

# POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Energetica e Nucleare**

**Tesi di Laurea Magistrale**

***Problematiche di radioprotezione legate alla presenza in  
discarica di NORM e TENORM e alla concentrazione di radon  
indoor in ambiente residenziale***



**Relatore**

prof. Massimo Zucchetti

**Candidato**

Lorenzo Di Renzo

*“Lo so. È tutto sbagliato. Noi non dovremmo nemmeno essere qui. Ma ci siamo. È come nelle grandi storie, padron Frodo. Quelle che contano davvero. Erano piene di oscurità e pericoli, e a volte non volevi sapere il finale. Perché come poteva esserci un finale allegro? Come poteva il mondo tornare com’era dopo che erano successe tante cose brutte? Ma alla fine è solo una cosa passeggera, quest’ombra. Anche l’oscurità deve passare. Arriverà un nuovo giorno. E quando il sole splenderà, sarà ancora più luminoso. Quelle erano le storie che ti restavano dentro, che significavano qualcosa, anche se eri troppo piccolo per capire il perché. Ma credo, padron Frodo, di capire, ora. Adesso so. Le persone di quelle storie avevano molte occasioni di tornare indietro e non l’hanno fatto. Andavano avanti, perché loro erano aggrappate a qualcosa.”*

*“Noi a cosa siamo aggrappati, Sam?”*

*“C’è del buono in questo mondo, padron Frodo. È giusto combattere per questo.”*

## Sommario

INTRODUZIONE.....	5
1 LEGISLAZIONE .....	7
1.1 DEFINIZIONI .....	7
1.2 LIMITI .....	8
1.3 CONCETTO DI CLEARANCE.....	9
1.4 RADIONUCLIDI NATURALI.....	11
2 MATERIALE RADIOATTIVO TRATTENUTO IN DISCARICA .....	19
2.1 CLASSIFICAZIONE RIFIUTI.....	19
2.2 CENERE VOLANTE .....	20
2.3 POLVERE DA ELETTROFILTRO .....	21
2.4 PROCESSO DI INERTIZZAZIONE.....	21
3 CALCOLO DOSE .....	23
3.1 GENII .....	23
3.2 STRUMENTAZIONE .....	23
3.3 MODELLO DI CALCOLO .....	25
3.4 CENERE VOLANTE .....	26
3.5 POLVERE DA ELETTROFILTRO .....	28
3.6 PROVE SPERIMENTALI .....	30
4 CASO STUDIO: ABITAZIONE CON ALTA CONCENTRAZIONE DI RADON .....	37
4.1 RADON .....	37
4.2 ASPETTI SANITARI .....	39
4.3 LEGISLAZIONE .....	40

4.4 SITUAZIONE LAZIO .....	41
4.5 CASO STUDIO.....	43
4.6 CEMENTO PORTLAND.....	44
4.7 MODELLO ABITAZIONE .....	46
5 MODELLO DI CALCOLO .....	48
5.1 MODELLO PER L'ESPOSIZIONE AL RADON.....	48
5.2 PARAMETRI TEMPORALI.....	53
5.3 BUILDING PARAMETERS .....	54
5.4 PARAMETRI PER I RICETTORI.....	56
5.5 PARAMETRI PER LA SORGENTE DI RADIOATTIVITA' .....	57
5.6 PARAMETRI PER I MATERIALI DI SHIELDING .....	65
6 RISULTATI.....	67
6.1 PRIMO CASO: STAGIONE AUTUNNALE.....	67
6.2 SECONDO CASO: STAGIONE INVERNALE.....	70
6.3 TERZO CASO: STAGIONE PRIMAVERILE .....	72
6.4 QUARTO CASO: STAGIONE ESTIVA .....	74
6.5 EVOLUZIONE TEMPORALE DELLA DOSE TOTALE.....	76
6.6 DIPENDENZA DELLA DOSE DAL COEFFICIENTE DI AIR EXCHANGE RATE .....	78
6.7 COMMENTI.....	81
7 CONCLUSIONI .....	84
Bibliografia.....	85

## INTRODUZIONE

Ogni giorno siamo esposti ad una certa quantità di radiazioni sottoforma di raggi o particelle. Queste radiazioni possono avere origine terrestre, generate da elementi radioattivi contenuti nella crosta terrestre, o extraterrestre.

Per quanto riguarda quest'ultime, dobbiamo distinguere tra radiazioni cosmiche, e radiazioni cosmogeniche, che sono originate da radionuclidi generati dalla collisione di raggi cosmici ad elevata energia e elementi presenti sia in atmosfera che nella crosta terrestre, tra i quali è importante ricordare il carbonio 14.

La radioattività naturale di origine terrestre è causata da elementi radioattivi presenti nella crosta terrestre, come uranio, torio o radio, o originati dal decadimento di quest'ultimi, tra cui citiamo il radon, che costituisce il 50% dell'esposizione totale alla radioattività naturale. Nella seguente tabella riassumeremo i valori medi a livello globale per quanto riguarda la dose per radioattività naturale.

Sorgente	Dose (mSv/anno)
Radiazione di origine extraterrestre	0,38
Esposizione esterna dovuta a radionuclidi naturali	0,46
Esposizione interna dovuta a radionuclidi naturali (escludendo il radon)	0,23
Esposizione interna dovuta al radon	1,2
Totale	2,4

### *Tabella 1. Dosi annuali da radioattività naturale*

In questo lavoro ci occuperemo di problematiche legate alla radioattività naturale e lo faremo analizzando due diversi ambiti: nella prima parte studieremo la radioattività dovuta alla presenza di radionuclidi naturali in rifiuti speciali pericolosi da depositare in discarica, mentre nella seconda parte affronteremo il problema radioprotezionistico dovuto all'alta concentrazione di radon nelle abitazioni.

Lo studio sulla radioattività naturale dei rifiuti speciali è stato effettuato tramite misurazioni sul campo presso l'impianto di trattamento e recupero rifiuti situato ad Orbassano e di proprietà di Ambienthesis, azienda specializzata in interventi di bonifica, di risanamento ambientale e di trattamento, recupero e smaltimento di rifiuti speciali, pericolosi e non pericolosi. La suddetta piattaforma è una delle più grandi in Italia e possiede una capacità di trattamento pari a 500.000 t/anno.

Alcuni dei rifiuti trattati da Ambienthesis possono essere classificati come NORM e TENORM, di cui ricordiamo le definizioni:

- NORM: acronimo di "naturally occurring radioactive material" qui inteso come materiale nel quale la radioattività è riconducibile alla presenza di radionuclidi naturali.
- TENORM: acronimo di "technologically enhanced naturally occurring radioactive material", qui inteso come materiale nel quale la radioattività, pur riconducibile alla presenza di radionuclide naturali, ha subito variazioni dovute all'esito di attività o lavorazioni antropiche.

In questo lavoro analizzeremo due tipologie di rifiuti: la cenere volante e la polvere da elettrofiltro, rifiuti trattati da Ambienthesis con processi di inertizzazione prima di essere smaltiti in discarica.

Specifichiamo che le misurazioni sul campo sono state effettuate solamente sulla polvere da elettrofiltro, essendo molto difficile prelevare campioni di cenere senza incorrere in inavvertite inalazioni causa la sua elevata volatilità.

Nella seconda parte verrà affrontato il problema del radon indoor.

Il radon  $^{222}$  è un gas radioattivo rilasciato durante il decadimento dell'uranio. A temperatura e pressione standard è privo di odore, di sapore e invisibile. Il tempo di dimezzamento che lo caratterizza è di 3,82 giorni. Il radon decade emettendo radiazioni alfa in polonio 218.

Se inalato, il polonio viene intrappolato nei polmoni irradiando e penetrando le celle delle mucose membranali, iniziando il processo che porta alla creazione di un tumore.

All'interno di un edificio il radon si accumula e può raggiungere dei valori preoccupanti per la salute degli abitanti.

In questa tesi considereremo la costruzione di un edificio nella regione Lazio, e in particolare in prossimità dei colli albani, dove la concentrazione media di radon raggiunge il livello massimo in Italia di 120 Bq/m<sup>3</sup> (consideriamo che la concentrazione media globale è di 40 Bq/m<sup>3</sup>), all'interno di un edificio può raggiungere concentrazioni di oltre 500 Bq/m<sup>3</sup>.

Il problema del radon è presente soprattutto in edifici confinati come negozi, uffici e strutture pubbliche dove il rateo di ventilazione è relativamente basso.

## 1 LEGISLAZIONE

Il documento di riferimento per quanto riguarda i materiali radioattivi è il decreto legislativo del 17/03/95 modificato dal D. Lgs. 26 maggio 2000 n. 187, dal D. Lgs. 26 maggio 2000 n. 241 e dal D. Lgs. 9 maggio 2001 n. 257 . In questi decreti si attuano anche le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 92/3/Euratom e 96/29/Euratom in materia di radiazioni ionizzanti.

Nelle pagine seguenti verrà riassunto il contenuto del decreto, soffermandoci soprattutto sulle definizioni di grandezze fondamentali per la realizzazione del lavoro, e sui limiti imposti per quanto riguarda i nuclidi radioattivi.

### 1.1 DEFINIZIONI

Come riferito nel capo II articolo 4, riportiamo le seguenti definizioni:

- **attività (A):**  $\frac{dN}{dt}$  dove dN è il numero atteso di transizioni nucleari spontanee di una determinata quantità di un radionuclide da uno stato particolare di energia in un momento determinato, nell'intervallo di tempo dt;
- **Becquerel (Bq):** nome speciale dell'unità di attività (A); un becquerel equivale ad una transizione per secondo. 1 Bq 1 s<sup>-1</sup>
- **dose assorbita (D):** energia assorbita per unità di massa  $\frac{dE}{dm}$ , in cui dE è l'energia media ceduta dalle radiazioni ionizzanti alla materia in un elemento volumetrico e dm la massa di materia contenuta in tale elemento volumetrico; ai fini del presente decreto, la dose assorbita indica la dose media in un tessuto o in organo. L'unità di dose assorbita è il gray;

- **gray (Gy):** nome speciale dell'unità di dose assorbita.  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J Kg}^{-1}$ . i fattori di conversione da utilizzare quando la dose assorbita è espressa in rad sono i seguenti:  $1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$   $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ ;
- **dose equivalente ( $H_T$ ):** dose assorbita media in un tessuto o organo T, ponderata in base al tipo e alla qualità della radiazione nel modo indicato nei provvedimenti di applicazione; l'unità di dose equivalente è il Sievert; Le dimensioni del Sievert sono  $\text{J kg}^{-1}$ . quando la dose equivalente o la dose efficace sono espresse in rem valgono le seguenti relazioni:  $1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$   $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ ;
- **dose efficace (E):** somma delle dosi equivalenti nei diversi organi o tessuti, ponderate nel modo indicato. nei provvedimenti di applicazione, l'unità di dose efficace è il Sievert;
- **dose efficace impegnata( $E(t)$ ):** somma delle dosi equivalenti impegnate nei diversi organi o tessuti  $H_T(t)$  risultanti dall'introduzione di uno o più radionuclidi, ciascuna moltiplicata per il fattore di ponderazione del tessuto  $w_T$  la dose efficace impegnata  $E(t)$  è definita da:

$$E(t) = \sum_T w_T H_T$$

dove t indica il numero di anni per i quali è effettuata l'integrazione; l'unità di dose efficace impegnata è il Sievert.

## 1.2 LIMITI

Nel decreto legislativo 241 del 26/05/2000 vengono stabiliti i limiti per la radioattività dei materiali aventi nuclidi radioattivi, già stabiliti nella direttiva 59/2013 da parte di euratom.

Come riferito nel decreto, una pratica può essere considerata, senza ulteriori motivazioni, priva di rilevanza radiologica se sono soddisfatti i seguenti criteri:

- a) la dose efficace cui si prevede sia esposto un qualsiasi individuo della popolazione a causa della pratica esente è pari o inferiore a  $10 \mu\text{Sv}$  all'anno;
- b) la dose collettiva efficace impegnata nell'arco di un anno di esecuzione della pratica non è superiore a circa  $1 \text{ Sv} \cdot \text{persona}$ .

Affinchè siano rispettati i precedenti criteri, la radioattività e la concentrazione non possono essere trascurate se si verificano congiuntamente le seguenti condizioni:

- a) la quantità totale di radioattività del nuclide è uguale o superiore ai valori riportati nella seguente tabella 1



- b) la concentrazione media del nuclide, intesa come rapporto tra la quantità di radioattività del radionuclide e la massa della matrice in cui essa è contenuta, è uguale o superiore a 1 Bq/g. Questo punto è valido per tutti i nuclidi escluso il K-40.
- c) Per quanto concerne il K-40, la concentrazione media del nuclide è uguale o superiore a 10 Bq/g.

Nel caso la materia radioattiva sia costituita da una miscela di radionuclidi, il decreto deve essere applicato se la somma dei rapporti tra la quantità di radioattività di ciascun radionuclide e quella prevista nella tabella 2 è superiore a 1.

radionuclide	Quantità radioattività (Bq)
K-40	$1 \cdot 10^6$
I-131	$5 \cdot 10^4$
Cs-137	$1 \cdot 10^4$
Pb-210	$5 \cdot 10^3$
Rn-222	$5 \cdot 10^5$
Th-232	$1 \cdot 10^3$
U-238	$1 \cdot 10^3$

*Tabella 2. Sono stati inseriti i valori per i radionuclidi di maggiore interesse*

### 1.3 CONCETTO DI CLEARANCE

I concetti di esclusione, esenzione e clearance sono stati definiti nel “international basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources” redatto dalla IAEA nel 1996.

La BSS offre la possibilità, alle autorità nazionali competenti, di esimere dai requisiti della propria direttiva quei materiali destinati al riutilizzo, riciclaggio o smaltimento, se il loro contenuto di radioattività fosse al di sotto dei cosiddetti “livelli di clearance”.

