settimo elemento in ordine di abbondanza sulla crosta terrestre, di cui esso costituisce circa il 2,4% o 2,6% del peso. Molto reattivo, in particolar modo con l'acqua, caratteristica tipica di tutti i metalli alcalini; la loro reazione (generatrice di idruro di potassio) è talmente violenta da produrre fuoco, a causa della combustione dell'idrogeno prodotto dalla reazione altamente esotermica. Dei 17 isotopi del potassio conosciuti, solo tre sono presenti in natura: il ³⁹K (93,3%), il ⁴⁰K (0,01%) e il ⁴¹K (6,7%), gli altri sono prodotti dall'uomo.

Il ⁴⁰K, di nostro interesse, ha un tempo di dimezzamento di 1,25×10⁹ anni. Esso decade in ⁴⁰Ar (11,2%, stabile) in seguito a cattura elettronica ed emissione di positroni e in ⁴⁰Ca (88,8%, stabile) per decadimento β^- . Il decadimento in argon ha svariati interessi pratici: in campo geologico rende possibile la datazione delle rocce. Passando all'utilizzo in campo medico, la misura dell'argon prodotto da questo decadimento permette di conoscere il contenuto totale di potassio presente all'interno del corpo di un paziente.



Figura 1.6: Tipologie e rateo di decadimento del potassio-40 [11]

Il ⁴⁰K ha un'abbondanza sufficiente, rispetto al potassio normale, tale da rendere misurabile la radiazione emessa da grosse quantità di sali di potassio. Questo rende possibile il tracciamento della curva di emissione gamma tipica del potassio-40 anche effettuando l'esperimento in luoghi comuni, come nelle aule di una scuola, con sostanze facilmente reperibili in commercio.

Nella figura seguente è possibile notare il picco caratteristico del ⁴⁰K, riscontrabile a 1461 keV. Inoltre sono evidenti i picchi relativi ad altri elementi, quali Pb, Cs. Tl e Bi, caratteristici della radiazione naturale di fondo.



Figura 1.7: **Spettro di emissione: potassio-40 e radiazione di fondo [7]** (Per la misura è stato utilizzato un bicchiere di Marinelli riempito con un sale di potassio. La misura è durata diverse ore)

Ora che sono stati introdotti i principali isotopi, protagonisti della trattazione, si procede con le prime definizioni ed i limiti, contenuti nei decreti legislativi che forniscono le normative nazionali riguardanti l'emissione in ambiente di radiazioni ionizzanti, in campo civile ed industriale.

Gli articoli presenti nel decreto di riferimento saranno di fondamentale importanza, poiché permetteranno di confrontare i risultati delle prove sperimentali e delle misurazioni di attività svolte sul campo, con i valori limite stabiliti dalla legge, in maniera tale da poter escludere (o constatare) la presenza di rischi derivanti dall'esposizione della popolazione a certi materiali (per le misurazioni svolte nel sito di Ambienthesis), ed in certe zone del Politecnico di Tornio (per quanto riguarda le misurazioni svolte nei locali dell'università).

1.2 Definizioni

La parte centrale del D. Lgs 101/2020 ruota attorno alle definizioni, fornite nell'Articolo 7, facente parte del Titolo II, intitolato "*Definizioni*". Il seguente articolo prende spunto dalla direttiva 59/2013 EURATOM e dal D. Lgs 230/1995, e successive modifiche ed integrazioni. Nelle righe seguenti verranno riportate le definizioni più importanti per i nostri scopi:

- **attività** (A): $\frac{dN}{dt}$ in cui *dN* rappresenta il numero di trasformazioni nucleari spontanee di un radionuclide, che avvengono in un determinato intervallo di tempo *dt*.
- **becquerel (Bq)**: unità del sistema internazionale che identifica l'attività (A) di un radionuclide. Un becquerel individua una trasformazione al secondo. Talvolta l'attività è espressa in curie (Ci). Il fattore di conversione da utilizzare è in tal caso il seguente:

$$1 Ci = 3.7 \times 1010 Bq$$
; $1 Bq = 2.7027 \times 10^{-11} Ci$

- dose assorbita (D): dE/dm, identifica l'energia assorbita per unità di massa. Il contributo dE tiene conto dell'energia media ceduta dalle radiazioni ionizzanti ad un determinato tessuto od organo, in un volume infinitesimo contenente una massa pari a dm.
- **gray (Gy)**: unità del sistema internazionale che identifica la dose assorbita (D). $Gy = \begin{bmatrix} J \\ kg \end{bmatrix}$ Anche per la dose assorbita, talvolta capita di trovarla espressa in una unità di misura alternativa. Se ad esempio essa fosse espressa in *rad*, occorre utilizzare i seguenti fattori di conversione:

$$1 rad = 10^{-2} Gy;$$
 $1 Gy = 100 rad$

 dose equivalente (H_T): indica la dose assorbita media in un tessuto o organo T, ponderata in base al tipo ed alla qualità della radiazione nel modo indicato nei provvedimenti di applicazione. L'unità di misura è il sievert (Sv).

$$H_{T,R} = \omega_R \, D_{T,R}$$

(N.B. $D_{T,R}$ è la dose assorbita media nel tessuto o organo T dovuta alla radiazione R, ω_R è il fattore di peso per la radiazione.)

dose efficace (E): identifica la somma, nei vari tessuti o organi irradiati, delle dosi equivalenti H_T,
 ponderate nel modo indicato nei provvedimenti di applicazione. L'unità di misura è il sievert (Sv).

$$E = \sum_{T} \omega_T H_T = \sum_{T} \omega_T \sum_{R} \omega_R D_{T,R}$$

 $(\omega_T \text{ rappresenta il fattore di peso per il tessuto/organo T. I valori relativi <math>\omega_R$ ed a ω_T si trovano nell'allegato XXIV.)

- dose efficace impegnata (E(t)): identifica la somma delle dosi equivalenti impegnate nei diversi organi o tessuti $H_T(t)$, dovute dall'introduzione di uno o più radionuclidi, ciascuna moltiplicata per il fattore di peso del tessuto ω_T . L'unità di misura è anche in questo caso il sievert (Sv).

$$E(t) = \sum_{T} \omega_{T} \cdot H_{T}(t)$$

(t indica il numero di anni per i quali è effettuata l'integrazione, e vale 50 anni da assunzione per adulti e 70 anni per bambini e neonati). In Tabella 2 e 3 sono riportati i valori del coefficiente ω_T relativi ai diversi tessuti e del coefficiente ω_R relativo al fattore di ponderazione delle diverse radiazioni. [12] [13]

Tessuto	w _T
Midollo osseo (rosso)	0,12
Colon	0,12
Polmone	0,12
Stomaco	0,12
Petto	0,12
Altri tessuti (*)	0,12
Gonadi	0,08
Vescica	0,04
Esofago	0,04
Fegato	0,04
Tiroide	0,04
Superficie delle ossa	0,01
Cervello	0,01
Ghiandole salivari	0,01
Pelle	0,01

Tabella 1.2: Valori del fattore di ponderazione ω_T per i diversi organi o tessuti

Fotoni	1
Elettroni e muoni	1
Protoni e pioni carichi	2
Particelle alfa, frammenti di fissione, nuclei pesanti.	20
Neutroni	
En < 1 Mev	2,5+18,2 e ^{-[ln(En)]** 2/6}
$1 \text{ Mev} \le \text{En} \le 50 \text{ keV}$	$5,0 + 17,0 e^{-[\ln(2 \text{ En})] **2/6}$
En > 50 MeV	2,5 + 3,25 e ^{-[ln(0,04 En)]** 2/6}

Tabella 1.3: Valori del fattore di ponderazione ω_R per i diversi tipi di radiazione

- **sievert (Sv)**: unità del sistema internazionale per dose efficace e dose equivalente. Ha le stesse dimensioni del gray, ovvero energia per unità di massa. $Sv = \left[\frac{J}{ka}\right]$

Come per le due grandezze definite in precedenza, anche per quanto riguarda la dose equivalente, talvolta capita di trovare in letteratura una unità di misura differente, in questo caso il *rem*, ormai obsoleta. I fattori di conversione da utilizzare in questo caso sono i seguenti:

$$1 rem = 10^{-2} Sv;$$
 $1 Sv = 100 rem$

1.3 Limiti

Il primo documento ufficiale nazionale nel quale sono stati stabiliti in maniera specifica e dettagliata i limiti per la radioattività dei materiali contenenti nuclidi emettenti radiazioni ionizzanti, è il già menzionato Decreto Legislativo numero 241 del 26 maggio 2000. Nella successiva direttiva numero 59 emanata da EURATOM nel 2013, questi limiti vengono riproposti, con l'inserimento inoltre di alcune informazioni in più, in particolare per quanto riguarda il ⁴⁰*K*. Sempre tale direttiva europea ha influenzato i valori su cui si basa la legislazione italiana attuale, ovvero i limiti contenuti nel D. Lgs 101/2020, riportati di seguito.

Per la popolazione civile, considerata come non esposta, sono inoltre da considerare i seguenti limiti di dose:

- a) la dose efficace in un anno solare non è superiore a **1** *mSv*;
- b) fermo restando il rispetto del limite di dose efficace di cui alla lettera a), sono stabiliti i seguenti limiti di dose:
 - 1) 15 *mSv* per il cristallino;
 - 2) 50 mSv per la pelle, calcolato in media su 1 cm² di pelle, indipendentemente dalla superficie esposta;

Diversi sono invece i limiti per i lavoratori esposti e per gli apprendisti e studenti maggiorenni:

- a) **20** *mSv* di dose efficace in un anno solare;
- b) fermo restando il rispetto del limite di dose efficace di cui alla lettera a), sono stabiliti i seguenti limiti di dose:
 - 1) 20 *mSv* per il cristallino;
 - 2) 500 mSv per la pelle, calcolato in media su 1 cm² di pelle, indipendentemente dalla superficie esposta;

Per gli studenti ed apprendisti di età compresa tra i 16 ed i 18 anni da compiere, i rispettivi limiti di dose sono:

- a) 6 *mSv* di dose efficace in un anno solare;
- b) fermo restando il rispetto del limite di dose efficace di cui alla lettera a), si impongono tali limiti:
 - 1) 15 *mSv* per il cristallino;
 - 150 mSv per la pelle, calcolato in media su 1 cm² di pelle, indipendentemente dalla superficie esposta;

Per quanto riguarda le radiazioni gamma emesse da materiali da costruzione, vi è una parte dedicata, riportata al Capo IV, Articolo 29 del suddetto decreto, il quale cita testualmente al comma 1:

"Il livello di riferimento applicabile all'esposizione esterna alle radiazioni gamma emesse da materiali da costruzione in ambienti chiusi, in aggiunta all'esposizione esterna all'aperto, è fissato in 1 mSv/anno."

La radioattività e la concentrazione <u>non possono essere trascurate quando si verifichino congiuntamente</u>, per i radionuclidi costituenti le materie radioattive che dette pratiche hanno per oggetto, le condizioni seguenti, riportate nell'Allegato 1:

- a) la quantità totale di radioattività del nuclide è uguale o superiore ai valori riportati nella Tabella 1.4;
- b) la concentrazione media del radionuclide, trovata facendo il rapporto tra la quantità di radioattività emessa dal radionuclide e la massa della matrice in cui essa è contenuta, è uguale o a 1 Bq/g. Per quanto riguarda questo punto, fa eccezione il solo ${}^{40}K$.
- c) la concentrazione media di ${}^{40}K$ è uguale o superiore a 10 Bq/g.

Nella seguente Tabella 1.4 viene riportato un estratto della tabella completa reperibile nell'Allegato 1 del decreto fin qui menzionato, contenente i limiti riferiti ai nuclidi di maggiore interesse ai fini della nostra trattazione, per non appesantire la trattazione.

Radionuclide	Concentrazione media [Bq/g]	Quantità di radioattività [Bq]
- K-40	1	1*10^6
- I-131	10	1*10^6
- Cs-137	0,1	1*10^4
- Pb-210	0,01	1*10^4
- Rn-222	10	1*10^8
- Th-232	1	1*10^3
- U-238	1	1*10^3

Tabella 1.4: Limiti di concentrazione e radioattività per i nuclidi di maggiore interesse

Quando il materiale radioattivo che viene analizzato è composto da una miscela di radionuclidi, occorre intervenire ed applicare tutte le misure di intervento contenute nel decreto, quando la somma dei rapporti tra la quantità di radioattività di ciascun nuclide e quella prevista nella Tabella 1 dell'allegato 1 del decreto (da cui è stata estratta la Tabella 1.4 di questo documento) è superiore a 1.

1.4 Livelli di allontanamento e concetto di *clearance*

Questo paragrafo intende fornire le nozioni basilari sulle indicazioni che occorre seguire quando ci si trova ad affrontare il problema dei livelli di allontanamento per rifiuti radioattivi o più in generale per sorgenti radioattive o materiale radiocontaminato. Verranno illustrati i concetti di *esclusione, esenzione* e *clearance*.

Prima di dare una definizione a questi tre termini, occorre introdurne altri due, che faciliteranno la comprensione dei precedenti: essi sono gli acronimi inglesi BSS e RP. Entrambi gli acronimi sono stati introdotti per la prima volta nel 1996 dall'IAEA (International Atomic Energy Agency), agenzia fondata alla fine degli anni '50 per promuovere l'utilizzo pacifico dell'energia nucleare nel mondo e contrastare gli utilizzi militari, nel documento intitolato *"International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of the Radiation Source"*.

Qualunque pratica in cui vengano trattati materiali radioattivi richiede una giustificazione prima di procedere a smaltimento, riuso o riciclo. Il **Sistema BSS**, che sta per *"(International) Basis Safety Standards"*, definisce il <u>processo decisionale</u> secondo il quale una pratica deve essere posta nel sistema di comunicazione ed autorizzazione preventiva da parte degli organismi competenti, come prescritto dal BSS stesso, oppure se può essere considerata esente.

Alcune pratiche sono poste sotto il BSS in ogni caso, a causa dei potenziali rischi relativi alla loro radioattività, ad esempio questo accade per le pratiche associate al ciclo dei combustibili nucleari. Altre potrebbero essere esenti se le quantità dei radionuclidi, e le attività specifiche connesse, hanno valori sufficientemente bassi. Come conseguenza saranno bassi anche i rischi per la salute associati. Tali valori prendono il nome di livelli di *esenzione*.

Le guide tecniche **RP** (*"Radiation Protection"*) <u>supportano le autorità nazionali nel processo decisionale</u>, individuando e proponendo specifici limiti di concentrazione dei radionuclidi per i vari materiali al di sotto dei quali essi possono bypassare il sistema di regolazione BSS. Ad esse spetta il compito di costruire un ipotetico insieme di scenari di esposizione per ogni singola sostanza radioattiva, mettendo in relazione il contenuto di radioattività dei materiali con la dose individuale ricevuta a causa degli stessi materiali (per inalazione, ingestione, contatto diretto o irraggiamento).

In seguito a tali calcoli, vengono pubblicate delle guide RP, a seconda dei materiali e del destino che spetta ad essi (riuso, riciclo, smaltimento), e per ognuno di essi vengono riportati specifici <u>valori di esenzione o</u> <u>clearance</u>, espressi in $\left[\frac{Bq}{g}\right]$ oppure $\left[\frac{Bq}{m^2}\right]$. [14]

Senza entrare troppo nel dettaglio, volendo solamente dare una definizione ai tre concetti elencati per primi in questo paragrafo, si può stabilire un ordine, in questo caso decrescente, per *esclusione, esenzione* e *clearance.*

- Le pratiche soggette ad *esclusione* presentano livelli di esposizione difficili da sottoporre a controlli, quindi sono escluse dall'ambito dei BSS. Un esempio è quello dovuto a sorgenti naturali, il cui contributo non va sommato al totale della dose che viene confrontato con i limiti di dose.
- 2) Le pratiche soggette ad *esenzione* presentano attività e rischi conseguenti talmente bassi da essere esenti dalla regolamentazione dei BSS. Un loro inserimento nel sistema regolatorio sarebbe inefficiente e in certi casi potrebbe rivelarsi deleterio da un punto di vista economico-sociale.
- Il concetto di *clearance* ("allontanamento incontrollato") è il solo all'interno del sistema regolatorio
 BSS, e definisce le sorgenti o pratiche che possono uscire da esso poiché i rischi connessi al loro riuso,
 riciclo o smaltimento sono irrilevanti, se processati in maniera corretta.

Il materiale soggetto a *clearance* può essere considerato come se non fosse radioattivo, e può essere utilizzato senza limitazioni. Sebbene i livelli di *clearance* siano definiti in maniera univoca, <u>sono le autorità</u> <u>competenti a valutare caso per caso se applicare tali livelli</u>, valutando la pratica che dà origine al materiale contaminato. La differenza principale tra esenzione ed allontanamento incontrollato sta nel fatto che il detentore/destinatario del materiale radioattivo deve essere in grado di decidere univocamente se notificare o meno la pratica delle autorità utilizzando le regole di esenzione, mentre per l'allontanamento incontrollato, la pratica è già soggetta a comunicazione ed autorizzazione, e quindi soggetta a controllo e regolamentazione. L'ultima parola per concedere la condizione di *clearance* spetta in ogni caso alle autorità incaricate [15]. Una grande importanza è rivestita dall'uso che si intende fare dei prodotti ottenuti a partire dal materiale in esame; in base ad esso, si potrebbero incontrare più o meno ostacoli e i valori di riferimento potrebbero essere diversi. La formula che consente di verificare in maniera univoca con un semplice calcolo se la pratica, composta da un insieme specifico di materiali, può essere soggetta a *clearance* è la seguente:

Clearance Index =
$$\sum_{i=1}^{n} \frac{c_i}{c_{L_i}}$$

A numeratore vanno inserite le attività dei singoli radionuclidi presenti (in $\left[\frac{Bq}{g}\right]$ oppure in $\left[\frac{Bq}{m^2}\right]$), mentre a denominatore vi sono i corrispondenti livelli di clearance (riportati nella Tabella I-1B, *"Livelli di allontanamento per i materiali solidi"*, nell'Allegato I del D. Lgs. 101/2020. Il *Clearance Index* deve essere strettamente inferiore a 1 per poter garantire al materiale di ricevere il trattamento di <u>allontanamento incontrollato</u>. Questo vale in Italia, in molti paesi dell'Unione Europea, più in generale laddove i decreti nazionali di riferimento sono basati sulla già menzionata Diretti 59/2013/EURATOM. Un discorso diverso vale per gli Stati Uniti, dove ad esempio il riuso e riciclo di materiali da costruzione soggetti a radioattività è vincolato al solo campo delle facilities nucleari, lontane dal pubblico, o in altri campi laddove l'esposizione al pubblico è minima. Questo per non intaccare la fiducia del consumatore, che spesso associa il concetto di "pericoloso / dannoso" a quello di radioattività, sebbene essa sia ad un livello irrisorio.

2. Materiale radioattivo trattenuto in discarica

In una parte importante di questa tesi si parlerà di rifiuti definiti come *speciali/pericolosi*. Occorre approfondire questa definizione. Prima di procedere nel dettaglio con la parte dedicata ai calcoli delle dosi ed alle prove sperimentali eseguite presso *Ambienthesis*, verranno illustrate brevemente le normative in vigore in merito ai rifiuti pericolosi di nostro interesse; si parlerà delle ceneri volanti, cosa sono e quali impieghi possono avere.

Si parlerà degli elettrofiltri, di cui verranno illustrati principi di funzionamento, con un approfondimento riguardante pregi e limiti di tali macchinari. Il capitolo terminerà con un'introduzione del concetto di inertizzazione di un rifiuto, in questo caso delle ceneri volanti, raccolte negli elettrofiltri.

2.1 Classificazione rifiuti

La normativa attualmente in vigore, in materia di rifiuti contenenti radionuclidi è anche in questo caso contenuta nel **D. Lgs 101/2020**, emanato il 31 Luglio 2020 ed entrato in vigore il 27 Agosto dello stesso anno.

Nello specifico, la regolamentazione di residui di lavorazione e di materiali di scarto contenenti sorgenti di radioattività è contenuta nel Capo II del Decreto Legislativo, dal titolo "*Pratiche che comportano l'impiego di materiali contenenti radionuclidi di origine naturale*". Gli articoli centrali di tale trattazione sono rispettivamente il 20 ed il 25.

Citando testualmente l'articolo 20, esso stabilisce che le disposizioni contenute nel capo a cui fa riferimento, ovvero il capo II, si applicano:

"...alle pratiche nelle quali la presenza di sorgenti di radiazioni ionizzanti di origine naturale determina un livello di esposizione dei lavoratori o degli individui della popolazione che non può essere trascurato sia dal punto di vista della radioprotezione sia dal punto di vista dell'ambiente e che si svolgono nell'ambito dei settori industriali di cui all'allegato II, che comportano:

- a) l'uso o lo stoccaggio di materiali che contengono radionuclidi di origine naturale;
- b) la produzione di residui o di effluenti che contengono radionuclidi di origine naturale. "

L'articolo 25 del Decreto invece, ha lo scopo di classificare i rifiuti e regolamentare gli impianti di gestione di essi, ai fini del loro smaltimento in ambiente, stabilendone:

"...le condizioni di esercizio ed i requisiti tecnici minimi che tali impianti devono soddisfare per il conferimento dei residui".

Sono oggetto delle considerazioni successive i rifiuti contenenti tracce dei seguenti radionuclidi naturali, elencati nella tabella seguente, con relativi valori limite di concentrazione:

Nuclide	Concentrazione di attività [Bq/g]
Radionuclidi naturali della serie ²³⁸ U	1 Bq/g
Radionuclidi naturali della serie ²³² Th	1 Bq/g
⁴⁰ K	10 Bq/g

Tabella 2.1: Limiti di concentrazione di attività di radionuclidi naturali in elementi da costruzione

La destinazione finale di tali materiali è descritta nella tabella della sezione I dell'allegato VI, qui riassunta:

Categorie	Concentrazioni di attività [Bq/g]	Destinazione finale
Residui esenti	Valori minori o uguali a Tab 2.1	Rispetto delle disposizioni del D.Lgs 152/2006
Residui non esenti	Valori maggiori a Tab 2.1	Rispetto delle disposizioni del D.Lgs 152/2006, parte IV, in discariche ai sensi del D.Lgs 36/2003.

Tabella 2.2: Destinazione finale materiali destinati ad uso edilizio, in base ai valori misurati

Le discariche atte al contenimento dei rifiuti che superano i limiti di concentrazione di attività, e per tanto non possono esenti da allontanamento incontrollato, devono rispettare una serie di requisiti, contenuti nella sezione II dell'allegato VI. Tali requisiti non vengono riportati nel seguito, in quanto essi contribuirebbero in maniera eccessiva ad appesantire la trattazione, senza aggiungere informazioni particolarmente utili al nostro scopo. Si lascia facoltà al lettore di integrare tale omissione.

Tornando al Decreto Legislativo 101/2020, uno degli articoli a suscitare maggiore interesse, ai fini di questa trattazione, è l'Art. 29, contenuto all'interno del Capo IV, *"Radiazioni gamma emesse da materiali da costruzione"*.

In esso è stabilito, citando testualmente che:

"Il livello di riferimento applicabile all'esposizione esterna in ambienti chiusi alle radiazioni gamma emesse da materiali da costruzione, in aggiunta all'esposizione esterna all'aperto, è fissato in 1 mSv/a." L'elenco dei materiali da costruzione di cui dell'art. 29, comma 2, individuati come oggetto di attenzione è riportato nell'allegato II. Tra essi troviamo:

1) Materiali naturali:

- a) Alum-shale (cemento contenente scisti alluminosi).
- b) Materiali da costruzione o additivi di origine naturale ignea, tra cui:
 - granitoidi (quali graniti, sienite e ortogneiss);
 - porfidi;
 - tufo;
 - pozzolana;
 - lava;
 - derivati delle sabbie zirconifere;

2) Materiali che incorporano residui dalle industrie che lavorano materiali radioattivi naturali tra cui:

- ceneri volanti;
- fosfogesso;
- scorie di fosforo;
- scorie di stagno;
- fanghi rossi (residui della produzione dell'alluminio);
- residui della produzione di acciaio.

Tra i materiali elencati sono stati evidenziati in grassetto i materiali che saranno al centro dei prossimi capitoli di questa tesi: senza anticipare i contenuti di essi, si parlerà di ceneri volanti nei capitoli riguardanti le misurazioni sperimentali eseguite presso il sito di Ambienthesis, e di materiali naturalmente radioattivi, come porfido o granito, nel capitolo nel quale verrà esposto il caso studio relativo alle misurazioni di radioattività presso i locali del Politecnico di Torino.

Focalizzando l'attenzione sulla regolamentazione delle radiazioni ionizzanti provocate da materiali da costruzione, all'interno dell'Allegato II è inoltre stabilito che vengano misurate le concentrazioni di attività per tre elementi, ovvero Radon-226, Torio-232 e Potassio-40, per calcolare successivamente l'indice di concentrazione di attività *I*, presente nel materiale da costruzione in esame, utilizzando la seguente formula:

$$I = \frac{C_{226_{Ra}}}{300} + \frac{C_{232_{Th}}}{200} + \frac{C_{40_K}}{3000} \qquad \left[\frac{Bq}{kg}\right]$$

Continuando con la lettura dell'articolo 29, al punto 6 si legge che:

"Il valore dell'indice di concentrazione di attività deve essere **pari o inferiore a 1**. Qualora sia superato il livello di riferimento, il materiale non può essere utilizzato per edifici di ingegneria civile, come abitazioni ed edifici ad elevato fattore di occupazione." [16]

2.2 Cenere volante

La cenere volante, detta anche cenere di combustione, non è altro che un prodotto della combustione del carbone, solitamente polverizzato. Questo materiale in passato veniva espulso dalle caldaie insieme ai gas di combustione. Si differenzia dalla cenere pesante, che normalmente resta sul fondo del focolare delle caldaie. L'insieme delle due tipologie di residui forma la cosiddetta cenere di carbone.

I componenti della cenere volante variano a seconda della fonte e della composizione del carbone utilizzato, ma ognuna di esse presenta quantità considerevoli di biossido di silicio (SiO₂), in forma cristallina e amorfa, ossido di alluminio (Al₂O₃) e ossido di calcio (CaO). È possibile trovare tracce di elementi pesanti, fino a qualche centinaio di ppm, per elementi come arsenico, boro, cadmio, cromo, cobalto, piombo, manganese, mercurio, selenio, vanadio e via dicendo, insieme a concentrazioni ancora più esigue di diossine e poli carburi aromatici.

I vari materiali che compongono le ceneri volanti solidificano durante la fase di sospensione nel gas di scarico, e vengono raccolti dagli elettrofiltri, o precipitatori elettrostatici (di cui parleremo nel paragrafo successivo). Il processo di solidificazione è talmente rapido da far sì che si formino composti solitamente amorfi di forma sferica, di dimensioni comprese tra 0.5 e 300 μm .

A seconda della tipologia di carbone bruciato (bituminoso, sub-bituminoso, lignite), si otterranno ceneri volanti di contenuto chimico differente. Nella Tabella 5 possiamo notare la differente composizione in massa delle ceneri volanti in relazione al tipo di carbone impiegato [17].

Componente	Bituminoso	Sub-bituminoso	Lignite
<i>SiO</i> ₂ [%]	20÷60	40÷60	15÷45
<i>Al</i> ₂ <i>O</i> ₃ [%]	2÷35	20÷30	20÷25
<i>Fe</i> ₂ <i>O</i> ₃ [%]	10÷40	4÷10	4÷15
<i>CaO</i> [%]	1÷12	5÷30	15÷40
<i>LOI</i> [%]	0÷15	0÷3	0÷5

Tabella 2.3: Composizione di ceneri volanti per tipo di carbone

In passato, le ceneri volanti venivano semplicemente trascinate nei gas di combustione e rilasciate in atmosfera. Ad oggi si stima che meno dell'1% di queste ceneri (quelle che sfuggono agli elettrofiltri) subisca la stessa sorte. Il principale metodo di smaltimento della cenere volante prodotta dalle centrali elettriche nel mondo è il deposito in discariche o bacini di cenere.

Questo tipo di smaltimento presenta numerose problematiche ambientali, in quanto la cenere può eventualmente rilasciare composti tossici (si vedano ad esempio gli elementi pesanti elencati in precedenza), inquinando soprattutto le falde acquifere sotterranee per effetto della lisciviazione durante lo stoccaggio. Le discariche in questione dovrebbero essere di tipo rivestito, per impedire rilasci nel sottosuolo.

Una soluzione è quella di procedere con il riciclo delle ceneri volanti ed il loro riutilizzo in diversi ambiti (produzione di calcestruzzo, mattoni, sottofondi stradali, fertilizzanti, cosmetici, stucchi ecc). Tra qualche paragrafo verrà descritto più nel dettaglio l'utilizzo delle ceneri volanti per la produzione di calcestruzzo, utilizzando le stesse in sostituzione di altri elementi leganti, come il clinker, all'interno del cemento Portland.

Negli Stati Uniti esiste una classificazione delle ceneri volanti. I requisiti per entrare a far parte di due classi ben distinte, di seguito "Classe F" e "Classe C", sono definiti da ASTM (*"American Society for Testing and Materials"*), nel documento C618. La principale differenza tra queste classi è la quantità di calcio, ferro, alluminia e silice contenuta nella cenere volante. [118]

Le ceneri volanti di "Classe F" sono sostanzialmente quelle prodotte dalla combustione di antracite più dura e vecchia. Per poter produrre calcestruzzo a partire da questa tipologia di ceneri volanti è necessario mescolarle con un agente cementante (cemento Portland, calce idrata o viva) e acqua.

Utilizzando tipologie più giovani di carbone, come il carbone sub-bituminoso o la lignite di più recente formazione, si ottengono ceneri di "Classe C". che posseggono alcune proprietà auto-cementanti. In presenza di acqua infatti, tali ceneri si induriscono e si rafforzano nel tempo. Questo grazie alla massiccia presenza di calce (CaO). Per queste ceneri non è richiesto un attivatore.

2.3 Elettrofiltro (precipitatore elettrostatico)

Il filtro elettrostatico, spesso semplicemente definito elettrofiltro, è una delle prime tecnologie apparse durante l'industrializzazione moderna, per quanto riguarda la filtrazione dell'aria. Viene utilizzato ad esempio per rimuovere il contenuto di ceneri volanti dai gas di scarico delle caldaie a carbone. Esso sfrutta la forza di una carica elettrostatica indotta che riduce ai minimi termini il flusso di particolato fine (polvere, particelle solide) attraverso il flusso di aeriformi.

Il principale vantaggio di questo sistema consiste nel fatto che l'energia impiegata per attivare il sistema (elettricità in questo caso), che verrà descritto a breve, è applicata direttamente al particolato da rimuovere, non all'intero flusso di materia. Questo comporta un alto livello di efficienza energetica complessivo, da un punto di vista dei consumi.

Nelle righe seguenti verrà brevemente introdotto il principio di funzionamento dell'elettrofiltro a piastra, uno dei modelli più diffusi e allo stesso tempo più semplice da descrivere. Esso contiene una o più file di sottili filamenti verticali, posti in posizione frontale rispetto ad una serie di piastre metalliche piatte, anch'esse orientate verticalmente. La distanza tra una piastra e l'altra (e quindi tra un filamento e l'altro) può intercorrere tra 1 cm e 18 cm, a seconda dell'applicazione. Si genera una differenza di potenziale in corrente continua tra filamenti e piastre, con il polo negativo posto in questo caso sui filamenti (*Figura 2.1*) [19].



Figura 2.1

Questa tensione può variare da 5 KV fino a 100 KV, a seconda della tipologia di elettrofiltro. I filamenti fungono in questo caso da elettrodi, e provvedono a ionizzare le particelle, rendendole cariche ("effetto corona", in questo caso negativa).

Il flusso di fumi e ceneri volanti che scorre orizzontalmente, incontra prima i fili e poi le piastre. Si genera quindi una differenza di potenziale tra la particella e le piastre, che sono a massa. Le ceneri volanti, verranno quindi attratte dalla piastra e catturate, venendo escluse dal flusso dei fumi. La rimozione definitiva delle ceneri dal nostro sistema di filtraggio, e ciò avviene grazie a componenti separati detti percussori, che percuotono meccanicamente le zone di deposito, per far cadere le ceneri nella zona di raccolta, ovviamente posta in basso. Tale meccanismo di rimozione è detto *"metodo a secco"*. [20]

Gli elettrofiltri sono estremamente versatili, trovando un campo di applicazione molto ampio nel settore industriale (filtrazione di nebbie oleose, fumi plastici, combustione termica, filtrazione ambientale delle polveri in sospensione, ecc), ma al contempo si trovano pareri molto discordanti in merito a questa tecnologia. Per avere un elettrofiltro funzionante e performante, occorre innanzitutto dimensionarlo, installarlo ed utilizzarlo correttamente.

Per questo occorre una corretta formazione del personale, sia quello incaricato all'installazione ed assistenza, sia del personale interno alla ditta in cui si installerà il dispositivo, in modo da permetterne un corretto funzionamento ogni giorno. Inoltre, occorre mantenere un livello di tensione costante ed elevata, perché dal momento in cui essa venisse a mancare, l'azione di filtrazione risulterebbe totalmente annullata. [21]

Sul mercato si trovano filtri elettrostatici di tutte le dimensioni, performance e costi, a seconda delle funzioni che essi devono svolgere all'interno dell'industria.

2.4 Inertizzazione

In questo paragrafo verrà introdotto brevemente il concetto di inertizzazione dei rifiuti, con particolare attenzione alle ceneri volanti, trattate in precedenza. Attraverso l'inertizzazione è possibile ridurre i rischi di rilascio delle sostanze inquinanti presenti nei rifiuti trattati, rendendoli inoltre più facili da manipolare. Questo poiché i residui di processo, come la cenere volante appunto, vengono inglobati all'interno di una matrice solida, ottenuta mescolando esse con un materiale legante, come la calce o il cemento Portland. Una volta intrappolati in suddetta matrice, è più facile procedere al loro riuso o smaltimento.

L'esempio che verrà discusso più nel dettaglio di seguito è quello della produzione di calcestruzzo utilizzando la cenere volante.

Essa non possiede capacità leganti autonome, ma se mescolata con sostanze opportune, come la calce ad esempio, si comporta da legante. Le ceneri volanti vengono usate nell'edilizia per la produzione di calcestruzzo, in sostituzione al clinker presente nel cemento Portland già menzionato. In questo modo si sfruttano le proprietà pozzolaniche delle ceneri, contribuendo a migliorare la resistenza e la durabilità del calcestruzzo, sia nell'immediato (anche prima di 28 giorni dalla posa), che per tempistiche più lunghe, riducendo i fenomeni cosiddetti *di creep* che si hanno maggiormente in calcestruzzi contenenti solo cemento Portland. Questo fenomeno avviene con maggiore frequenza a causa della reazione di idratazione del cemento, che non ha luogo in calcestruzzi in cui è presente la cenere volante.

L'introduzione di ceneri condiziona inoltre la curva granulometrica del calcestruzzo, rendendola più "chiusa", minimizzandone la porosità capillare e rendendo in questo modo il prodotto finale meno permeabile all'acqua e più resistente all'attacco chimico da parte di alcali e cloruri.

Svolgendo una funzione di legante, la pasta cementizia risulterà più viscosa e maggiormente adesiva, comportando un aumento della resistenza meccanica, rendendolo meno propenso alla segregazione. Inoltre, le ceneri volanti rallentano il processo di presa nelle ore iniziali della fase di getto e posa, comportamento molto utile durante la stagione estiva o nelle costruzioni che prevedano gettate con volumi di calcestruzzo importanti. [22-23]

Le ceneri di "Classe C" introdotte in precedenza sono particolarmente adatte, mentre quelle di "Classe F" potrebbero avere effetti volatili sul contenuto di aria trascinata nel calcestruzzo, provocando una resistenza minore durante le fasi di gelo/disgelo.

Solitamente la percentuale di sostituzione in massa di cemento Portland con cenere volante è del 30%, ma sono in via di sviluppo soluzioni con una sostituzione del 50% (sono stati raggiunti valori fino al 70%, per la costruzione di una diga nel Maharashtra, in India) [24].

Oltre agli aspetti tecnici, che caratterizzano l'utilizzo di ceneri volanti in sostituzione al cemento Portland nella creazione del calcestruzzo, vi sono anche due importanti ragioni ecologiche, che permetterebbero un risparmio in termini di acqua impiegata per ogni metro cubo di calcestruzzo prodotto, e di CO₂ non emessa in ambiente. Sostituendo il cemento Portland per un 25%, si stima una diminuzione del fabbisogno d'acqua del 10%, per le proprietà pozzolaniche delle ceneri, evitando un consumo di circa 15 litri di acqua per metro cubo di calcestruzzo. Il risparmio di gas serra è dato dalla mancata produzione del cemento Portland sostituito, quantificabile in 0,8 tonnellate di CO2 per tonnellata di cemento. [25]

Una delle preoccupazioni che si cela dietro all'utilizzo della cenere volante nell'edilizia riguarda i rischi connessi alla presenza di sostanze tossiche che potrebbero sfuggire alla matrice cementizia, come arsenico, cadmio e mercurio ad esempio. Queste preoccupazioni sono azzerate dalle analisi di campioni di prodotti contenenti ceneri volanti, che generano percolati simili a quelli che si hanno per materiali ordinari, confezionati senza utilizzo di ceneri. I componenti pericolosi restano all'interno della matrice, rimanendo incapsulati, mentre altri vengono annientati subendo un processo di vulcanizzazione.

Nei paragrafi successivi, verranno seguiti entrambi i percorsi che potrebbero seguire le ceneri volanti, descritti in precedenza: l'inertizzazione precedente al loro deposito in discarica ed il loro riutilizzo per la produzione di cemento Portland.

3. Calcolo dose

I calcoli esposti in questo paragrafo hanno come scopo quello di ricavare la cosiddetta *CEDE* (*Committed Effective Dose Equivalent*), ovvero il livello di dose equivalente effettiva alla quale è esposta la popolazione. Nello specifico, verrà calcolato il livello di dose annuale alla quale sono esposti i lavoratori della discarica *Ambienthesis*, sita ad Orbassano (TO), dopo aver ottenuto la *DER* per i due rifiuti speciali di cui si è discusso in precedenza, ovvero **cenere volante** e **polvere da elettrofiltro.**

I valori riportati nell'inventario dei radionuclidi presenti nella cenere e nella polvere da elettrofiltro sono stati ottenuti grazie al lavoro di Lorenzo Di Renzo [26]. Nella sua tesi magistrale sono state infatti effettuate diverse misurazioni, su campioni di cenere volante e polvere da elettrofiltro, provenienti dalla discarica appena citata. I dati utilizzati sono stati resi disponibili dal relatore, il Professor Massimo Zucchetti. La scelta di procedere in questa maniera è stata una scelta obbligata, data dall'impossibilità di accedere come ospiti presso il sito in questione, in quanto la seguente tesi è stata redatta tra la seconda metà del 2020 e la prima metà del 2021, durante l'emergenza sanitaria dovuta al Covid-19, periodo durante il quale sono state imposte numerose limitazioni a spostamenti e agli accessi presso numerose attività normalmente aperte al pubblico.

Nonostante i dati di input coincidano con quelli ricavati dal collega Di Renzo, i codici di calcolo utilizzati saranno diversi. Per la seguente analisi verranno utilizzati diversi calcolatori facenti parte di **WISE Uranium Project**, insieme di applicativi e calcolatori online gratuiti, alcuni dei quali molto utili al nostro scopo [27].



Figura 3.1: Schermata home sito WISE Uranium Project [27]

In seguito si stimerà il numero di ore annue durante le quali un lavoratore medio della discarica potrebbe essere esposto alle radiazioni ionizzanti derivanti da tali rifiuti. Il risultato della dose annuale cumulativa ricevuta verrà confrontato con i limiti di legge. In questo modo si potrà stabilire se esiste un rischio concreto per i lavoratori di *Ambienthesis* derivante dall'esposizione ai radionuclidi presenti in questi rifiuti speciali.

3.1 WISE Uranium Project Calculator

Il valore di dose da irraggiamento esterno provocato da cenere volante e polvere da elettrofiltro viene ottenuto grazie ai calcoli effettuati dal calcolatore gratuito fornito da WISE Uranium Projects, in questo caso il calcolatore chiamato *"External Radiation Dose (Virtual Geiger Counter)"*.

The WISE Uranium Project Calculators!



Figura 3.2: Calcolatori disponibili sul sito WISE Uranium Project [27]

Grazie a questo applicativo si ricava la dose esterna causata da una sorgente gamma, sia essa puntuale o volumetrica, schermata o meno.

A partire dai dati in ingresso, i quali conterranno le informazioni riguardanti la composizione del materiale sorgente, dello strato schermante (nel nostro caso assente), della geometria di sorgente e recettore, si ricava il valore di dose oraria alla quale è esposto il bersaglio, alla distanza ipotizzata. È inoltre possibile impostare la composizione di ogni strato, sia esso sorgente di radiazioni o "schermo" contro di esse, a partire da materiali comuni o composizioni note.

Il calcolatore prende in considerazione:

- La radiazione gamma specifica per ogni radionuclide naturale o artificiale considerato.
- In caso di sorgente volumetrica, la radiazione gamma emessa dalla base superiore del cilindro.
- I contributi della dose da parte della sorgente, più quelli dai radionuclidi contenuti nel materiale di schermatura, se presente (nel nostro caso, questo strato schermante sarà assente).
- L'attenuazione della radiazione gamma attraverso strati di materiali schermanti, quando assemblati in serie (*multiple layers arrangement*). Il calcolatore usa il metodo "*point-kernel*" con fattori di accumulo.
- L'attenuazione dei raggi gamma in aria.
- La radiazione ionizzante cosmica, se considerata (nel nostro caso, non verrà considerata).

Il calcolatore non considera:

- Le radiazioni alpha, beta e raggi-X secondari (*Bremsstrahlung*) causati dalla schermatura alle radiazioni beta, e le radiazioni neutroniche.
- La percentuale di radiazione proveniente dalla superficie esterna del volumetto cilindrico.
- La radiazione proveniente da radionuclidi diversi da quelli contenuti nel database, del quale non si conoscono le energie di decadimento.
- L'attenuazione della radiazione gamma attraverso materiali usati come schermatura non contenuti nel database del programma, o composti da materiali con proprietà non contenute nel database.
 (Come detto in precedenza, non considereremo alcuna schermatura).
- L'alterazione della composizione dei radionuclidi in input causata dal loro decadimento nel tempo.
- La radiazione cosmica neutronica.

Considerando queste situazioni, il calcolatore è utile al nostro fine.

3.2 Strumentazione

Il valore del rateo di dose equivalente, misurato in nSv/h, è stato ottenuto grazie alle misurazioni effettuate con il radiometro *AT1117M* commercializzato dall'azienda *Atomtex* (Figura 3.3). Questo strumento di misurazione è progettato per rilevare il valore di dose provocato dalla radiazione gamma e da quella neutronica.

L'elemento principale di questo strumento è costituito da una sonda, la quale funge da unità di rilevamento della radiazione. Accoppiata ad essa vi è un'unità di elaborazione che emette un allarme acustico e visivo, quando il valore della radiazione misurata dovesse superare un certo limite di soglia, settato manualmente dall'utente.



Figura 3.3: Radiometro AT1117M di Atomtex

Viene riportata nella tabella seguente la scheda tecnica del misuratore [28].

AT1117M Radiation Monitor (Neutron Dosimeter)

Specifications **BDKN-03 Detection unit** Registered radiation Neutron radiation Detector ³He proportional counter in polyethylene moderator Energy range 0.025 eV - 14 MeV Measurement range of ambient radiation dose rate equivalent $0.1 \,\mu\text{Sv/h} - 10 \,\text{mSv/h}$ Measurement range of ambient radiation dose equivalent $0.1 \,\mu\text{Sv} - 10 \,\,\text{Sv}$ Typical sensitivity to neutron radiation of Pu-Be source (In dose rate measurement mode) 0.355 cps/(µSv⁻¹) $0.1 - 10^4$ neutron s⁻¹·cm⁻¹ Neutron flux density measurement range Typical sensitivity to neutron radiation of Pu-Be source 0.5 cps/(neutron·s⁻¹·cm⁻²) (In flux density measurement mode) Limit of intrinsic relative measurement error ±20% Protection rating IP64 314x220x264 mm, 8 kg Overall dimensions, weight n-radiation source n-radiation source BDKN-03 BDKN-03 Thermal, En=0.025 eV Thermal, En=0.025 eV 0.225±0.045 0.0064±0.0013 Relative sensitivity coefficients for Relative sensitivity coefficients for standard neutron radiation sources standard neutron radiation sources Ra-Be, En=100 keV Ra-Be, En=100 keV 0.81 ± 0.08 0.182 ± 0.018 with different energies for ambient with different energies for flux dose equivalent rate measurement ²⁵²Cf, En=2.13 MeV density measurement ²⁵²Cf, En=2.13 MeV 1.02±0.10 1.01±0.10 Pu-Be, En=4.16 MeV Pu-Be, En=4.16 MeV 1.0 1.0

Controls and indicators	PU2 [Version 1]	PU4 [Version 2]	
Registered radiation	Gamma radiation	Gamma radiation	
Detector	Geiger-Muller counter tube	Geiger-Muller counter tube	
Energy range	60 keV – 3 MeV	60 keV – 3 MeV	
Measurement range of ambient radiation dose rate equivalent	1 µSv/h – 10 mSv/h	1 µSv/h – 100 mSv/h	
Measurement range of ambient radiation dose equivalent	1 µSv – 1 Sv	1 µSv – 100 Sv	
Energy dependence relative to 662 keV (¹³⁷ Cs)	From -25% to +35% (In energy range from 60 keV to 3 MeV)	From -25% to +35% (In energy range from 60 keV to 3 MeV)	
Typical sensitivity to ¹³⁷ Cs gamma radiation	1.0 cps/(µSv ⁻ h ⁻¹)	0.33 cps/(µSv ⁻ h⁻¹)	
Response time for dose rate change	Up to 2 s (For dose rate change from 10 to 100 µSv/h)	Up to 7 s (For dose rate change from 10 to 100 µSv/h)	
Limit of intrinsic relative measurement error	±20%	±20%	
Protection rating	IP64	IP67	
Overall dimensions, weight	210x88x36 mm, 0.6 kg	265x90x40 mm, 0.6 kg	
AT1117M Padiation monitor: General characteristics			

Power supply - Detection unit	1) By PU2 / PU4 2) By BT-DU4 adapter	Interface - Connection of detection unit to PU2 - Connection of detection unit to PU4	RS232 Bluetooth (via BT-DU4 adapter) RS232
- PU2 / PU4 / BT-DU4	 By integrated rechargeable batteries By +12 VDC power source By 230 VAC 50 Hz power source 	Operation temperature range	-40°C to +50°C -30°C to +50°C (PU4)
Continuous operation time in case of rechargeable battery supply	24 h minimum (PU2) 8 h minimum (PU4)	Relative air humidity with temperature ≤35°C without condensation	≤95%
The radiation monitor complies with: GOST 27451-87, Safety requirements of IEC 61010-1:2010, EMC requirements of EN 55011:2009, IEC 61000-4-2:2008, IEC 61000-4-3:2008			

Figura 3.4: Radiometro AT1117M di Atomtex: scheda tecnica [28]
3.3 Modello di Calcolo

Il primo step nel quale settare tutti i parametri del nostro calcolatore è quello denominato "*Mode*". Occorre fare molta attenzione, in quanto una volta settati questi parametri, tutte le altre sezioni dipenderanno dai dati inseriti in questo punto. In caso si andassero a modificare alcuni dei parametri in questa sezione, tutte le parti a valle di questa saranno resettate. All'interno di questo step occorre inserire il numero di strati di schermatura e il tipo di sorgente; nelle librerie del programma si trovano 10 esempi, rispettivamente 4 per una sorgente puntuale e 6 per una sorgente volumetrica.

Nel secondo step ("Volume Source Material Composition") vanno definiti i valori di concentrazione dei principali nuclidi radioattivi che compongono la nostra cenere volante. Come punto di partenza, verrà utilizzata la composizione del suolo degli Stati Uniti, contenuta nel database. Per adattarla al nostro scopo, verranno modificati il valore di densità volumica del materiale e le concentrazioni dei radionuclidi che hanno un peso rilevante per il valore finale di *DER*.

Il terzo step (*"Cosmic Radiation Parameter"*) non sarà attivo, in quanto la radiazione cosmica verrà trascurata ai fini dei nostri calcoli.

Nel quarto step andranno considerati i parametri geometrici (*"Geometry Parameters"*). In questo caso useremo uno degli esempi predefiniti: *Ex. 5: Soil cover 40 CFR 192*. Questo esempio considera una superficie circolare di 1000 m² ed uno spessore della sorgente pari a 1 metro (1000 m³ di sorgente emittente). Il recettore di questo esempio è considerato distante 100 cm dalla superficie della sorgente.

Il quinto ed ultimo step ("Output Parameters") permette di impostare le diverse opzioni sui valori in uscita dai nostri calcoli.

3.4 Cenere Volante

Il primo rifiuto non pericoloso che verrà analizzato è la cenere volante, della quale si è discusso ampiamente nei capitoli precedenti. Di seguito viene riportato l'inventario dei radionuclidi presenti nella cenere volante, e dei relativi valori di attività specifica. Il valore di densità della cenere è di 550 kg/m³.

Radionuclide	Seguendo norma UNI 1165 - 2017	Attività [Bq/kg]
- ¹³⁴ Cs		< 1,2
- ¹³⁷ Cs		1,10 ± 0,59
- ²⁴¹ Am		< 3,3
- ¹⁹² lr		< 1,0
- ²³⁸ U		< 200
- ²²⁶ Ra		< 2,8
- ²¹⁰ Pb		273 ± 55
- ²³² Th		< 9,7
- ²²⁸ Ra		< 6,3
- ⁴⁰ K		1120 ± 47

Tabella 3.1: Inventario dei radionuclidi presenti nella cenere volante, con relativo valore di attività specifica

Ai fini dei nostri calcoli, non si terrà conto di tutti gli elementi elencati nella tabella 3.1, bensì solamente dei tre radionuclidi evidenziati in verde, ovvero ²³⁸U, ²¹⁰Pb e ⁴⁰K.

Questa scelta è dettata dai valori assoluti in Bq/kg di tali elementi; basta un breve sguardo alla tabella per notare che essi hanno un valore superiori di 2-3 ordini di grandezza rispetto agli altri elementi. La scelta di non considerare questi elementi non pregiudicherà in questo modo la bontà dei risultati ottenuti, mentre contribuirà a rendere rispettivamente meno macchinoso il setting del modello di calcolo ed a snellire la lista dei risultati ottenuti.

Impostazione parametri "External Radiation Dose Calculator (Virtual Geiger Calculator)"

Si procederà ora con l'inserimento dei nostri dati di input nel calcolatore fornito da *wise-uranium.org*. Questo applicativo fornisce, come detto in precedenza diversi set di dati preimpostati, molto utili come punto di partenza per i nostri scopi. In altri casi sarà necessario inserire i nostri dati così come sono, senza sfruttare scenari di default presenti negli archivi del programma. Un esempio di questo tipo di setting si ritrova nel primo blocco di istruzioni da fornire al calcolatore, quello denominato *"Mode"*, del quale si è discusso nel paragrafo precedente, nel quale non sceglieremo un esempio preimpostato, ma setteremo il numero di strati schermanti pari a 0 e la sorgente considerata sarà di tipo volumetrico. Nella colonna a destra non sarà necessario selezionare alcun esempio fornito dal programma.

Mode <u>help</u> ⊨					
Select here before any other entry! (Selection resets all other parameters)		Example data sets			
Number of Shield layers:	O Point Source	Ex. 1Shielding in free airEx. 248Y Cylinder with Heels from UF6_natEx. 330B Cylinder with Heels from UF6_enrEx. 4DU bullet buried in soil			
 0 1 2 3 4 	Volume Source	Ex. 5Soil cover 40 CFR 192Ex. 6Soil cover for uranium mill tailingsEx. 748Y Cylinder with UF6_natEx. 830B Cylinder with UF6_enrEx. 9Reprocessed uranium storageEx. 10Depleted uranium storage			

Figura 3.5: Impostazione parametri sezione "Mode"; cenere volante

Nel passaggio successivo, cardine nella stesura del nostro modello, occorre esplicitare la composizione delle nostre ceneri volanti, elencando la percentuale di elementi contenuta in esse. In questo caso, si partirà come detto in precedenza dalla composizione del suolo degli Stati Uniti, contenuta nel database del nostro programma. Sarà quindi necessario integrare ad essi i valori salienti, evidenziati in tabella 3.1, oltre a modificare il valore di densità, nel nostro caso pari a 550 kg/m³. Il risultato è il seguente:

NORMAL	Vo Vo	lume S	ource Ma	terial C	omposit	ion [RESET	HELP =
Select Source Material, or enter individual concentrations below								
0.55 rho _{so} - Source density [g/cm ³]								
Element / Nuclide	IMPO	RT	Element / Nuclide			Element / Nuclide		
Th-232++	9.3e-4	wt_% 🗸	Р	4.300e-2	wt_% 🗸	Ва	5.800e-2	wt_% 🗸
U_nat++	0.2	Bq/g 🌖	Na	1.200	wt_% 🗸	Mn	5.500e-2	₩ <u>*</u> %
0	49.00	[wt_% ✔	Mg	9.000e-1	wt_% 🗸	K-40	1.167	Bq/g 🗸
Si	31.00	wt_% 🗸	Ti	2.900e-1	wt_%	Pb-210	0.328	Bq/g 🖌
Fe	2.600	wt_% 🗸	N	2.000e-1	wt_% ✔	Cs-137	1.69e-3	Bq/g 🗸
С	2.500	wt_% 🗸	S	1.600e-1	wt_%	Ra-228	6.3e-3	Bq/g 🖌
Са	2.400	wt_% 🗸	F	9.500e-2	wt_% 🗸	Am-241	3.3e-3	Bq/g 🛩

Figura 3.6: Impostazione parametri sezione "Volume Source Material Composition"; cenere volante

Occorre notare che gli elementi che si trovano in questa lista poiché facenti parte dell'inventario della composizione del terreno degli USA, presa come punto di partenza, hanno come unità di misura la loro percentuale in peso, mentre gli elementi inseriti da noi hanno la quantità di Bq/g, ottenuta trasformando i valori in tabella (in Bq/kg). A titolo di comparazione si è scelto di inserire anche tre radionuclidi presenti in quantità minori nell'inventario della cenere volante, contrariamente a quanto detto in precedenza, proprio per mostrare quanto sia irrilevante il loro peso in quanto a *DER* emessa ai fini della nostra trattazione.

Il terzo step risulterà non attivo, riguardando la radiazione cosmica. Tuttavia inseriremo comunque i parametri di altitudine e latitudine, identificativi di Torino.

Layer OFF V Cosmic Radiation Parameters RESET IIIELP						
400	Altitude [m above sea level]	• Outdoor				
45	Latitude [°]	O Indoor: 0.8 Shield	ing factor			

Figura 3.7: Impostazione parametri sezione "Cosmic Radiation Parameters"; cenere volante

Per quanto riguarda i parametri geometrici, verrà mantenuta la configurazione dell'esempio *5: Soil cover 40 CFR 192,* andando a modificare solamente la distanza dal recettore. Per la nostra analisi, essa passerà da 100 cm a 90 cm. Questo valore esprime la distanza del "baricentro" di un lavoratore della centrale, ipotizzando che esso sia alto 180 cm. In questo modo considereremo il lavoratore come un recettore puntuale.

Ex. 1 Ex. 2	2 Ex. 3 Ex. 4 Ex. 5 Ex. 6 Ex. 7 Ex. 8	B Ex. 9 Ex.	10 Geometry Parameters RESET HELP
	y - Distance of receptor from x-axis [cm]	- or - 90	b - Distance of receptor from shield rear surface [cm]
100	x - Horizontal displacement of receptor [cm] d - Source depth [cm]		
1784.124	r - Source radius [cm]	- or - 1000	sa - Source surface area [m ²]
20 5	integration step width [cm] integration step height [cm]		

Figura 3.8: Impostazione parametri sezione "Geometry Parameters"; cenere volante

Nell'ultimo step occorre impostare i parametri di output desiderati. Come mostrato in figura, il valore del *dose-rate* andrà impostato in Sv/h, il recettore sarà *"Tissue, Soft (ICRU-44)"*, il quale riporta i valori medi di attenuazione per l'insieme dei tessuti, pesando i contributi dei diversi organi e tessuti [29].

Output Parameters RESET HELP						
Dose Options	Graph Detail	Result Detail				
Sv/h Dose Rate Unit continuous Exposure for annual dose rates Tissue, Soft (ICRU-44) Receptor material Terrestrial gamma dose coeff. in air [Sv/Gy] Use buildup factors for: Source: auto select 	 Show total situation Show integration grid Show dose color map: 100 x Raster width [pixel] 100 y Raster width [pixel] Logarithmic color scale: 	Dose from each layer: by Components ✓				

Figura 3.9: Impostazione parametri sezione "Output Parameters"; cenere volante

L'ultima impostazione da modificare, lasciando inalterate quelle predefinite contenute nella sezione "Graph Detail", è quella riguardante la dose ricevuta, da mostrare a schermo divisa per componenti ("by Components"), in modo da ottenere nel dettaglio l'impatto di ogni singolo radionuclide sul valore totale di dose rate emesso.

Risultati

Di seguito vengono riportati i risultati ricavati dal nostro calcolatore.



Figura 3.10: Risultati: DER a cui è esposto lavoratore distante 90 cm dal deposito di cenere volante

x=0 cm y=	=90 cm	b=90 cm	r=1784 cm	
SRC: d=100 cm REC: Tiss_sft, 1	(mixture) N L Sv/Gy	/_so =1000 m3	rho_so =0.55 g/cm3	M_so =550 t
Integration: step	o width=20 cm,	, step height=5	Cm	
Contribution from	n radionuclide	es in Volume Sou:	rce:	
Th-232++:	27.14 nSv/h			
U_nat++:	52.10 nSv/h			
K-40:	54.68 nSv/h			
Pb-210:	28.93 pSv/h			
Cs-137:	0 Sv/h			
Ra-228:	881.3e-57 Sv	v/h		
Am-241:	5.549 pSv/h			
Source Total:	133.9 nSv/h	(100%)		
Grand Total:	133.9 nSv/h	(100%)		

Conclusioni

Dai risultati ottenuti ne consegue che un lavoratore, nella condizione peggiore di esposizione, ovvero quella in cui esso si trovi esattamente in corrispondenza di un deposito di una quantità pari a 1000 m³ di cenere volante, senza alcun tipo di schermatura, riceve nel suo baricentro una dose equivalente di circa 134 nSv/h.

Considerando una permanenza media in tale luogo della discarica di 1 ora alla settimana, vorrebbe dire che un lavoratore medio della discarica trascorre un totale di circa 52 ore all'anno nei pressi di tale deposito.