- Il concetto di esclusione è riferito alla decisione secondo cui il sistema regolatorio non può essere applicato a determinate fonti di esposizione perché eccessivamente difficoltoso o irrealistico
- Il concetto di esenzione si applica alle sorgenti di radiazione e/o alle pratiche che non entrano nel sistema regolatorio: al di sotto di determinati livelli di rischio l'inserimento nel sistema regolatorio è del tutto inefficiente o persino dannoso da un punto di vista sociale
- Il concetto di clearance (livello di allontanamento) si applica a sorgenti all'interno del sistema regolatorio ma che ne possono uscire perché presentano rischi irrilevanti e sulle quali pertanto il sistema regolatorio non si applica più.

In questo caso il materiale può essere trattato come se non contenesse radioattività e riutilizzato senza restrizioni.

Definiamo di seguito l'indice di clearance CI necessario per stabilire se un materiale possa essere riutilizzato o no:

$$CI = \sum_i (A_i / L_i)$$

Dove  $A_i$  è l'attività del singolo nuclide, mentre  $L_i$  è il limite di clearance. L'indice CI deve essere inferiore all'unità affinché il materiale possa essere definito riutilizzabile.

I limiti di clearance stabiliti dalla IAEA non sono accettati da tutte le commissioni regolatorie, infatti in alcuni paesi i limiti sono molto più restrittivi. Di seguito viene riportata una tabella con i diversi valori di  $L_i$  espressi in Bq/g per le diverse commissioni.

Negli stati uniti il riutilizzo di materiali radioattivi nel mercato edile è quasi assente anche qualora i limiti di clearance venissero rispettati; il riutilizzo è limitato al campo delle facilities nucleari o in campi dove l'esposizione al pubblico è minima.

Questo è dovuto al fatto che molte industrie applicano una politica di tolleranza zero verso i materiali radioattivi in quanto la loro presenza potrebbe compromettere la fiducia del consumatore nei loro prodotti.

Per quanto riguarda il limite di dose, è stato accettato a livello globale il valore di 10  $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ , valore irrisorio se paragonato al limite per l'esposizione del pubblico visto precedentemente di 1  $\text{mSv}/\text{anno}$ .

## 1.4 RADIONUCLIDI NATURALI

Ai fini dell'applicazione del presente decreto sono considerate materie radioattive naturali l'Uranio naturale (U nat) ed il Torio naturale (Th nat), con i loro prodotti di decadimento, e il <sup>40</sup>K. Ai fini dell'applicazione del presente decreto, per capostipiti dell'U nat e del Th nat devono intendersi rispettivamente l'<sup>238</sup>U ed il <sup>232</sup>Th.

### URANIO

L'uranio è un metallo duro, denso, malleabile caratterizzato da un colore bianco-argenteo. Può essere trovato in quantità molto piccole in rocce, terreno, acqua e aria sotto forma di ossido; essendo un materiale molto reattivo, in ambiente si trovano solo i suoi composti e mai allo stato elementare.

L'uranio naturale è composto da una miscela di tre isotopi, <sup>234</sup>U, <sup>235</sup>U e <sup>238</sup>U, di cui <sup>238</sup>U è il più abbondante (99,3%), mentre il <sup>234</sup>U costituisce una percentuale trascurabile del totale. I precedenti isotopi sono radioattivi e hanno un'emivita pari rispettivamente a  $4,468 \times 10^9$  anni, per l'<sup>238</sup>U,  $7,038 \times 10^8$  anni, per l'<sup>235</sup>U e  $2,455 \times 10^5$  anni per l'<sup>234</sup>U.

Di seguito viene mostrata la catena di decadimento, partendo dall'isotopo <sup>238</sup>U fino ad arrivare al <sup>206</sup>Pb, stabile.

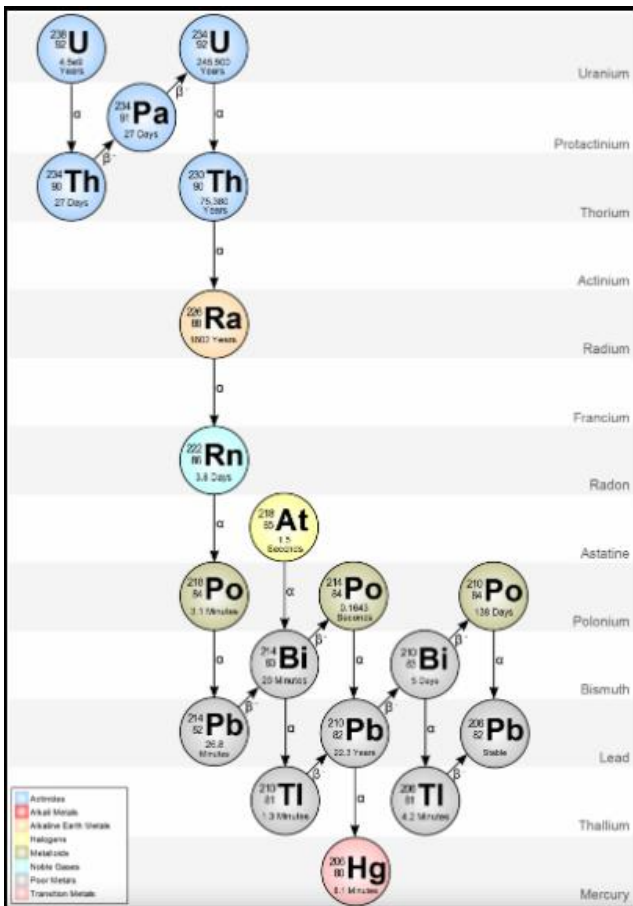


Figura 1. Serie di decadimento dell' uranio 238

Nuclide	Tempo dimezzamento	Energie decadimento alfa[Mev]	% decadimento alfa	Energie decadimento beta [Mev]	% decadimento beta	Energie decadimento gamma [Mev]	% decadimento gamma
U 238	4,468 x10 <sup>9</sup> anni	4,15	22,9	0	0	0,0496	0
		4,2	76,8	0	0	0	0
Th 234	24,1 giorni	0	0	0,076	2,7	0,0633	3,8
		0	0	0,095	6,2	0,0924	2,7
		0	0	0,096	18,6	0,0928	2,7
		0	0	0,1886	72,5	0,1128	0,24
Pa 234	1,17 minuti	0	0	2,28	98,6	0,766	0,207
		0	0	0	0	1,001	0,59
U 234	244,5 anni	4,72	27,4	0	0	0,053	0,12
		4,77	72,3	0	0	0,121	0,04
Th 230	7,7 x10 <sup>4</sup> anni	4,621	23,4	0	0	0,0677	0,37
		4,688	76,2	0	0	0,142	0,07
		0	0	0	0	0,144	0,045
Ra 226	1600 anni	4,6	5,55	0	0	0,186	3,28
		4,78	94,4				
Rn 222	3,823 giorni	5,49	99,9	0	0	0,51	0,078
Po 218	3,05 minuti	6	100	0,33	0,02	0,837	0,0011
At 218 (0,02%)	2 secondi	6,66	6,4	0	0	0,786	1,1
		7,7	89,9	0	0	0,053	6,6
		6,757	3,6	0	0	0	0
Pb 214 (99,98%)	26,8 minuti	0	0	0,67	48	0,2419	7,5

		0	0	0,73	42,5	0,295	19,2
		0	0	1,03	6,3	0,352	37,1
Bi 214	19,9 minuti	5,45	0,012	1,42	8,3	0,609	46,1
		5,51	0,008	1,505	17,6	1,12	15
		0	0	1,54	17,9	1,765	15,9
		0	0	3,27	17,7	2,204	5
Po 214 (99,979%)	164 picosecondi	7,687	100	0	0	0,7997	0,01
Tl 210 (0,021%)	1,3 minuti	0	0	1,32	25	0,2918	79,1
		0	0	1,87	56	0,7997	99
		0	0	2,34	29	0,86	6,9
		0	0	0	0	1,11	6,9
		0	0	0	0	1,21	17
		0	0	0	0	1,31	21
		0	0	0	0	1,41	4,9
		0	0	0	0	2,01	6,9
		0	0	0	0	2,09	4,9
Pb 210	22,3 anni	3,72	0,000002	0,016	80	0,0465	4
		0	0	0,063	20	0	0
Bi 210	5,01 giorni	4,65	0,00007	1,161	100	0	0
Po 210	138,378 giorni	5,305	100	0	0	0,802	0,0011
Pb 206	stabile						

Tabella 3. Serie di decadimento dell' uranio 238

## TORIO

Il torio è un metallo attinoide radioattivo, di colore argenteo se puro e in forma metallica, che diventa nero se esposto all'aria.

Il torio si trova in piccole quantità nella maggior parte delle rocce e dei suoli, dove è circa dieci volte più abbondante dell'uranio ed è circa comune quanto il piombo. Il terreno contiene di solito una media di sei ppm di torio; tale elemento si rinviene anche in molti minerali di cui il più comune è la monazite, formata da fosfato di torio e terre rare, che contiene fino al 12% di ossido di torio e di cui esistono depositi consistenti in vari paesi.

Il torio ha quattro isotopi, il Th232, il Th230, il Th229 e il Th228, rispettivamente con un'emivita di 14 miliardi di anni, 75380 anni, 7340 anni e 1,92 anni.

Di seguito viene mostrata la catena di decadimento, che parte dal torio 232 fino ad arrivare al piombo-208, stabile.

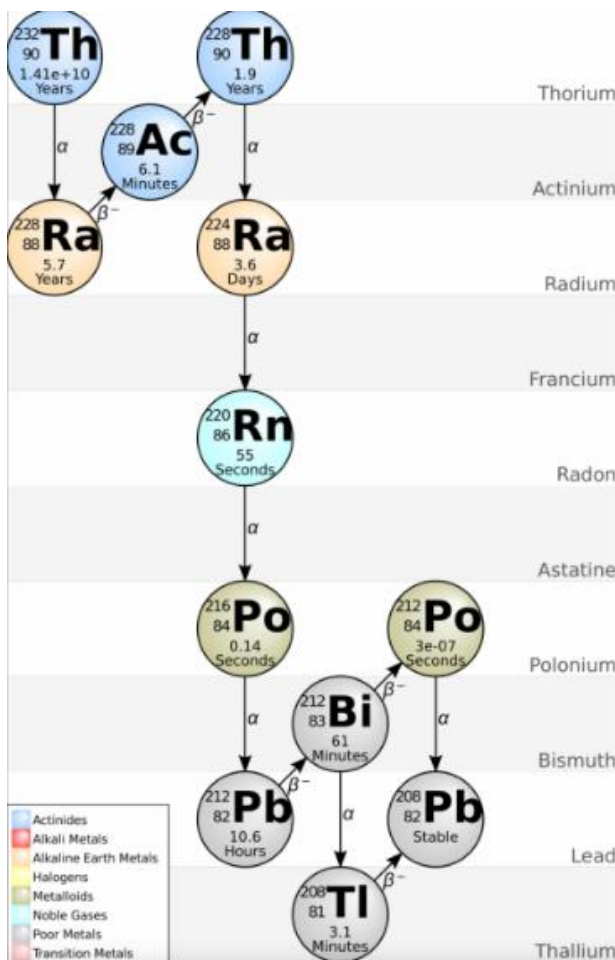


Figura 2. Serie di decadimento del torio 232

Nuclide	Tempo dimezzamento	Energie decadimento alfa [Mev]	% decadimento alfa	Energie decadimento beta [Mev]	% decadimento beta	Energie decadimento gamma [Mev]	% decadimento gamma
Th 232	1,405 x10 <sup>10</sup>	3,83	0,2	0	0	0,059	0,19
		3,95	23	0	0	0,126	0,04
		4,01	76,8	0	0	0	0
Ra 228	5,75 anni	0	0	0,0389	100	0,0067	6 x10 <sup>-5</sup>
Ac 228	6,13 ore	0	0	0,983	7	0,338	11,4
		0	0	1,014	6,6	0,911	27,7
		0	0	1,115	3,4	0,969	16,6
		0	0	1,17	32	1,588	3,5
		0	0	1,74	12	0	0
		0	0	2,08	8	0	0
Th 228	1,913 anni	5,34	26,7	0	0	0,084	1,19
		5,42	72,4	0	0	0,132	0,11
		0	0	0	0	0,132	0,11
		0	0	0	0	0,166	0,08
		0	0	0	0	0,216	0,27
Ra 224	3,66 giorni	5,45	4,9	0	0	0,241	3,9
		5,42	72,4	0	0	0	0
Rn 220	55,6 secondi	6,288	99,9	0	0	0,55	0,07
Po 216	0,15 secondi	6,78	100	0	0	0,128	0,002
Pb 212	10,64 ore	0	0	0,158	5,2	0,239	44,6



		0	0	0,334	85,1	0,3	3,4
		0	0	0,573	9,9	0	0
Bi 212	60,55 minuti	6,05	25	1,59	8	0,04	1
		6,09	9,6	2,246	48,4	0,727	11,8
		0	0	0	0	1,62	2,75
Po 212 (64,07%)	305 nano- secondi	8,785	100	0	0	0	0
Tl 208 (35,93%)	3,07 minuti	0	0	1,28	25	0,277	6,8
		0	0	1,52	21	0,5108	21,6
		0	0	1,8	50	0,583	85,8
		0	0	0	0	0,86	12
		0	0	0	0	2,614	100
Pb 208	stabile						

*Tabella 4. Serie di decadimento del torio 232*

## POTASSIO 40

Il potassio è un metallo alcalino tenero, bianco argenteo che è possibile trovare in natura soprattutto legato ad altri elementi. Il potassio ha tre isotopi: il potassio-39, il potassio-40 e il potassio-41; solo il potassio-40 è radioattivo, ed è anche l'isotopo più raro: rappresenta solo lo 0,0117% del totale degli isotopi.