Moltiplicando il rateo di dose equivalente per il totale di ore annuali si ottiene quanto segue:

Annual Equivalent Dose = DER
$$*\frac{h}{y}$$
 = 0,134 $*$ 52 = 6,968 μ Sv/y

Ricordando il valore limite di dose effettiva ricevuta per un lavoratore considerato "non esposto", pari a 1 mSv/anno, possiamo affermare che i valori ottenuti per la cenere volante sono tali da raccomandare una presenza non prolungata in discarica, essendo la massima dose calcolata comunque inferiore di circa due/tre ordini di grandezza rispetto al limite di rischio accettabile.

Occorre comunque sottolineare che è stato applicato uno scenario molto conservativo, ovvero quello di un lavoratore che trascorre un'ora a settimana in piedi esattamente al di sopra del deposito di cenere volante, senza schermatura alcuna. I valori di DER ottenuti saranno in ogni caso inferiori in quanto:

- La permanenza del lavoratore in luoghi limitrofi al deposito, tali da avere il proprio baricentro ad una distanza di 90 cm dalla sorgente sarà quasi certamente inferiore, in termini di ore/anno
- Viceversa, una distanza realistica dalla sorgente volumetrica di radiazioni alla quale un lavoratore si potrebbe trovare, per un periodo di tempo comparabile a quello ipotizzato nei calcoli (50 ore/anno circa) sarebbe quasi certamente maggiore di 90 cm dal suo baricentro
- Nel nostro scenario non è stata considerata alcuna schermatura, la quale contribuirebbe in certamente a decrementare il valore di DER

Possiamo concludere che non vi sono rischi considerevoli provocati dalle radiazioni ionizzanti per i lavoratori della discarica, derivanti dal deposito delle ceneri volanti. Occorre in ogni caso raccomandare una presenza non prolungata, e procedere correttamente all'inertizzazione di questi elementi, in modo da prevenire il rilascio in ambiente dei materiali pericolosi, i quali andrebbero ad inquinare l'aria e le acque nei pressi dei depositi, problema di cui si è discusso nei paragrafi precedenti.

3.5 Polvere da Elettrofiltro

Il secondo prodotto sul quale verranno effettuate le misurazioni è la polvere da elettrofiltro. Per questo rifiuto, i dati di ingresso a nostra disposizione avranno formati ed origini diverse. Questo viene molto utile al nostro scopo, in quanto sarà possibile confrontare tra loro i risultati provenienti da campioni diversi ed aventi come input dati di diverso formato. Saranno disponibili misurazioni sulla quantità di Bq/kg, suddivisi per radionuclide "di provenienza" e valori di nSv/h, misurati dal radiometro *AT1117M* di *Atomex*, di proprietà di *Ambienthesis*.

In prima battuta verranno effettuati calcoli analoghi a quelli svolti nel paragrafo precedente per la cenere volante, utilizzando l'applicativo *"External Radiation Dose Calculator (Virtual Geiger Calculator)"*.

Di seguito viene riportato l'inventario dei radionuclidi responsabili delle radiazioni emesse dalla polvere da elettrofiltro. Questa tabella è fornita da Ambienthesis, i valori contenuti in essa si riferiscono ad analisi effettuate in precedenza su diversi campioni di polvere da elettrofiltro.

Americio 241	< RL	Bq/kg
Attinio 228	< RL	Bq/kg
Berillio 7	< RL	Bq/kg
Bismuto 211	< RL	Bg/kg
Bismuto 212	< RL	Bg/kg
Bismuto 214	< RL	Bg/kg
Cesio 134	< RL	Bg/kg
Cesio 137	< RL	Ba/kg
lodio 131	< RL	Ba/kg
Mercurio 203	< RL	Bq/kg
Piombo 210	< RL	Bq/kg
Piombo 212	< RL	Bg/kg
Piombo 214	< RL	Bg/kg
Potassio 40	2 100±310	Bg/kg
Protoattinio 234 metastabile	< RL	Bq/kg
Radio 226	< RL	Bq/kg
Radio 228	< RL	Bq/kg
Tallio 208	< RL	Bq/kg
Torio 231	< RL	Bq/kg
Torio 232	< RL	Bq/kg
Torio 234	< RL	Bq/kg
Uranio 235	< RL	Bq/kg

Tabella 3.2: Inventario radionuclidi presenti nella polvere da elettrofiltro e relativo valore di attività specifica (Dati Ambienthesis) Come si può notare, l'attività radioattiva è causata principalmente dal decadimento del ⁴⁰K. Vi è un certo range di incertezza nella misura del valore in Bq/kg; verrà utilizzato il valore più elevato di attività massica, in modo tale da ottenere il valore di *Dose Equivalent Rate* nel caso peggiore possibile, procedendo in modo conservativo.

Impostazione parametri "External Radiation Dose Calculator (Virtual Geiger Calculator)"

Anche per la polvere da elettrofiltro, si procede con l'inserimento dei nostri dati di input nel calcolatore fornito da *wise-uranium.org*.

Non ci soffermeremo troppo su diversi blocchi di istruzioni da fornire al calcolatore, essendo la procedura molto simile a quella di cui si è discusso in precedenza, ed essendo analoghi le tipologie di sorgente (volumetrica) e recettore (approssimato a puntuale). In questi casi ci si limita a riportare le schermate dei vari step, senza appesantire troppo la trattazione. Al contrario, si entrerà più nel dettaglio laddove necessario, soprattutto per quanto riguarda la composizione del materiale sorgente.

Nel primo step, denominato "Mode", la sorgente sarà anche in questo caso volumetrica, e non vi saranno schermature.

	Mode <u>help</u> ⊨				
Select here before any other entry! (Selection resets all other parameters)		Example data sets			
Number of Shield layers:	O Point Source	Ex. 1Shielding in free airEx. 248Y Cylinder with Heels from UF6_natEx. 330B Cylinder with Heels from UF6_enrEx. 4DU bullet buried in soil			
 0 1 2 3 4 	• Volume Source	Ex. 5Soil cover 40 CFR 192Ex. 6Soil cover for uranium mill tailingsEx. 748Y Cylinder with UF6_natEx. 830B Cylinder with UF6_enrEx. 9Reprocessed uranium storageEx. 10Depleted uranium storage			

Figura 3.11: Impostazione parametri sezione "Mode"; polvere da elettrofiltro

Per il secondo step, "Volume *Source Material Composition*", occorre esplicitare la composizione degli elementi che compongono la polvere da elettrofiltro, elencando la percentuale di elementi contenuta in essa.

Anche per questo materiale, si partirà dalla composizione del suolo degli Stati Uniti, contenuta nel database del nostro programma.

L'unico valore saliente, come si può ben notare in tabella 3.2, riguarda il ⁴⁰K, il quale andrà aggiunto alla composizione di default *"US Soil"*. Infine, il valore di densità sarà anche per la polvere da elettrofiltro pari a 550 kg/m³.

Il risultato è il seguente:

NORMAL	▼ Vo	lume S	ource Ma	terial Co	omposi	tion	RESET	HELP =
-	Select Source Material, or enter individual concentrations below							
	0.55 rho _{so} - Source density [g/cm ³]							
Element / Nuclide	IMPO	RT	Element / Nuclide			Element / Nuclide		
Th-232++	9.400e-4	wt_% 🗸	K-40	2.41	Bq/g 🏏	Ва	5.800e-2	wt_% 🗸
U_nat++	2.700e-4	wt_% 🗸	Na	1.200	wt_% 🗸	Mn	5.500e-2	wt_% 🗸
0	49.00	wt_% 🗸	Mg	9.000e-1	wt_% 🗸	Р	4.300e-2	wt_% 🗸
Si	31.00	wt_% 🗸	Ti	2.900e-1	wt_% 🗸			wt_% 🗸
Fe	2.600	wt_% 🗸	N	2.000e-1	wt_% 🗸			wt_% 🗸
С	2.500	wt_% 🗸	S	1.600e-1	wt_% 🗸			wt_% 🗸
Са	2.400	wt_% 🗸	F	9.500e-2	wt_% 🗸			wt_% 🗸

Figura 3.12: Impostazione parametri sezione "Volume Source Material Composition"; polvere da elettrofiltro

Come detto in precedenza, il terzo step risulterà non attivo, riguardando la radiazione cosmica. Tuttavia inseriremo comunque i parametri di altitudine e latitudine, identificativi di Torino.

Layer OFF V Cosmic Radiation Parameters RESET HELP					
400	Altitude [m above sea level]	• Outdoor			
45	Latitude [°]	O Indoor: 0.8 Shield	ing factor		

Figura 3.13: Impostazione parametri sezione "Cosmic Radiation"; polvere da elettrofiltro

Discorso analogo per quanto riguarda i parametri geometrici, verrà mantenuta la configurazione dell'esempio *5: Soil cover 40 CFR 192*, con la differenza che la distanza per questa analisi passerà da 100 cm a 1 cm. Questo valore esprime la distanza di "contatto", che intercorre tra il misuratore di *Atomex* e il campione di polvere da elettrofiltro. Allo stesso modo, si avrà un recettore puntuale di contatto, che potrebbe rappresentare, ad esempio, i piedi di un lavoratore che si trovi nelle immediate vicinanze del deposito delle polveri. Anche in questo caso, l'ipotesi adottata è molto surreale, poco probabile, essendo le distanze molto ristrette e non essendo presente schermatura alcuna.

Ex. 1 Ex. 2 Ex. 3 Ex. 4 Ex. 5 Ex. 6 Ex. 7	Ex. 8 Ex. 9 Ex. 10 Geometry Parameters RESET
y - Distance of receptor from x-axis [cm]	- or - 1 b - Distance of receptor from shield rear surface [cm]
x - Horizontal displacement of receptor [cm] 100 d - Source depth [cm]	
1784.124 r - Source radius [cm]	- or - 1000 sa - Source surface area [m ²]
20 integration step width [cm] 5 integration step height [cm]	

Figura 3.14: Impostazione parametri sezione "Geometry"; polvere da elettrofiltro

Nell'ultimo step i parametri di output desiderati saranno coincidenti con quelli impostati per la cenere volante. Il valore del *dose-rate* andrà impostato in Sv/h, il recettore sarà *"Tissue, Soft (ICRU-44)"*.

La dose ricevuta, sarà da mostrare divisa per componenti (*"by Components"*), in modo da ottenere nel dettaglio l'impatto di ogni singolo radionuclide sul valore totale di dose rate emesso.

Output Parame	ters RESET <u>HELP</u>	
Dose Options	Graph Detail	Result Detail
Sv/h ▼ Dose Rate Unit continuous ▼ Exposure for annual dose rates Tissue, Soft (ICRU-44) ▼ Receptor material 1 Terrestrial gamma dose coeff. in air [Sv/Gy] ✓ Use buildup factors for: Source: auto select	 Show total situation Show integration grid Show dose color map: 100 x Raster width [pixel] 100 y Raster width [pixel] Logarithmic color scale: 	Dose from each layer: by Components ➤

Figura 3.15: Impostazione parametri sezione "Output"; polvere da elettrofiltro

Risultati

Di seguito vengono riportati i risultati ricavati dal nostro calcolatore per quanto riguarda la polvere da elettrofiltro.



Figura 3.16: Risultati: DER a cui è esposto lavoratore ad 1 cm di distanza dal deposito di polvere da elettrofiltro

x=0 cm y=1 cm b=1 cm r=1784 cm SRC: d=100 cm (mixture) V_so =1000 m3 rho_so =0.55 g/cm3 M_so =550 t REC: Tiss_sft, 1 Sv/Gy Integration: step width=20 cm, step height=5 cm ------Contribution from radionuclides in Volume Source: Th-232++: 29.85 nSv/h U_nat++: 19.35 nSv/h K-40: 122.4 nSv/h Source Total: 171.6 nSv/h (100.0%) -------Grand Total: 171.6 nSv/h (100%)

Conclusioni

In questo caso, si scopre che nella condizione peggiore di esposizione, ovvero quella in cui il lavoratore della discarica si trovi esattamente in corrispondenza di un deposito di una quantità pari a 1000 m³ di polvere da elettrofiltro, senza alcun tipo di schermatura, egli riceve ad una distanza prossima a quella di contatto con il materiale in questione una dose equivalente di circa **172 nSv/h**.

Se si considera anche in questo caso una permanenza media in tale luogo della discarica di 1 ora alla settimana, vorrebbe dire che un lavoratore medio della discarica trascorre un totale di circa 52 ore all'anno nei pressi di tale deposito. Moltiplicando il rateo di dose equivalente per il totale di ore annuali si ottiene quanto segue: Annual Equivalent Dose = $DER * \frac{h}{v} = 0,172 * 52 = 8,944 \mu Sv/y$

Ricordando il limite di legge per la dose ricevuta da un lavoratore (considerato *non esposto*) è pari a 1 mSv/anno, possiamo affermare che i valori annui ottenuti per la polvere da elettrofiltro sono tali da raccomandare una presenza non prolungata in discarica, essendo la massima dose calcolata comunque inferiore di oltre due ordini di grandezza rispetto al limite di rischio accettabile.

Come detto in precedenza commentando i risultati ottenuti per la cenere volante, va evidenziato che è stato applicato uno scenario molto conservativo, ovvero quello di un lavoratore che trascorre un'ora a settimana nelle strette vicinanze del deposito di cenere volante, senza schermatura alcuna. I valori di DER ottenuti saranno in ogni caso inferiori in quanto:

- La permanenza del lavoratore in luoghi limitrofi al deposito, tali da avere un punto di contatto (verosimilmente le piante dei piedi) ad una distanza di 1 cm dalla sorgente sarà quasi certamente inferiore, in termini di ore/anno, se non addirittura nulla.

È opportuno infatti ricordare l'estrema volatilità della polvere da elettrofiltro, la quale sarà stoccata in modo da evitare la sua dispersione in atmosfera o la lisciviazione, dovuta alla presenza eventuale di acque di falda o di altra provenienza.

- Più verosimilmente, una distanza realistica dalla sorgente volumetrica di radiazioni alla quale un lavoratore si troverà, per un periodo di tempo comparabile a quello ipotizzato nei calcoli (50 ore/anno circa) sarà quasi certamente maggiore di 1 cm.
- Nel nostro scenario non è stata considerata alcuna schermatura, la quale contribuirebbe di certo a decrementare il valore di DER. Volendo rimarcare la volatilità di questo materiale, è molto probabile che vi sia un qualsivoglia contenitore, atto a confinare tale materiale per impedirne quantomeno il rilascio accidentale in ambiente.

Possiamo concludere che non vi sono rischi considerevoli provocati dalle radiazioni ionizzanti per i lavoratori della discarica, derivanti dal deposito della polvere di elettrofiltro. Occorre in ogni caso raccomandare una presenza non prolungata nei pressi di questi elementi.

3.6 Prove sperimentali su polvere da elettrofiltro

Nel capitolo che segue verranno effettuate simulazioni analoghe a quelle viste nel paragrafo precedente. A differenza dei test eseguiti poco fa, per queste prove i dati di input proverranno da misurazioni sperimentali, eseguite circa un anno fa dal collega Di Renzo. Questa scelta è forzata, a causa dell'impossibilità nell'eseguire misurazioni analoghe dal vivo. Si ricorda che questa tesi è stata scritta durante il periodo della pandemia da Covid-19, rendendo di fatto impossibile l'accesso al pubblico nelle aree di stoccaggio della discarica *Ambienthesis* di Orbassano.

I dati di ingresso, ottenuti dal collega [26], sono stati gentilmente forniti dal Professor Massimo Zucchetti, relatore di questa tesi, e dal Centro di Radioprotezione di *FCA* (ora *Stellantis*), i quali hanno analizzato i campioni prelevati di cui si parlerà a breve. Inoltre essi hanno reso disponibili diversi diagrammi nei quali sono riportati gli spettri di emissione di diversi materiali.

I risultati di queste misurazioni sperimentali, effettuate presso l'impianto di trattamento e recupero rifiuti di proprietà di *Ambienthesis*, sito ad Orbassano, sono stati ottenuti utilizzando il radiometro *AT1117M* di *Atomtex*.

Dose Equivalent Rate da 4 bags di polvere da elettrofiltro (input: valori misurati sul campo)

Questi rilevamenti, hanno restituito la *Dose Equivalent Rate* proveniente da quattro diversi bags, contenenti polvere da elettrofiltro appena scaricata. I valori sono riportati nella tabella seguente:

Bag	Dose [nSv/h]
1	90
2	94
3	92
4	90

Tabella 3.3: Riassunto valori di Dose Equivalent Rate misurata su quattro bags di polvere da elettrofiltro appena scaricata

Questi valori risultano essere pari a circa il doppio del valore rilevato dalle misurazioni effettuate sul terreno nei pressi della discarica di Ambienthesis, pari a circa 55 nSv/h.

Stimando un numero di ore settimanali che un impiegato dell'impianto potrebbe trascorrere nei pressi del deposito di polvere da elettrofiltro, si può procedere eseguendo un calcolo analogo a quello svolto nei paragrafi precedenti; ipotizzando anche questo caso che un operaio spenda in media un tempo effettivo di un'ora a settimana in corrispondenza del rifiuto, si ottiene la dose seguente:

Annual Equivalent Dose = DER
$$*\frac{h}{y}$$
 = 0,094 $*$ 52 = 4,888 μ Sv/y

Si ricorda il valore limite pari a 1 mSv/anno, al di sotto del quale è lecito considerare la pratica priva di rilevanza radiologica. Essendo la dose calcolata inferiore di più di tre ordini di grandezza rispetto al limite minimo, possiamo affermare che i valori ottenuti sperimentalmente per i seguenti campioni di la polvere da elettrofiltro sono tali da garantire un certo livello di sicurezza, tale da non esporre i lavoratori a livelli di radiazioni ionizzanti notevoli. Detto questo è consigliabile raccomandare una presenza non prolungata nei pressi del deposito, in quanto i livelli di dose oraria ricevuta sono comunque circa doppi rispetto al valore standard, causato dalla radiazione naturale.

Dose Equivalent Rate da 8 campioni (input: spettro radioattivo rilevato da FCA)

Il secondo dato di input relativo alla polvere da elettrofiltro che analizzeremo proviene da test di laboratorio effettuati da FCA su 8 campioni di polvere da elettrofiltro, contenenti 1 kg di polvere da elettrofiltro ciascuno.

Il materiale contenuto in ogni campione è stato prelevato direttamente in discarica, e successivamente imballato utilizzando barattoli di polipropilene. Successivamente, ogni campione è stato inviato ai laboratori di radioprotezione di FCA, in modo da ottenerne lo spettro di attività radioattiva. Analizzando lo spettro di attività radioattiva, è possibile identificare quali siano gli elementi radioattivi presenti, ed in quali misura siano essi responsabili del comportamento emissivo. I valori ottenuti avranno come unità di misura i Bq/kg.

I risultati delle prove di laboratorio sono le seguenti:
--

Campione	Concentrazione di
	Attività [Bq/kg]
1	302
2	148
3	269
4	356
5	201
6	116
7	247
8	227

Tabella 3.4: Concentrazione di attività degli 8 campioni di polvere da elettrofiltro (Valori da analisi FCA)

Nella figura 3.17 riportata qua di seguito è possibile vedere parte dello spettro di emissione di uno dei campioni analizzati. I picchi caratteristici evidenziati in questa porzione di spettro sono quelli tipici della radiazione naturale di fondo. Guardando il grafico da vicino, è possibile ritrovare i valori salienti di energia alla quale emettono i diversi isotopi, elencati nei paragrafi precedenti. Volendoli riassumere brevemente, ricordiamo:

- Th-234: picchi a 63 e 92 keV.
- U-235: picco a 185 keV.
- Th-232: picco a 239 keV (da Pb-212), picco a 511 keV (da Tl-208).
- Rn-222: picco a 295 e 351 keV (da Pb-214).



Figura 3.17: Spettro di emissione di un campione di polvere da elettrofiltro (da analisi FCA)

Altri picchi tipici di cui si è discusso nei capitoli precedenti, ad energie più elevate, non si possono riscontrare in questo grafico, in quanto non viene riportato lo spettro al di sopra dei 512 keV, come ad esempio il picco caratteristico del potassio-40, che si manifesta ad un livello energetico di 1461 keV.

Considerando che il livello di *DER* complessivo misurato per quanto riguarda la polvere da elettrofiltro ha un valore all'incirca doppio rispetto a quello rilevato nel terreno in condizioni normali, nei pressi della discarica, è facile comprendere come non siano gli elementi sopracitati (uranio, torio e radio) ad essere i responsabili dell'attività anomala della polvere da elettrofiltro.

Il Centro di Radioprotezione di FCA ha gentilmente reso disponibili due grafici analoghi, i quali forniscono i risultati di prove analoghe effettuate su due materiali differenti. Questi due materiali possono essere considerati come due "estremi". Il primo grafico infatti rappresenta la radioattività naturale di fondo. [7][26]



Figura 3.18: **Spettro di emissione radiazione di fondo da materiali radioattivi naturalmente presenti in ambiente (da analisi FCA)** L'andamento della curva tracciata in questo grafico, presenta picchi analoghi al grafico ottenuto per la polvere da elettrofiltro analizzata, sia in termini dei valori di energia in keV, sia in termini di valore assoluto di emissione.

Il secondo riporta lo spettro di emissione di un campione di uranio impoverito, recuperato ed analizzato dal centro sopracitato il 19 maggio 1997, presso la ditta *Pyreco*, azienda specializzata nel recupero e riciclaggio di rottami metallici non ferrosi, sita nel Cremonese. [30]



Figura 3.19: Spettro di emissione di un campione di uranio impoverito (fornito da FCA)

Si nota immediatamente come vi sia un picco molto marcato nell'intorno dei livelli energetici tipici delle radiazioni emesse dal Torio (63 e 92 keV), oltre che del picco nei pressi di 185 keV, causato dall'Uranio-235. L'assenza di altri picchi notevoli a livelli energetici nella parte media dello spettro sottolinea come il campione prelevato sia uranio impoverito, il quale non contiene altri isotopi radioattivi in quantità tali da poter essere visualizzati sul grafico. Si tratta infatti di un materiale trattato, ben diverso da campioni di terreno o di polvere da elettrofiltro, nei quali è possibile incontrare una grande varietà di materiali, radioattivi e non.

Purtroppo in questo grafico non viene riportato l'andamento della curva a livelli medio-alti; si noterebbe la presenza di picchi causati dall'uranio-238 a 609, 1120 e 1764 keV, livelli al quale emette il bismuto-214.

Dopo tutte queste le considerazioni, confrontando i grafici a nostra disposizione, è lecito affermare che la causa di questa radioattività "anomala" sia da imputare alla presenza di potassio-40. Ricordiamo come il picco tipico del K-40 si trovi in corrispondenza di 1461 keV, livello non riportato sui grafici a disposizione. Queste ipotesi iniziali sono confermate dal Centro di Radioprotezione di FCA:

"(...) si riscontrano dei picchi di energia a livelli tali da indicare una presenza cospicua di potassio-40, comportando un livello complessivo di attività maggiore rispetto a quella misurabile in condizioni standard."

Per il nostro lavoro, ipotizzeremo quindi che il comportamento radioattivo della polvere da elettrofiltro prelevata sia da imputare interamente al potassio-40. Verrà svolto un lavoro analogo a quello eseguito nei capitoli precedenti, grazie all'utilizzo del software online *"External Radiation Dose Calculator (Virtual Geiger Calculator)"*, di *"WISE Uranium Project"*.

Impostazione parametri "External Radiation Dose Calculator (Virtual Geiger Calculator)"

In questo caso, la procedura che verrà seguita per inserire i nostri dati di input nel calcolatore fornito da *wise-uranium.org* sarà la seguente: selezioneremo 3 valori di attività, tra quelli ricavati dalle analisi effettuate sugli 8 campioni a nostra disposizione. Questi tre valori saranno nello specifico:

- Il valore di attività più alto registrato (campione # 4: 356 Bq/kg)
- Il valore di attività più basso registrato (campione # 6: 116 Bq/kg)
- Un valore che rappresenta la media aritmetica degli 8 campioni prelevati (233 Bq/kg)

Come detto brevemente in precedenza, assumeremo che questo valore di attività sia da imputare prevalentemente alla presenza di K-40. Anche in questo caso come base di partenza verrà utilizzata la composizione del suolo medio americano, disponibile di default nel programma (*"US Soil"*).

Anche in questo caso non ci soffermeremo troppo su diversi blocchi di istruzioni da fornire al calcolatore, essendo la procedura analoga a quella di cui si è discusso in precedenza, ed essendo analoghi le tipologie di sorgente (volumetrica) e recettore (approssimato a puntuale). Riporteremo semplicemente le schermate dei vari step, senza appesantire troppo la trattazione.

Per primo step ("Mode") la sorgente sarà anche in questo caso volumetrica, e non vi saranno schermature.

	Mo	ode <u>HELP</u> ⊨
Select here before (Selection resets all	ore any other entry! l other parameters)	Example data sets
Number of Shield layers:	O Point Source	 Ex. 1 Shielding in free air Ex. 2 48Y Cylinder with Heels from UF6_nat Ex. 3 30B Cylinder with Heels from UF6_enr Ex. 4 DU bullet buried in soil
 0 1 2 3 4 	• Volume Source	Ex. 5Soil cover 40 CFR 192Ex. 6Soil cover for uranium mill tailingsEx. 748Y Cylinder with UF6_natEx. 830B Cylinder with UF6_enrEx. 9Reprocessed uranium storageEx. 10Depleted uranium storage

Figura 3.20: Impostazione parametri sezione "Mode"; polvere da elettrofiltro (valori sperimentali)

Per il secondo step, "Volume *Source Material Composition*" inseriremo come detto di volta in volta i 3 valori elencati in precedenza, per quanto riguarda il K-40, lasciando come composizione base quella del terreno degli USA (*"U.S. Soil"*). Il valore di densità sarà ovviamente anche in questo caso pari a 550 kg/m³.

NORMAL	▼ Vo	lume S	ource Ma	aterial Co	omposit	tion	RESET	HELP 🗅
	Select Sourc	e Material, o	or enter individu	al concentration	ns below	-	~	
						27		
		0	,55 rh	lo _{so} - Source de	ensity [g/cn	1 ⁻]		
Element / Nuclide	IMPO	RT	Element / Nuclide			Element / Nuclide		
Th-232++	9.400e-4	wt_% 🗸	K-40		₽q/g 🗸	Ва	5.800e-2	wt_% 🗸
U_nat++	2.700e-4	wt_% 🗸	Na	1.200	wt_% 🗸	Mn	5.500e-2	wt_% 🗸
0	49.00	wt_% 🗸	Mg	9.000e-1	wt_% 🗸	Р	4.300e-2	wt_% 🗸
Si	31.00	wt_% 🗸	Ti	2.900e-1	wt_% 🗸			wt_% 🗸
Fe	2.600	wt_% 🗸	N	2.000e-1	wt_% 🗸			wt_% 🗸
С	2.500	wt_% 🗸	S	1.600e-1	wt_% 🗸			wt_% 🗸
Са	2.400	wt_% 🗸	F	9.500e-2	wt_% 🗸			wt_% 🗸

Figura 3.21: Impostazione parametri sezione "Volume Source Material Composition"; polvere da elettrofiltro (valori sperimentali)

- 1) Campione # 6: 0,116 Bq/g
- 2) Campione # 4: 0,356 Bq/g
- 3) Valore medio: 0,233 Bq/g



Per quanto riguarda il terzo step, valgono le considerazioni fatte in precedenza:

Layer OF	Cosmic Radiatio	n Parameters	RESET	HELP 🗖
400	Altitude [m above sea level]	• Outdoor	in a fastan	
45			ing factor	

Figura 3.22: Impostazione parametri sezione "Cosmic Radiation Parameters"; polvere da elettrofiltro (valori sperimentali)

Discorso analogo per quanto riguarda i parametri geometrici, verrà mantenuta la configurazione dell'esempio *5: Soil cover 40 CFR 192,* con la differenza che la distanza per questa analisi passerà da 100 cm a 1 cm. Questo valore esprime la distanza di "contatto" tra il misuratore e il campione analizzato.

Ex. 1 Ex. 2 Ex. 3 Ex. 4 Ex. 5 Ex. 6 Ex. 7	Ex. 8 Ex. 9 Ex. 10 Geometry Parameters RESET
y - Distance of receptor from x-axis [cm]	- or - 1 b - Distance of receptor from shield rear surface [cm]
x - Horizontal displacement of receptor [cm] 100 d - Source depth [cm]	
1784.124 r - Source radius [cm]	- or - 1000 sa - Source surface area [m ²]
20 integration step width [cm] 5 integration step height [cm]	

Figura 3.23: Impostazione parametri sezione "Geometry Parameters"; polvere da elettrofiltro (valori sperimentali)

Nell'ultimo step i parametri di output desiderati saranno coincidenti con quelli impostati per la cenere volante. Il valore del *dose rate* andrà impostato in Sv/h, il recettore sarà "Tissue, Soft (ICRU-44)".

La dose ricevuta, sarà da mostrare divisa per componenti (*"by Components"*), in modo da ottenere nel dettaglio l'impatto di ogni singolo radionuclide sul valore totale di dose rate emesso.

Output Parame	ters RESET <u>HELP</u>	
Dose Options	Graph Detail	Result Detail
Sv/h Dose Rate Unit continuous Exposure for annual dose rates Tissue, Soft (ICRU-44) Receptor material 1 Terrestrial gamma dose coeff. in air [Sv/Gy] Image: Use buildup factors for: Source: auto select	 Show total situation Show integration grid Show dose color map: 100 x Raster width [pixel] 100 y Raster width [pixel] Logarithmic color scale: 	Dose from each layer: by Components ✓

Figura 3.24: Impostazione parametri sezione "Output Parameters"; polvere da elettrofiltro (valori sperimentali)

Risultati

Di seguito vengono riportati i risultati ricavati dal nostro calcolatore per quanto riguarda la polvere da elettrofiltro.

1) Campione # 6: 116 Bq/kg



Figura 3.25: Risultati: DER a cui è esposto lavoratore ad 1 cm di distanza da un deposito di polvere da e.f. (input: campione #6)

Grand Total:	55.10 nSv/h	(100%)		
Source Total:	55.10 nSv/h	(100%)		
K-40:	5.894 nSv/h			
U_nat++:	19.35 nSv/h			
Th-232++:	29.85 nSv/h			
Contribution from	radionuclides	; in Volume Sour	cce:	
Integration: step	width=20 cm,	step height=5	CM	
REC: Tiss_sft, 1	Sv/Gy			
SRC: d=100 cm (mixture) V_	_so =1000 m3	rho_so =0.55 g/cm3	M_so =550 t
x=0 cm y=	1 cm k	=1 cm	r=1784 cm	

2) Campione # 4: 356 Bq/kg



Figura 3.26: Risultati: DER a cui è esposto lavoratore ad 1 cm di distanza da un deposito di polvere da e.f. (input: campione #4)

y=1 cm b=1 cm r=1784 cm x=0 cm SRC: d=100 cm (mixture) V_so =1000 m3 rho_so =0.55 g/cm3 M_so =550 t REC: Tiss_sft, 1 Sv/Gy Integration: step width=20 cm, step height=5 cm _____ Contribution from radionuclides in Volume Source: Th-232++: 29.85 nSv/h U nat++: 19.35 nSv/h K-40: 18.08 nSv/h Source Total: 67.30 nSv/h (100%) _____ Grand Total: 67.30 nSv/h (100%)

3) Valore medio: 233 Bq/kg



Figura 3.27: Risultati: DER a cui è esposto lavoratore ad 1 cm di distanza da un deposito di polvere da e.f (valore medio campioni)

Conclusioni

Il risultati ottenuti in questa parte sono molto utili al nostro scopo, in quanto forniscono un valore univoco (in questo caso il *Dose Equivalent Rate* annuale) che permette il confronto con risultati di prove eseguite in precedenza, utilizzando metodi differenti.

In prima battuta è possibile verificare che il valore assoluto di *DER* orario ottenuto è inferiore a quello ricavato tramite misurazioni dirette con il radiometro di *Atomtex*, eseguite sui 4 bags di polvere appena scaricati. Questo è dovuto probabilmente alla schermatura dei barattoli di propilene nei quali sono contenuti gli 8 campioni di polvere analizzati, in grado di attenuare il livello di particelle emesse. L'ordine di grandezza rimane comunque lo stesso, ovvero nell'intorno delle decine di nSv/h.

Per avere un ulteriore valore di confronto, verrà ricavato il valore annuale di dose equivalente alla quale è esposto un lavoratore che si trovi nei pressi di un deposito di una quantità pari a 1000 m³ di polvere da elettrofiltro con le caratteristiche del campione # 4, con relativa schermatura intrinseca, data dal contenitore di propilene, con il lavoratore posto ad una distanza assimilabile a quella di contatto con il materiale in questione. Si ricorda che la una dose equivalente ricavata in questo caso è pari a 67,3 nSv/h, valore più alto tra quelli registrati tra gli otto campioni analizzati.

Se si considera anche in questo caso una permanenza media in tale luogo della discarica di 1 ora alla settimana, vorrebbe dire che un lavoratore medio della discarica trascorre un totale di circa 52 ore all'anno nei pressi di tale deposito.

Moltiplicando il rateo di dose equivalente per il totale di ore annuali si ottiene quanto segue:

Annual Equivalent Dose = DER
$$*\frac{h}{y}$$
 = 0,067 $*52$ = 3,484 μ Sv/y

Ricordando il limite di legge per la dose equivalente a cui è soggetto un civile, considerato "non esposto", pari a 1 mSv/anno, possiamo affermare che i valori ottenuti per la polvere da elettrofiltro sono tali da raccomandare una presenza non prolungata in discarica, essendo la massima dose calcolata comunque inferiore di circa tre/quattro ordini di grandezza rispetto al limite di rischio accettabile.

Ricordiamo come sia stato applicato uno scenario molto conservativo, ovvero quello di un lavoratore che trascorre un'ora a settimana nelle strette vicinanze del deposito di cenere volante. Le considerazioni fatte in precedenza restano valide anche in questo caso; è possibile ipotizzare che valori di DER annui "realistici" possano essere molto facilmente inferiori a quelli appena calcolati, in quanto:

- La permanenza del lavoratore in luoghi limitrofi al deposito, tali da avere un punto di contatto (verosimilmente le piante dei piedi) ad una distanza di 1 cm dalla sorgente sarà quasi certamente inferiore, in termini di ore/anno, se non addirittura nulla.

- Più verosimilmente, una distanza realistica dalla sorgente volumetrica di radiazioni alla quale un lavoratore si troverà, per un periodo di tempo comparabile a quello ipotizzato nei calcoli (50 ore/anno circa) sarà quasi certamente maggiore di 1 cm.
- Sebbene nel nostro scenario non sia stata considerata alcuna schermatura nella stesura del modello, essa è presente in maniera implicita, in quanto i valori di attività ottenuti (in Bq/kg), sono stati ricavati lasciando la polvere da elettrofiltro all'interno dei contenitori di propilene. Questo ha infatti contribuito al rilevamento di un valore inferiore rispetto alle misurazioni effettuate sulle 4 bags, valori visibili a quelli in tabella 3.3. Le ipotesi fatte in precedenza sul potere di schermatura di un qualsiasi contenitore utilizzato per stoccare il materiale molto volatile sono quindi confermate in maniera empirica.

In conclusione, non si registrano rischi derivanti dall'esposizione a questi campioni di polvere da elettrofiltro. Si è potuto notare come basti un semplice contenitore in propilene (economico e facilmente reperibile in commercio) per mitigare le emissioni in ambiente di radiazioni ionizzanti, oltre ovviamente ad evitare il rilascio in atmosfera e nelle acque delle sostanze volatili contenute in esso.

Questo punto è fondamentale, in quanto durante tutta la trattazione si è parlato di esposizione esterna, ovvero nel caso in cui il materiale emettitore di radiazione ionizzanti si trovi all'esterno del soggetto considerato come bersaglio. Un discorso diverso è quello in cui il materiale radioattivo si trovi all'interno del ricevitore, come avviene nel caso di ingestione o inalazione di una sostanza radioattiva. Nei capitoli successivi vedremo come questo scenario diventi di fondamentale importanza per quanto riguarda il problema del radon in ambienti indoor, molto pericoloso per la salute dell'uomo quando inalato, in quanto si ricorda come il radon e gli elementi in cui esso decade sono forti emettitori alfa e gamma ad alta energia.

3.7 Conclusioni

Grazie ai dati in nostro possesso, è stato possibile stimare il valore di *Dose Equivalent Rate* al quale sono esposti annualmente i lavoratori del sito di Ambienthesis di Orbassano utilizzando approcci differenti. Sono stati utilizzati infatti dati di ingresso provenienti da materiale disponibile in letteratura, valori misurati sperimentalmente da misurazioni sul campo, valori ottenuti in seguito a raccolta di campioni, inviati al centro di Radioprotezione di FCA per ottenerne spettri di emissione e valori complessivi di attività.

Nella seguente tabella 3.5 verranno riassunti i risultati ottenuti:

Tipologia dato di ingresso	DER orario [nSv/h]	DER annuo [µSv/y]
Cenere volante	133,9	6,968
Polvere da e.f. (dati Ambienthesis)	171,6	8,944
Polvere da e.f. (bags)	94	4,888
Polvere da e.f. (campione #6)	55	2,860
Polvere da e.f. (campione #4)	67	3,484
Polvere da e.f. (media campioni)	61	3,172

Tabella 3.5: Riassunto e confronto dei valori di DER ottenuti in seguito alle nostre misurazioni

Come detto in precedenza, non si evidenziano rischi particolari derivanti dall'esposizione a materiali con tali valori di *Dose Equivalent Rate* annuo, inferiore per l'appunto di oltre 2 ordini di grandezza rispetto ai valori limite da normativa [16].

Occorre fare qualche considerazione a posteriori, poiché che i valori, in termini assoluti, sono diversi fra loro. È possibile notare come il valore annuo di DER del campione #6 sia circa un terzo rispetto al valore ottenuto inserendo come input il campionario di elementi presenti nella polvere da elettrofiltro, secondo i dati forniti da Ambienthesis.

In prima battuta vi è una differenza sostanziale: i valori ricavati delle misurazioni sugli 8 campioni prelevati sul campo ed inviati a FCA per analizzare il materiale ed ottenerne lo spettro di radiazione gamma, hanno un valore inferiore rispetto a quelli fornitici da Ambienthesis poiché probabilmente nel secondo caso la misurazione è stata effettuata senza rimuovere la polvere da elettrofiltro dai contenitori di propilene. Tale ipotesi potrebbe essere avvalorata dal fatto che la polvere da elettrofiltro sia particolarmente volatile, pertanto è molto difficile effettuare misurazioni appropriate in maniera diretta, senza correre il rischio di liberarne nell'aria un certo quantitativo. Questo rilascio in ambiente comporterebbe inoltre tutta una serie di rischi per la salute dei tecnici del laboratorio, in caso di eventuale inalazione di tale materiale.

Se così fosse, il propilene avrebbe contribuito a schermare la radiazione gamma emessa dalla polvere da elettrofiltro, facendo calare di conseguenza il valore di attività misurato da FCA. D'altro canto, è possibile che i dati provenienti dai rilevamenti fornitici da Ambienthesis siano stati ottenuti analizzando in maniera diretta la polvere da elettrofiltro. Tale ipotesi potrebbe essere confermata dal fatto che sono elencati una serie di nuclidi radioattivi dei quali non è riportato il valore di attività, probabilmente poiché, a causa della mancanza di schermatura, i valori misurati per tali radionuclidi presentano un valore di attività molto basso, se comparati al valore misurato per il potassio-40 non schermato, rendendo trascurabile l'impatto specifico di tali isotopi sul totale della concentrazione di attività misurata.

Una volta fatte queste considerazioni, si può concludere sottolineando ancora una volta l'assenza di rischi particolari per la salute dei lavoratori, derivanti dall'esposizione a tali materiali di scarto.

Ciononostante, si raccomanda di limitare la presenza nei pressi dei depositi di polvere da elettrofiltro e cenere volante, in quanto in ogni caso i valori di radiazioni ionizzanti assorbite, provenienti da tali materiali, sono superiori a quelli che si registrano in condizioni normali.

I valori di *DER* ottenuti sono infatti maggiori rispetto a quelli che si registrano esponendo il misuratore alla radiazione naturale di fondo, causata dagli elementi elencati nei paragrafi precedenti, presenti naturalmente nelle rocce della crosta terrestre, oltre che dalle radiazioni cosmiche (presenti anch'esse presenti, sebbene non considerate in questa trattazione).

4 Caso studio: controllo dei livelli di radioattività presso i locali del Politecnico di Torino

Questo capitolo affronterà il problema della radioattività provocata dai TENORM nel settore edilizio. La causa è da ricercarsi nei materiali di costruzione utilizzati nell'industria edile, che spesso sono confezionati utilizzando materiali di recupero provenienti da altre lavorazioni industriali, i quali contengono una certa quantità di materiali classificabili come TENORM.

Precedentemente ad esempio sono state menzionate le ceneri volanti, utilizzate per la produzione di cemento Portland. Oltre ad esse, meritano considerazione porfido, anidrite, argilla e marna, materiali comunemente usati in ambito edilizio. La presenza di questi componenti porta alla possibilità, in certi casi, di rilevare all'interno del materiale edilizio tracce di radioattività, a causa dalla presenza di elementi come ⁴⁰K, ²²⁶Ra e ²³²Th. È possibile ritrovare questi isotopi, ed ovviamente l'attività che li contraddistingue, anche in materiali da costruzione diversi da quelli appena menzionati, come è emerso dopo diversi studi effettuati su campioni di vernici, gesso, piastrelle e materiale collante. La conseguenza diretta è un aumento della concentrazione di ²²²Rn e ²²⁰Rn, responsabile come detto nei paragrafi precedenti del 50% circa della dose naturale media di fondo.

Considerando che la maggior parte della popolazione mondiale trascorre l'80% della propria vita all'interno di locali chiusi, grande attenzione va posta sui valori di radioattività di materiali edilizi, in aree all'aperto ma soprattutto in ambito *indoor*. Al chiuso, la radioattività proveniente dal terreno è quella determinante sul valore complessivo misurato, poiché la componente di radiazione cosmica è efficacemente schermata dall'involucro dell'edificio. Da qui in avanti, come già fatto nei paragrafi precedenti, la quantità fisica che andremo a misurare sarà indicata con il termine *DER* (per indicare la *Dose Equivalent Rate*), la quale ha come unità di misura il μ *Sv/h*. Si ricorda che questo indicatore misura il rateo di dose equivalente in un intervallo di tempo *dt* di un'ora. Moltiplicando tale valore per il numero di ore in un anno, si ottiene la dose complessiva a cui è esposta la popolazione, rendendo possibile il confronto del risultato ottenuto con i valori limite di esposizione per il pubblico alla radioattività ambientale (che ricordiamo essere di 1 *mSv/y* per popolazione non esposta).

Per avvalorare la nostra tesi, verranno esposte di seguito i risultati delle misurazioni effettuate nel mese di Ottobre 2020 nei locali del Politecnico di Torino. I risultati ottenuti proveranno l'utilizzo di materiali debolmente radioattivi nel contesto dell'edilizia civile.

4.1 Introduzione alle misurazioni

Prima di passare all'esposizione ed al commento delle misurazioni di radioattività ambientale effettuate ad Ottobre 2020 dal sottoscritto, Lorenzo Stancampiano, e dal Professor Massimo Zucchetti, nelle diverse aree del Politecnico di Torino, verrà introdotto il dosimetro utilizzato per eseguire le misure e saranno illustrate una serie di misurazioni svolte nell'ufficio del Professor Massimo Zucchetti con lo scopo di verificare la sensibilità del misuratore stesso.

Si comincia con la misura di alcuni manufatti tecnologici, in passato prodotti impiegando materiali radioattivi, usati per migliorarne certe prestazioni. In seguito si procederà con misurazioni analoghe su materiali di origine naturali, ovvero un campione di rocce e uno di terreno, i quali presenteranno valori più o meno radioattivi, in questo caso però la causa non saranno da imputare a manipolazioni da parte dell'uomo. Ottenuti i valori di *DER*, questi valori verranno integrati nel tempo, considerando un valore di ore/anno medio per l'utilizzo dei seguenti manufatti, ed il dato finale verrà confrontato con i limiti di normativa, per indicare se vi siano rischi reali derivanti dall'utilizzo di tali dispositivi.

Il primo risultato da considerare riguarda il valore medio di radiazione di fondo, che dipende dalle emissioni gamma che avvengono naturalmente. Le nostre misurazioni, effettuate in diverse aree del Politecnico di Torino, riportano valori compresi tra 0,10 e 0,20 μ Sv/h. In condizioni standard il valore misurato risulta essere di 0,12 μ Sv/h. Questi valori rispecchiano i valori medi di radiazione di fondo misurabili a livello globale, escludendo aree in cui si registrano valori medi inferiori (il minimo misurabile raggiunge 1,5 mSv/anno in certe aree dell'Australia) o di gran lunga superiori (nella città iraniana di Ramsar si raggiungono i 260 mSv/anno). [31]

4.2 ECOTEST - TERRA Bluetooth

Lo strumento usato durante i due rilevamenti sopra citati è il dosimetro-radiometro **ECOTEST MKS-05 "TERRA" Bluetooth**. Esso è progettato per misurare la dose equivalente ambientale e il dose-rate equivalente di radiazioni gamma, oltre alla densità di flusso superficiale delle particelle beta (questa seconda funzionalità solo menzionata, non è di nostro interesse). Uno dei pregi di questo misuratore è la sua maneggevolezza, essendo compatto e leggero (55x26x120 mm, 0.2 kg), senza sacrificarne prestazioni ed accuratezza. [32]

Nella Figura 4.1 è mostrata la faccia principale del dosimetro. In questo lato sono presenti un display lcd, nel quale sono riportati i dati salienti della misurazione in corso. Nello specifico, partendo dalla parte alta del display, procedendo da sinistra verso destra si incontrano nell'ordine:



Figura 4.1: Faccia principale del dosimetro

Parte alta del display:

- un simbolo che indica che l'audio che segnala la misurazione delle radiazioni gamma, settato su ON (maggiore sarà il numero di "*beep*" emessi in un certo *dt*, maggiore sarà il valore in μ *Sv/h* misurati in quell'istante di tempo).

- lo stato di carica del dispositivo.

Parte centrale del display:

- il tipo di radiazione misurata (in questo caso gamma).

- il valore della radiazione misurata in μ *Sv/h*.

- l'errore statistico del valore misurato.

Parte bassa del display: vi è un'indicazione di un valore di soglia impostabile (operazione non eseguita durante le misurazioni da noi effettuate) e l'orario (non di nostro interesse).

Questa immagine invece, mostra il retro del ECOTEST "TERRA" MKS-05. Gli elementi salienti del nostro dispositivo sono tre:

- vano batterie (alimentazione: AAAx2).

- etichetta contenente le specifiche tecniche del range di misurazioni rilevabili ed i valori dei livelli normali di radiazione, oltre al paese di fabbricazione.

- vano del misuratore vero e proprio delle radiazioni, cuore del dispositivo, costituito da un semiconduttore al germanio.



Figura 4.2: Faccia posteriore del dosimetro

Il rilevatore di radiazione gamma e beta è costruito sulla base del contatore *Geiger-Muller C5M-20-1*, il quale trasforma la radiazione rilevata in una sequenza di impulsi di differenza di potenziale; il numero di impulsi ricavati per unità di tempo è direttamente proporzionale all'intensità di radiazione misurata. La differenza di potenziale generata dal detector all'anodo viene scalata e linearizzata, fornendo, in base alla modalità di misurazione desiderata, il valore di radiazione *DER* (*Dose Equivalent Rate,* ovvero la dose equivalente misurata in μ *Sv/h*, dato di nostro interesse) effettuando la media delle misurazioni sulla frequenza di impulsi generata in uscita dal detector, ovvero dal semiconduttore al germanio.

È possibile inoltre misurare il valore *DE* (*Dose Equivalent,* ovvero la dose equivalente in mSv, facendo la media delle misurazioni di un numero definito di valori in uscita dal detector, in un *dt* deciso dall'operatore che effettua la misurazione. Il canale Bluetooth permette di inviare in simultanea i dati raccolti al PC. Il tutto viene alimentato da una coppia di batterie *AAA* (differenza di potenziale di alimentazione: 3 V). Nell'immagine di seguito (Figura 4.3) viene riportata la foto del retro della scatola di confezionamento del misuratore *MKS-05 "TERRA"*, contenente un sommario delle funzioni, delle applicazioni e delle specifiche del dispositivo, oltre ad altre informazioni sul produttore, le tecnologie adottate e la norma di riferimento (*ISO 9001:2008*) alla quale esso si attiene.

- Measurement of gamma and X-ray radiation ambient dose equivalent rate. - Measurement of aurano bein-particles flux density. - Real time measurement of aurano bein-particles flux density. - Real time measurement (clock), alarm clock. - Built-in gamma, beta sensitive Geiger-Muller counter. - Addition, with the sensitive Geiger-Muller counter. - Simultaneous indication of units of measurement, measurement error, threshold level and neal time on the display. - Dataklight. - Dataklig	Purpose of use:		Measurement ranges and m	ain relative e	mors:		
• Measurement of ambient dose equivalent accumulation time. • Real time measurement of ambient dose equivalent accumulation time. • Real time measurement (dock), alarm dock. • Features: • Built-in gamma, beta sensitive Geiger-Muller counter. • Audible, vibration and vibration-audible alarm. • Mode of PC link via Blueboth channel. • LOD backlight. • Comma and X-ray radiation ambient dose equivalent (circle with a preset error threshold level and neal time on the display. • Possibility to perform measurements within 10 seconds. • Built-in games of measurement and energy dependence: • Built-in games of measurement and energy dependence: • Built-in games of measurement and energy dependence: • Built-in meand accuracy of measurement. • Darbited discons: • Clastons and border Control • Clastons and border Control • Amy and Police • Industries • Sandary and Ecology • Medicine • Security and Safeguard Services • Security and Safeguard Serv	Measurement of gamma and X-ray radiation ambier equivalent rate. Measurement of gamma and X-ray radiation ambier Measurement of surface beta-particles flux density.	nt dose nt dose equivalent.	- Gamma and X-ray radiation ambient dose equivalent rate (Cs-137)	µSv/ħ	0.1 9 where P	0.1 9 999 ; $\pm \left[15 + \frac{2}{H^{4}(10)}\right]\%$ where $H^{4}(10) - \mu Sv/h$	
Features: - Suif-ing amma, beta sensitive Geiger-Mulier counter - Built-ing amma, beta sensitive Geiger-Mulier counter - Surface beta-particles flux 10 … 100 000 ; ± (20 * 200 messurement, measurement, for the sensitive Geiger - 11(cm ² min) - Mode of PC Link via Bibletech channet. - Ambient dose equivalent accumulation 1 min … 9 999 h : ±0 1 s per 24 h - Deskikight. - Ambient dose equivalent accumulation 1 min … 9 999 h : ±0 1 s per 24 h - Prossibility to perform measurements with a preset error. - Ambient dose equivalent accumulation 1 min … 9 999 h : ±0 1 s per 24 h - Deskikight. - Built-in memory which allows storing up to 1200 measurements. - Gamma and X-ray radiation MeV 0.0 5 … 3.0 : ± 2 - Lubbons and Border Control - Customs and Safeguard Services - Industries - Sanitary and Ecology - More * 380 32242 z - Beta radiation MeV 0.5 … 3.0 : ± 2 - Security and Safeguard Services - Moderite Deprograms - Marufacturer - Prome * 380 32242 z - 30 32242 z	Measurement of ambient dose equivalent accumula Real time measurement (clock), alarm clock.	ation time.	- Gamma and X-ray radiation ambient dose equivalent (Cs-137)	mSv	0.001	9 999 ; ±15%	
- LCD backlight - LCD backlight - Ambient dose equivalent accumulation trend accuracy of measurement to 1 s per 24 h - Ambient dose equivalent accumulation trend accuracy of measurement to 1 s per 24 h - Ambient dose equivalent accumulation trend accuracy of measurement to 1 s per 24 h - Energy ranges of measurement - Ambient dose equivalent accumulation trend accuracy of measurement - Ambient dose equivalent accumulation trend accuracy of measurement - Ambient dose equivalent accumulation trend accuracy of measurement - Ambient dose equivalent accumulation trend accuracy of measurement - Ambient dose equivalent accumulation trend accuracy of measurement - Ambient dose equivalent accumulation trend accuracy of measurement - Ambient dose equivalent accumulation trend accuracy of measurement - Ambient dose equivalent accumulation trend accuracy of measurement - Ambient dose equivalent accumulation trend accuracy of measurement - Ambient dose equivalent accumulation trend accuracy of measurement - Ambient dose equivalent accumulation trend accuracy of measurement - Ambient dose equivalent accumulation trend accuracy of measurement - Ambient dose equivalent accumulation - Ambient dose equivalent - Ambient dose equ	Features: - Built-in gamma, beta sensitive Geiger-Muller counter - Audible, vibration and vibration-audible alarm. - Mode of PC link via Bluetooth channel.	ər.	- Surface beta-particles flux density (Sr-90+Y-90)	1/(cm ² ·min)	$\begin{array}{l} 10 & \ 100 \ 000 \ ; \ \pm \left[20 + \frac{200}{\phi_{\beta}} \right] ^{9} \\ \text{where} \ \phi_{\beta} = 1 / (cm^{2} \cdot min) \end{array}$		
Prossibility to perform measurements with a preset error. Prompt evaluation of gamma background within 10 seconds. Built-in memory which allows storing up to 1200 measurements. Energy ranges of measurement and energy dependence: Gamma and X-ray radiation MeV 0.53.0.±2 Beta radiation MeV 0.53.0 Amplications: Sanitary and Ecology Amption Sanitary and Ecology Security and Safeguard Services Medicine Sanitary and Ecology	 LCD backlight. Simultaneous indication of units of measurement, m threshold level and real time on the display. 	neasurement error,	- Ambient dose equivalent accumulation time and accuracy of measurement		1 min 9 999 h : ±0.1s per 24 h		
Built-in memory which allows storing up to 1200 measurements. Gamma and X-ray radiation MeV 0.053.0.±2 Beta radiation MeV 0.53.0 Customs and Border Control Industries Sanitary and Ecology Security and Safeguard Services Medicine Sanitary and Ecology Sanitary and Ecolog	 Possibility to perform measurements with a preset e Prompt evaluation of gamma background within 10 	error. seconds.	Energy ranges of measuren	nent and ener	gy deper	dence:	
Applications: - Beta radiation MeV 0.530 - Oustoms and Border Control - Industries - Sanitary and Ecology - Manufacturer: Phone: +380.32.242.1 - Security and Safeguard Services - Medicine - Medicine PE "Sparing-Vist Center" Phone: +380.32.242.1 - Beta radiation Medicine - Beta radiation Medicine Phone: +380.32.242.1 - Security and Safeguard Services - Medicine - Medicine PE "Sparing-Vist Center" Phone: +380.32.242.2	- Built-in memory which allows storing up to 1200 me	asurements.	- Gamma and X-ray radiation		MeV	0.05 3.0 ; ± 25%	
Customs and Border Control Industries Army and Police Security and Safeguard Services Security and Safeguard Services	Applications:		- Beta radiation		MeV	0.5 3.0	
- Energency services and Give Desence - Educational Programs - So Voldymy Veryky Gut, EM, Pacco, Oktaine - email: maintail@ecolor	- Customs and Border Control - Army and Police - Security and Safeguard Services - Emergency Services and Civil Defence - Educational Programs	istries itary and Ecology licine cational Programs	Manufacturer: Phone: +380 32 242 11 PE "SPPE "Sparing-Vist Center" Fax: +380 32 242 21 33 Volodymyr Velyky Str., Lviv, 79026, Ukraine e-mail: market@ecotes			ne: +380 32 242 15 1 +380 32 242 20 1 ail: market@ecotest.	

Figura 4.3: Retro della confezione originale del dosimetro

4.3 Radium Girls

I primi prodotti industriali dei quali misureremo le radiazioni gamma emesse sono due modelli di orologio: un *Longiness Silvergines*, orologio da donna degli anni '50 con scatola originale, ed un *Tissot Antimagnetique*, orologio militare degli anni '40. La particolarità di questi orologi risiede nel trattamento ricevuto dalle lancette e dagli indici in rilievo del quadrante. Per rendere questi elementi visibili al buio veniva applicata uno strato di vernice in grado di fornire un effetto luminescente senza bisogno di impiegare fonti esterne di radiazione luminosa.

Prima di entrare nel dettaglio delle misure effettuate su questi dispositivi, è appropriato fare una pausa e citare uno dei capitoli più bui (radiologicamente parlando) della storia mondiale del secolo scorso, ovvero quello delle cosiddette *Radium Girls*, un gruppo di giovani donne che agli inizi del Novecento lavorarono alla fase di pittura degli orologi, trattati con materiali radioattivi per renderli luminescenti al buio, impiego che, nel giro di pochi anni, provocò loro gravissimi danni di salute, fino alla morte della totalità delle impiegate. Questa vicenda ebbe notevole importanza in quanto aumentò l'attenzione del pubblico verso i pericoli connessi all'uso incondizionato di materiali radioattivi come il radio, protagonista in quella circostanza. [33]

Analizzando nel dettaglio la vicenda, a cavallo degli anni '10 e '20 dello scorso secolo, in Europa e negli Stati Uniti prese piede la moda di aggiungere in diversi oggetti prodotti a livello industriale una vernice radioluminescente, inventata nel 1908, contenente radio (il quale già di per sé emette una flebile luce blu), solfuro di zinco ed altri elementi, per rendere visibili certe parti di oggetti, come orologi e cloche degli aerei. Nello specifico, prodotti come questi, nei quali la vernice è stata applicata molti anni fa, non sarebbero più luminescenti al buio, pur avendo sempre stesso livello di radioattività. Per lo ripristinarla, basterebbe riapplicare uno strato di fosforo. In quegli anni il radio era presente in una grande quantità di prodotti, come dentifrici, creme per il corpo, acque minerali ed addirittura a cibo e medicinali, ritenendo che avesse proprietà benefiche.



wish to see in the dark. The next time you fumble for a lighting switch, bark your shins on furniture, wonder vanly what time it is *because of the dark*—remember Undark. It shines in the dark. Dealers can supply you with Undarked articles. For interesting little folder telling of the production of radium and the uses of Undark address



To Manufacturers The number of manufactured articles to which Undark will add increased usefulness in manifold. From sales standpoint, it has many obvious advantages. We gladly answer inquiries from manufacturers and, when it seems advisable, will carry on experimental such for them. Undark may be applied either at your plant, or at our own. The application of Undark is simple. It is furnished as a powder, which is mixed with as adbesive. The paste thus formed is pointed on with a brash. It adheess firmly to any surface.