L'isotopo radioattivo naturale del potassio subisce un duplice decadimento: per l'89% gli atomi di  $^{40}\text{K}$  si trasformano in  $^{40}\text{Ca}$  per decadimento  $\beta^-$ ; per il restante 11% gli atomi di  $^{40}\text{K}$  si trasformano in  $^{40}\text{Ar}$

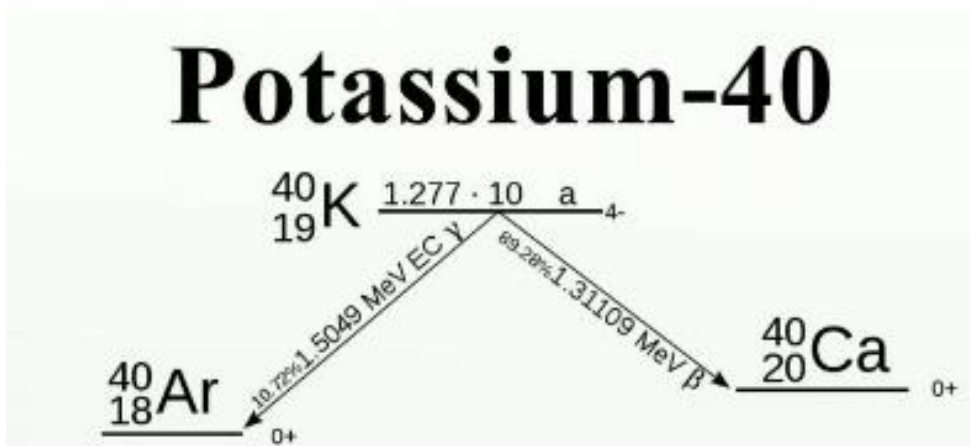


Figura 3. Serie di decadimento del potassio 40

## **2 MATERIALE RADIOATTIVO TRATTENUTO IN DISCARICA**

Secondo la direttiva 2008/98/Ce del 19 novembre 2008, il rifiuto viene definito come: "qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o l'obbligo di disfarsi".

I rifiuti sono classificati secondo il decreto legislativo n. 152/2006 e vengono divisi in rifiuti urbani e rifiuti speciali, entrambi a loro volta possono essere suddivisi in rifiuti pericolosi e non.

In questo lavoro ci occuperemo di rifiuti speciali pericolosi, quindi ci accingeremo ad approfondire con più chiarezza questa categoria.

### **2.1 CLASSIFICAZIONE RIFIUTI**

Secondo l'articolo 184, capitolo 3, sono definiti rifiuti speciali i rifiuti provenienti da attività industriali, agricole, artigianali, commerciali e di servizi.

Le caratteristiche che rendono un rifiuto pericoloso sono catalogate nel Reg(UE) n. 1357/2014, caratteristiche che sono poi state attribuite a partire dal primo giugno 2015 e rinominate con le lettere HP (hazardous property) per evitare la possibile confusione con i codici delle indicazioni di pericolo stilate dal Reg. (CE) n. 1272/2008, dove le caratteristiche erano precedute solamente dalla lettera H.

Di seguito elenchiamo tutte le possibili HP attribuibili ad un rifiuto:

- HP1 esplosivo;
- HP2 comburente;
- HP3 infiammabile;
- HP4 irritante – irritazione cutanea e lesioni oculari;
- HP5 tossicità specifica per organi bersaglio (STOT)/tossicità in caso di aspirazione;
- HP6 tossicità acuta;
- HP7 cancerogeno;
- HP8 corrosivo;
- HP9 infettivo;
- HP10 tossico per la riproduzione;
- HP11 mutageno;
- HP12 liberazione di gas a tossicità acuta;

- HP13 sensibilizzante;
- HP14 ecotossico;
- HP15 “rifiuto che non possiede direttamente una delle caratteristiche di pericolo summenzionate ma può manifestarla successivamente”.

## 2.2 CENERE VOLANTE

La cenere volante è un materiale particolato prodotto dalla combustione del carbone polverizzato, che viene trasportato nei gas di scarico e solitamente raccolto dai gas di combustione tramite precipitatori elettrostatici.

E' costituita da particelle fini e polverose, di forma prevalentemente sferica, sia di forma solida che vuota, e per lo più vetrose (amorfe) in natura.

Le proprietà chimiche delle ceneri volanti sono influenzate in larga misura da quelle del carbone bruciato e dalle tecniche utilizzate per la movimentazione e lo stoccaggio. Ci sono fondamentalmente quattro tipi, o gradi, di carbone, ognuno dei quali varia in termini di valore di riscaldamento, composizione chimica, contenuto di ceneri e origine geologica. I quattro tipi o gradi di carbone sono antracite, bituminoso, subbituminoso e lignitoso.

Di seguito viene mostrata la composizione chimica in una tabella

Component	Bituminous	Subbituminous	Lignite
SiO <sub>2</sub>	20-60	40-60	15-45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-35	20-30	10-25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO <sub>3</sub>	0-4	0-2	0-10
Na <sub>2</sub> O	0-4	0-2	0-6
K <sub>2</sub> O	0-3	0-4	0-4
LOI	0-15	0-3	0-5

*Tabella 5. Composizione chimica della cenere volante*

Le ceneri volanti sono classificate come rifiuto pericoloso e devono essere collocate in discarica per rifiuti pericolosi o inertizzate e poste in discarica per rifiuti non pericolosi. Parleremo dell'inertizzazione in seguito.

### **2.3 POLVERE DA ELETTROFILTRO**

L'elettrofiltro è uno strumento attraverso il quale è possibile realizzare la captazione di particelle solide e liquide presenti in un flusso d'aria. Il filtro induce una differenza di potenziale tra degli elettrodi di emissione e di raccolta, riuscendo a realizzare la separazione delle particelle contaminanti, che andranno poi a costituire la polvere studiata nel nostro caso, dal gas che viene fatto fluire tra gli elettrodi. L'utilizzo di filtri permette di ottenere aria completamente esente da polvere, fumo, spore, batteri, polline.

Oltre agli elettrodi, un sistema a filtri elettrostatici è costituito da:

- un gruppo di alimentazione che genera tensione dai 30 ai 100 kV
- un apparato per la pulizia periodica degli elettrodi di raccolta, che realizza il distacco delle polveri fissate sugli elettrodi percuotendo o trasmettendo vibrazioni all'elettrodo. Il suddetto metodo è chiamato "metodo a secco" ed è il più utilizzato.
- strutture di alloggiamento degli elettrodi e di distribuzione dei flussi di gas in ingresso e in uscita
- contenitori per la polvere.

Di seguito vedremo brevemente in cosa consiste il trattamento nei filtri.

Innanzitutto viene applicata un'elevata differenza di potenziale per creare un forte campo elettrostatico. Il campo generato provoca la ionizzazione del gas attorno alla superficie dell'elettrodo di emissione, realizzando un cosiddetto "effetto corona". Il flusso di gas viene poi fatto passare tra le piastre di raccolta e viene ionizzato, quindi gli ioni tendono a spostarsi dalla zona di corona verso la zona di raccolta. In questa fase gli ioni prodotti collidono con le particelle di contaminante e cedono loro una carica elettrica, permettendo così la loro cattura da parte degli elettrodi di raccolta, dove le polveri sono trattenute e successivamente rimosse col metodo a secco.

### **2.4 PROCESSO DI INERTIZZAZIONE**

Lo scopo dell'inertizzazione è di ridurre sensibilmente il rilascio delle sostanze inquinanti presenti nel residuo solido migliorandone anche la manipolabilità. L'azione inertizzante viene praticata da sostanze che possono polimerizzare e creare matrici solide, che riducono la mobilità dei metalli e di alcuni composti organici.

Il principale additivo universalmente utilizzato è il cemento Portland, da decenni utilizzato in tutti gli impianti di trattamento fisico nel mondo per inertizzare le matrici più disparate: dalle ceneri volanti ai terreni contaminati, da composti organici persistenti, all'amianto. L'azione del cemento può essere migliorata se nel rifiuto vengono inseriti alcuni composti che velocizzano l'effetto polimerizzante e riducono gli effetti negativi di alcune sostanze presenti nel rifiuto. Ad esempio, un agente utile è il solfato di calcio anidro, che in piccole quantità aumenta i tempi di presa ma riduce la porosità della miscela di cemento e riduce le perdite per disidratazione.

Molti dei rifiuti che vengono inseriti nella miscela hanno azione positiva nei confronti dell'azione inertizzante: ad esempio, una buona selezione di terre e rocce da scavo, con un corretto fuso granulometrico, costituiscono uno scheletro per le miscele geopolimeriche, tanto da conferire resistenze a compressione di valore paragonabile a quelle ottenute nei calcestruzzi non strutturali. Altri componenti molto importanti, che possono conferire stabilità e resistenza al manufatto in cemento sono le scorie pesanti di siderurgia, componenti tipici del ciclo siderurgico, che presentano una riserva alcalina estremamente elevata e una altrettanto elevata pozzolanicità (proprietà, posseduta da diversi materiali di origine vulcanica, di fissare l'elemento calcio da una sospensione acquosa di calce dando, se impastati con questa, analogamente alla pozzolana, malte capaci di far presa e di indurire anche sott'acqua).

La riserva alcalina permette ai metalli contenuti nel rifiuto di permanere nello stato di idrossidi insolubili, mentre la pozzolanicità aumenta la resistenza del manufatto al cloro e agli attacchi chimici solfatici.

## 3 CALCOLO DOSE

Lo scopo del lavoro è il calcolo della cede (committed effective dose equivalent) per le persone più esposte della popolazione. Per farlo utilizzeremo il codice GENII, acronimo di generation II for dosimetry system. Il codice è stato elaborato dalla pacific northwest laboratory e si basa sui modelli di percorsi ambientali utilizzati ad Hanford, con la metodologia raccomandata dalle pubblicazioni 26 (1977) e 30 (1979) dell' ICRP (international commission on radiological protection).

### 3.1 GENII

Col codice GENII possiamo calcolare le dosi da radiazione derivate da rilasci acuti e cronici, e specificatamente può essere calcolata la dose annuale, la dose impegnata, e la dose accumulata, valutando le diverse vie di esposizione alla radiazione, quindi esposizione diretta tramite acqua, aria, suolo o esposizione tramite ingestione o inalazione di radionuclidi.

Lo scenario è definito tenendo conto delle modalità di immissione degli effluenti radioattivi nell'ambiente, delle caratteristiche fisico chimiche dello scarico o del rilascio, delle proprietà dell'ambiente ricettore e delle abitudini alimentari e di vita dell'uomo nell'area considerata.

I moduli del sistema GENII si basano su modelli e codici già esistenti, utilizzando però formulazioni e coefficienti di trasferimenti aggiornati. Il sistema è composto da sette codici intercorrelati le cui librerie di dati sono collegate tra di loro tramite file di riferimento. L'uscita di uno dei codici viene immagazzinata in un file che può essere letto dal codice successivo nel sistema; in alternativa l'utente può bloccare il processo e leggere i file di dati di trasferimento intermedi per ottenere informazioni specifiche sui processi in evoluzione o sui risultati intermedi.

### 3.2 STRUMENTAZIONE

Il valore di rateo del rateo di dose equivalente, misurato in nSv/h, è stato rilevato tramite il radiometro AT1117M prodotto dall'azienda Atomtex, strumento di misurazione designato per rilevare il valore di dose causato da radiazione neutronica e gamma. Lo strumento è composto da una sonda che funge da unità di rilevamento della radiazione e da un'unità di elaborazione che emette un allarme sonoro e visivo se il valore della radiazione supera un certo limite, preimpostato manualmente dall'utente.

Di seguito viene presentata la scheda tecnica del misuratore.

Detection unit		BDKN-03	
Registered radiation		Neutron radiation	
Detector		<sup>3</sup> He proportional counter in polyethylene moderator	
Energy range		0.025 eV – 14 MeV	
Measurement range of ambient radiation dose rate equivalent		0.1 μSv/h – 10 mSv/h	
Measurement range of ambient radiation dose equivalent		0.1 μSv – 10 Sv	
Sensitivity to neutron radiation of Pu-Be source (In dose rate measurement mode)		≥0.355 cps/(μSv·h <sup>-1</sup> )	
Neutron flux density measurement range		0.1 – 10 <sup>4</sup> neutron·s <sup>-1</sup> ·cm <sup>-2</sup>	
Sensitivity to neutron radiation of Pu-Be source (In flux density measurement mode)		≥0.5 cps/(neutron·s <sup>-1</sup> ·cm <sup>-2</sup> )	
Limit of intrinsic relative measurement error		±20%	
Protection rating		IP64	
Overall dimensions, weight		314x220x264 mm, 8 kg	

Relative sensitivity coefficients for standard neutron radiation sources with different energies for ambient dose equivalent rate measurement	<i>n-radiation source</i>	<i>BDKN-03</i>	Relative sensitivity coefficients for standard neutron radiation sources with different energies for flux density measurement	<i>n-radiation source</i>	<i>BDKN-03</i>
	Thermal, En=0.025 eV	0.225±0.045		Thermal, En=0.025 eV	0.0064±0.0013
	Ra-Be, En=100 keV	0.81±0.08		Ra-Be, En=100 keV	0.182±0.018
	<sup>252</sup> Cf, En=2.13 MeV	1.02±0.10		<sup>252</sup> Cf, En=2.13 MeV	1.01±0.10
	Pu-Be, En=4.16 MeV	1.0		Pu-Be, En=4.16 MeV	1.0

Figura 4. Scheda tecnica del radiometro

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	0.3 μSv/h – 100 mSv/h
Measurement range of ambient radiation dose equivalent	1 μSv – 1 Sv	30 nSv – 100 Sv
Energy dependence relative to 662 keV ( <sup>137</sup> 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)
Sensitivity to <sup>137</sup> Cs gamma radiation	≥1.0 cps/(μSv·h <sup>-1</sup> )	≥0.33 cps/(μSv·h <sup>-1</sup> )
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 Radiation monitor: General characteristics			
<b>Power supply</b>	- Detection unit	1) By PU2 / PU4 2) By BT-DU4 adapter	<b>Interface</b> - Connection of detection unit to PU2 RS232 - Connection of detection unit to PU4 Bluetooth (via BT-DU4 adapter), RS232
	- PU2 / PU4 / BT-DU4	1) By integrated rechargeable batteries 2) By +12 VDC power source 3) By 230 VAC 50 Hz power source	
<b>Continuous operation time</b> in case of rechargeable battery supply	24 h minimum (PU2) 8 h minimum (PU4)	<b>Relative air humidity</b> with temperature ≤35°C without condensation	≤95%

Figura 5. Scheda tecnica del radiometro



### 3.3 MODELLO DI CALCOLO

Nel primo step per la creazione del modello di calcolo viene impostato lo scenario adatto al nostro caso, scegliendo la tipologia di rilascio e stabilendo se la dose da calcolare sia quella media assorbita dalla popolazione allocata vicino al sito oppure se sia la dose massima assorbita dall'individuo più esposto. Nel nostro caso scegliamo la seconda opzione.