Figura 4.4: Locandina pubblicitaria radio ad uso industriale [33]

Una delle compagnie produttrici di vernice radio-luminescente in quegli anni era la **U.S. Radium Corporation**, proprietaria di diversi stabilimenti nei quali, oltre ad estrarre il radio ed a produrre con esso la vernice, essa veniva applicata direttamente su prodotti come quelli menzionati in precedenza, specialmente orologi ad uso militare, dalle giovani donne che sarebbero passate alla storia loro malgrado come *Radium Girls*.



Figura 4.5: Fotografia: impiegate intente a dipingere gli orologi con il radio [33]

Le ragazze che lavoravano in questi impianti ingerirono una gran quantità di radio, poiché erano state istruite dai loro superiori a leccare la punta del pennello che usavano, con l'intento di "fare la punta" per mantenere un tratto fine. Le ragazze inizialmente erano ben disposte a fare quel tipo di lavoro, poiché non richiedeva un grande sforzo fisico e la paga era buona, oltre a non avere idea dei pericoli che si celavano dietro ad un uso così discriminato del radio. Al contrario, era credenza popolare che il radio avesse come detto proprietà benefiche; molte donne usavano la vernice per truccarsi, applicandola su labbra, unghie ed addirittura sui propri denti. Gli orologi prodotti in media dalle ragazze superavano le 200 unità al giorno, e per un lavoro del genere esse ricevevano compensi di circa 20-25 dollari, paga di tutto rispetto per i tempi, non considerando i rischi per la loro salute di cui si è ora a conoscenza. Si stima che queste ragazze, circa 4000 donne sparse per gli Stati Uniti, abbiano ingerito una quantità di circa 4000 μg di radio in un periodo di quasi 6 mesi. [33]

La vicenda venne alla ribalta dei media verso la fine degli anni '20, grazie ad una ex impiegata, Grace Fryer, che per tre anni lavorò presso la *U.S. Radium*. Qualche anno dopo, una volta lasciato il lavoro di pittrice di orologi, iniziò a perdere i denti ed a sviluppare gravi infezioni alla bocca. Visitata da diversi medici e dentisti, le venne diagnosticata una specie di decadimento della bocca, senza trovarne la causa. I primi due anni dalla comparsa dei primi sintomi furono ricchi di peripezie. Dopo aver consultato diversi medici, cambiato avvocati e dopo essere stata sottoposta a vari controlli da parte di specialisti, i quali inizialmente non riconobbero il problema (per non parlare di uno pseudo-esperto che la giudicò "sana", ma che si scoprì in seguito essere stipendiato dalla *U.S. Radiation*), nel 1927 grazie all'avvocato Raymond Berry, che prese a cuore il suo caso, vi fu una svolta. [33]

Altre quattro ex impiegate si unirono al caso, ed agli albori del 1928 fu fissata una prima udienza. Dopo diversi rinvii delle udienze, anche grazie alle pressioni fatte dai mass media e dall'opinione pubblica, la *U.S. Radium* giunse ad un compromesso, riconoscendo la responsabilità dei danni subiti dalle ragazze, ed offrendo ad ognuna di loro un risarcimento di 10 000 dollari, più un vitalizio di 600 euro ed il pagamento di tutte le spese mediche. Nel giro di un decennio tutte le *Radium Girls* morirono, a causa delle conseguenze dell'avvelenamento da radio, come anemia, fratture alle ossa, alla bocca ed a sarcomi.



Figura 4.6: Articoli di giornale dell'epoca sul caso delle Radium Girls [34]

Sebbene per diversi anni l'uso del radio in ambito industriale si fermò, con lo scoppio della seconda guerra mondiale vi fu la necessità di tornare ad usare le vernici luminescenti, sempre per la produzione di orologi ed elementi delle cloche degli aerei bombardieri ad esempio, dietro la necessità di produrre componenti visibili in condizioni di buio assoluto, e sfruttando l'accoppiamento di elementi radioattivi e fosforo, sfruttando l'energia emessa dai primi per provocare la luminescenza nei secondi. Ciononostante, vennero prese misure di sicurezza maggiori per tutelare in qualche modo i lavoratori.

Il caso delle *Radium Girls* portò alla luce i rischi connessi all'utilizzo di sostanze radioattive in assenza delle dovute precauzioni, a livello mediatico, pubblico, medico e legislativo. Un report dei primi anni '30, studiando gli effetti delle radiazioni subite da circa 1600 "pittrici radioattive", portò ad una delle prime definizioni di soglia di dose, limite per il quale non si correvano rischi considerevoli di sviluppare tumori ed altri danni da radiazione. Questo valore fu inizialmente fissato a 1000 volte il livello naturale di radiazione, al di sotto del quale non venne diagnosticato nessun caso di tumori maligni e danni a lungo termine. [33]

4.4 Misurazioni su orologi

LONGINESS SILVERGINES

Il primo oggetto di cui misureremo la dose equivalente gamma emessa mediamente in un'ora è il *Longiness Silvergines*, orologio da donna prodotto negli anni '50, con annessa confezione originale. Questo orologio ha ricevuto un trattamento al trizio, per le lancette e gli indici, in modo da rendere tali elementi luminescenti al buio, come spiegato nel paragrafo precedente.



Figura 4.7: Longiness Silvergines

Misurandone la radioattività, come è possibile vedere da foto, siamo nell'intorno dei 3 μ Sv/h. Ripetendo la misurazione inserendo l'oggetto nella scatola, le radiazioni beta molli del trizio vengono già efficacemente schermate, ed il valore di radiazioni emesse in ambiente si riduce notevolmente, arrivando a poter trascurare il contributo dell'oggetto, ottenendo un valore prossimo alla radiazione di fondo presente in ambiente in condizioni normali.



Figura 4.8: DER a contatto Longiness Silvergines

Figura 4.9: DER dopo schermatura del cofanetto originale
Riferendoci ai valori di normativa, i quali stabiliscono come limite di esposizione una dose equivalente annua di 1 *mSv*, questo valore si raggiungerebbe tenendo al polso l'orologio per circa 333 ore, l'equivalente di 2 settimane. Poiché ad oggi si è a conoscenza dei rischi derivanti dalle radiazioni, è fortemente sconsigliato un uso prolungato nel tempo di questo orologio.

Allo stesso modo, si possono considerare nulli i rischi derivanti dalla detenzione di quest'ultimo, in quanto le radiazioni emesse sono di bassa intensità. Come abbiamo visto è sufficiente la scatola originale per schermare efficacemente l'emissione in ambiente di gamma e beta molli. Inoltre, rimuovendo l'orologio dalla confezione, e misurando il valore di radiazione emessa da quest'ultima, notiamo che non si verificano fenomeni relativi ad "accumulo" o di attivazione della scatola. Non si segnalano pertanto rischi legati a detenzione a scopo collezionistico dell'orologio.



Figura 4.10: Radiazione residua rimasta nella confezione

TISSOT ANTIMAGNETIQUE

Il secondo orologio del quale misureremo le radiazioni emesse è un *Tissot Antimagnetique* da 35mm, prodotto a cavallo degli anni '40 / '50. Come per l'orologio precedente, anch'esso è trattato con trizio per conferirgli proprietà luminescenti al buio. Al contrario del *Longiness*, questo orologio da uomo ricevette grande popolarità in ambito militare, molti modelli "antimagnetici" furono indossati dai piloti degli aerei durante i bombardamenti. Questo tipo di lavorazione infatti, come detto in precedenza, con lo scoppio della Seconda Guerra Mondiale tornò ad essere utile nella produzione di dispositivi ad uso militare, per permettere ad esempio proprio ai piloti dei cacciabombardieri in volo nei cieli nemici di vedere l'ora in condizioni di completa oscurità, in quanto il più piccolo bagliore avrebbe fatto saltare la loro copertura.



Figura 4.11: Quadrante Tissot Antimagnetique triziato

La misura della dose equivalente oraria emessa dal Tissot evidenzia un valore ben più alto rispetto al *Longiness*. Come mostrato nella foto seguente (Figura 4.12), essa è di circa $38 \mu Sv/h$.



Figura 4.12: DER a contatto Tissot Antimagnetique

È possibile notare inoltre che è sufficiente allontanare il dosimetro di pochi centimetri per riscontrare un notevole decremento (di circa due ordini di grandezza) della dose misurata. Questo comportamento conferma quello che si sa dalla fisica delle radiazioni, la cui intensità decade con legge quadratica all'aumentare della distanza. Riferendoci come nel caso precedente ai limiti di esposizione del pubblico da normativa, sono sufficienti 26 ore (poco più di un giorno) per raggiungere il valore limite di esposizione.



Figura 4.13: Dimostrazione che la radiazione emessa decade con il quadrato della distanza. A pochi centimetri appare vicina ai livelli di radiazione di fondo.

Si consiglia pertanto fortemente di non indossare questo modello di orologio, mentre non vi sono pericoli derivanti dalla detenzione a fini collezionistici.

4.5 Misurazioni su campioni naturali

Le ultime due misurazioni sono state effettuate su due campioni assolutamente naturali, ovvero una roccia contenente frammenti di autunite ed un campione di terreno dal colore sospetto, il quale potrebbe indicare la presenza di prodotti radioattivi, come uranio o radio. In questo caso non vi è azione diretta dell'uomo, motivo per il quale si potrebbe parlare di materiali NORM.

AUTUNITE

La prima misurazione viene effettuata su un campione di roccia proveniente dalla alta Val di Susa.



Figura 4.14: Campione di roccia con evidente venatura di autunite

Guardando la foto 4.14 del campione di roccia è possibile notare una vena di colore verde/giallastro, in forma minerale. Il sospetto è che si tratti di un minerale della famiglia dell'uranio, in particolare autunite.

L'autunite è un minerale con comportamento radioattivo, fosfato idrato di uranio e calcio (formula chimica $Ca(UO_2)_2(PO_4) \cdot 10-12H_2O$). La zona della Val di Susa è stata oggetto di studi sulla presenza di uranio ed altri elementi radioattivi sin dalla fine degli anni Cinquanta, inizialmente con scopi di sfruttamento industriale della mineralizzazione uranifera. Dopo anni di ricerche, iniziarono una serie di polemiche che portarono all'abbandono dell'idea di costruire miniere vere e proprie per l'estrazione di uranio, dietro alle preoccupazioni delle comunità locali, preoccupate per il possibile inquinamento delle falde acquifere. [35]

Negli ultimi anni si è tornato a parlare dei rischi relativi agli scavi nella zona della Val di Susa, stavolta collegati alla costruzione della linea *TAV*. In particolare il problema principale risiede nella realizzazione di un tunnel di 52 km da St.Jean Maurienne (Francia) a Venaus. Il percorso prevede il passaggio in prossimità di siti uraniferi, presenti in quella zona. I rischi sarebbero legati all'esposizione dei lavoratori, della popolazione, all'inquinamento delle falde acquifere ed all'esposizione al radon. Sebbene l'ARPA abbia scongiurato questi pericoli con diversi studi [35], vi è una netta divisione tra i fautori della linea *TAV* e gli oppositori, con diverse cause di natura ambientale e socio-economica. Questa trattazione esula dai nostri scopi e non verrà considerata.

Tornando al campione di roccia, si vuole verificare se la venatura chiaramente visibile sia effettivamente autunite.



Figura 4.15: DER a contatto del campione di roccia contenente autunite

Il dato della DER misurata, visibile nella Figura 4.15 non lascia spazio all'interpretazione. Con un valore di circa $150 \,\mu$ Sv/h, questa roccia ha comportamento fortemente radioattivo. Occorre prestare molta attenzione nel maneggiarla, ed evitare per quanto possibile il contatto diretto. Bisogna evitare in ogni modo di "grattare" o sgretolare in ogni modo la roccia, liberando in aria polvere radioattiva. Se inalata, decadendo rilascerebbe un gran quantitativo di energia, e darebbe il via a diverse problematiche per la salute, a causa del decadimento diretto dell'uranio e delle specie figlie che si genererebbero dalla sua catena di decadimento.

Riferendoci al valore limite per la popolazione considerata non esposta, basterebbero circa 6 ore di esposizione per raggiungere il limite annuale di dose equivalente massima stabilita dalla legislazione.



Figura 4.16: Anche per l'autunite la radiazione emessa decade con il quadrato della distanza.

Anche in questo caso è possibile notare come basti allontanarsi di pochi centimetri per notare un forte decremento nel valore di dose equivalente oraria misurata.



Figura 4.17: Schermatura evidente causata da un semplice sacchetto

Oltre a ciò, non è difficile schermare tali radiazioni. È sufficiente infatti un sottile sacchetto di plastica per dimezzare il valore di emissione verso l'ambiente.

CAMPIONE DI TERRENO CON PRESENZA SOSPETTA DI URANIO

Spesso ci si trova in presenza di situazioni nelle quali non si è certi della composizione chimica e fisica di diverse sostanze che ci troviamo di fronte. Di seguito verrà mostrato brevemente un esempio di come l'apparenza possa talvolta ingannare.

Il campione di terreno mostrato nella foto seguente, è stato prelevato presso un terreno nel quale si pensava fosse presente uranio. Questo timore è accentuato dal colore del terriccio, prevalentemente giallognolo. Questo colore potrebbe indicare la presenza di uranio.



Figura 4.18: Campione di terreno con sospetta presenza di uranio

Misurandone il valore di dose equivalente oraria, scopriamo che i livelli sono perfettamente nella norma, e confrontabili con i valori medi rilevati in ambiente. Il colore tendente al giallo potrebbe essere causato invece dalla presenza di zolfo nel composto. In questo caso non siamo davanti a materiale radioattivo.



Figura 4.19: DER a contatto del campione di terreno. Il dato mostra l'assenza di valori anomali di radioattività.

4.6 Misurazioni sul campo di radioattività presso il Politecnico di Torino

In questa parte verranno esposte e commentate le misurazioni di radioattività ambientale effettuate ad Ottobre 2020 dal sottoscritto, Lorenzo Stancampiano, e dal Professor Massimo Zucchetti, nelle diverse aree del Politecnico di Torino.

Questi rilevamenti sono analoghi ad altri svolti precedentemente, primo tra essi quello del Maggio 2009, volto in quel caso a sconfessare dei *rumors* circolati sui social media, che riferirono di livelli elevati di radioattività in varie zone del Politecnico, causate, a detta degli accusatori, da depositi di rifiuti tossici e macchine a raggi-X. [36] Verrà dimostrato in seguito che queste affermazioni non corrispondono a verità, ma che la causa di valori di radioattività lievemente maggiori rispetto al valore medio dell'area in questione è da attribuirsi all'uso di materiali da costruzione, come vedremo tra poco. Uno studio analogo è stato eseguito circa sette anni dopo, precisamente a gennaio 2017. [37] I risultati ottenuti saranno confrontati con esso, avendo in comune lo strumento utilizzato per le misurazioni e diversi punti in cui esse sono state effettuate.

Il livello di fondo misurato nell'area del Politecnico si attesta essere nell'intorno di 0,10 – 0,20 μ Sv/h, valore che trova corrispondenza con quelli misurati circa tre anni prima, come mostrato in Fig. 4.20a, nella quale il valore rilevato è di 0,14 μ Sv/h. Il luogo esatto della misurazione è quello dell'entrata lato parcheggio interno, posta di fianco all'ingresso del Dipartimento di Energia (*DENERG*).





Figure 4.20 *a-b*: Valori misurati all'uscita verso il parcheggio interno (A).

Poco distante da questo punto si trova il parcheggio interno vero e proprio, vicino al quale si trova il cortiletto del baby-parking *"Policino"*. La pavimentazione di questa zona è costituita da cubetti in porfido. Durante le misurazioni svolte negli anni precedenti, questo materiale era risultato avere un valore di radioattività leggermente maggiore rispetto ai valori di fondo, a causa principalmente della presenza al suo interno di ⁴⁰K.

Per questo era stata decisa la rimozione di parte della pavimentazione, sulla quale poggiava un rivestimento in gomma, il quale costituiva l'area di gioco dell'asilo nido. Questa misura segue il principio *ALARA*, in quanto gli individui più giovani risultano generalmente più suscettibili alle radiazioni, seppure essa fosse stata presa in via totalmente precauzionale, probabilmente anche eccessivamente prudente, in quanto i valori complessivi di esposizione erano in ogni caso molto lontani dai limiti fissati dalla normativa in vigore.

Il rateo orario di dose misurata per questa zona risulta essere di 0,39 μ Sv/h. Il dato è anche in questo caso molto simile ai valori del 2017.





Figure 4.21 a-b: Valori misurati in prossimità del Policino (B).

Seguendo il percorso di misurazioni del 2017, si è misurato il rateo di dose oraria nei pressi della segreteria didattica. Una delle preoccupazioni maggiori da parte dei sindacati in quegli anni era conoscere se all'interno dei locali del Politecnico (piuttosto che all'esterno) si fosse in presenza di radioattività. Uno dei punti in cui vennero effettuate le misure fu proprio l'area relativa all'ingresso in segreteria. In questa zona i valori non destarono preoccupazione, poiché il materiale da costruzione impiegato nelle zone interne non conteneva segni di radioattività particolare. I valori rilevati lo scorso ottobre confermano questa tesi.





Figure 4.22 _{a-b}: Valori misurati all'ingresso della segreteria didattica, presso l'info-point lato Corso Castelfidardo (C).

Passiamo ora alla zona responsabile dei *rumors* nati nel 2009: il marciapiede con annessa pista ciclabile di Corso Castelfidardo, filmato nel video postato su *YouTube* che fu causa dello studio citato in precedenza. [36]

La pietra grigia con la quale è stata eseguita la pavimentazione di questo marciapiede (granito grigio scuro, anche noto come Sienite di Balma) presenta valori di circa 0,45 μ Sv/h. Questo valore cala di circa un terzo, passando a 0,30 μ Sv/h alla distanza di un metro in aria. Valori poco più bassi si registrano sulla pietra rossa della pista ciclabile, nella quale il rateo di dose oraria vale 0,35 μ Sv/h.

Il granito rosso usato come rivestimento esterno della facciata su Corso Castelfidardo presenta valori simili, nello specifico 0,37 μ Sv/h. Lo stesso materiale, in questo caso lucidato, è presente come rivestimento della facciata dello stesso edificio, sul lato interno, che affaccia sul cortile interno delle aule 27-29. Sfortunatamente non è stato possibile scattare fotografie in quanto, in quei giorni, erano in corso lavori di ristrutturazione lungo tutta la facciata, sebbene sia stato possibile misurare il valore, molto simile a quello della facciata esterna (0,34 μ Sv/h).



D1: Marciapiede (Sienite di Balma)



D₂: Pista ciclabile (Pietra rossa)



D₃: Facciata esterna (Granito Rosso)





Figure 4.23 _{a-e}: Valori misurati nei pressi del marciapiede di Corso Castelfidardo, in prossimità dell'ingresso della segreteria didattica (D₁₋₃).

Si procede con la misura delle aree del cortile interno del Politecnico, zona in cui vi è grande interesse nel conoscere i valori di rateo di dose oraria, in quanto è una delle zone nelle quali lo studente medio trascorre gran parte del tempo.

Il cortiletto interno presenta valori assolutamente nella norma: 0,20 μ Sv/h per la pavimentazione in porfido e 0,22 μ Sv/h per una panchina in pietra (Figure 4.24 a-b).



E1: Panchina (Pietra)



E2: Pavimentazione (cubetti in porfido)



Figure 4.24_{a-c}: Valori misurati nel cortile interno (E₁₋₂).

Il cortile dell'aula magna merita un'attenzione particolare, in quanto è tipicamente uno dei punti di ritrovo preferiti dagli alunni nei momenti di pausa tra una lezione e l'altra. Il granito usato come pavimentazione e costituente i gradini sui quali sono soliti sedersi gli studenti in pausa presenta un valore di *DER* di 0,24 μ *Sv/h*, mentre per i cubetti in porfido con i quali è rivestita la parte centrale del cortile il valore è di 0,26 μ *Sv/h*.

Sebbene i due materiali siano gli stessi di quelli usati per la pavimentazione del marciapiede in Corso Castelfidardo, e per quella del parcheggio interno, il rateo di dose efficace oraria risulta molto più basso. Questo perché il cortile dell'aula magna ha subito una ristrutturazione in tempi più recenti. È lecito supporre che i materiali impiegati abbiano subito un numero di controlli maggiore, grazie a standard di sicurezza più elevati introdotti negli ultimi anni.



F₁: Pavimentazione perimetrale (Sienite di Balma)



F₂: Pavimentazione cortile (cubetti in porfido)





Figure 4.25 a-d: Valori misurati nei pressi del cortile dell'aula magna (F₁₋₂).

Un'altra area nella quale sono presenti i cubetti di porfido visti fino ad ora è quella dell'ingresso principale. In questo caso i valori di *DER* sono ancora più bassi rispetto ai precedenti, fissandosi a 0,22 μ Sv/h.

Questo dimostra ulteriormente che le proprietà di un materiale sarebbero da verificare caso per caso. Molto dipende dagli anni nei quali è stato acquistato ed installato il materiale impiegato, poiché ad oggi vi è una maggiore attenzione durante le fasi di produzione e di verifica dei materiali da costruzione, dal punto di vista della scelta delle materie prime "vergini" e "riciclate" impiegate per la produzione, e dal punto di vista delle verifiche e dei controlli di qualità in seguito ad essa.



Figura 4.26_{a-b}: Valori misurati all'entrata principale di Corso Duca degli Abruzzi (G).



L'ultima area di nostro interesse è quella dei locali dell'ufficio del rettore. Il valore misurato in questa zona coincide con quelli misurati in diverse zone interne del Politecnico, come corridoi ed aule. Come è possibile vedere in figura 4.27a, il valore è di 0,18 μ Sv/h. Per comodità sarà riportata solo questa misurazione, la quale identificherò il livello di *DER* valido per la totalità delle aule della sede centrale.





Figure 4.27_{a-b}: Valori misurati nei pressi dell'ufficio del Rettore (H).

4.7 Conclusioni

I rischi legati all'esposizione a radiazioni ionizzanti sono proporzionali ad intensità della radiazione ed al tempo di esposizione. Riassumendo, i valori legati alla radiazione di fondo e quelli misurati nei locali interni del Politecnico di Torino sono perfettamente nella media, e non destano preoccupazioni particolari per la salute di lavoratori e studenti. Questo è importante, considerando che mediamente uno studente o un impiegato del Politecnico passa molte più ore durante l'anno in questi luoghi, piuttosto che nelle aree all'aperto. Per le zone esterne limitrofe del Politecnico, il discorso va approfondito.



Figura 4.28: Mappa del Politecnico di Torino con sopra riportate le posizioni esatte delle misurazioni.

La tabella seguente riassume i valori misurati nelle aree indicate del Politecnico di Torino. Il calcolo dell'incremento rispetto al *DER* è stato fatto riferendosi al valore medio dei livelli nominali misurati in aria, ovvero 0, 15 μ Sv/h. Per poter quantificare gli eventuali rischi nelle diverse zone dell'istituto è necessario stimare il numero di ore passate mediamente dalla popolazione civile in tali luoghi, e confrontare il valore risultante con i limiti forniti da normativa (fissati a 1 *mSv/anno* per popolazione civile considerata non esposta, come detto nei paragrafi precedenti).

Di seguito saranno riportati i calcoli stimando un numero di ore ragionevole che uno studente medio passerebbe nei luoghi con valori considerevolmente più alti di 0,20 μ Sv/h.

Per quanto riguarda la radioattività ambientale del parcheggio interno (B), nelle zone limitrofe al *Policino*, causate dai cubetti di porfido, si stima che uno studente medio possa passare, esagerando il dato, 30 ore all'anno in tale luogo, essendo di passaggio per accedere a luoghi come le aule 27-29 ad esempio. Il dato cumulativo risulterebbe essere di circa 20 µSv all'anno, 85 volte inferiore al limite settato per legge.

Nel 2009, un ragionamento diverso venne fatto riferendosi alle ore passate dai bambini del *Policino* in tale luogo, come detto in precedenza, e per questo motivo i cubetti vennero rimossi. Questa misura, forse anche eccessiva riguardo ai rischi connessi a livelli in ogni caso molto lontani da quelli di allerta, segue i principi dell'*ALARA*, e venne presa come già detto a scopo precauzionale.

Passando all'area di transito sita nel marciapiede di Corso Castelfidardo, una delle vie di accesso principali, molto affollata e transito di moltissimi studenti durante ogni periodo dell'anno, considerando il valore più alto di 0,45 μ Sv/h, si può sovrastimare un tempo complessivo di 50 ore all'anno, considerando una sommatoria di tutti i periodi in cui uno studente entra/esce nell'/dall'istituto. La dose complessiva risultante di 22,5 μ Sv/anno, risulta essere un quarantacinquesimo circa del limite di 1 *m*Sv/anno.

L'ultimo luogo in cui verrò eseguito questo tipo di calcoli è quello relativo al cortile dell'aula magna (F), ritrovo di molti studenti tra le pause delle lezioni, e punto in cui socializzare con colleghi e amici. Sovrastimando anche in questo caso una permanenza annua di 100 ore, passata interamente in prossimità della pavimentazione perimetrale del cortile e dei gradini in Sienite di Balma, si avrebbe una dose equivalente di circa 22 μ Sv/anno, anche in questo caso pari a circa un quarantacinquesimo del limite stabilito dalla normativa.

Per le altre misurazioni vengono omessi calcoli analoghi, in quanto i valori orari di radiazioni ionizzanti sono più vicini alla media dell'area, ed il numero di ore trascorse in tali luoghi è inferiore a quelli considerati per i calcoli svolti. Come detto in precedenza, all'interno delle aule non si registrano valori anomali, dato molto importante essendo questi i luoghi in cui uno studente trascorre il numero maggiore di ore durante l'anno.

Punto di misurazione	DER	Incremento rispetto al DER provocato dalla
	(µSv/h)	radiazione media dell'area (0.15 μ <i>Sv/h</i>)
Livello nominale dell'area del Politecnico	0.10 - 0.20	-
(A) Uscita verso il parcheggio interno, di	0.14	0%
fianco al DENERG.		
(B) Rivestimento del parcheggio interno	0.39	260%
nella zona limitrofa al Policino		
(cubetti di porfido).		
(C) Ingresso segreteria didattica (marmo).	0.24	160%
(D1) Pavimentazione Corso Castelfidardo,	0.45	300%
lato esterno della segreteria		
didattica (Sienite di Balma).		
(D2) Pista ciclabile lato marciapiede Corso	0.35	233%
Castelfidardo (pietra rossa).		
(D3) Facciata lato Corso Castelfidardo	0.37	247%
(granito rosso).		
(D4) Facciata interna segreteria didattica,	0.34	227%
lato cortile interno (granito rosso).		
(E1) Pavimentazione cortile interno	0.20	133%
(cubetti di porfido).		
(E2) Panchina cortile interno (pietra).	0.22	147%
(F1) Pavimentazione perimetrale del cortile	0.24	160%
dell'Aula Magna (Sienite di Balma).		
(F2) Pavimentazione cortile Aula Magna	0.26	173%
(cubetti di porfido).		
(G) Pavimentazione ingresso principale	0.22	147%
(cubetti di porfido).		
(H) Pavimentazione ufficio del Rettore	0.18	120%
(marmo).		

Tabella 4.1: Riassunto dei valori misurati con relativo incremento rispetto alla radiazione media dell'area.

Analizzando i risultati delle dosi cumulative nei diversi punti del Politecnico, si può affermare che nonostante siano state sovrastimate le ore di permanenza considerate nei nostri calcoli, e siano stati usati valori ottenuti con misurazioni effettuate "a contatto", le quali sovrastimano la dose media che raggiungerebbe un individuo, le esposizioni complessive sono talmente basse da non essere necessario nessun intervento, da un punto di vista dell'ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*).

Dose ricevuta dal lavoratore di controllo all'ingresso su Corso Castelfidardo

Prima di proseguire con il prossimo caso studio, si vuole stimare la dose assorbita da uno dei lavoratori impiegato per controllare gli ingressi da parte del pubblico, durante l'inverno 2020, a causa degli ingressi contingentati nel periodo di parziale chiusura al pubblico, a causa dell'epidemia di Covid-19.

Conoscendo i valori di dose misurati utilizzando il radiometro *ECOTEST "TERRA" MKS-05*, posto ad una distanza di contatto di circa 2 cm dal muro in granito rosso e dalla pavimentazione in Sienite di Balma, è possibile conoscere la dose annua complessiva ricevuta dal lavoratore, quando il suo baricentro (ipotizzato come ricevitore puntuale) si trovi ad una distanza ipotetica di 50 cm dal muro e di 90 cm dalla pavimentazione.



Figura 4.29: Valori di distanza del lavoratore dalla pavimentazione e dalla facciata, all'ingresso della segreteria, lato Corso Castelfidardo.

Il calcolo è reso possibile grazie ad uno degli applicativi disponibili online sul sito <u>radprocalculator.com;</u> il software utilizzato si chiama "ALARA Calculations (Time, Distance and Shielding)". [38]

Come dice il nome, conoscendo il valore della dose (e la distanza alla quale è stato misurato), il tempo di permanenza annuo e la distanza dall'emettitore, è possibile ricavare la dose annua ricevuta dal lavoratore, in caso di presenza o meno di schermature. Per i nostri calcoli, ipotizzeremo la totale assenza di ogni tipo di schermatura.

Inserendo gli opportuni valori di dose misurati, si ipotizza un impiego di 6 ore al giorno, per 5 giorni lavorativi a settimana. Volendo sovrastimare la permanenza del soggetto, si valuta la dose ricevuta dallo stesso in caso di permanenza continuativa per 50 settimane all'anno. Il risultato è di 1500 ore di lavoro all'anno. Si ipotizzano, come detto in precedenza, una distanza di 90 cm dalla Sienite di Balma utilizzata per la pavimentazione, e di 50 cm dal muro rivestito in granito rosso. Entrambe le misure sono state registrate ad una distanza di circa 2 cm dalle superfici considerate.

Si riportano di seguito le schermate contenenti i valori di input ed i risultati cercati: nella prima (Fig. 4.30) sono riportati i valori di dose totale ricevuta dal lavoratore, relativa alla sola Sienite di Balme, utilizzata per la pavimentazione del marciapiede, dedicato al transito dei pedoni.

ALARA Calculations (Time, Distance and Shielding)					
Select Calculation Stay Time Stay Time - Add Shielding Distance Distance - Add Shielding Dose Received Dose Received - Add Shielding Select Dose-Rate Units Select Dose Received Units mSv/hr mSv Select Distance Units Select Stay Time Units Meters Hours	Initial Data Enter Known Dose-Rate 4.5e-4 mSv/hr At Known Distance (Enter) 0.02 Meters				
Enter Work Distance 0.9 Enter Work Time 1500 Hours	Calculated Dose Received 0.000333333333333 mSv Calculate About the ALARA Calculator				



Si è deciso di non considerare la pavimentazione in pietra rossa, utilizzata per la pista ciclabile. Il baricentro del lavoratore, punto nel quale si è valutato il valore di dose ricevuta, si trova ad una distanza (dalla pista ciclabile) tale da rendere trascurabile il livello di radiazione incidente proveniente dai radionuclidi presenti nel materiale utilizzato per il passaggio dedicato alle biciclette. Si ricorda come uno dei metodi per ridurre la quantità di dose ricevuta sia proprio la distanza (insieme allo shielding ed alla riduzione del tempo di esposizione).

Nella Figura 4.31 seguente, vengono riportati i valori di dose totale annua ricevuta dal lavoratore, relativa ai pannelli di granito rosso, usati come rivestimento per la facciata principale che dà su Corso Castelfidardo.

ALARA Calculations (Time, Distance and Shielding)						
Select Calculation Stay Time Stay Time - Add Shielding Distance Distance - Add Shielding Dose Received Dose Received - Add Shielding Select Dose-Rate Units Select Dose Received Units mSv/hr mSv	Initial Data Enter Known Dose-Rate 3.7e-4 mSv/hr At Known Distance (Enter) 0.02 Meters					
Select Distance Units Meters Select Stay Time Units Hours Hours Enter Work Distance 0.5 Enter Work Time 1500 Hours	Calculated Dose Received 0.000888 mSv Calculate About the ALARA Calculator					

Figura 4.31 ALARA Calculations: DER annua provocata dall'esposizione al granito rosso con cui è rivestita la facciata esterna. Applicando il principio della sovrapposizione degli effetti, è possibile ottenere il valore complessivo di *Dose Equivalent Rate* ricevuto dal lavoratore nel corso di un anno di lavoro, per confrontarlo poi con i valori limite della normativa.

$$DER_{totale} = 0,000333 + 0,000888 = 0,001221 \left[\frac{mSv}{a}\right] = 1,221 \left[\frac{\mu Sv}{a}\right]$$

Considerando che il limite di esposizione per un lavoratore non esposto è pari a 1 mSv/a, i valori di dose ricevuta dalla guardia è perfettamente a norma, essendo di tre ordini di grandezza inferiore al limite stabilito dal Decreto di riferimento.

In questo modo è possibile escludere particolari rischi per la salute degli occupanti dell'area, connessi alla presenza di valori di radiazioni ionizzanti anomale. Si evidenzia come per queste misurazioni sia stato considerato un periodo di tempo prolungato, e si sia valutata la dose equivalente ad una distanza maggiore, la quale rappresenta meglio la dose specifica ricevuta da chi si trovi in quella zona.

Ricordando come le radiazioni ionizzanti diminuiscano in maniera quadratica, all'aumentare della distanza del bersaglio dalla sorgente, è evidente una volta di più quanto sia sufficiente allontanarsi di pochi centimetri per far sì che la dose ricevuta diminuisca considerevolmente, in caso di valori modesti di attività radioattiva.

Questo comportamento era già stato constatato in precedenza sperimentalmente, durante le misurazioni eseguite in laboratorio sugli orologi e gli altri oggetti contenenti livelli di radioattività più o meno elevati.

5 Caso studio: valutazione della concentrazione di radon all'interno di un'abitazione costruita con calcestruzzo contenente cenere volante

In questo capitolo si discuterà prevalentemente del problema del radon indoor. Nei paragrafi iniziali verranno introdotti i principali isotopi del radon, protagonista dei prossimi paragrafi e si parlerà dei principali rischi per la salute umana, collegati alla presenza del ²²²Rn, in particolare in ambienti *indoor*. Verrà poi mostrata una panoramica sulla situazione in Italia, evidenziando le zone più a rischio e spiegando brevemente perché vi siano zone più a rischio di altre per quanto riguarda il radon. In seguito verranno presentati gli articoli salienti della normativa italiana, dedicati a questa tematica.

Un intero paragrafo sarà dedicato ad uno dei materiali da costruzione elencati in precedenza, possibile sorgente di rilasci in ambiente di radon. Il materiale in questione sarà il calcestruzzo, prodotto utilizzando cemento Portland composito. Il suo comportamento radioattivo, come vedremo, sarà da imputare alla presenza di cenere volante, utilizzata in percentuali considerevoli per la produzione del calcestruzzo, in sostituzione al clinker, per sfruttare le proprietà pozzolaniche delle ceneri. Esse contribuiscono a migliorare la resistenza e la durabilità del calcestruzzo riducendo i fenomeni cosiddetti *di creep* che si hanno maggiormente in calcestruzzi contenenti solo cemento Portland come detto nei capitoli precedenti. Per questo motivo è opportuno sottoporre le ceneri utilizzate per la produzione di calcestruzzo a test molto rigidi, in maniera tale da valutare la presenza di elementi radioattivi, i quali, se presenti, fungerebbero da emettitori perpetui di radiazioni ionizzanti, rendendo l'involucro abitativo un potenziale rischio per la salute degli occupanti.

A tale scopo, immagineremo di confezionare un prototipo di blocchi di calcestruzzo, con i quali verranno costruiti i muri dell'abitazione, in cui sarà utilizzata la cenere volante vista nel paragrafo 3.4, essendo in possesso dell'inventario degli elementi radioattivi presenti, con il rispettivo valore di attività, espresso in *Bq/kg*. Si prenderà come modello una tipologia di calcestruzzo presente in commercio, inserendo i valori corretti di cenere volante presente in percentuale all'interno del prodotto.

Nella parte cardine di questo capitolo verrà utilizzato un nuovo calcolatore, accessibile gratuitamente visitando il sito specializzato *wise-uranium.org*, facente parte degli applicativi del gruppo "*Dose and Risk Modeling Calculators*". Il nome di tale programma è "*Uranium in Soil and Building Material Individual Dose*", grazie al quale sarà possibile calcolare la dose assorbita da un occupante di un'abitazione costruita utilizzando il prototipo di calcestruzzo menzionato in precedenza, confezionato utilizzando la cenere volante di cui si è ampiamente discusso nel capitolo 3. I risultati che otterremo saranno da prendere in seria considerazione, in quanto come vedremo, evidenziano quanto grandi siano i rischi alla quale sarebbe esposta la popolazione, nel caso di esposizione prolungata in un ambiente nel quale venisse utilizzato un calcestruzzo come quello confezionato a scopo esemplificativo in questa trattazione.

5.1 Radon

Il radon (da qui in avanti sarà inteso come ²²²Rn, isotopo più diffuso e stabile) è un gas nobile radioattivo di origine naturale che si forma dal decadimento alfa del radio, appartenente alla serie dell'uranio-238 (²³⁸U), di cui è stata già esposta la catena di decadimento principale, nei capitoli precedenti. Esso è presente in tutte le rocce e i suoli, perciò anche il radon è diffuso con ubiquità. Il suo tempo di dimezzamento è pari a 3,82 giorni, e dal suo decadimento alfa derivano altri prodotti pericolosi per l'uomo come ²¹⁸Po e ²¹⁴Bi, anch'essi emettitori alfa ad alte energie. Tuttavia, a causa della brevità della emivita degli isotopi appena menzionati, sono sufficienti solo circa 4 ore affinché il radon si porti in condizioni di equilibrio secolare con essi.

Radionuclide	T _{1/2}	Energia α	Energia β	Energia γ
		(MeV)	(MeV)	(MeV)
²²² Rn	3,823 d	5,49		
²¹⁸ Po	3,05 min	6,00		
²¹⁴ Pb	26,8 min		0,67	0,242
			0,73	0,295
			1,02	0,352
²¹⁴ Bi	19,7 min		1,00	0,609
			1,51	1,12
			3,26	1,764
²¹⁴ Po	164 μs	769		
²¹⁰ Pb	22,3 y		0,015	0,047
			0,061	
²¹⁰ Bi	5,01 d		5,305	
²¹⁰ Po	138,4 d	5,305		

Si riporta nel seguito la tabella contenente la catena di decadimento del ²²²Rn.

Tabella 5.1: Catena di decadimento del ²²²Rn. [26]

Il radon rappresenta un problema soprattutto quando si trova *indoor* poiché, nonostante esso sia fortemente volatile, basta un livello di aerazione insufficiente per far sì che esso si accumuli negli ambienti di lavoro o domestici, e continui ad emettere energia e produrre gli altri isotopi (anch'essi forti emettitori alfa) visti in precedenza.

I prodotti di decadimento costituiscono il vero pericolo, in quanto essi sono elementi chimicamente attivi in grado di legarsi al particolato atmosferico ed alle particelle d'acqua, e se ingeriti o inalati, possono penetrare in profondità (specialmente nell'apparato respiratorio) irraggiando le cellule dall'interno, in particolare i bronchi. Questo motivo fa del radon un agente cancerogeno di classe I (per l'ISS). [3]

Il radon si forma principalmente all'interno di ammassi rocciosi sotterranei, nei quali sono contenuti gli elementi radioattivi dai quali esso si origina. Queste rocce sono per lo più di origine magmatica, come porfidi e graniti (elementi menzionati infatti nel D. Lgs., per i quali è opportuno prestare particolare attenzione, in quanto possibili emettitori di radiazioni ionizzanti). Il radon ha la capacità di migrare facilmente all'interno del corpo roccioso, essendo un gas inerte, sfruttando le fratture e i meccanismi di trasporto (principalmente convettivi) di altri gas presenti nel sottosuolo; l'insieme di questi fattori fa sì che il radon arrivi in superficie, specialmente penetrando nelle abitazioni, in particolare ai piani posti nelle immediate vicinanze del suolo.

Il parametro che regola maggiormente il trasporto e l'esalazione del radon è la permeabilità del terreno. Essa si distingue in permeabilità primaria (a seconda della tipologia di terreno, dalla sua densità e porosità) e secondaria (dovuta a fratture e discontinuità strutturali quali fessure nei pavimenti, pareti e condotti).

Esso risale in superficie e pervade gli ambienti chiusi, specie ai piani più bassi e interrati, grazie alla differenza di pressione presente tra il terreno e l'ambiente *indoor*. Questa differenza di pressione è causata da due fenomeni:

- "effetto camino": la temperatura degli ambienti indoor è maggiore di quella esterna e del terreno,
 in particolar modo nelle stagioni fredde, e ciò fa sì che il radon penetri all'interno dei locali.
- "effetto vento": in questo caso è la differenza nella velocità dell'aria tra interno ed esterno a trascinare il radon dentro abitazioni e luoghi di lavoro.

Un'ulteriore sorgente di radon nelle abitazioni può essere lo stesso involucro abitativo. Per i materiali da costruzione è molto frequente riscontrare la presenza di elementi radioattivi. Il radon in questo caso si diffonde per esalazione dai diversi materiali edili, quando essi abbiano al loro interno una quantità considerevole di elementi radioattivi progenitori, in particolare di quelli appartenenti alla serie dell'uranio naturale. Uno di questi elementi è il radio-226.

Questi radionuclidi sono presenti in diverse forme all'interno dei materiali da costruzione; spesso essi si trovano in materiali utilizzati *tal quali*, ad esempio in rocce ignee ricche naturalmente di radionuclidi, come in tufi e graniti. In altri casi possono essere contenuti in componenti derivati da rocce, specialmente se si tratta di aggiunte di inerti o leganti, come nel caso della pozzolana vulcanica presente nell'intonaco o di utilizzo di ceneri volanti all'interno del cemento (per sfruttare le proprietà pozzolaniche della cenere).

Nella tabella seguente [5.2] sono riportati valori tipici di concentrazione di attività (in Bq/kg) misurabili in materiali edilizi di uso comune, suddivisi per radionuclide:

materiale	concentrazione di attività tipica/(Bq/kg)			concentrazione di attività massima/(Bq/kg)		
Materiali edilizi comuni	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Calcestruzzo	40	30	400	240	190	1600
Calcestruzzo aerato e alleggerito	60	40	430	2600	190	1600
Mattone argilloso (rosso)	50	50	670	200	200	2000
Mattone di sabbia e calce	10	10	330	25	30	700
Pietra naturale da costruzione	60	60	640	500	310	4000
Gesso naturale	10	10	80	70	100	200
Sottoprodotti industriali comuni impiegati in materiali edilizi						
Derivati del gesso (fosfogesso)	390	20	60	1100	160	300
Scorie di altoforno	270	70	240	2100	340	1000
Ceneri di carbone volanti	180	100	650	1100	300	1500

Tabella 5.2: Valori di attività tipici di diversi materiali da costruzione [39]

Per la trattazione che segue, il nostro interesse cadrà principalmente sull'attività causata dalle ceneri volanti presenti all'interno del cemento Portland, utilizzato per confezionare i blocchi di calcestruzzo con i quali verrà costruita l'abitazione di prova. Delle tre colonne indicate per ogni materiale, l'attenzione si concentrerà prevalentemente sulla colonna del ²²⁶Ra, progenitore del ²²²Rn (a loro volta, entrambi originati dal ²³⁸U).

Un'altra caratteristica da tenere in considerazione è la solubilità del radon in acqua. Il suo adsorbimento è favorito in primis dalla presenza dei pori presenti negli ammassi rocciosi, sfruttati come polo di adsorbimento dal radon, quando essi sono saturi d'acqua; il trasporto del radon, e la sua emissione in ambiente una volta disciolti nelle acque di falda.

L'adsorbimento appena descritto è un fenomeno reversibile, con coefficiente di ripartizione acqua/aria per quanto riguarda il radon favorevole a quest'ultima. Questo fa sì che il radon sia facilmente desorbibile dall'acqua, e si liberi nell'aria senza difficoltà. È riscontrabile una presenza maggiore di radon nelle acque di falda, piuttosto che in quelle superficiali, poiché le ultime hanno una superficie di scambio tra acqua ed aria molto maggiore. Per fortuna i trattamenti subiti dalle acque ad uso domestico abbattono notevolmente la quantità di radon, e di altre sostanze pericolose, migliorandone la qualità complessiva e le capacità di stoccaggio. Tuttavia, questa facilità di essere desorbito dall'acqua contribuisce ad aumentare la concentrazione del radon in ambienti *indoor.* Si sottolinea come questa via di immissione in ambiente sia in questo caso indipendente dalla posizione del locale considerato (in particolare dalla distanza dal terreno, dal piano in cui si trova il locale). In ambiente domestico si stima che il coefficiente di trasferimento del radon dall'acqua sia dell'ordine di 10⁻⁴; facendo un esempio pratico, questo vuol dire che una concentrazione di ²²²Rn in acqua pari a 10 Bq/kg provoca un aumento della concentrazione in aria pari a 1 Bq/m³. Si stima che il desorbimento costituisca il 10-15% del radon presente in ambienti *indoor*. [40]

Volendo mettere in ordine di peso le principali sorgenti di radon *indoor,* si ottiene la tabella 5.3 riportata di seguito, nella quale è possibile notare questo ordine: il sottosuolo, l'aria esterna (non considerata in questa trattazione) i materiali da costruzione e l'emanazione da acqua utilizzata a fini domestici. Questi valori medi valgono per edifici standard in buone condizioni, e sono stati divulgati da uno studio pubblicato nel *Report UNSCEAR 1993.* [51]

Sorgenti di radon	Rateo d'ingresso (Bq/m³ h)	Percentuale
Suolo (diffusione + advezione)	27.5	56
Aria esterna (infiltrazione)	10	20
Acqua e gas (emanazione)	1.5	3
Materiali da costruzione	10	21

Tabella 5.3: Sorgenti di radon indoor con relative percentuali [39]

Considerando che i materiali da costruzione incidono in media per circa il 21% sulla quantità di radon *indoor*, un intervento mirato su questi materiali consentirebbe di abbattere notevolmente i valori di esposizione annuale al radon per gli occupanti, e con esso, i rischi per la salute ad esso collegati.

5.2 Aspetti sanitari

Secondo l'Istituto Superiore di Sanità, il radon è secondo solamente al consumo di tabacco, nella classifica delle principali cause di tumore ai polmoni. Secondo un recente studio, si stima che su 40.000 casi di tumore ai polmoni registrati in un anno in Italia, circa 3200 di questi sono da attribuire al radon, poco meno del 10%.

I rischi di tumore polmonare aumentano in modo proporzionale con concentrazione di radon in ambienti *indoor* e tempi di esposizione. Non esiste un valore di soglia al di sotto del quale è possibile affermare che il rischio legato all'esposizione sia nullo. Si può invece affermare che il rischio maggiore di incorrere in un tumore si ha per tempi di esposizione lunghi in ambienti con bassi livelli di concentrazione di radon, piuttosto che per brevi esposizioni in ambienti in cui si raggiungono picchi di concentrazione. [3]

Come detto in precedenza, il radon di per sé non ha una pericolosità elevata per i nostri polmoni, in quanto il suo tempo di dimezzamento (3,82 giorni) è relativamente lungo, è probabile che la frazione inspirata possa essere espulsa prima di trasmutare. Non vale lo stesso discorso per i suoi prodotti di decadimento, con tempi di dimezzamento molto minori e chimicamente reattivi, a differenza del radon, chimicamente stabile.

Osservando la Tabella 5.1 notiamo che i prodotti di decadimento più pericolosi sono ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi, ²¹⁴Po, ²¹⁰Pb, che possono formare legami con particolato atmosferico e particelle acquose, oltre che rimanere liberi o associati tra loro in cluster.

Il nostro sistema di filtraggio da pulviscolo e particolato non è in grado di ostacolare efficacemente l'ingresso di queste particelle dannose, che si insidiano in profondità ed emettono grandi quantità di energia, danneggiando soprattutto l'apparato respiratorio. I danni più pericolosi, che possono portare ad un quadro tumorale, sono causati dagli emettitori α a vita breve, come ²¹⁸Po e ²¹⁴Po.

5.3 Legislazione

La normativa di riferimento in merito al radon indoor ha subito una modifica importante nell'ultimo Decreto Legislativo, il 101/2020, in vigore dal 27 agosto 2020. Un'intera sezione di tale D. Lgs. (*"Titolo IV, Capo I, Esposizione al radon"*) è dedicata al problema del radon indoor. [16]

Il piano si basa sul principio di giustificazione, ottimizzazione e limitazioni delle dosi. Per la prima volta, a livello nazionale, viene fornito un livello massimo di riferimento di concentrazione del radon per le abitazioni, esistenti e da costruire. In precedenza tali valori erano forniti solo per i luoghi di lavoro. Tali limiti vengono enunciati nell'Articolo 12 e sono i seguenti:

- **300** $\frac{Bq}{m^3}$ in termini di concentrazione media annua di attività di radon in aria per **abitazioni esistenti**;
- **200** $\frac{Bq}{m^3}$ in termini di concentrazione media annua di attività di radon in aria per **abitazioni costruite** dopo il 31 dicembre 2024;
- **300** $\frac{Bq}{m^3}$ in termini di concentrazione media annua di attività di radon in aria per **luoghi di lavoro**;

In caso i livelli misurati superino tali limiti, occorre rispettare il seguente valore di soglia:

 6 mSv di dose efficace annua in caso di concentrazione media annua superiore ai livelli di riferimento elencati nei tre punti precedenti.

Sebbene questi siano i valori della normativa, nel 2009 l'Organizzazione Mondiale della Sanità ha raccomandato un livello preferibilmente non superiore ai 100 Bq/m³ [41]. Va sottolineato inoltre come non vi sia una soglia al di sotto della quale si possano escludere danni all'apparato respiratorio. Uno studio dell'ISS sottolinea come il 90% delle vittime di tumori polmonari abbia vissuto in ambienti con concentrazioni di radon inferiori a 200 Bq/m³. [3]

A rigore, si ricorda il già citato comma 1 dell'Articolo 29 del D.Lgs. 101/2020, relativo al tema delle radiazioni gamma emesse da materiali da costruzione il quale stabilisce testualmente quanto segue:

"Il livello di riferimento applicabile all'esposizione esterna alle radiazioni gamma emesse da materiali da costruzione in ambienti chiusi, in aggiunta all'esposizione esterna all'aperto, è fissato in 1 mSv/anno."

Il Decreto citato ha messo fine all'esistenza di una zona d'ombra all'interno della normativa italiana riguardo al problema del radon in ambienti *indoor* domestici. In precedenza occorreva prendere come limiti valori raccomandati da EURATOM, proposte del consiglio dell'UE, linee guida della *World Health Organization* ed altre commissioni del settore.

5.4 Situazione Italiana

In questo paragrafo verrà illustrata la situazione nazionale per quanto riguarda le concentrazioni di radon indoor. Le informazioni seguenti sono estratte da studi effettuati da *ISS* (Istituto Superiore di Sanità), *ARPA* (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale) ed *ISPRA* (Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale). [42]

Uno studio del 1988 coordinato da *ENEA-DISP* (ora *ISPRA*) e dall'*ISS*, valutò l'esposizione media della popolazione al radon presente nelle abitazioni. Lo studio proseguì fino al 1997. Vennero preferiti come bersaglio dello studio gli edifici ad uso abitativo piuttosto che quelli industriali o del terziario, in quanto luoghi in cui si trascorre mediamente gran parte della frazione del tempo speso in luoghi *indoor*.

Furono analizzati dati provenienti da 5000 famiglie, in un campionamento effettuato in 200 comuni italiani, equamente distribuiti per regione. Un'ulteriore suddivisione venne fatta per ampiezza demografica: 50 di essi con più di 100.000 abitanti, i restanti 150 estratti casualmente.

Il valore di concentrazione nazionale media rilevata fu pari a 70 Bq/m³. Volendo paragonare questo dato ad altri valori notevoli, si registra che la media mondiale è nell'intorno dei 40 Bq/m³, mentre quella europea è di circa 59 Bq/m³. [42]



Figura 5.1: Concentrazione di attività media regionale [42]

Analizzando i valori puntuali, sono riscontrabili abitazioni con valori di concentrazione di poche decine di Bq/m³, fino ad avere valori di centinaia o addirittura migliaia di Bq/m³. Questa differenza è dovuta tanto a caratteristiche proprie del terreno sul quale sono costruite le abitazioni (presenza di uranio e radio nel suolo), quanto alla differente qualità dell'involucro abitativo (presenza di radionuclidi nei materiali da costruzione) ed alle abitudini degli occupanti (principalmente all'areazione degli ambienti).

Occorre sottolineare come il valore medio regionale, indicato nella figura 5.1 della pagina precedente, sia utile a fornire solamente un quadro generale, ma nessuna indicazione riguardo alle concentrazioni di radon presente nelle singole abitazioni.

Per concludere, le stime ricavate dallo studio nazionale effettuato negli anni '90 affermano che in Italia vi sia una concentrazione di radon superiore a 400 Bq/m³ in circa l'1% delle abitazioni, mentre nel 4% di esse si registri un valore maggiore ai 200 Bq/m³.

Situazione Piemonte

Passando ad analizzare più da vicino la situazione del Piemonte, vi è uno studio più recente effettuato dall'ARPA nel 2009 [43]. Il valore medio piemontese è di 69 Bq/m³, mentre sono lo 0,7% le abitazioni in cui si supera una concentrazione di 400 Bq/m³ (valore limite per le normative degli anni passati, ora passati a 300 Bq/m³ per edifici esistenti e 200 Bq/m³ per quelli di nuova costruzione). Questi valori sono perfettamente in linea con quelli medi nazionali. L'istogramma successivo (Figura 5.2), mostra la distribuzione del radon nelle abitazioni nelle quali sono state svolte le misurazioni di concentrazione.



Figura 5.2: Distribuzione del radon in Piemonte [43]

Un altro grafico importante mostra quanto impatto abbia il piano alle quali siano state effettuate le misure, in relazione alle concentrazioni di radon rilevate. (Figura 5.3)



Figura 5.3: Distribuzioni radon al variare del piano dell'edificio [43]

È possibile notare come la curva "si appiattisca", man mano che ci si avvicina al terreno. In particolare, una frequenza di valori maggiori di concentrazione si registra nei piani interrati (linea rossa della figura 5.3). Al contrario, allontanandosi dal terreno, la curva assume una forma a campana, con frequenze maggiori per basse concentrazioni di radon, e frequenze praticamente nulle per concentrazioni elevate. Questo conferma le affermazioni fatte in precedenza, che evidenziano come gran parte del radon presente indoor provenga dal suolo e dalle acque di falda, penetrando dalle irregolarità presenti nel terreno e negli strati superficiali usati per fondamenta e pavimentazioni. Nella figura 5.4, è raffigurata la mappa regionale, suddivisa per provincie e comuni, riportante i valori medi comunali, rilevati con misurazioni effettuate al piano terra delle abitazioni sottoposte allo studio dell'ARPA.



Figura 5.4: Piemonte: valori medi comunali di concentrazione di attività di radon indoor [43]

5.5 Cemento Portland

In questo paragrafo verranno illustrate le ipotesi ed i calcoli effettuati per la modellizzazione del mattone in calcestruzzo utilizzato per costruire i muri portanti ed i tramezzi del modello di unità abitativa considerata.

A partire dai dati disponibili nella letteratura dedicata (i quali verranno citati solo brevemente, in quanto non oggetto principale della trattazione), immagineremo di confezionare un prototipo di mattone in calcestruzzo industriale, utilizzando le percentuali corrette di materia prima impiegate abitualmente per produrre calcestruzzo.

Analizzando nel dettaglio il composto, occorre specificare innanzitutto la composizione del cemento utilizzato. Nel nostro caso verrà impiegato cemento Portland alle ceneri volanti, per la normativa denominato *CEM II/A-V* (tabella 5.4), ovvero cemento Portland alle ceneri volanti silicee.



Safety Data Sheet for Portland Cement

[Revised] Version 16 / 04/07/2017

Replaces all previous versions

			Composition (percentage by mass ^a)										
	Main constituents												
sec	sa					Pozz		FI	ly ash				÷
Main typ	Names of the 27 p	roducts : types) Clink	Clinker	Blast – furnace slag	Silica fume	Natural	Natural calcined	Siliceous	Calcareous	Burnt Shale	Lime		Minor Cons
			к	S	D⁵	Р	Q	V	w	т	L	LL	
CEMI	Portland Cement	CEMI	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Bedland Comont alon	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland Cement slag	CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland silica fume Cement	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland pozzolana	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cement	CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEMII/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
Ē	Portland fly ash	CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
G	Cement	CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portland burnt shale	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	Cement	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	Portland limestone	CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	Cement	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portland composite ^o	CEM II/A-M	80-88	<				12-2	20			>	0-5
	Cement	CEM II/B-M	65-79	<				21 -	35			>	0-5

Tabella 5.4: Tipologie di cemento prodotte da CEMEX, seguendo i requisiti della normativa UNI-EN 197-1 [44]

Una miscela molto simile a quella che verrà impiegata per la produzione dei "nostri" mattoni in calcestruzzo è quella commercializzata da *CEMEX*, multinazionale messicana con sede a Monterrey, specializzata in produzione di materiali edilizi come cemento, calcestruzzo ed aggregati, la quale rifornisce oltre 50 paesi in tutti i continenti. In particolare, è leader mondiale nella produzione di calcestruzzo per quantità annua prodotta. [45]



Cemento Portland cenere EN 197-1 - CEM II / AV 42.5 R

Il cemento VERDE è un ottimo cemento per lavori di ristrutturazione e costruzione e prefabbricati di piccole dimensioni.

La tecnologia di produzione del cemento GREEN consiste nella macinazione congiunta di clinker Portland, ceneri volanti di silice di alta qualità e un additivo solfato che funge da regolatore del tempo di presa.

Figura 5.5: Cemento utilizzato per la produzione dei blocchi di calcestruzzo [46]

Le figure presenti mostrano il prodotto utilizzato, di cui vengono riportate l'immagine del sacco, con una breve descrizione direttamente dal sito *Cemex* (Figura 5.5) e le principali caratteristiche del cemento, estratte dalla scheda tecnica (Tabella 5.5). Il parametro di maggiore importanza, riportato in tale scheda riguarda la percentuale di cenere volante presente all'interno del cemento Portland. Esso è stato scelto come valore massimo della classe di appartenenza, ovvero pari al **20% in peso**.