- Scenario: near field;
- Dose: individuale, dose massima;
- Rilascio: cronico.

Nel secondo step vengono stabilite quali siano le matrici contenenti radionuclidi e in quale modo le radiazioni vengano trasportate. Inoltre vengono ipotizzate le vie di assorbimento delle radiazioni.

- Localizzazione radionuclidi: rifiuti seppelliti;
- Trasporto: degradazione del rifiuto;
- Tipi di esposizione: esterna, inalazione, ingestione cibi, ingestione non voluta del suolo.

Nel terzo step selezioniamo i radionuclidi di nostro interesse specificando le rispettive attività in Bq/m<sup>3</sup>. Nei successivi paragrafi sono presenti le schede tecniche dei rifiuti con le quantità considerate

Nel quarto step decidiamo il lasso temporale in cui l'individuo è esposto alle radiazioni e il lasso temporale da considerare per il calcolo della dose.

- Intake ends after: 70 anni;
- Dose calculation ends after: 70 anni.

Infine vengono scelti i parametri per tempo d'esposizione annuale, area del sito, consumazione del cibo e dell'acqua. Per quanto riguarda il tempo di esposizione, volendo considerare il peggior scenario possibile, abbiamo considerato 8766 ore annuali, mentre per quanto riguarda i parametri di consumo del cibo e dell'acqua, vengono utilizzati i parametri di default suggeriti dal codice.

### 3.4 CENERE VOLANTE

Come detto in precedenza, la cenere può essere inertizzata e spedita in una discarica per rifiuti non pericolosi. Di seguito viene mostrato lo spettro dei radionuclidi presenti nella cenere.

* 134Cs UNI 11665:2017	Bq/Kg	<1,2
* 137Cs UNI 11665:2017	Bq/Kg	1,10 ± 0,59
* 241Am UNI 11665:2017	Bq/Kg	<3,3
* 192Ir UNI 11665:2017	Bq/Kg	<1,0
* 238U UNI 11665:2017	Bq/Kg	<200
* 226Ra UNI 11665:2017	Bq/Kg	<2,8
* 210Pb UNI 11665:2017	Bq/Kg	273 ± 55
* 232Th UNI 11665:2017	Bq/Kg	<9,7
* 228Ra UNI 11665:2017	Bq/Kg	<6,3
* 40K UNI 11665:2017	Bq/Kg	1120 ± 47

Figura 6. Radionuclidi contenuti nella cenere volante

Ai fini dei calcoli considereremo solo l'uranio, il piombo e il potassio in quanto gli altri radionuclidi hanno un'attività specifica trascurabile.

Considerando la densità della cenere pari a 550 kg/m<sup>3</sup> e convertendo i precedenti valori in Bq/m<sup>3</sup> otteniamo le seguenti attività:

- U238=1,1\*10<sup>5</sup> Bq/m<sup>3</sup>;
- Pb210=1,8\*10<sup>5</sup> Bq/m<sup>3</sup>;
- K40=6,42\*10<sup>5</sup> Bq/m<sup>3</sup>.

Inserendo i suddetti valori nel codice otteniamo i seguenti risultati:

Release period: 0.0  
 Uptake/exposure period: 70.0  
 Dose commitment period: 70.0  
 Dose units: Sv

	Dose Commitment Year				
	1	2	3	...	
Internal Intake Year:	-----				
3			0.0E+00	...	
2		0.0E+00	0.0E+00	...	Internal Effective Dose Equivalent
1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	...	= 0.0E+00
Internal Annual Dose	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	...	= 0.0E+00
	+	+	+		
External Annual Dose	2.1E-09	2.1E-09	2.1E-09	...	1.5E-07
Annual Dose	2.1E-09 + 2.1E-09 + 2.1E-09 + ... =				1.5E-07
					2.1E-09
					Maximum Annual Dose Occurred In Year 2

#### External Dose by Radionuclide

Radionuclide	
K 40	2.1E-09
PB 210	0.0E+00
BI 210	0.0E+00
PO 210	0.0E+00
U 238	5.7E-33
TH 234	0.0E+00
PA 234	0.0E+00
Total	2.1E-09

#### External Dose by Radionuclide

Radionuclide	
K 40	1.5E-07
PB 210	0.0E+00
BI 210	2.3E-13
PO 210	4.8E-14
U 238	4.0E-31
TH 234	5.3E-10
PA 234	1.5E-10
Total	1.5E-07

Figura 7. Risultati dosi assorbite causa cenere volante.

Ricordando il limite di legge per la rilevanza di una pratica radioprotezionistica è pari a 10  $\mu$ Sv/anno, possiamo affermare che i valori ottenuti sono irrilevanti, essendo la massima dose calcolata inferiore di circa quattro ordini di grandezza rispetto al limite di rischio accettabile.

Possiamo inoltre notare come la dose sia dovuta interamente a irraggiamento esterno: acqua e cibo non sono in alcun modo contaminati dalle radiazioni.

Avendo applicato lo scenario più conservativo possibile (persona che passa 70 anni nei pressi della discarica) e avendo comunque ottenuto valori di dosi irrilevanti, possiamo concludere che le ceneri possono essere depositate in discarica senza rischio alcuno per il pubblico.

### 3.5 POLVERE DA ELETTROFILTRO

Americio 241	< RL	Bq/kg
Attinio 228	< RL	Bq/kg
Berillio 7	< RL	Bq/kg
Bismuto 211	< RL	Bq/kg
Bismuto 212	< RL	Bq/kg
Bismuto 214	< RL	Bq/kg
Cesio 134	< RL	Bq/kg
Cesio 137	< RL	Bq/kg
Iodio 131	< RL	Bq/kg
Mercurio 203	< RL	Bq/kg
Piombo 210	< RL	Bq/kg
Piombo 212	< RL	Bq/kg
Piombo 214	< RL	Bq/kg
Potassio 40	2 100±310	Bq/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

Figura 9. Radionuclidi presenti nella polvere da elettrofiltro

Release period: 0.0  
 Uptake/exposure period: 70.0  
 Dose commitment period: 70.0  
 Dose units: Sv

	Dose Commitment Year				
	1	2	3	...	
Internal Intake Year:	3		0.0E+00	...	
			+		
	2	0.0E+00	0.0E+00	...	Internal Effective Dose Equivalent
		+	+		
	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	+ ... = 0.0E+00
Internal Annual Dose	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	...	= 0.0E+00
	+	+	+		+
External Annual Dose	3.2E-09	3.1E-09	3.1E-09	...	2.2E-07
Annual Dose	3.2E-09	3.1E-09	3.1E-09	...	= 2.2E-07
					3.2E-09
					Maximum Annual Dose Occurred In Year 1

Figura 10. Risultati dosi assorbite causa polvere da elettrofiltro

Come nel caso delle ceneri il valore di dose rilevato è di 4 ordini di grandezza inferiore al limite di rischio accettabile pari a 10 µSv/anno.

Anche in questo caso la dose è dovuta interamente a irraggiamento esterno, non coinvolgendo irradiazione per inalazione o ingestione di cibi o acqua.

Possiamo concludere che anche in questo caso la polvere da elettrofiltro può essere depositata in discarica senza rischi per il pubblico.

### 3.6 PROVE SPERIMENTALI

Le seguenti misurazioni sperimentali sono state effettuate presso l'impianto di trattamento e recupero rifiuti situato ad Orbassano e di proprietà di Ambienthesis, monitorando col radiometro AT1117M Atomtex quattro bags contenenti polvere da elettrofiltro appena scaricati, ottenendo i seguenti valori di dose:

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

Tabella 6. Attività presente nei bags contenente polvere da elettrofiltro

I valori misurati risultano all'incirca il doppio della radioattività naturale misurabile sul terreno, pari a 55 nSv/h.

Sono stati poi prelevati nove campioni contenenti 1 kg di polvere imballati tramite barattoli di polipropilene, e ciascuno campione è stato inviato in FCA per ottenere lo spettro di attività radioattiva, causata principalmente dal decadimento del K-40

I valori ottenuti sono i seguenti:

Campione	Concentrazione di Attività [Bq/kg]
1	201
2	356
4	302
5	227
6	148
7	269
8	116
9	247

Tabella 7. Attività presente nei campioni della polvere da elettrofiltro

Inserendo i precedenti valori nel codice GENII, si ottengono i seguenti risultati

Release period:		0.0	
Uptake/exposure period:		70.0	
Dose commitment period:		70.0	
Dose units:			SV

	Dose Commitment Year				
	1	2	3	...	
Internal Intake Year:			0.0E+00	...	
			+		
		0.0E+00	0.0E+00	...	Internal Effective Dose Equivalent
		+	+		
1	0.0E+00	+ 0.0E+00	+ 0.0E+00	+ ...	= 0.0E+00
Internal Annual Dose	0.0E+00	+ 0.0E+00	+ 0.0E+00	+ ...	= 0.0E+00
	+	+	+		Cumulative Internal Dose
External Annual Dose	2.6E-10	2.6E-10	2.6E-10	...	1.8E-08
Annual Dose	2.6E-10	+ 2.6E-10	+ 2.6E-10	+ ...	= 1.8E-08
					Cumulative Dose
					2.6E-10
					Maximum Annual Dose Occurred In Year 2

Figura 11. Risultati dose primo campione

Release period:		0.0	
Uptake/exposure period:		70.0	
Dose commitment period:		70.0	
Dose units:			SV

	Dose Commitment Year				
	1	2	3	...	
Internal Intake Year:			0.0E+00	...	
			+		
		0.0E+00	0.0E+00	...	Internal Effective Dose Equivalent
		+	+		
1	0.0E+00	+ 0.0E+00	+ 0.0E+00	+ ...	= 0.0E+00
Internal Annual Dose	0.0E+00	+ 0.0E+00	+ 0.0E+00	+ ...	= 0.0E+00
	+	+	+		Cumulative Internal Dose
External Annual Dose	4.6E-10	4.6E-10	4.6E-10	...	3.2E-08
Annual Dose	4.6E-10	+ 4.6E-10	+ 4.6E-10	+ ...	= 3.2E-08
					Cumulative Dose
					4.6E-10
					Maximum Annual Dose Occurred In Year 1

Figura 12. Risultati dose secondo campione

Release period: 0.0  
 Uptake/exposure period: 70.0  
 Dose commitment period: 70.0  
 Dose units: Sv

	Dose	Commitment	Year	3	...	
	1	2				
Internal Intake Year:	3			0.0E+00	...	
				+		
	2	0.0E+00		0.0E+00	...	Internal Effective Dose Equivalent
		+		+		
	1	0.0E+00	+	0.0E+00	+	0.0E+00
Internal Annual Dose		0.0E+00	+	0.0E+00	+	0.0E+00
		+		+		
External Annual Dose		1.3E-11	+	1.3E-11	+	9.1E-10
Annual Dose		1.3E-11	+	1.3E-11	+	9.1E-10
						1.3E-11
						Maximum Annual Dose Occurred In Year 2

Figura 13. Risultati dose terzo campione

Release period: 0.0  
 Uptake/exposure period: 70.0  
 Dose commitment period: 70.0  
 Dose units: Sv

	Dose	Commitment	Year	3	...	
	1	2				
Internal Intake Year:	3			0.0E+00	...	
				+		
	2	0.0E+00		0.0E+00	...	Internal Effective Dose Equivalent
		+		+		
	1	0.0E+00	+	0.0E+00	+	0.0E+00
Internal Annual Dose		0.0E+00	+	0.0E+00	+	0.0E+00
		+		+		
External Annual Dose		3.9E-10	+	3.9E-10	+	2.7E-08
Annual Dose		3.9E-10	+	3.9E-10	+	2.7E-08
						3.9E-10
						Maximum Annual Dose Occurred In Year 2

Figura 14. Risultati dose quarto campione



Release period: 0.0  
 Uptake/exposure period: 70.0  
 Dose commitment period: 70.0  
 Dose units: SV

	Dose Commitment Year				
	1	2	3	...	
Internal Intake Year:			0.0E+00	...	
			+		
		0.0E+00	0.0E+00	...	Internal Effective Dose Equivalent
		+	+		
	0.0E+00	+ 0.0E+00	+ 0.0E+00	+ ...	= 0.0E+00
Internal Annual Dose	0.0E+00	+ 0.0E+00	+ 0.0E+00	+ ...	= 0.0E+00
	+	+	+		Cumulative Internal Dose
External Annual Dose	3.0E-10	2.9E-10	2.9E-10	...	2.1E-08
Annual Dose	3.0E-10	+ 2.9E-10	+ 2.9E-10	+ ...	= 2.1E-08
					Cumulative Dose
					3.0E-10
					Maximum Annual Dose Occurred In Year 1

Figura 15. Risultati dose quinto campione

Release period: 0.0  
 Uptake/exposure period: 70.0  
 Dose commitment period: 70.0  
 Dose units: SV

	Dose Commitment Year				
	1	2	3	...	
Internal Intake Year:			0.0E+00	...	
			+		
		0.0E+00	0.0E+00	...	Internal Effective Dose Equivalent
		+	+		
	0.0E+00	+ 0.0E+00	+ 0.0E+00	+ ...	= 0.0E+00
Internal Annual Dose	0.0E+00	+ 0.0E+00	+ 0.0E+00	+ ...	= 0.0E+00
	+	+	+		Cumulative Internal Dose
External Annual Dose	2.0E-10	2.0E-10	2.0E-10	...	1.4E-08
Annual Dose	2.0E-10	+ 2.0E-10	+ 2.0E-10	+ ...	= 1.4E-08
					Cumulative Dose
					2.0E-10
					Maximum Annual Dose Occurred In Year 1