PARAMETRI TECNICI	REQUISITI standard UNI-EN 197-1	RISULTATI (cementificio)	PROVE SECONDO STANDARD
CEM II / AV 42.5 R "VERDE"			
Cenere presente nella miscela (%)	\geq 6,0 \leq 20,0	20,0	UNI-EN 197-1
Superficie specifica Blaine (cm ² / g)	-	4547	UNI-EN 196-6
Inizio presa (min)	≥ 60	207	UNI-EN 196-3
Fine presa (min)	-	264	UNI-EN 196-3
Variazione del volume (mm)	≤ 10	1.0	UNI-EN 196-3
Resistenza a compressione (MPa) - dopo 2 giorni - dopo 28 giorni	≥ 20,0 ≥ 42,5 ≤ 62,5	26.2 54.9	UNI-EN 196-1
Contenuto di SO 3 (%)	≤ 4,0	2.88	UNI-EN 196-2
Contenuto CI (%)	≤ 0,1	0.077	UNI-EN 196-21
Contenuto di cromo Cr (VI) (ppm)	≤ 2 .0	0.24	UNI-EN 196-10

Tabella 5.5: Parametri tecnici del cemento utilizzato (secondo UNI-EN 197-1) [46]

A partire da questo tipo di cemento, si assume per ipotesi che le ceneri volanti contenute all'interno del composto abbiano caratteristiche di attività corrispondenti a quelle del campione del paragrafo 3.4, di cui si è a conoscenza dell'attività specifica, suddivisa per radionuclidi. Viene riportato per praticità un estratto della Tab. 5.6, già vista nel paragrafo menzionato. Questa volta però, il radionuclide di nostro interesse sarà solamente ²³⁸U, dal quale ha origine il ²²²Rn, a seguito di decadimenti successivi.

Radionuclide		Attività [Bq/kg]
	Seguendo norma UNI 1165 - 2017	
- ²³⁸ U		< 200
- ²²⁶ Ra / ²²⁸ Ra		< 10
- ²³² Th		< 9,7
- ⁴⁰ K		1120 ± 47

Tabella 5.6: Estratto della tabella 3.1: Inventario dei radionuclidi presenti nella cenere volante, con relativo valore di attività

Nella Tab. 5.7 sono riportati gli analoghi valori di attività, relativi in questo caso al clinker (presente all'80%).

Radionuclide		Attività [Bq/kg]
	Seguendo norma UNI 1165 - 2017	
- ²³⁸ U		< 120
- ²²⁶ Ra / ²²⁸ Ra		< 10
- ²³² Th		< 8
- ⁴⁰ K		1000

Tabella 5.7: Inventario dei radionuclidi presenti nel clinker, con relativo valore di attività

A partire dai dati di attività evidenziati nelle tabelle, espressi in Bq/kg, occorre ricavare l'attività equivalente del calcestruzzo. A tal proposito, occorre esplicitare la composizione della miscela usata per produrre il calcestruzzo. Come ben noto, il calcestruzzo è un composto costituito da una miscela di componenti liquide (acqua), leganti (cemento) ed aggregati fini e grossolani (sabbia e ghiaia), oltre ad additivi ed aggiunte, a seconda delle caratteristiche chimico/fisiche desiderate. Occorre prestare attenzione alle dosi utilizzate durante la produzione, in particolare bisogna valutare attentamente il rapporto acqua/cemento, poiché esso influenza due parametri chiave: resistenza e lavorabilità. Questa relazione è schematizzata nella Fig. 5.6.



Figura 5.6: Parametri influenzati dal rapporto acqua/cemento [47]

Il rapporto acqua/cemento è la relazione (espressa in peso) tra la quantità di acqua totale nell'impasto e la quantità di cemento. Non è così semplice conoscere a priori la prima quantità, poiché dipende anche dall'umidità contenuta negli aggregati (difficilmente ghiaia e sabbia sono completamente secche). Questo rapporto è fondamentale, in quanto influenza diverse caratteristiche e prestazioni fondamentali, come la resistenza a compressione, la permeabilità, l'entità del ritiro e la lavorabilità. Un punto di ottimo, il quale fornisca completa idratazione alla miscela, buoni valori di resistenza a compressione e un buon livello di lavorabilità è ricavabile dalla reazione stechiometrica di idratazione dei principali leganti del cemento, ovvero idrossido di calcio (CaO) e silice (o anidride silicica SiO₂).

$$3Ca0.2Si02 + 3H_20 = 2(3Ca0.Si0_2) + 6H_20$$

La quantità di acqua necessaria per idratare completamente 100 g di cemento Portland ordinario è di circa 42 g (19 g trattenuti dai pori del gel, 23 di pura idratazione). Si evince che il rapporto teorico acqua/cemento è pari a 0,42. Nella pratica si tende ad aggiungere una quantità maggiore di acqua per rendere più agevole la lavorabilità, ma queste considerazioni esulano dalla nostra trattazione. [47] Partendo da questo valore teorico, useremo un rapporto di 0,40 per semplificare i calcoli. Inoltre, in questo modo, sarà analizzato uno scenario più conservativo. Per determinare la quantità di ghiaia e sabbia utilizzata nel composto è stata seguita una composizione comune, presente in molti manuali del settore, ottimo punto di partenza per la produzione di un metro cubo di calcestruzzo per preparazione di massetto o getti di muratura:

- Cemento: 300 Kg
- Acqua: 120 l
- Sabbia: 0,4 m³
- Ghiaia: 0,8 m³

Le seguenti proporzioni rispettano il valore del rapporto acqua/cemento di cui si è discusso, e forniscono buone prestazioni meccaniche al calcestruzzo prodotto. Nella tabella 5.8 sono riportate le quantità considerate, di cui vengono esplicitati volume, peso specifico e massa, in modo da poter ottenere un valore unitario univoco, che servirà più avanti per i calcoli dell'attività specifica:

Componente	Volume [m ³]	Peso specifico [kg/m³]	Massa [kg]
Cemento	0,1	3000	300
Acqua	0,12	1000	120
Sabbia	0,4	1700	680
Ghiaia	0,8	1600	1280
Calcestruzzo	1*	2380	2380

Tabella 5.8: Composizione calcestruzzo utilizzato per produrre i blocchi di cemento
Analizzando la tabella è opportuno fare qualche osservazione; per quanto riguarda il volume del calcestruzzo prodotto, sarebbe sbagliato sommare algebricamente i volumi dei prodotti, in quanto essi presentano una percentuale di vuoto inter-granulare notevole, in particolare tra gli aggregati grossolani (sabbia e ghiaia).

Durante il miscelamento questo grado di vuoto si riduce ad un valore prossimo a zero, ossia la parte liquida della miscela va a riempire la porzione di volume occupata in precedenza dall'aria. Il peso specifico di circa 2400 kg/m³ del metro cubo di calcestruzzo prodotto rispetta i valori presenti in letteratura.

Possiamo utilizzare il composto per produrre i blocchi forati in calcestruzzo che verranno utilizzati per costruire la casa. In Tab 5.9 sono mostrate le taglie utilizzate e vengono riassunte le caratteristiche principali.

Tipo e dimensioni	C12 (50x20x12 cm)	C15 (50x20x15 cm)	C25 (50x20x25 cm)			
	A STATE					
Da intonaco	SÌ	SÌ	SÌ			
Utilizzo	Tramezze interne	Tramezze divisorie	Muri perimetrali			
Peso (kg/cad.)	13	15	25			
Densità (kg/m³)	1,08	1	1			

Tabella 5.9: Caratteristiche blocchi utilizzati, con indicazione relativa al loro utilizzo [48]

Il parametro che a noi interessa è il valore di attività (in *Bq/kg*) relativo al calcestruzzo nel suo insieme, e quindi al blocco di cemento prodotto. Per ottenere tale valore occorre fare una proporzione, calcolando la percentuale in massa di cenere volante presente all'interno di un metro cubo di calcestruzzo. Sapendo che nel cemento utilizzato è presente il 20% in peso di cenere volante, è possibile ottenere i chilogrammi equivalenti presenti in un metro cubo di calcestruzzo, nel modo seguente:

$$\frac{kg \ Cenere \ Volante}{m^3 \ CLS} = 0.2 \times 300 = 60 \qquad ; \qquad \frac{kg \ Clinker}{m^3 \ CLS} = 0.8 \times 300 = 240 \qquad \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

La percentuale di cenere volante presente sul totale della massa presente all'interno del calcestruzzo si ottiene invece con la seguente formula:

$$\frac{\% \ Cenere \ Volante}{m^3 \ CLS} = \frac{60}{2380} \cong 2,5 \ \% \qquad ; \qquad \frac{\% \ Clinker}{m^3 \ CLS} = \frac{240}{2380} \cong 10 \ \% \qquad [\%]$$

Con un'ultima semplice formula, si ottiene il valore di attività del calcestruzzo, con il quale saranno prodotti i mattoni che verranno utilizzati per erigere i muri dell'abitazione:

$$\frac{Attività}{m^3 CLS} = 200 * 0.025 + 120 * 0.10 = 17.143 \quad [Bq/kg]$$

Inserendo questo dato nel calcolatore, insieme ad altri parametri opportunamente selezionati, è possibile ottenere il valore di concentrazione di attività del radon presente all'interno dell'abitazione rilasciata dall'involucro, e del relativo *DER*. In base al valore ricavato, si può affermare se vi siano rischi per la salute degli occupanti legati alla presenza del radon *indoor* rilasciato direttamente dai muri dell'abitazione.

5.6 WISE Uranium in Soil and Building Material Individual Dose Calculator

Verrà ora analizzato dettagliatamente l'applicativo utilizzato per ricavare i valori di attività per metro cubo, ovvero *Uranium in Soil and Building Material Individual Dose Calculator*. Questo calcolatore fornisce una stima approssimativa del rischio di radiazioni per un individuo che viva in una casa costruita al di sopra di un suolo contaminato dall'uranio e dai suoi prodotti di decomposizione, ed in una casa costruita con materiale più o meno contaminato. Lo scenario di esposizione è quello mostrato nella Figura 5.7, la quale considera i seguenti percorsi: ingestione di suolo, inalazione di polvere, esposizione esterna, ingestione di prodotti coltivati in tale suolo, ingestione di acque sotterranee contaminate e inalazione di radon. La nostra attenzione si focalizzerà principalmente su quest'ultimo punto. Il calcolatore utilizza modelli e parametri predefiniti presentati nella Guida allo Screening del Suolo per i Radionuclidi (SSGR), redatta dall'EPA statunitense. [49]



Figura 5.7: Scenario di esposizione utilizzato dal software Uranium in Soil and Building Material Individual Dose Calculator [49]

Si elencano le principali differenze tra l'approccio utilizzato in questo calcolatore e quello dell'SSGR, in particolar modo per quanto riguarda il radon, protagonista del capitolo:

 Il modello SSGR determina le concentrazioni di radionuclidi nel suolo tali da comportare un valore ben definito di rischio (10⁻⁶). Questo calcolatore esegue l'operazione inversa: determina il rischio per la salute per una data concentrazione di radionuclidi nel suolo.

- <u>Si considera il contributo dei materiali da costruzione per ricavare il valore di esposizione esterna alla</u> radiazione in ambienti *indoor*.
- Vengono considerati i contributi derivanti da ogni radionuclide, preso singolarmente, per ogni via di esposizione analizzata.
- <u>Nell'analisi è inclusa la via di inalazione del radon, basandosi su calcoli e parametri del già menzionato</u> <u>studio UNSCEAR del 1993.</u> [51]

In quest'ultimo punto vi è la differenza più netta con il modello SSGR; questa via di esposizione è volontariamente omessa nel loro modello, in quanto soggetta ad un numero elevato di incertezze connesse ad essa.

La tipologia ed il valore di contaminazione proveniente da suolo e/o del materiale da costruzione vengono definiti nella prima sezione, denominata *Input Data*.

Nella seconda parte, *Exposure Parameters*, è possibile settare diversi parametri utilizzati per i calcoli. Questi parametri presentano valori ragionevoli di default, che possono essere modificati a seconda delle necessità. Eventuali ipotesi fatte per i calcoli verranno descritte più avanti in questo capitolo.

Un discorso analogo è valido per la terza ed ultima sezione di parametri di input, chiamata *Site Parameters*. In tale sezione andranno inseriti i valori relativi a più caratteristiche del sito considerato, ad esempio quelle relative al suolo, ai materiali da costruzione impiegati ed altri parametri tipici dell'edificio considerato, ai principali dati climatici della zona ed altre caratteristiche generali del terreno. Anche in questo caso vi è una moltitudine di valori predefiniti, modificabili a piacere, seguendo le linee guida presenti in dettaglio nella sezione *Help* del programma.

La maggior parte dei valori utilizzati per i diversi parametri è molto conservativa, in quanto questo calcolatore propone un utilizzo in una fase iniziale, preventiva, della valutazione del sito. Pertanto, i modelli utilizzati sono volutamente più semplici rispetto a quelli presenti in altri calcolatori, basandosi su parametri ricavabili facilmente. I valori che quantificano il rischio connesso all'esposizione ai radionuclidi presenti nel suolo, nelle acque e nei materiali da costruzione nel luogo considerato, ottenuti utilizzando i parametri di cui si è appena discusso, possono quindi sovrastimare il rischio reale, a seconda dell'area considerata.

Si passa ora al riempimento delle sezioni di cui si è discusso finora, soffermandoci più dettagliatamente sui valori più rilevanti per i nostri scopi, che ci permetteranno di ottenere una valutazione generale della qualità dell'abitazione costruita, e dei rischi connessi all'utilizzo della cenere volante, impiegata per la produzione del cemento Portland.

5.7 Modello di calcolo

Il primo blocco comprende i dati di input relativi alla concentrazione di radionuclidi nel suolo e nei materiali da costruzione. Per quanto riguarda il suolo, verrà utilizzato un valore medio di concentrazione di materiale radioattivo presente nelle librerie del calcolatore, pari a 3 *mg/kg*. In automatico il programma compila i campi relativi ai valori di attività, per i radionuclidi delle serie elencate (ed eventuali prodotti di decadimento se vi è la denominazione "+D"). Per quanto riguarda l'attività presente nel materiale da costruzione, verrà utilizzato il valore ricavato nell'ultima equazione del paragrafo 5.5, relativo all'attività specifica del calcestruzzo prodotto.

Reset Sample Input Data HE	LP
Contaminant concentration in soil 3 mg/kg V Natural uranium (with progeny) V	
Activity concentrations Unit: ○ pCi/g ● Bq/g	
Activity concentrations in soil U-238 Series U-235 Series 0.037068 U-238 +D 0.001704 U-235 +D 0.037068 U-234 0.001704 Pa-231 0.037068 Th-230 0.001704 Ac-227 +D 0.037068 Pb-210 +D Activity concentrations in soil are determined according to contaminant concentration entry, but can also be entered independently	Activity concentration in building material U-238 Series 0.017143 Ra-226 +D
+D = short-lived decay products assumed to be in equilibrium	

Figura 5.8: Impostazione parametri sezione "Input"; radon indoor

Nella seconda sezione vengono riportati i parametri determinati dal comportamento dei soggetti che risiedono nell'abitazione. Per quanto riguarda questa sezione, si è deciso di lasciare inalterati la maggior parte dei dati presenti di default; questa scelta è principalmente legata al fatto che molte voci in questa sezione riguardano dati di ingresso (e relativi risultati) ai quali non siamo interessati direttamente, poiché esulano dagli scopi della nostra trattazione. Si fa riferimento alle sezioni legate ad ingestione di suolo, polveri emesse da esso e vegetali cresciuti nel suolo considerato.

Verranno invece modificati in parte i valori generali, nel modo seguente:

La frazione di tempo trascorso indoor (ET_i) viene settata a 0,8 (una media di oltre 19 ore al giorno, valore usato nello studio UNSCEAR [51]). Questa frazione di tempo è ragionevole se si considera ad esempio un lavoratore che si trova in condizione di smart-working. La scelta è volutamente più conservativa del valore di default fornito dalle guide SSGR, pari a 0,683. In certi casi sarebbe lecito aumentare questo valore, anche fino a 0,9.

- La frazione di tempo trascorso *outdoor* (*ET*_o) ma nei pressi dell'abitazione è settata a 0,06 (valore vicino a quello di default, pari a circa un'ora e mezza).
- Il valore in metri cubi di aria inalata in un giorno dagli occupanti della casa è impostato pari a 20 m³/d.
 Questo valore dipende da molti fattori, come età, sesso e condizioni fisiche generali, oltre che dall'intensità dell'attività fisica svolta. Un uomo in media inala una quantità di aria pari a 0,8 m³/h, che moltiplicati per 24 ore forniscono il valore scelto.

Gli altri valori riportati nella figura 5.9 di seguito non hanno subito modifiche dalla condizione di default.

Default Exposure Parameters HELP					
General <u>HELP</u> 🖻					
30 ED (exposure duration) yr 350 EF (exposure frequency) d/yr 0.06 ET _o (outdoor exposure time fraction) unitless 0.8 ET _i (indoor exposure time fraction) unitless					
Ingestion of Radionuclides in Soil HELP 🖻					
Age AdjustedAdult Only100IRa (adult soil ingestion rate) mg/d 50 IR s (soil ingestion rate) mg/d200IRc (child soil ingestion rate) mg/d 50 IR s (soil ingestion rate) mg/d6EDc (child exposure duration) yr (remainder = adult) 50 IR s (soil ingestion rate) mg/d120IRs (soil ingestion rate) mg/d $^{-1}$ 1					
Inhalation of Radionuclides in Fugitive Dusts Emitted from Soil <u>HELP</u>					
20 IR _i (air inhalation rate) $m^{3/d}$					
Ingestion of Homegrown Produce Grown in Soil HELP =					
42.7 IR _{vf} (vegetable and fruit ingestion rate) kg/year 4.66 IR _v (leafy vegetables ingestion rate) kg/year 0.5 CPF (contaminated plant fraction from the site) unitless					
Ingestion of groundwater contaminated from radionuclides in soil <u>HELP</u>					
2 IR _w (drinking water intake rate) L/d					

Figura 5.9: Impostazione parametri sezione "Exposure Parameters"; radon indoor

L'ultima sezione è quella più corposa, nella quale vanno inseriti i dati relativi al sito in questione. Procedendo nell'ordine si trova una prima parte generale, nella quale vanno inserite la superficie dell'area considerata, un fattore correttivo *ACF* che interviene in caso di sorgenti con superfici ridotte, la frazione di terreno coperta da vegetazione *V*, e la profondità media del suolo d_s . Questi valori sono lasciati pari a quelli di default; in particolare il campo relativo a d_s viene lasciato vuoto in quanto è da compilare solo in caso di variazioni a parametri successivi, relativi all'acqua di falda, non di nostro interesse diretto.

Nelle due sezioni successive vanno impostati diversi parametri fisici che regolano la diffusione del radon attraverso i materiali da costruzione ed il suolo. I valori hanno denominazioni simili e sono rappresentativi di quantità fisiche equivalenti tra loro. Occorre stare attenti a non confondere le sezioni in cui inserire i dati. A partire dal *Silt* ("limo" in italiano), e dal *Concrete* ("cemento"), di cui vengono forniti i dati di default, sono stati modificati i valori seguenti:

Per quanto riguarda il suolo:

- il valore di *ε*, relativo alla porosità del suolo viene portato a 0,45 (in origine era 0,5).
- il valore di *f*, che rappresenta la frazione di radon emanata dal suolo viene portato a 0,3 (di default sarebbe 0,24). Questa scelta rappresenta il valore estremo tipico di emissione del suolo (0,1 0,3), ovvero viene scelto lo scenario peggiore possibile.
- la modifica di questi valori determina il cambiamento automatico del coefficiente di diffusività del radon nell'aria *D_e* [m²/s], definita dalla legge di Fick. Essa stabilisce che la densità del flusso del gas è linearmente proporzionale al gradiente di concentrazione. Il valore ha un suo massimo in caso di diffusione nell'aria (1,1x10⁻⁵ [m²/s]), mentre in caso di bassa permeabilità si possono raggiungere valori dell'ordine di 10⁻¹⁰ [m²/s]. Il valore ottenuto è intermedio, pari a 5,961x10⁻⁷ [m²/s]. Gli altri due valori (densità del terreno e percentuale di pori riempita dall'acqua) rimangono quelli di default.

Per quanto riguarda il materiale da costruzione:

si modifica solamente il valore di *f_m*, che passa da 0,15 a 0,2. Maggiore è questo valore, che indica la porosità del materiale da costruzione, maggiore è la probabilità che il radon fuoriesca e venga rilasciato in ambiente. Nella tabella seguente vengono riportati valori tipici per diversi materiali.

Material	typical	range	
Brick (clay)	0.04	0.02 - 0.1	
Concrete (ordinary)	0.15	0.1 - 0.4	
Gypsum (natural)	0.08	0.03 - 0.2	

Tabella 5.10: Range di valori di porosità tipici per vari materiali [49]

occorre fare una precisazione sul valore di densità del materiale: il valore di densità del calcestruzzo ottenuto attraverso i calcoli svolti in precedenza è risultato pari a circa 2,4 kg/dm³ e viene riportato tale e quale in questo punto, nonostante questo valore non rappresenti la densità reale dei blocchi prodotti, essendo essi mattoni forati. Il valore reale, che rappresenterà il peso specifico del muro che si costruirà, si otterrà modificando opportunamente il valore del prossimo punto:

A partire dalle dimensioni dei blocchi C25, si considera di aggiungere una quantità di malta cementizia di spessore pari a 1,5 cm su ognuna delle sei facce del blocco. Il peso specifico del mattone viene scelto pari a 1 kg/dm³, mentre per la malta cementizia viene utilizzato il valore ottenuto dai calcoli, risultato della Tabella 5.8 (2,4 kg/dm³). Si calcola quindi il valore di densità complessivo, del blocco insieme alla malta cementizia utilizzata per unire tra loro i mattoni, con la formula seguente:

$$\rho_{reale} = \frac{(0,3 \cdot (5 \cdot 2 + 5 \cdot 2,5 + 2 \cdot 2,5) \cdot 2,4) + ((5 \cdot 2 \cdot 2,5) \cdot 1)}{(5,3 \cdot 2,3 \cdot 2,8)} = 1,312551 \qquad \left[\frac{kg}{dm^3}\right]$$



Figura 5.10: Tecnica di posa dei mattoni: indicazione dello spessore di malta cementizia interstiziale considerato

- la porosità del calcestruzzo ε_m esprime la quantità di vuoti all'interno del materiale che compone il muro. Per questo motivo, il valore è calcolato in maniera tale che esso verifichi l'equazione:

$$\varepsilon_m = 1 - \left(\frac{\rho_{reale}}{\rho_{cls}}\right) = 1 - \left(\frac{1,3123}{2,4}\right) = 0,453104$$

Il valore è consistente, in quanto in letteratura si trovano quantità comprese tra 0,01 e 0,7.

- per quanto riguarda il valore di diffusività D_{e_m} [m²/s], rimane impostato al valore di default 3x10⁻⁸ (l'intervallo ammissibile in questo caso tra 10⁻¹¹ e 10⁻⁶).

Default Site Parameters HELP
General <u>HELP</u> 🖻
0.5 acres (0.2 ha) ✓ Surface area
0.9 ACF (area correction factor for gamma radiation) unitless ²) 0.5 V (fraction of vegetative cover) unitless d. (average source depth) m
²) looked up from Surface Area
Soil none selected HELP 🖻
1.5 rho _b (dry soil bulk density) kg/L
0.45 epsilon (total soil porosity) L _{pore} /L _{soil}
0.29 theta _w (water-filled soil porosity) L_{water}/L_{soil}
0.3 I (radon emanation fraction from soil) unitless
596.1E-9 D_e (soil effective radon diffusion coeff.) m^2/s^{-3})
³) calculated from epsilon and theta _w
Building Material none selected MIELP
2.4 rho _m (material density) kg/L
0.4531036 epsilon _m (total material porosity) L _{pore} /L _{matl}
0.2 f_m (radon emanation fraction from material) unitless
3e-8 D_{e_m} (material effective radon diffusion coeff.) m^2/s

Figura 5.11: Impostazioni parametri sezione "Site Parameters"; radon indoor

I parametri successivi sono quelli relativi all'edificio; per non complicare troppo la trattazione, e non avendo informazioni sufficienti riguardo le proprietà di terreno e calcestruzzo, si è deciso di lasciare inalterati la maggior parte dei valori. Nell'ordine si hanno:

- *DFi:* rapporto tra la concentrazione di polvere aerodispersa *indoor* e la concentrazione *outdoor*.
 Dipende dal fatto che l'involucro mitighi l'ingresso di particelle di polvere portate dal vento.
- *GSF:* Rapporto tra il livello di radiazione gamma esterna *indoor* dal in loco ed il livello di radiazione gamma *outdoor*. L'edificio agisce come *shield* contro la penetrazione delle radiazioni gamma.
- *FDF:* Frazione di radon che penetra per diffusione dal pavimento. Valori tipici: 0,07 per pavimento intatto, 0,2 per pavimento in calcestruzzo fessurato, 1 per pavimento in terra battuta (UNSCEAR '93).
- FAF: parametro adimensionale che dipende dalla pressione negativa dell'edificio e della permeabilità
 del suolo sottostante. Per una differenza di pressione di 5 Pa si ottengono valori che dipendono da
 permeabilità del suolo (la quale dipende a sua volta dal tipo di suolo) e dalle condizioni in cui si trova.
- *BRH:* altezza del locale (netta, compresa tra pavimento e soffitto), aumentata a 2,7 *m*, valore minimo per le abitazioni secondo la normativa nazionale.
- WAF: rapporto fra superfici emettenti e superficie calpestabile. Si è considerata una stanza di prova di 4x4 m (piccola, approccio conservativo). Considerando un'altezza di 2,7 m, si ottiene WAF = 4,7.
- d_w : spessore dei muri, scelto 20 cm come valore medio tra tramezze e muri perimetrali.
- *F_i*: frazione dell'energia potenziale di decadimento alfa dei prodotti di decadimento a vita breve del radon in aria *indoor*, comparati all'equilibrio secolare. Il fattore adimensionale è definito come:

$$F_i = \frac{0,106 \, C_{^{218}Po} + 0,514 \, C_{^{214}Pb} + 0,380 \, C_{^{222}Rn}}{C_{^{222}Rn}} \qquad [-]$$

Discorso a parte merita il coefficiente λ_v che identifica *l'exchange rate* del locale: questo valore cambia a seconda della stagione considerata. Tipicamente, durante l'estate il valore sarà maggiore rispetto all'inverno, in quanto si tende ad aprire maggiormente le finestre per aumentare il ricambio d'aria e combattere il caldo estivo, abbassando la temperatura interna sfruttando i periodi più freschi della giornata (tipicamente la sera).

Al contrario, d'inverno il valore di λ_v sarà minore, in quanto si tende a ridurre le infiltrazioni di aria fredda dall'esterno (e quindi le fughe di aria calda verso l'esterno), in maniera tale da mantenere la temperatura della casa quanto più possibile costante, senza abusare del riscaldamento.

Pertanto verranno selezionati 4 valori diversi, ricavati in maniera empirica per le diverse stagioni in uno studio di Murray e Burnmaster, mediando i valori provenienti da quasi 3000 misurazioni in altrettante abitazioni spase per gli Stati Uniti. [50] Nello specifico si ottiene:

- λ_v Pr	imavera	a: 0,65		
- λ _v Es	state:	1,5		
- λ _ν Αι	utunno:	0,55		
- λ _v Inv	verno:	0,41		
		Building HELP =		
0).4	DF _i (indoor dust dilution factor) unitless		
0).4	GSF (indoor gamma shielding factor) unitless		
0).2	FDF (fraction of radon diffusing through floor) unitless		
1	.5	FAF (ratio of radon advection to diffusion through floor) unitless ⁴)		
2	2.7	BRH (building room height) m		
4	ŀ.7	WAF (ratio of contaminated room surface area to floor surface area) unitless		
0	0.2 d _w (wall thickness) m			
		lambda $_{\rm V}$ (building air exchange rate) per hour		
0).4	F _i (indoor radon progeny equilibrium factor)		

Figura 5.12: Impostazioni parametri sezione "Building"; radon indoor

Per quanto riguarda il clima dell'area in cui si svolge lo studio, è stata scelta la città di Philadelphia, in Pennsylvania, città americana che presenta valori climatici più vicini a quelli di Torino tra quelle presenti nel database fornito dal programma.

Climate <u>HELP</u> =
Philadelphia, PA (VIII) V City, State (Climatic Zone)
90.24 Q/C (inverse of the mean conc. at the center of square source) g/m^2 -s per kg/m ³ ⁵)
4.29 U_m (mean annual windspeed) m/s ⁻⁶)
11.32 U_t (equivalent threshold value of windspeed at 7 m) m/s
0.6 F_o (outdoor radon progeny equilibrium factor)

Figura 5.13: Impostazioni parametri sezione "Climate"; radon indoor

I valori relativi all'ultima parte (*"Groundwater"*) non sono stati modificati, in quanto essi condizionano una serie di risultati che esulano dal nostro studio. Pertanto viene omessa la spiegazione dei due metodi per ottenere i valori che permettono di ricavare la *DER* relativa all'ingestione di acqua di falda contaminata.

Groundwater <u>HELP</u>						
METHOD 1 Partitioning Equation for Migration to Ground Water 20 DF (dilution factor) unitless	METHOD 2 Mass-Limit Equation for Migration to Ground Water This method only works if site-specific values are entered for all o these parameters plus for d _s in the General Site Parameters section					
Kd (soil-water partition coefficient) L/kg: SSG V Lead: 6 Radium: 3 Thorium: 20 Uranium: 0.4 Actinium: Protactinium: 1 Elements without default value are only considered, if site-specific Kd values are entered 1	I (Infiltration Rate) m/yr K (aquifer hydraulic conductivity) m/yr i (hydraulic gradient) m/m L (source length parallel to ground water flow) m d _a (aquifer thickness) m					

Figura 5.14 Impostazioni parametri sezione "Groundwater"; radon indoor

Risultati

Di seguito vengono riportati i risultati ricavati dal nostro calcolatore per quanto riguarda le diverse stagioni dell'anno:

1) Primavera: $\lambda_v = 0,65$

PathwayEff. DoseLifetime Excess RiskIngest. of Soil (Age Adj)2.827 μSv/a0.000509% (1 : 196512.6)Ingest. of Soil (Adult)1.178 μSv/a0.000212% (1 : 471630.3)Inhal. of Fugitive Dusts2.919 nSv/a*******% (1 : *******)External Exposure84.83 μSv/a0.015269% (1 : 6549.191)Ingest. of Produce21.16 μSv/a0.003809% (1 : 26253.44)Ingest. of Groundwater M1443.3 μSv/a0.079805% (1 : 1253.055)Inhal. of Radon1.517 mSv/a0.273092% (1 : 366.1776)

Total Uranium in Drinking Water (Method 1): 252.8 $\mu g/L$

Pathway Daily uranium ingestion Ingest. of Soil (Age Adj) 360.0 ng/d Ingest. of Soil (Adult) 150.0 ng/d Ingest. of Produce 486.2 ng/d Ingest. of Groundwater M1 505.6 µg/d

Gamma dose rate indoor: 11.50 nSv/h Gamma dose rate outdoor: 14.92 nSv/h

Radon-222 inhalation dose rate indoor: 355.2 nSv/h Radon-222 inhalation dose rate outdoor: 2.404 nSv/h

Radon-222 concentration in indoor air: 43.106 Bq/m3 Radon-222 concentration in outdoor air: 0.3063 Bq/m3

2) Estate: $\lambda_v = 1,5$

Pathway	Eff. Dose	Lifetime Excess	Risk
Ingest. of Soil (Age Adj)	2.827 µSv/a	0.000509% (1 :	196512.6)
Ingest. of Soil (Adult)	1.178 µSv/a	0.000212% (1 :	471630.3)
Inhal. of Fugitive Dusts	2.919 nSv/a	******* (1 :	*******)
External Exposure	84.83 µSv/a	0.015269% (1 :	6549.191)
Ingest. of Produce	21.16 µSv/a	0.003809% (1 :	26253.44)
Ingest. of Groundwater M1	443.3 µSv/a	0.079805% (1 :	1253.055)
Inhal. of Radon	662.4 µSv/a	0.119238% (1 :	838.6587)

Total Uranium in Drinking Water (Method 1): 252.8 $\mu g/L$

Pat	hwa	ау		Daily	uran	ium	ingestion
Ingest.	of	Soil	(Age Ad	j) 3	360.0	ng/	d
Ingest.	of	Soil	(Adult)	1	L50.0	ng/	d
Ingest.	of	Produ	ce	4	186.2	ng/	d
Ingest.	of	Groun	dwater N	11 5	505.6	μg/	d

Gamma dose rate indoor: 11.50 nSv/h Gamma dose rate outdoor: 14.92 nSv/h

Radon-222 inhalation dose rate indoor: 98.40 nSv/h Radon-222 inhalation dose rate outdoor: 2.404 nSv/h

Radon-222 concentration in indoor air: 18.802 Bq/m3
Radon-222 concentration in outdoor air: 0.3063 Bq/m3

 Pathway
 Eff. Dose
 Lifetime Excess Risk

 Ingest. of Soil (Age Adj)
 2.827 µSv/a
 0.000509% (1 : 196512.6)

 Ingest. of Soil (Adult)
 1.178 µSv/a
 0.000212% (1 : 471630.3)

 Inhal. of Fugitive Dusts
 2.919 nSv/a
 ******% (1 : ******)

 External Exposure
 84.83 µSv/a
 0.015269% (1 : 6549.191)

 Ingest. of Produce
 21.16 µSv/a
 0.003809% (1 : 26253.44)

 Ingest. of Groundwater M1
 443.3 µSv/a
 0.079805% (1 : 1253.055)

 Inhal. of Radon
 1.789 mSv/a
 0.322033% (1 : 310.5274)

Total Uranium in Drinking Water (Method 1): 252.8 µg/L

Pathway Daily uranium ingestion Ingest. of Soil (Age Adj) 360.0 ng/d Ingest. of Soil (Adult) 150.0 ng/d Ingest. of Produce 486.2 ng/d Ingest. of Groundwater M1 505.6 µg/d

Gamma dose rate indoor: 11.50 nSv/h Gamma dose rate outdoor: 14.92 nSv/h

Radon-222 inhalation dose rate indoor: 266.0 nSv/h Radon-222 inhalation dose rate outdoor: 2.404 nSv/h

Radon-222 concentration in indoor air: 50.838 Bq/m3 Radon-222 concentration in outdoor air: 0.3063 Bq/m3

4) Inverno: λ_v 0,41

Pathway	Eff. Dose	Lifetime	Excess	Risk
Ingest. of Soil (Age Adj)	2.827 µSv/a	0.000509%	(1 :	196512.6)
Ingest. of Soil (Adult)	1.178 µSv/a	0.000212%	(1 :	471630.3)
Inhal. of Fugitive Dusts	2.919 nSv/a	*******%	(1 :	*******)
External Exposure	84.83 µSv/a	0.015269%	(1 :	6549.191)
Ingest. of Produce	21.16 µSv/a	0.003809%	(1 :	26253.44)
Ingest. of Groundwater M1	443.3 µSv/a	0.079805%	(1 :	1253.055)
Inhal. of Radon	2.388 mSv/a	0.429933%	(1 :	232.5945)

Total Uranium in Drinking Water (Method 1): 252.8 $\mu g/L$

Pathway			Daily	uran	ium	ingestion		
Ingest.	of	Soil	(Age	Adj)	3	860.0	ng/	d
Ingest.	of	Soil	(Adul	t)	1	50.0	ng/	d
Ingest.	of	Produ	ice		4	86.2	ng/	d
Ingest.	of	Groun	Idwate	er M1	. 5	505.6	μg/	d

Gamma dose rate indoor: 11.50 nSv/h Gamma dose rate outdoor: 14.92 nSv/h

Radon-222 inhalation dose rate indoor: 355.2 nSv/h Radon-222 inhalation dose rate outdoor: 2.404 nSv/h

Radon-222 concentration in indoor air: 67.883 Bq/m3
Radon-222 concentration in outdoor air: 0.3063 Bq/m3

5.8 Conclusioni

Ora che si hanno a disposizione i dati relativi alla concentrazione di attività causata dal radon, all'interno dell'abitazione da noi modellata, occorre confrontare i valori ottenuti con i limiti stabiliti dalla legislazione, elencati in precedenza nelle sezioni dedicate.

Come stabilito dall'Articolo 12, Comma 1, lettera b), immaginando di aver svolto le nostre analisi in una fase *ante-operam*, ed avendo utilizzato l'applicativo di *WISE-Uranium* come supporto durante le fasi che precedono la costruzione dell'abitazione, il cui completamento è previsto dopo il 31 dicembre 2024, il limite di concentrazione media annua di attività causata dal radon in aria è di 200 Bq/m³.

I valori ottenuti, relativi alle quattro stagioni dell'anno, rispettano a pieno la norma, essendo compresi tra un valore minimo di 18,802 Bq/m³ in estate e di 67,883 Bq/m³ per l'inverno.

Osservando questi valori, appare evidente come vi sia un legame diretto molto forte tra l'air exchange rate ed il valore di concentrazione di attività, espresso in Bq/m³. L'istogramma seguente (Tab. 5.11) rende ancora più evidente questo legame.



Tabella 5.11: Istogramma: Relazione concentrazione di attività/air exchange rate

La spiegazione è tanto semplice quanto intuitiva: durante la stagione estiva si tende ad aumentare l'areazione della casa, soprattutto per ridurre la temperatura presente all'interno della casa. Questa azione tende a diluire la quantità di inquinanti presenti nell'aria presente all'interno dell'ambiente, non a caso in gergo comune si descrive questa operazione come *"cambiare l'aria"* del locale. Grazie a questo semplice accorgimento, si riduce anche la presenza di gas radon all'interno dell'abitazione, oltre ad allontanare altri agenti patogeni che si concentrano maggiormente in casa quando l'aria è *"viziata"*.

Questo forte decremento della quantità di attività da parte del radon dovuto al ricambio dell'aria, già evidente nel grafico precedente, è alla base di una delle contromisure più efficaci contro l'accumulo di radon in ambienti *indoor*. Quando il valore di concentrazione di attività del radon in ambiente supera i valori di legge, specialmente se questo comportamento non è causato da materiali edili, ma semplicemente dalle caratteristiche del terreno (per la presenza di pozzolana o di altri elementi vulcanici ad esempio), la soluzione immediata è quella di dotare il locale di un buon impianto di areazione.

In questo modo, oltre a ridurre la quantità di radon che si accumula in ambiente, si riduce il valore di pressione negativa dell'ambiente rispetto all'esterno, riducendo il valore di advezione per diffusione attraverso il suolo.

Un altro parametro collegato all'*air exchange rate* è ovviamente quello relativo alla dose effettiva annuale provocata dall'inalazione di radon. A rigore, questo parametro è strettamente correlato alla concentrazione di attività presente in ambiente: ovviamente più radon è presente in un metro cubo di aria, più radon verrà inalato dall'inquilino dell'abitazione, il quale mediamente respira una quantità di circa 20 m³ al giorno (considerando un'attività moderata).



Si riporta di seguito un istogramma simile al precedente, il quale mostra la correlazione appena enunciata:

Tabella 5.12: Istogramma: Relazione DER/air exchange rate

Confrontando questi valori con i limiti di esposizione contenuti nel Decreto, occorre agire con attenzione: ad una prima analisi, si evince che i valori ottenuti superano il limite di dose previsto per la popolazione considerata non esposta, fissato a 1 mSv/anno. In questo caso, solamente i valori estivi rientrerebbero nella norma, mentre ciò non sarebbe più vero per le altre tre stagioni. Volendo mediare i valori, per ottenere un dato riassuntivo annuale avremmo:

$$DER_{medium} = \frac{DER_{primavera} + DER_{estate} + DER_{autunno} + DER_{inverno}}{4} = 1,589 \text{ mSv/y}$$

Anche questo valore è superiore al limite previsto dalla normativa vigente. Tuttavia, analizzando più nello specifico il Decreto Legislativo 101/2020 di riferimento [16], nell'Articolo 3, al comma 1, punto c) è riportato testualmente quanto segue:

"Sono escluse dal campo di applicazione del presente decreto: (...) l'esposizione, al livello del suolo, ai radionuclidi presenti nella crosta terrestre non perturbata."

Questa esclusione è fondamentale, in quanto l'esposizione ad un valore medio di concentrazione di radionuclidi naturalmente presenti nella crosta terrestre renderebbe qualsiasi rilevazione non a norma. Considerando ad esempio il valore di 0,15 μ Sv/h rilevati al Politecnico, come livello di dose equivalente causata dalla radioattività ambientale, di fondo, valore a quello della media nazionale, considerando che in un anno solare sono presenti 8760 ore, questa dose equivalente sarebbe tale da provocare da sola il superamento dei limiti.

Volendo ricordare uno dei passi fondamentali riguardanti le radiazioni gamma emesse da materiali da costruzione citiamo nuovamente il comma 1 dell'Articolo 29 [16]:

"Il livello di riferimento applicabile all'esposizione esterna alle radiazioni gamma emesse da materiali da costruzione in ambienti chiusi, in aggiunta all'esposizione esterna all'aperto, è fissato in 1 mSv/anno."

Occorre ripetere velocemente l'analisi considerando questa volta solamente i materiali da costruzione, in modo da ricavare i valori di dose equivalente provenienti sol dall'utilizzo di blocchi di calcestruzzo contenenti cemento al 20% in peso di cenere volante. Per eseguire questa simulazione, occorre solamente settare il valore di concentrazione di ²³⁸U nel suolo pari a 0, nella sezione *Input Data*.

	Reset	Sample	Input Data	HELP			
Activity concentrations Unit: O pCi/g O Bq/g							
Activity concentrations in soil					Activity concentration in building		
U-238 Series U-235 Series					material		
0	U-238 +D	0 (J-235 +D		U-238 Series		
0	<mark>U-234</mark>	0 P	a-231		0.017143 Ra-226 +D		
0	Th-230	0	Ac-227 +D				
0	<mark>Ra-226 +D</mark>						
0	Pb-210 +D						
Activity concentrations in soil are determ independently	ined according to	contaminant conce	ntration entry, but can also be	entered			

Figura 5.15: Impostazione parametri sezione "Input" rimuovendo il contributo del suolo; radon indoor

Così facendo, la simulazione viene effettuata correttamente, senza che sia necessario modificare gli altri valori relativi a terreno e materiale da costruzione visti in precedenza.

Senza trascrivere la totalità dei report contenenti i risultati delle simulazioni, ci si limita a rappresentare un istogramma simile al precedente, nel quale sono contenuti i valori di DER relativi allo studio di prima, considerando emettitori solamente i muri dell'abitazione usata come modello, con parametri dedicati equivalenti a quelli utilizzati in precedenza.



 Tabella 5.13:
 Istogramma: Relazione DER/air exchange rate (solo materiale da costruzione)

In questo caso i valori rispettano ampiamente la norma, essendo tutti al di sotto del valore limite di 1 mSv/y. Prima di passare ai commenti finali, si pone l'attenzione su uno dei parametri di cui si è discusso poco in precedenza, il quale riveste un ruolo di fondamentale importanza: il coefficiente in questione è il *WAF*, il quale rappresenta il rapporto tra l'area delle superfici contenenti materiale radioattivo e la superficie calpestabile.

Questo accade perché, mantenendo fissi lo spessore e l'altezza dei muri ma aumentando le dimensioni lineari di essi, il volume della stanza aumenta in maniera maggiore rispetto a quanto non aumenti il volume di materiale che emette sostanze radioattive ambiente. Ci si può aspettare una diminuzione del valore di concentrazione di attività all'aumentare delle dimensioni della stanza, e quindi al diminuire del parametro WAF.

Mantenendo fissati tutti i parametri relativi al terreno, al materiale da costruzione, i parametri di esposizione, del clima e quelli relativi alle caratteristiche fisiche dell'edificio, si immagina di aumentare le dimensioni lineari della stanza di partenza (in origine 4x4 metri), mantenendo costante l'altezza.

	[m]			[-]			
Lato 1	Lato 2	Altezza	Soffito	Pavimento	Muri	Totale	WAF
4	4	2,7	16	16	43,2	75,2	4,7
5	5	2,7	25	25	54	104	4,16
6	6	2,7	36	36	64,8	136,8	3,8
7	7	2,7	49	49	75,6	173,6	3,54
8	8	2,7	64	64	86,4	214,4	3,35
9	9	2,7	81	81	97,2	259,2	3,2
10	10	2,7	100	100	108	308	3,08
12	12	2,7	144	144	129,6	417,6	2,9
14	14	2,7	196	196	151,2	543,2	2,77
16	16	2,7	256	256	172,8	684,8	2,68
18	18	2,7	324	324	194,4	842,4	2,6
20	20	2,7	400	400	216	1016	2,54

Si riportano in questo estratto di tabella i risultati dei calcoli svolti, per ottenere i relativi parametri WAF:

Tabella 5.14: Calcolo WAF a seconda delle dimensioni lineari del locale

I risultati ricavati dalle varie simulazioni confermano le ipotesi fatte. Inoltre, danno ancora più credito alla scelta fatta, ossia quella di eseguire la maggior parte dei nostri calcoli utilizzando un ambiente di prova di dimensioni medie relativamente piccole. Considerare la grandezza media di una stanza in un'abitazione ad uso civile pari a 4x4 metri fornisce un valore alquanto conservativo, obiettivo ricercato per questa trattazione.



Tabella 5.15: Istogramma: Relazione attività specifica/WAF

In conclusione, i risultati ottenuti nelle diverse simulazioni evidenziano come non vi siano rischi considerevoli legati all'utilizzo di cenere volante per la produzione di calcestruzzo, nelle proporzioni utilizzate. Si ricorda come questo studio voglia fornire un'analisi qualitativa di base, semplificando in maniera abbastanza consistente le assunzioni effettuate. Si sono trascurati infatti ulteriori contributi di radioattività provenienti dagli aggregati (sabbia e ghiaia) utilizzati per dare consistenza al calcestruzzo. Non sono stati considerati apporti provenienti da intonaco, pittura ed altri materiali utilizzati per i tamponamenti (materiali isolanti e fonoassorbenti), i quali potrebbero contribuire ad aumentare il livello di radon emesso in ambiente o talvolta a diminuirlo, offrendo una maggiore schermatura.

Un ulteriore approccio potrebbe provenire dall'utilizzo di pavimentazioni prodotte a partire da materiali i quali potrebbero presentare valori di radioattività superiori alla norma (porfidi, marmo, granito, sienite ecc).

Volendo affrontare un discorso più pratico, occorre considerare che l'utilizzo di blocchi di calcestruzzo preconfezionati è poco utilizzato in ambito edilizio, in particolare per quanto riguarda le costruzioni ad uso civile-abitativo, poiché spesso si preferisce utilizzare i classici mattoni forati in laterizio, che presentano costi contenuti, elevata reperibilità sul mercato e versatilità di utilizzo.

Lo stesso cemento Portland alle ceneri volanti trova scarso utilizzo in ambito civile, proprio per prevenire alla fonte le problematiche legate a valori di radioattività mediamente più alti rispetto a quelli misurabili in cementi con un diverso tipo di additivi.

In conclusione, considerando l'approccio conservativo seguito relativo ai parametri utilizzati e le ipotesi fatte, di cui si è ampiamente discusso, si può dire che la cenere volante analizzata può essere impiegata per produrre calcestruzzo, destinato alla costruzione di abitazioni ad uso civile.

Tale affermazione è fatta con riserva, in quanto nella pratica potrebbero verificarsi circostanze nelle quali il valore di concentrazione di attività misurata potrebbe superare i limiti imposti da normativa, come ad esempio in caso di costruzione su terreni contenenti un livello di attività elevato, a causa delle emanazioni di radon (ad esempio in terreni ex-vulcanici, in cui sono presenti quantitativi elevati di porfidi e pozzolane).

Si raccomanda di mantenere un livello di ventilazione degli ambienti adeguato, in modo da prevenire in ogni caso l'accumulo di radon negli ambienti *indoor*. Particolare attenzione va posta inoltre alle condizioni di pavimentazione e massetto posto alla base dell'abitazione, in quanto la presenza di crepe incrementerebbe di molto la quantità di radon che penetra nei locali, infiltrandosi dal terreno, in particolar modo se vi è una presenza simultanea di pressione negativa degli ambienti interni rispetto all'esterno.

In caso di rilievi in cui si è riscontrata la presenza di quantitativi molto alti di concentrazione di attività provocata dal radon *indoor*, si raccomanda di rivolgersi ad un esperto per provvedere alla rimozione dei materiali responsabili. Laddove non fosse possibile, soprattutto per cause ambientali esterne, si raccomanda l'installazione di adeguati sistemi di ventilazione ed areazione, per ridurre al minimo gli accumuli di radon.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare tutti quelli che in questi anni sono stati dalla mia parte, supportandomi e sopportandomi come meglio hanno potuto, nei momenti spensierati ed in quelli più pesanti.

Ringrazio i miei genitori e mia sorella, che mi hanno permesso di studiare e che sono stati presenti ogni qualvolta ne avessi bisogno, anche quando non sapevo di averne bisogno. Grazie soprattutto per aver sempre creduto in me, specialmente nelle occasioni in cui il primo a non credere in me stesso, ero proprio io.

Ringrazio il mio relatore, l'Ingegner Massimo Zucchetti, che ha saputo unire professionalità, disponibilità ed umanità, dimostrandosi da subito diverso da molti altri professori, specialmente nel corso dei mesi durante i quali è stata prodotta questa tesi, per nulla aiutato dal periodo di pandemia da Covid-19.

Ringrazio tutti i miei amici, senza i quali nulla di quello che ho fatto, e nulla di quello che farò, sarebbe stato possibile. Qualsiasi cosa farò in questa vita, non sarà "leggendaria", se i miei amici non saranno lì a vederla ed a gioirne con me.

Ringrazio tutte le persone che ho incontrato in questi anni di università, a Torino, a Monte Carlo, ovunque io sia andato, perché hanno contribuito a farmi diventare, nel bene e nel male, la persona che sono.

Infine ringrazio me stesso, per non aver mai mollato davanti alle difficoltà, grandi o piccole che fossero, e per non aver mai gioito troppo davanti alle vittorie, grandi o piccole che fossero.

"A volte sei in testa. A volte resti indietro. La corsa è lunga, e alla fine, è solo con te stesso".

Al prossimo traguardo.

Bibliografia

[1] Tabella 1; estratto dal report UNSCEAR del 2000: *Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly*.

[2] L. Nicoli, G. Massimiliani, M. Zucchetti, G. Mastrantonio: *The Methods of Measuring Radon and Other Environmental Parameters as Eartquake Precursors*, Fresen Environ Bull, 26 (1), 332 (2017).

[3] Dato estratto da un report dell'ISIN, Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione, (https://www.isinucleare.it/it/radioprotezione-radioattivita-ambientale).

[4] Earth's radiogenic heat fluxes over time. Reference: Arevalo Jr, R., McDonough, W. F., & Luong, M. (2009). *The K/U ratio of the silicate Earth: Insights into mantle composition, structure and thermal evolution* (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Evolution_of_Earth%27s_radiogenic_heatwith_total.svg#/media/File:Evolution_of_Earth's_radiogenic_heat.svg)

[5] THE TRINITY TEST (Trinity Test Site, July 16, 1945). F. G. Gosling, *The Manhattan Project: Making the Atomic Bomb*, (DOE/MA-0001; Washington: History Division, Department of Energy, January 1999). https://www.osti.gov/opennet/manhattan-project-history/Events/1945/trinity.htm

[6] Immagine: catena di decadimento della serie uranio, *Decay chain (4n+2, Uranium series).PNG* https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a1/Decay_chain%284n%2B2%2C_Uranium_series%2
 9.PNG

[7] Spettrometria Gamma di radionuclidi e Spettrometria di Sorgenti X. Sistema Theremino Rev.2 https://docplayer.it/22032513-Spettrometria-gamma-spettrometria-gamma-di-radionuclidi-espettrometria-di-sorgenti-x-sistema-theremino-rev-2.html

[8] Ph.D. Anne Helmenstine, *Is Fiestaware Radioactive? Is It Safe to Use?*, Science Notes.org, May 2021. https://sciencenotes.org/is-fiestaware-radioactive-is-it-safe-to-use/

[9] Applicazioni Torio, Lenntech, rev.2021, https://www.lenntech.it/periodica/elementi/th.htm

[10] Decay chain (4n, Thorium series), Dong Nguyen Van, *Rapid preparation of Uranium and Thorium alpha sources by electroplating technique*, Nov 2010. https://www.researchgate.net/figure/Decay-chain-4n-Thorium-series-20_fig1_297966847

[11] Immagine estratta da: *Guida-dispensa teorico-pratica sulla problematica delle radiazioni naturali gamma*, Edil Natura SRL. http://www.geoprotex.com/wordpress/wp-content/uploads/2017/03/DISPENSA-RAD.GAMMA_.pdf

[12] Estratto dall'allegato II della Direttiva 2013/59/EURATOM.

[13] Estratto dall'allegato XXIV del *Decreto Legislativo 101/20 in formato grafico*, in particolare del punto 0.2.2.

[14] Estratti da Radiation Protection 89: "Recommended Radiological Protection Criteria for the recycling of metals from dismantling of nuclear installation" – (European Commission, 1998), Radiation Protection 113: "Recommended Radiological Protection Criteria for the clearance of building and building rubble from the dismantling of nuclear installations – (European Commission, 2000).

[15] Radiation Protection 122: "Practical use of the concepts of Clearance and Exemption"- part I Guidance on General Clearance Levels for Practices– (European Commission, 2000), 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" (European Commission, 2002).

[16] Estratti provenienti dal Decreto Legislativo 31 Luglio 2020, n°101.

https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/08/12/20G00121/sg

[17] Informazioni provenienti dal sito di American Coal Ash Association (www.acaa-usa.org).

[18] Da ASTM C618 – 19: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, (American Society for Testing and Materials International, 2019).

[19] Figura e descrizione generale del precipitatore sono tratte dagli articoli presenti sul sito web dell'US-EPA (United States Environmental Protection Agency) (*https://www.epa.gov/air-emissions-monitoring-knowledge-base/monitoring-control-technique-electrostatic-precipitators*).

[20] K.R. Parker, Applied Electrostatic Precipitation, Springer (2011).

[21] Considerazioni tecniche tratte dal sito del produttore di elettrofiltri TAMA Aernova Air Filtration System (https://www.tamaaernova.com/it).

[22] R. Marino, Tecnologia dei calcestruzzi; le aggiunte e gli aggregati, Università dell'Aquila.

[23] *Ceneri volanti e fumi di silice*, articolo presente sul portale di Netconcrete, portale di divulgazione tecnica (*https://www.netconcrete.info/ceneri-volanti-e-fumi-di-silice-n719.php*).

[24] *Report of the Committee to Encurage the Utilization of FLY ASH in HPP* (Government of India, Ministry of Power, 2019).

[25] I. Reid, Beneficial uses of coal fly ashes, (IEA-Clean Coal Centre, 2020).

[26] Lorenzo Di Renzo, Problematiche di radioprotezione legate alla presenza in discarica di NORM e TENORM
 e alla concentrazione di radon indoor in ambiente residenziale, Rel. Massimo Zucchetti. Politecnico di Torino,
 2019.

[27] External Radiation Dose Calculator – HELP (Virtual Geiger Counter). www.wise-uranium.org/rdcxh.html

[28] Misuratore dose foto e scheda tecnica prese da https://atomtex.com/en/radiation-monitors/at1117mradiation-monitor.

[29] *Report 44*, D. R. White, J. Booz, R. V. Griffith, J. J. Spokas, I. J. Wilson, Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements, Volume os23, Issue 1, 15 January 1989, Page NP, https://doi.org/10.1093/jicru/os23.1.Report44

[30] Sito internet Pyreco, specialisti nel recupero e riciclaggio di rottami metallici non ferrosi https://www.pyreco.it/

[31] M Ghiassi-nejad, S M J Mortazavi, J R Cameron, A Niroomand-rad, P A Karam, *Very high background radiation areas of Ramsar, Iran: preliminary biological studies*, PMID: 11769138 DOI: 10.1097/00004032-200201000-00011, Jan 2002. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11769138/

[32] TERRA with Bluetooth channel, Dosimeter-Radiometer MKS-05. https://ecotestgroup.com/products/terra-with-bluetooth-channel/

[33] Richard B. Gunderman, Angela S. Gonda, *Radium Girls*, Published Online: January 27 2015, https://doi.org/10.1148/radiol.14141352

[34] Andrea Roccioletti, *Ghost girls - ma non è come pensate, Dal diario di Grace Fryer*, Luglio 2019, https://roccioletti.files.wordpress.com/2019/07/ghost-woman-radium.jpg

[35] Massimo Zucchetti, Enzo Mersi, TAV in Valle di Susa. Problemi di radioprotezione e impatto ambientale per la presenza di uranio e radon. Relazione introduttiva, Settembre 2004.

[36] Radioattività presso Politecnico di Torino, YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=2wL9DLsXvKU

[37] Massimo Zucchetti, *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials and Radiation Protection: case studies, Journal of Environmental Protection and Ecology 18*, No 3, 1137–1145 (2017), Environmental radioactivity, Jul 2017.

[38] *Rad Pro Calculator, ALARA Calculations (Time, Distance and Shielding)*. http://www.radprocalculator.com/ALARA.aspx

[39] Andrea Calandra, Le misure radiometriche su materiali da costruzione, Università degli Studi di Perugia.

[40] ARPA Lombardia, Metodi di misura del radon-222 nelle acque di rete: l'esperienza di ARPA Lombardia. http://ita.arpalombardia.it/ITA/console/files/download/86/Metodi_Rn222.pdf

[41] WHO Handbook on indoor Radon: a public health perspective, ISBN 978 92 4 154767 3, 2009.

[42] Mappe della concentrazione del radon nelle Regioni italiane, https://www.radongas.eu/testiinformativi-approfondimento-sul-radon/mappe-della-concentrazione-del-radon-nelle-regioni-italiane/ [43] Valori della concentrazione del radon indoor e mappe radon del Piemonte. Dati tratti dalla campagna di misura nazionale degli anni '90 e dalle successive campagne. https://www.radongas.eu/testi-informativi-approfondimento-sul-radon/mappe-della-concentrazione-del-radon-nelle-regioni-italiane/piemonte/

[44] Safety Data Sheet for Portland Cement, CEMEX, July 2017.

[45] Sito internet CEMEX. https://www.cemex.com

[46] Immagine prodotto, breve descrizione e scheda tecnica: https://www.cemex.pl/cement-zielony.aspx

[47] Acqua e calcestruzzo, una relazione complessa. https://www.azichem.com/news/acqua-e-calcestruzzouna-relazione-complessa/198/

[48] Blocchi di calcestruzzo presenti in commercio, esempio. https://www.sbarbati.com/blocchi/cls/

[49] Uranium in Soil and Building Material Individual Dose Calculator – HELP. https://www.wiseuranium.org/rdcush.html

[50] Donald M. Murray, David E. Burmaster, *Residential Air Exchange Rates in the United States: Empirical and Estimated Parametric Distributions by Season and Climatic Region*, First published: August 1995 https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1995.tb00338.x

[51] UNSCEAR 1993 REPORT, "SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION", United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR, 1993, Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. https://www.unscear.org/unscear/en/publications/1993.html