Figura 16. Risultati dose sesto campione

Release period: 0.0  
 Uptake/exposure period: 70.0  
 Dose commitment period: 70.0  
 Dose units: Sv

		Dose Commitment Year				
		1	2	3	...	
Internal Intake Year:	3			0.0E+00	...	
	2		0.0E+00	0.0E+00	...	
	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	...	0.0E+00
						Internal Effective Dose Equivalent
Internal Annual Dose		0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	...	0.0E+00
		+	+	+		Cumulative Internal Dose
External Annual Dose		3.9E-11	3.9E-11	3.9E-11	...	2.7E-09
Annual Dose		3.9E-11	3.9E-11	3.9E-11	...	2.7E-09
						Cumulative Dose
						3.9E-11
						Maximum Annual Dose Occurred In Year 2

Figura 17. Risultati dose settimo campione

Release period: 0.0  
 Uptake/exposure period: 70.0  
 Dose commitment period: 70.0  
 Dose units: Sv

		Dose Commitment Year				
		1	2	3	...	
Internal Intake Year:	3			0.0E+00	...	
	2		0.0E+00	0.0E+00	...	
	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	...	0.0E+00
						Internal Effective Dose Equivalent
Internal Annual Dose		0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	...	0.0E+00
		+	+	+		Cumulative Internal Dose
External Annual Dose		1.5E-10	1.5E-10	1.5E-10	...	1.1E-08
Annual Dose		1.5E-10	1.5E-10	1.5E-10	...	1.1E-08
						Cumulative Dose
						1.5E-10
						Maximum Annual Dose Occurred In Year 1

Figura 18. Risultati dose ottavo campione

Release period: 0.0  
 Uptake/exposure period: 70.0  
 Dose commitment period: 70.0  
 Dose units: Sv

	Dose Commitment Year				
	1	2	3	...	
Internal Intake Year:	3		0.0E+00	...	
	2	0.0E+00	0.0E+00	...	
	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	...
					= 0.0E+00
Internal Annual Dose	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	...	= 0.0E+00
	+	+	+		
External Annual Dose	3.2E-10	3.2E-10	3.2E-10	...	2.2E-08
Annual Dose	3.2E-10	3.2E-10	3.2E-10	...	= 2.2E-08
					3.2E-10
					Maximum Annual Dose Occurred In Year 1

Figura 19. Risultati dose nono campione

I valori ottenuti sono estremamente bassi, tutti di almeno 5 grandezze inferiori al limite imposto dalla legislazione italiana di 10 µSv, quindi i rifiuti possono essere smaltiti senza ulteriori analisi.

Nei seguenti grafici gentilmente offertici da FCA si può notare come i valori di radioattività del rifiuto siano riconducibili alla radioattività naturale di fondo, mentre è netta la differenza col terzo grafico ottenuto da prove condotte su dell' uranio impoverito, recuperato ed analizzato dal Centro di Radioprotezione della FCA presso la ditta Pyreco il 19.5.1997.

Si nota come nel terzo caso ci sia un picco di conteggi a 93 keV che indica la presenza di uranio 238, mentre i picchi per le radiazioni ad alta energia che si notano nei primi due grafici indicano la presenza di prodotti di decadimento dell'uranio 235, prodotto di decadimento dell' uranio naturale, e del torio contenuti nel suolo .

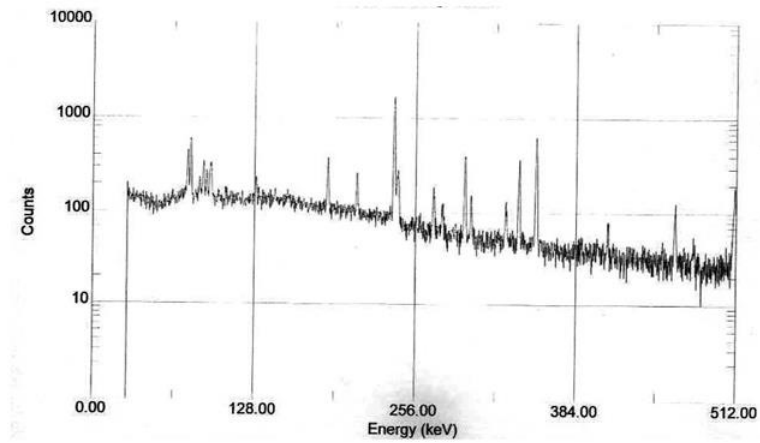


Figura 20. Campione prelevato in Ambientthesis

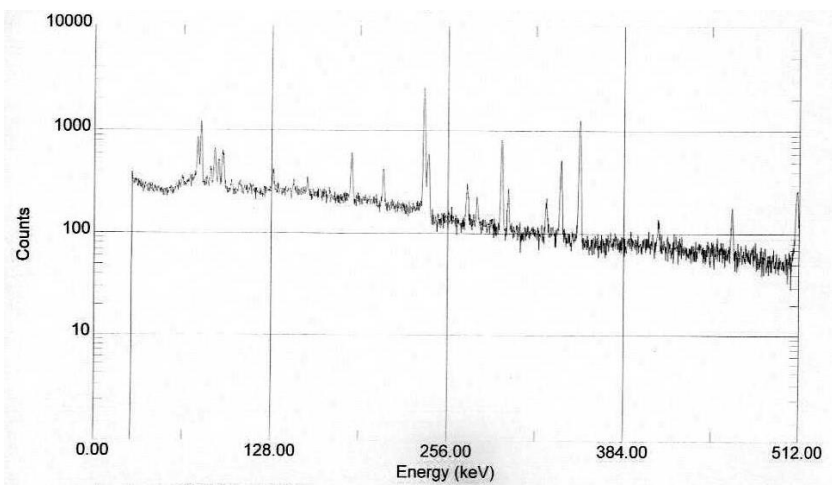


Figura 21. Campione di terreno con normale radioattività naturale, disponibile in FCA Centro di Radioprotezione, come riferimento.

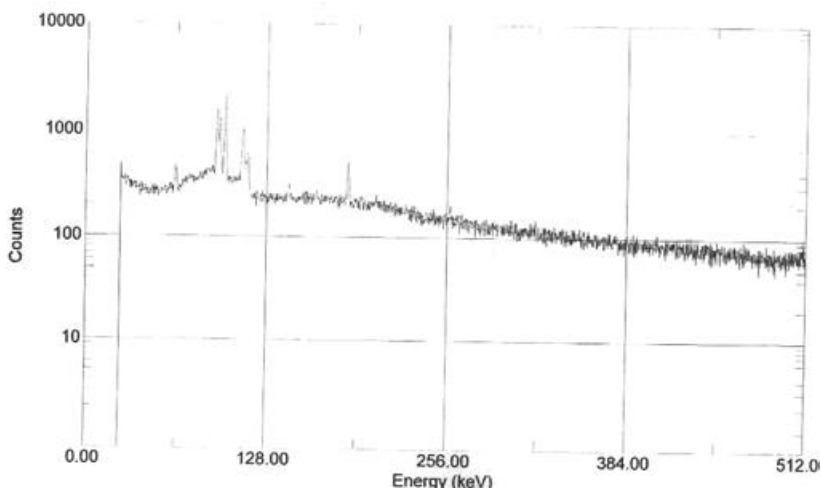


Figura 22. Frammento verniciato con presenza di contaminazione da Uranio, disponibile in FCA Centro di Radioprotezione

## 4 CASO STUDIO: ABITAZIONE CON ALTA CONCENTRAZIONE DI RADON

In questo capitolo analizzeremo il caso di un'abitazione situata nei pressi dei Colli Albani in Lazio, zona caratterizzata dalla presenza di un vulcano spento il cui terreno contiene valori di radioattività superiori alla media che causa un'alta concentrazione di radon nell'aria.

Lo scopo è individuare la dose assorbita da due individui durante la loro permanenza nell'abitazione tramite il codice di calcolo RESRAD BUILD.

### 4.1 RADON

Il radon è un gas nobile radioattivo scoperto all'inizio del secolo ed è un prodotto di decadimento presente nella famiglia dell'uranio 238, uranio 235 e torio 232. Nell'uso comune, il termine radon è associato all'isotopo con numero atomico 86, ma è bene specificare che il gas ha 26 isotopi che vanno dal Rn 199 al Rn 226. L'isotopo più diffuso è il radon 222 ed è un prodotto di decadimento dell'uranio 238.

Di seguito verrà mostrata una tabella con la catena di decadimento del radon 222.

Radionuclide	$T_{1/2}$	Energia $\alpha$ (Mev)	Energia $\beta$ (Mev)	Energia $\gamma$ (Mev)
Rn 222	3.823 d	5.49		
Po 218	3.05 min	6.00		
Pb 214	26.8 min		0.67 0.73 1.02	0.242 0.295 0.352
Bi 214	19.7 min		1.0 1.51 3.26	0.609 1.12 1.764
Po 214	164 $\mu$ s	769		
Pb 210	22.3 y		0.015 0.061	0.047
Bi 210	5.01 d		5.305	
Po 210	138.4 d	5.305		

Tabella 8. Serie di decadimento del radon 222

I prodotti di decadimento Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Pb-210 sono elementi chimicamente attivi che possono essere inalati, depositati e parzialmente trattenuti dall'apparato respiratorio, sia come ioni liberi che come ioni adsorbiti dalle gocce d'acqua o dal particolato. Per questo motivo è considerato dall'istituto superiore di sanità come agente cancerogeno di classe 1.

Il radon entra negli edifici attraverso vie di comunicazione presenti nella struttura (fessurazioni, giunzioni del pavimento, pareti, condotte, tubazioni, passaggi dei servizi, ecc.). La principale causa dell'ingresso del radon è la differenza di pressione tra interno ed esterno dell'edificio. Tale differenza di pressione è dovuta a due principali fenomeni:

- "Effetto camino", dovuto alla maggiore temperatura interna di un edificio, in particolare di notte e ancora di più nelle stagioni fredde;
- "Effetto vento" dovuto alla differenza di velocità dell'aria tra esterno ed interno dell'edificio.

L'esalazione di radon di una certa area dipende la conformazione morfologica del terreno, soprattutto dalle proprietà delle rocce presenti.

Le rocce che affiorano sulla superficie terrestre sono raggruppate in tre principali tipologie: sedimentarie, metamorfiche e magmatiche. Le rocce sedimentarie sono quelle che più diffusamente affiorano in superficie e sono prevalentemente formate da materiale eroso dalla superficie terrestre, trasportato in diversi modi (fiumi, vento, forza di gravità, ecc.) e accumulato in ambiente subaereo (depositi continentali) o sul fondo di bacini marini (depositi marini) o lacustri. In queste rocce la distribuzione di uranio e radio è influenzata essenzialmente dalla natura della roccia madre; più in generale oltre all'origine primaria (cioè al contenuto di radionuclidi genitori nelle rocce di origine) l'arricchimento / impoverimento di U, Th nelle rocce può essere legato anche a processi secondari quali l'interazione acqua-roccia.

Le rocce metamorfiche si formano per variazioni di temperatura e pressione da preesistenti rocce di qualsiasi tipo che rimangono solide durante tutti i processi di modificazione. In queste rocce la presenza di uranio e radio è, in generale, dipendente dal contenuto delle rocce originarie e dall'interazione acqua – roccia che ne può modificare il tenore originario. Le rocce magmatiche, infine, sono quelle che si formano dal consolidamento di un magma. La tendenza dell'uranio a concentrarsi nei magmi ricchi in silice, da cui si formano le rocce intrusive, ne determina la distribuzione in queste ultime. Nei tufi la concentrazione varia a seconda del chimismo; in particolare, i tufi dell'area laziale sono ricchi di uranio.

## 4.2 ASPETTI SANITARI

Il principale effetto dell'esposizione al radon è un aumento di rischio di tumore polmonare proporzionale alla concentrazione e al tempo di esposizione.

L'istituto superiore di sanità ha stimato che circa il 10% dei 31000 casi di tumore ai polmoni che si registrano in Italia ogni anno è attribuibile al radon. In particolare, l'ISS ha stimato che i casi di tumore polmonare dovuto al radon siano tra i 1000 e i 5500.

È universalmente riconosciuto tra gli studiosi sul caso del radon che non esista un valore soglia di esposizione sotto il quale il rischio è nullo; la probabilità di incorrere in un tumore infatti non è legata al numero di radiazioni che colpiscono una singola cellula epiteliale, ma dipende dal numero di interazioni tra cellule e radiazioni, che è proporzionale all'esposizione.

Inoltre, a parità di esposizione totale, si assume l'ipotesi che la situazione di maggiore rischio si presenti per esposizioni a bassi livelli di concentrazione per tempi prolungati piuttosto che per picchi di concentrazione in tempi ridotti.

In realtà, il maggior rischio per la salute umana non è rappresentato tanto dal radon quanto dai suoi prodotti di decadimento, in particolare quelli a vita breve.

Infatti il radon, oltre ad essere chimicamente stabile, ha un tempo di dimezzamento pari a 3,82 giorni. Pertanto, la frazione maggioritaria inalata di questo gas viene espulsa, contribuendo in misura meno rilevante ai danni dell'apparato respiratorio. I prodotti di decadimento del radon sono invece chimicamente reattivi e hanno un tempo di dimezzamento breve.

Una volta generati, rimangono in parte liberi o associati in cluster, cioè agglomerati di particelle con diametro inferiore a 1nm (frazione non attaccata o libera), e in parte si associano al particolato atmosferico (frazione attaccata), depositandosi sulle superfici (effetto plate-out) o rimanendo sospesi in aria. I prodotti di decadimento che rimangono sospesi in aria (frazione non attaccata e frazione attaccata non depositata) possono essere inalati.

Inoltre, i sistemi di filtraggio interni dell'apparato respiratorio non sono in grado di bloccare le particelle più piccole che quindi si fissano sui tessuti più interni. I prodotti di decadimento, a loro volta, continuano a decadere emettendo radiazioni e, tra questi, i radionuclidi emettitori  $\alpha$  a vita breve,  $^{218}\text{Po}$  e  $^{214}\text{Po}$  forniscono il maggior contributo alla dose assorbita dai bronchi e dai polmoni, provocando danni che, in alcuni casi, possono modificare la struttura cellulare e innescare un processo cancerogeno.

### 4.3 LEGISLAZIONE

Gli aspetti normativi in materia di radon hanno come obiettivo finale la riduzione del rischio ad un livello che può essere considerato accettabile. Tali provvedimenti vanno dall’emanazione di vere e proprie leggi, con valore di riferimento e sanzioni, a raccomandazioni con valori suggeriti. Il quadro normativo può essere riassunto nella tabella seguente.

	NORMATIVA		
	COMUNITARIA	ITALIANA	REGIONE LAZIO
AMBIENTI DI LAVORO	Direttive EURATOM 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3	D. Lgs. 230/1995 "Attuazione delle direttive EURATOM 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti"	L.R. 31 Marzo 2005, n. 14- Prevenzione e salvaguardia dal rischio gas radon (Bollettino Ufficiale della Regione Lazio del 9 aprile 2005, n. 10)
	Direttiva 96/29/EURATOM del 13.5.96	D. Lgs. n.241 del 26.5.2000 "Attuazione della direttiva 96/29/EURATOM del 13.5.96 in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti"	
	Proposta di direttiva del Consiglio UE n. 17623/1/12 del 20/12/2012 di individuazione degli standard di protezione contro l'esposizione alle radiazioni ionizzanti		
AMBIENTI RESIDENZIALI	Raccomandazione Commissione Europea 90/143/EURATOM	---	
	Proposta di direttiva del Consiglio UE del 20/12/2012 di individuazione degli standard di protezione contro l'esposizione alle radiazioni ionizzanti		

Tabella 9. Direttive sulla concentrazione di radon indoor

La legislazione italiana prevede un limite di concentrazione accettabile per il radon solamente per quanto riguarda gli ambienti di lavoro, intesi come luoghi sotterranei ed esplicitamente tunnel, sottovie, catacombe, grotte e terme, e incarica le Regioni e le Province autonome di effettuare una prima individuazione delle zone o delle tipologie dei luoghi di lavoro in superficie, con precise caratteristiche, ad elevate probabilità di alte concentrazioni di attività di radon (art.10 sexies).

Il decreto prevede lo stesso limite anche per le scuole.

Il limite imposto dalla legge è di 500 Bq/m3.

In questo lavoro ci occuperemo di un ambiente residenziale, pertanto i limiti da considerare sono quelli imposti dalla commissione europea, che verranno riassunti nella seguente tabella.



<b>AMBIENTI RESIDENZIALI</b>	400 per gli edifici esistenti	Raccomandazione Commissione Europea 90/143/ EURATOM
	200 per gli edifici da costruire	
	≤ 300	Proposta di direttiva del Consiglio UE n. 17623/1/12 del 20/12/2012 di individuazione degli standard di protezione contro l'esposizione alle radiazioni ionizzanti
	100 - 300	(World Health Organization, 2009 Handbook on indoor radon: a public health perspective)
	300	International Commission for Radiological Protection, 2009

Tabella 10. Limiti sulla concentrazione del radon indoor

Il report della regione Lazio è stato stilato considerando il limite di 300 Bq/mc.

#### 4.4 SITUAZIONE LAZIO

Per il nostro caso studio la scelta è ricaduta sulla regione Lazio in quanto la concentrazione media di radon è la più alta in Italia come mostrato nella seguente mappa

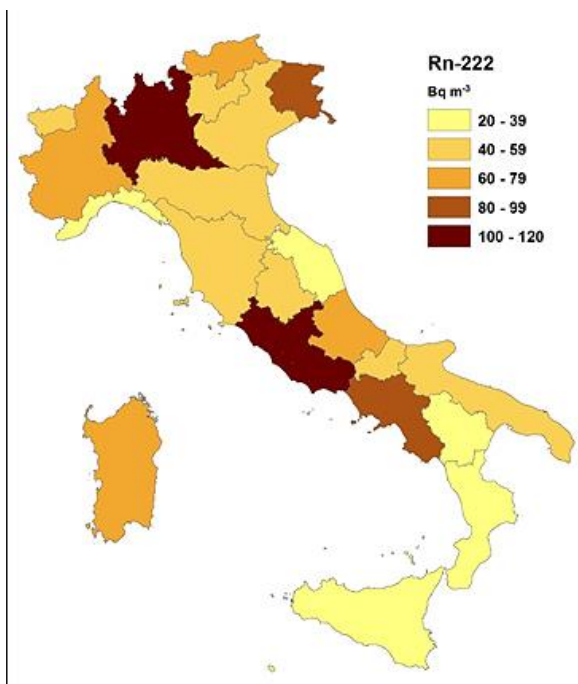


Figura 23. Concentrazioni medie di radon indoor nelle regioni italiane

La causa è da ricercare nella morfologia del terreno: la regione Lazio presenta numerose rocce di provenienza vulcanica, che ricordiamo sono ricche di uranio.

I parametri specifici delle concentrazioni di radon nel Lazio sono ripresi dal rapporto arpa del 2013, indagine nata dall'esigenza di raccogliere un insieme di dati e di metodologie finalizzati alla classificazione nel territorio della regione Lazio delle zone ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon, nel rispetto della normativa.

Sono stati raccolti dati su circa 4.600 abitazioni campionate casualmente nel territorio con le stesse procedure di base e impiegati circa 700 volontari per un controllo totale di circa 5200 abitazioni. Per la misura della concentrazione di radon sono stati utilizzati circa 25000 rilevatori di tracce nucleari a stato solido.

Di seguito sono mostrati i risultati ottenuti:

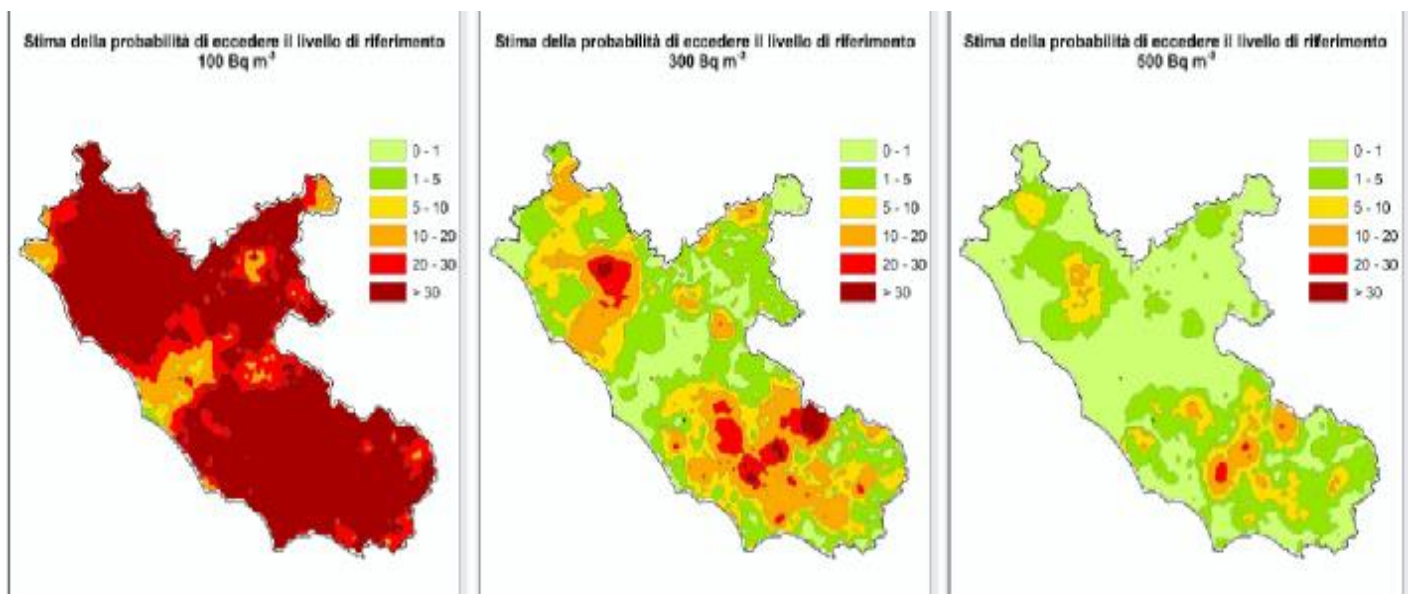


Figura 24. Concentrazione media di radon indoor nel Lazio

	Numero comuni dell'indagine regionale	Popolazione Residente – totale nei 348 comuni dell'indagine regionale	Popolazione Residente esposta valori medi annui superiori a 300 Bq m <sup>-3</sup>	% Popolazione Residente esposta valori medi annui superiori a 300 Bq m <sup>-3</sup>
<b>Regione Lazio</b>	<b>348</b>	<b>5 370 867</b>	<b>182 979</b>	<b>3.4</b>
Provincia di Viterbo	57	308 467	32 100	10.4
Provincia di Rieti	70	150 480	4 786	3.2
Provincia di Roma	102	3 905 322	69 393	1.8
Provincia di Latina	31	524 561	29 355	5.6
Provincia di Frosinone	88	482 037	47 345	9.8

*Tabella 11. Percentuale di abitazioni con concentrazioni di radon indoor superiore al limite nelle varie province laziali*

#### **4.5 CASO STUDIO**

Il caso studio di questo lavoro prenderà in considerazione un'abitazione situata in prossimità dell'area della valle della Caffarella, a sud di Roma. Quest' area è di particolare interesse in quanto il substrato geologico è formato in prevalenza da depositi alluvionali recenti e dai prodotti dell'attività vulcanica dei colli albani.

Questo vulcano cominciò a formarsi accumulando i prodotti delle sue prime attività su un basamento più antico di sedimenti marini di rocce carbonatiche che formavano un'ampia pianura tra la costa ed i Monti Appennini. Si stima che abbia eruttato circa 297 km<sup>3</sup> di materiale vulcanico durante la sue manifestazioni vulcaniche eruttive, che si sono verificate fino a circa 5000 anni fa.

Come detto in precedenza, le aree vulcaniche sono caratterizzate da una grande abbondanza di tufi e pozzolane, rocce ricche di materiali radioattivi che causano una grande diffusione di radon in aria. Consideriamo i seguenti valori di radioattività presente nel terreno dell'area:

Radionuclide	Attività [Bq/kg]
U-238	130
Ra-226	150
Th-232	200
K-40	500

*Tabella 12. Attività principali radionuclidi presenti nel suolo*

## 4.6 CEMENTO PORTLAND

Volendo calcolare la massima dose assorbita, oltre a considerare una concentrazione di radon che ecceda i limiti previsti dalla commissione europea, supporremo che nel cemento utilizzato per costruire l'abitazione sia stata usata della cenere volante, già classificata precedente come NORM.

Il cemento viene utilizzato come collante nella miscela di calcestruzzo, che ricordiamo è formato da acqua, cemento e un inerte. Grazie al cemento la miscela ottiene proprietà adesive solidificando per effetto di reazioni chimiche con l'acqua. Per questo motivo il cemento è definito genericamente legante idraulico.

E' prodotto per cottura a 1400°C in un forno rotativo di una miscela di argilla e calcare e altre materie prime minori. Il processo termico di cottura produce profondi cambiamenti fisici e chimici nei materiali di base, formando il prodotto cotto che prende il nome di clinker. Una volta macinato si aggiunge al clinker una piccola quantità di gesso biidratato (inferiore all'8%) per controllare il processo di presa.

I principali costituenti del cemento portland sono il silicato tricalcico ( $3\text{CaO-SiO}_2$ ), il silicato dicalcico ( $2\text{CaO-SiO}_2$ ), l'alluminato tricalcico ( $3\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ ) e la fase ferrica ( $4\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}_2$ ).

Gli alluminati sono responsabili della fase di presa (periodo in cui l'impasto perde la sua plasticità) mentre i solfati controllano la cinetica di tale processo, interagendo con gli alluminati. Questa fase ha una durata di qualche ora. Segue quindi la fase di indurimento, in cui i silicati reagiscono con l'acqua di impasto per dar luogo a prodotti di idratazione che conferiscono proprietà meccaniche.

Il cemento ha un'ottima proprietà di resistenza a compressione, ma un pessimo comportamento a trazione, resistenza che però è migliorata inserendo delle barre metalliche di armatura, andando a formare così il cemento armato.

Esistono in commercio parecchie tipologie di cemento, classificate in accordo alla normativa UNI ENV 197-1. In base a tale norma, ogni tipo di cemento è individuato da una sigla che inizia con CEM, seguita da un numero romano e da lettere che individuano il tipo e il sottotipo, e da un numero indicante la classe di resistenza normalizzata.

Tipo	Denominazione	Sigla	Clinker	Loppa d'alto forno	Microsilice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare	C.S. <sup>(a)</sup>
						Nat. P	Ind. Q <sup>(b)</sup>	Silicica V	Calcica W			
			K	S	D <sup>(c)</sup>					T	L	
I	Cemento Portland	I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla loppa	II/A-S II/B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5 0-5
	Cemento Portland alla microsilice	II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	II/A-P II/B-P	80-94 65-79	-	-	6-20 21-35	-	-	-	-	-	0-5 0-5
		II/A-O II/B-O	80-94 65-79	-	-	-	6-20 21-35	-	-	-	-	0-5 0-5
	Cemento Portland alle ceneri volanti	II/A-V II/B-V	80-94 65-79	-	-	-	-	6-20 21-35	-	-	-	0-5 0-5
II		II/A-W II/B-W	80-94 65-79	-	-	-	-	-	6-20 21-35	-	-	0-5 0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	II/A-T II/B-T	80-94 65-79	-	-	-	-	-	-	6-20 21-35	-	0-5 0-5
	Cemento Portland al calcare	II/A-L II/B-L	80-94 65-79	-	-	-	-	-	-	-	6-20 21-35	0-5 0-5
	Cemento Portland composito	II/A-M II/B-M III/A	80-94 65-79 35-64	<----- <----- 36-65	----- ----- -	----- ----- -	6 21 -	20 <sup>(d)</sup> 35 <sup>(e)</sup> -	----- ----- -	----- ----- -	----- ----- -	>---- >---- 0-5
III	Cemento d'altoforno	III/B III/C	20-34 5-19	66-80 81-95	-	-	-	-	-	-	-	0-5 0-5
IV	Cemento pozzolanico	IV/A IV/B	65-89 45-64	-	<----- <-----	----- -----	11-35 36-55	>---- >----	- -	- -	- -	0-5 0-5
V	Cemento composito	V/A V/B	40-64 30-39	18-30 31-50	-	<----- <-----	18-30 31-50	>---- >----	- -	- -	- -	0-5 0-5

(a) I valori del prospetto si riferiscono al nucleo del cemento, escludendo solfato di calcio e additivi.

(b) Costituenti secondari: possono essere filler oppure uno o più costituenti principali, sempre che questi non siano inclusi come costituenti principali nel cemento.

(c) La proporzione di microsilice è limitata al 10%.

(d) La proporzione di loppa non ferrosa è limitata al 15%.

(e) La proporzione di filler è limitata al 5%.

Tabella 13. Cementi comuni e loro composizioni

In questo lavoro utilizzeremo cemento portland alle ceneri volanti col 65% di clinker e il 35% di cenere volante, considerando i seguenti valori di attività radioattiva:

Radionuclide	Attività [Bq/kg]
Ra-226	140
Th-232	120
K-40	1000

Tabella 14. Attività principali radionuclidi presenti nel cemento.

Radionuclide	Attività [Bq/kg]
Ra-226	650
Th-232	200
K-40	1100

Tabella 15. Attività principali radionuclidi presenti nella cenere volante

#### 4.7 MODELLO ABITAZIONE

In questo caso studio considereremo un'abitazione di 120 m<sup>2</sup> e 2,7 m di altezza, costruita con cemento portland avente densità pari a 300 kg/m<sup>3</sup>. La casa seguirà la struttura mostrata nella successiva figura.

La tamponatura esterna è costituita da malta cementizia e da mattoni multiforo aventi dimensioni 12x24x5,5 come mostrato in figura

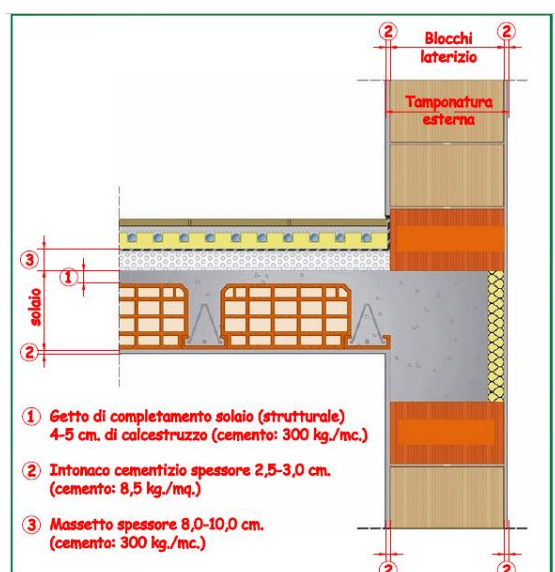


Figura 25. Misure mattone multiforo

Considerando lo spessore della tamponatura esterna pari a 30 cm, e considerando come legante tra i mattoni la malta cementizia, se il mattone avrà uno spessore di 5,5 cm, allora lo spessore totale della malta sarà di 2,5 cm.

Quindi in totale avremo le seguenti quantità di cemento:

- Pavimento e solaio: 18 cm di cemento.
- Muri: 8,5 cm di cemento.



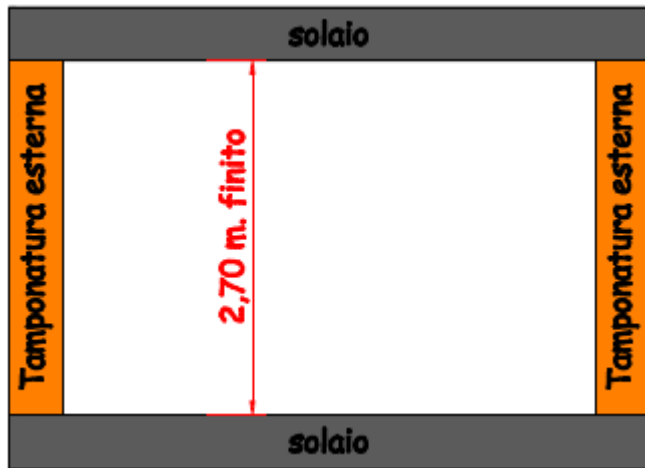


Figura 26. Modello abitazione

Al fine del calcolo verrà considerato solo il cemento, che sarà allo stesso tempo sorgente di radiazione e shielding.

## 5 MODELLO DI CALCOLO

La dose assorbita dai residenti dell'abitazione è calcolata utilizzando il codice RRSRAD BUILD

RESRAD è un codice sviluppato nel 1994 dal National laboratory of Argonne per lo U.S. department of energy con lo scopo di valutare materiali residui radioattivi nel terreno. Col passare degli anni sono stati sviluppati nuovi codici per ambiti più specifici, come il codice RESRAD BUILD, utilizzato per calcolare la potenziale dose alla quale può essere esposto un individuo che vive o lavora in un ambiente contaminato con materiali radioattivi.

Il sito contaminato viene caratterizzato inserendo valori numerici per numerosi parametri riguardanti le caratteristiche fisiche della struttura e della sorgente, oltre che i rateo di occupazione, inalazione, ingestione da parte degli abitanti della casa contaminata.

Il materiale radioattivo presente nella struttura può essere rilasciato in ambiente interno grazie a meccanismi di diffusione, come nel caso del radon, rimozione meccanica o erosione. il codice considera sette vie di esposizione: esposizione esterna direttamente dalla sorgente, esposizione esterna da materiali radioattivi depositati nel terreno, esposizione esterna dovuta all'immersione in aria, inalazione di particolato radioattivo sospeso in aria, inalazione di radon, ingestione involontaria di materiale radioattivo direttamente dalla sorgente, ingestione di materiali depositati sulla superficie della struttura.

### 5.1 MODELLO PER L'ESPOSIZIONE AL RADON

La concentrazione del radon nell'aria è calcolata grazie a un "indoor air quality model", che simula il trasporto del contaminante dentro un'abitazione con lo scambio di aria tra il compartimento e l'aria outdoor. Si ipotizza che la concentrazione sia uniforme all'interno del compartimento.

Il rateo di ventilazione è definito come il totale del volume dell'aria contenuta nel compartimento che è scambiata con l'aria outdoor per unità di tempo, ed è definito dalla seguente espressione:

$$\lambda_i^a = \frac{\sum_{j=0}^3 Q_{ji}}{V_i}$$

Con

- $\lambda_i^a$  = rateo per il compartimento i
- j,i=indici del compartimento, 0 sta per l'esterno
- $j \neq i$ .



- $Q_{ji}$  = flusso di aria tra il compartimento j e il compartimento i [ $m^3/h$ ]
- $V_i$  = volume del compartimento i

Il bilancio di massa del contaminante in un compartimento i è dato dalla seguente equazione:

$$V_i \frac{d C_i^n(t)}{dt} = \lambda_m V_i C_i^{n-1}(t) + \sum_{\substack{j=0 \\ (j \neq i)}}^3 (Q_{ji} C_j^n(t)) - C_i^n(t) \sum_{\substack{j=0 \\ (j \neq i)}}^3 Q_{ij} + I_i^n(t) - S_i^n(t),$$

Dove

- $C_i$  = concentrazione al tempo t di un radionuclide di ordine n nella sua serie di decadimento, presente nell' aria del compartimento i [ $[pCi/m^3]$ ];
- $\lambda_{rn}$  = costante di decadimento del radionuclide n;
- $I_i^n$  = rateo di iniezione del radionuclide n nell' aria del compartimento i al tempo t [ $[pCi/h]$ ];
- $S_i^n(t)$  = termine di sink per il radionuclide n nel compartimento i al tempo t [ $[pCi/h]$ ];

il termine a primo membro rappresenta il cambio netto del contaminante nel volume  $V_i$  per unità di tempo. Il primo termine del secondo membro rappresenta la generazione del principale radionuclide di ordine n a causa del decadimento del progenitore, il radionuclide n-1; il secondo termine rappresenta il contributo alla concentrazione del radionuclide da parte dei compartimenti adiacenti; il terzo termine rappresenta la perdita di materia nel compartimento i n dovuto alla migrazione di aria negli altri compartimenti. Il termine di sink rappresenta la perdita di materia del contaminante dovuta a decadimento radioattivo,  $S_{ri}^n$ , e deposito superficiale,  $S_{di}^n$ , e può essere espresso dalla seguente equazione:

$$S_i^n = S_{ri}^n + S_{di}^n;$$

dove

- $S_{ri}^n = \lambda_{rn} V_i C_i^n(t)$ ;
- $S_{di}^n = \lambda_{di} V_i C_i^n(t)$ ;
- $\lambda_{di} = \frac{u_d A_i}{V_i}$ ;
- $\lambda_{rn}$  = costante di decadimento del radionuclide n [ $1/h$ ];
- $\lambda_{di}$  = rateo di deposito superficiale [ $1/h$ ];
- $u_d$  = velocità di deposito superficiale [ $m/h$ ];
- $A_i$  = area orizzontale del compartimento.

Il termine  $I_i^n$  rappresenta l' iniezione totale di materiale radioattivo nell' aria del compartimento i a causa della sorgente di radioattività presente nel compartimento, e a causa della risospensione del materiale depositato sul pavimento.

Abbiamo inoltre bisogno di un modello per valutare la concentrazione di radionuclidi depositati sulla superficie. Il bilancio di massa è espresso dalla seguente equazione:

$$A_i \frac{d C_{di}^n(t)}{dt} = u_d A_i C_i^n(t) - \lambda_{rn} A_i C_{di}^n(t) - \lambda_R A_i C_{di}^n(t)$$

Dove

- $C_{di}^n(t)$  = concentrazione superficiale al tempo t del principale radionuclide n nella serie di decadimento, dovuta al deposito sulla superficie del compartimento i [ $pCi/m^2$ ];
- $C_i^n(t)$  = concentrazione in aria al tempo t del radionuclide n nel compartimento i [ $pCi/m^3$ ];
- $\lambda_{rn}$  = costante di decadimento del radionuclide n [ $1/h$ ];
- $\lambda_R$  = rateo di risospensione del materiale radioattivo in aria [ $1/h$ ];
- $u_d$  = velocità di deposito superficiale [ $m/h$ ];
- $A_i$  = area orizzontale del compartimento.

Il termine al primo membro rappresenta l'accumulo totale di massa radioattiva sulla superficie; il primo termine del secondo membro rappresenta l'incremento di massa dovuto al deposito di particelle; il secondo membro rappresenta la perdita di massa dovuta al decadimento radioattivo; infine, il terzo termine rappresenta la perdita di massa dovuta alla risospensione in aria delle particelle.

Abbiamo inoltre bisogno di modellizzare il bilancio di massa del radon presente nell'appartamento.

Se si assume il suolo infinito orizzontalmente ed omogeneo e si ignora l'effetto della convezione nella matrice porosa da esso costituita, il flusso di radon J può essere legato al gradiente di concentrazione di radon nel poro (C) dall'equazione di diffusione:

$$J = p_t D \frac{dC}{dz};$$

dove

- $p_t$ =porosità totale media;
- $D$ = coefficiente di diffusione [ $m^2/s$ ];
- $C$ = concentrazione di radon nel poro [ $Bq/m^3$ ];
- $z$ = coordinata assiale in direzione della diffusione [m].

L' equazione con cui può essere calcolata la concentrazione di radon nel suolo è la seguente:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{d}{dz} \left( D \frac{dC}{dz} \right) + \lambda Q;$$

dove

- $\lambda$  è la costante di decadimento del radon, pari a 0,1824 giorni (radon 222);
- $Q$  è il termine di sorgente di radon nel poro [ $Bq/m^3s$ ].

Il termine di sorgente può essere approssimato dall' espressione:

$$Q = \frac{\varepsilon \rho_b S_{Ra} \lambda}{p_t}.$$

Dove

- $\varepsilon$ =coefficiente di emanazione del radon, può assumere valori da 0,01 a 0,8;
- $\rho_b$ = densità media del materiale costituente il suolo [ $Bq/kg$ ];
- $S_{Ra}$ = concentrazione di radio nel suolo [ $Bq/kg$ ];

Per quanto riguarda la concentrazione di radon indoor, può essere ottenuta applicando il seguente bilancio di massa:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{J_i A_i F_{ai}}{V} - (\lambda + \nu) C_i + \nu C_0.$$

Dove

- $C_i$ = concentrazione radon indoor [ $Bq/m^3$ ];
- $A_i$  =area interna del compartimento;
- $F_{ai}$ = indoor area factor;
- $\nu$  =tasso di ventiazione del compartimento [ $1/s$ ];

L' indoor area factor rappresenta la frazione della superficie delle fondamenta dell'edificio sviluppata in zona contaminata e può assumere i seguenti valori

- $F_{ai} = 1$  se  $A = A_i$ ;
- $F_{ai} = A/A_i$  se  $A < A_i$ ;
- $F_{ai} = 1 + 4 \frac{D_h}{\sqrt{A_i}}$  se  $A > A_i$ .

dove

A= area della zona contaminata;

$A_i$ = area del pavimento dell'abitazione;

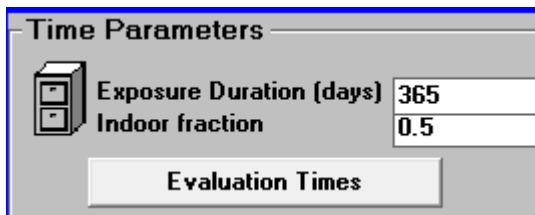
$D_h$ = profondità delle fondamenta all' interno della zona contaminata

La soluzione della precedente equazione è la seguente:

$$C_i = \frac{\frac{J_i F_{ai}}{H} + v C_0}{\lambda + v};$$

dove  $H = \frac{V}{A_i}$ .

## 5.2 PARAMETRI TEMPORALI

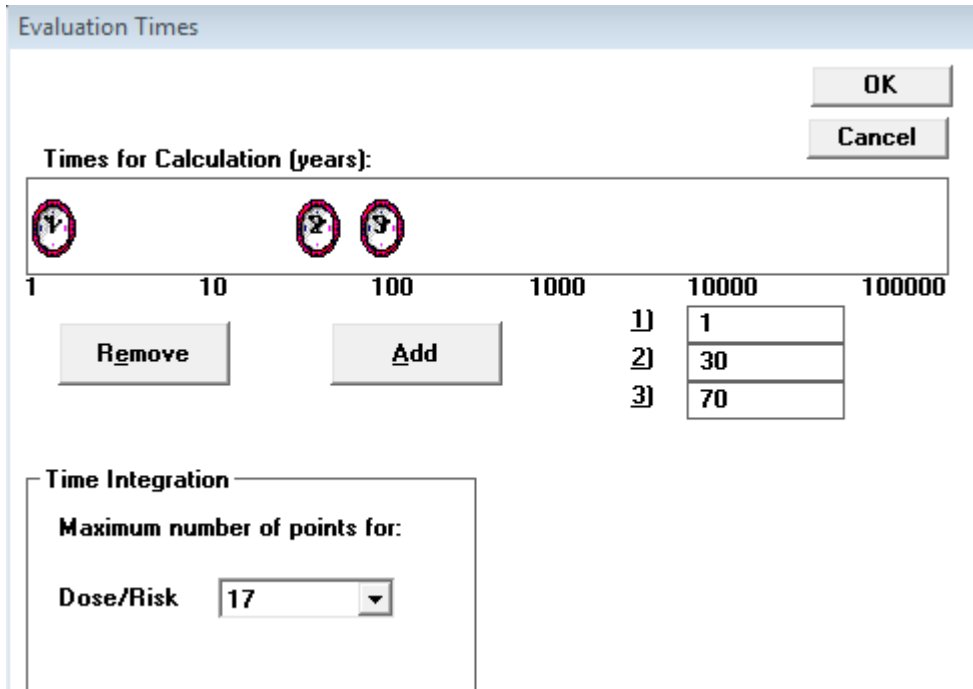


Time Parameters

Exposure Duration (days) 365

Indoor fraction 0.5

Evaluation Times



Evaluation Times

OK

Cancel

Times for Calculation (years):

1 10 100 1000 10000 100000

Remove Add

1) 1

2) 30

3) 70

Time Integration

Maximum number of points for:

Dose/Risk 17

Figura 27. Parametri temporali usati su resrad build

**Indoor fraction:** questo parametro indica la frazione di tempo trascorsa nell'abitazione dai recettori rispetto al parametro "exposure duration". In questo caso, supponiamo che i recettori trascorrono 182,5 ore in un anno dentro l'abitazione, quindi daremo un valore di 0,5.

**Number of times of calculation:** questo parametro permette all'utente di calcolare diversi valori di dose per diversi periodi di esposizione con un'unica run. Possono essere considerati fino a 10 lassi temporali per ogni run del programma. Nel nostro caso calcoleremo la dose dopo un anno, dopo 30 anni e dopo 70 anni di permanenza dei recettori nell'abitazione.

**Time integration:** con questo parametro definiamo i punti di integrazione durante il periodo di esposizione che il codice deve considerare per calcolare la dose.

### 5.3 BUILDING PARAMETERS

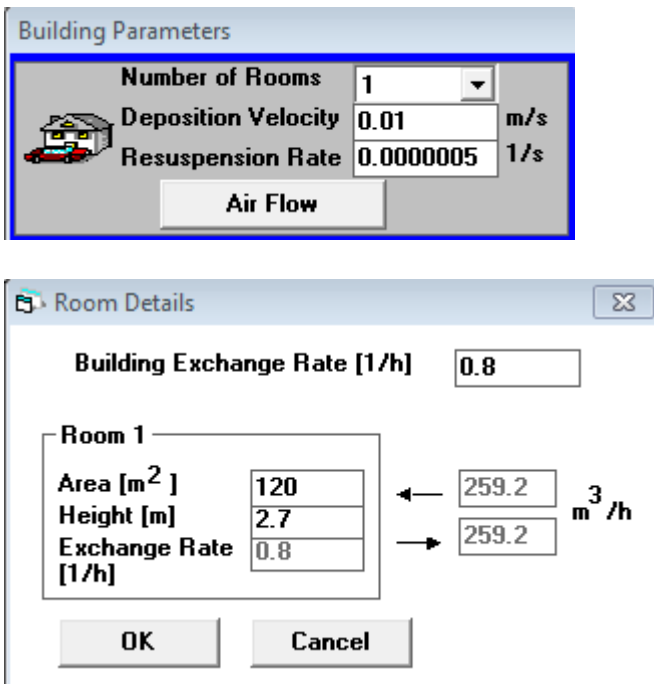


Figura 28. Parametri strutturali usati su resrad build

**Number of rooms:** L’abitazione è modellizzata come una struttura composta di al massimo tre componenti, ognuno dei quali può scambiare aria con l’esterno e col compartimento adiacente.

Nel nostro caso considereremo un solo compartimento da 120 m<sup>2</sup>

**Deposition velocity:** questo parametro definisce la velocità di deposito sulla superficie del compartimento da parte delle particelle nell’aria indoor. La suddetta velocità caratterizza il rateo di deposito delle particelle contenute nell’aria sulla superficie. Il rateo è espresso dalla seguente espressione

$$\lambda_d = \frac{u_d A_d}{V}$$

Dove

$u_d$ = velocità di deposito;

$A_d$ = area della superficie disponibile per il deposito

$V$ =volume dell’aria.

Si assume che la velocità sia pari a 0,01 m/s.

**Resuspension rate:** questo parametro rappresenta il rateo al quale il materiale depositato sulla superficie è risospeso in aria, per unità di tempo. La risospensione delle particelle può portare a esposizione esterna alla radiazione ma anche a esposizione interna tramite inalazione.

Si assume che il rateo sia pari a  $5 \cdot 10^{-7}$

L'equazione di conservazione di massa che regola la concentrazione di particelle in aria è la seguente

$$V \frac{dC_a}{dt} = C_s * A * \lambda_r - C_a * A * u_d + C_a * V * n$$

Dove

$C_a$ = concentrazione del contaminante in aria;

$C_s$ = concentrazione del contaminante sulla superficie;

$\lambda_r$ =rateo di risospensione;

$V$ = volume del compartimento;

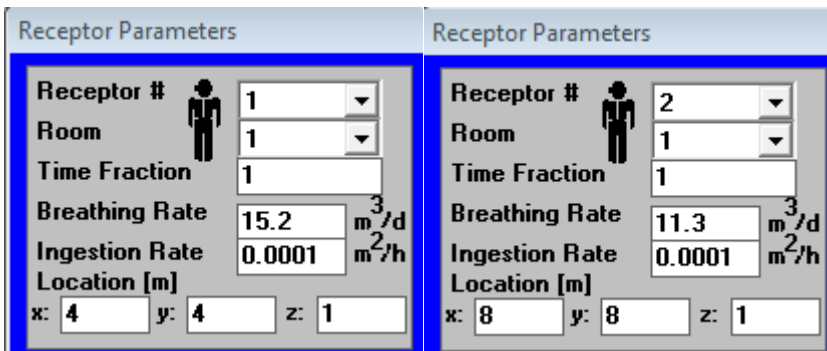
$A$ = area della superficie contaminata;

$u_d$ = velocità di deposito;

$n$ = numero di cambi dell'aria per unità di tempo grazie alla ventilazione.

**Air exchange rate:** questo parametro rappresenta il rateo di ventilazione ed è uguale al volume di aria presente nel compartimento rimpiazzato dall'aria esterna per unità di tempo. Il parametro è calcolato dal codice in base all'area e all'altezza del compartimento

## 5.4 PARAMETRI PER I RICETTORI



Receptor Parameters		Receptor Parameters			
Receptor #	1	Receptor #	2		
Room	1	Room	1		
Time Fraction	1	Time Fraction	1		
Breathing Rate	15.2 m <sup>3</sup> /d	Breathing Rate	11.3 m <sup>3</sup> /d		
Ingestion Rate	0.0001 m <sup>2</sup> /h	Ingestion Rate	0.0001 m <sup>2</sup> /h		
Location [m]		Location [m]			
x: 4	y: 4	z: 1	x: 8	y: 8	z: 1

Figura 28. Parametri sui recettori utilizzati su resrad build

La finestra per i parametri del recettore permette di specificare le caratteristiche dell'esposizione dell'individuo. Possiamo inserire nel codice fino a 10 ricettori e distribuirli a nostro piacimento nei compartimenti. Nel nostro caso supponiamo ci siano due ricettori nel compartimento.

**Receptor location:** con questo parametro specifichiamo le coordinate spaziali in un piano cartesiano occupato dal recettore. Questo parametro è importante solo per valutare l'esposizione esterna ai raggi gamma, tutte le altre vie di esposizione dipendono solo dai parametri che caratterizzano il compartimento. Tipicamente la valutazione della dose viene eseguita considerando come coordinata spaziale z pari ad un metro.

**Receptor time fraction:** questo parametro specifica la frazione di tempo passata dal recettore in un compartimento quando il recettore è presente in casa. Essendoci solo un compartimento il valore è pari a 1.

**Receptor breathing rate:** questo parametro riflette il rateo al quale un individuo inala aria nel compartimento considerato. Di seguito vengono mostrati i parametri stimati dall'EPA per determinate fasce di età.



Population	Mean (m <sup>3</sup> /d)
<i>Long-Term Exposures</i>	
Infants (<1 year)	4.5
Children	
1-2 years	6.8
3-5 years	8.3
6-8 years	10
9-11 years	
Males	14
Females	13
12-14 years	
Males	15
Females	12
15-18 years	
Males	17
Females	12
Adults (19-65+yrs)	
Females	11.3
Males	15.2

Considerando un uomo e una donna di età adulta, i valori saranno di rispettivamente 11,3 m<sup>3</sup>/d e 15,2 m<sup>3</sup>/d.

**Indirect ingestion rate:** questo parametro rappresenta il rateo di ingestione di materiale depositato sulla superficie del compartimento. Il materiale viene ingerito per via orale entrando in contatto con mani, cibo o altri oggetti. Questo parametro è diverso dal “direct ingestion rate” dato che per ingerire del materiale contaminato il recettore non deve per forza trovarsi all’ interno della struttura.

Viene utilizzato il valore di default pari a 0,0001.

## 5.5 PARAMETRI PER LA SORGENTE DI RADIOATTIVITA’

Si assume che l’abitazione sia contaminata con materiali radioattivi situati in determinati punti della struttura. Ogni location contaminata è considerata come una sorgente distinta, quindi il nostro obiettivo sarà piazzare nella location adatta, facendo le dovute assunzioni, ogni sorgente considerata. Il codice ci dà la possibilità di considerare fino a 10 sorgenti per ogni run del programma.

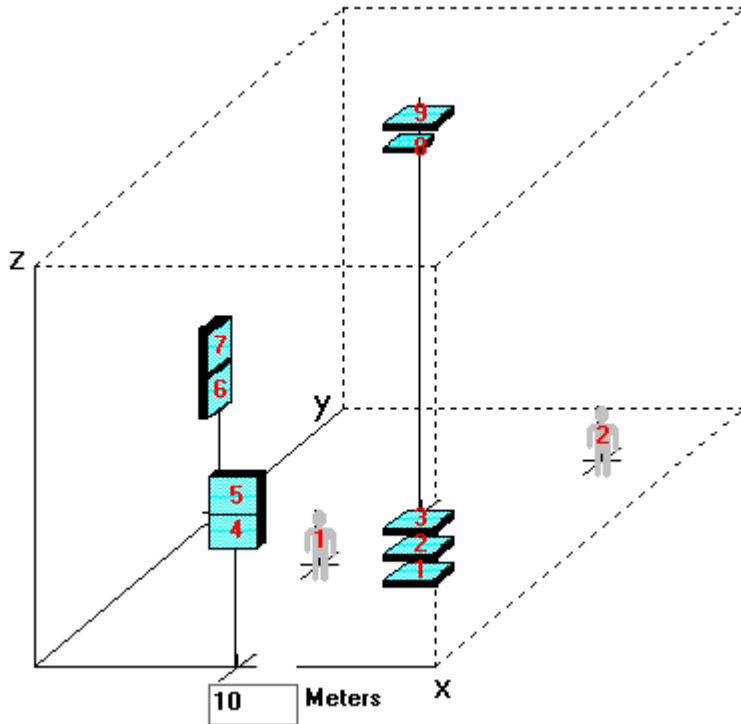


Figura 29. Ubicazione sorgenti e recettori

Source Parameters	Source Parameters	Source Parameters
Source # 1 Room 1 Type/Dir Volume Z Location [m] x: 5 y: 6 z: 0	Source # 2 Room 1 Type/Dir Volume Z Location [m] x: 5 y: 6 z: 0	Source # 3 Room 1 Type/Dir Volume Z Location [m] x: 5 y: 6 z: 0
Source # 4 Room 1 Type/Dir Volume Y Location [m] x: 5 y: 0 z: 1.35	Source # 5 Room 1 Type/Dir Volume Y Location [m] x: 5 y: 0 z: 1.35	
Source # 6 Room 1 Type/Dir Volume X Location [m] x: 0 y: 6 z: 1.35	Source # 7 Room 1 Type/Dir Volume X Location [m] x: 0 y: 6 z: 1.35	

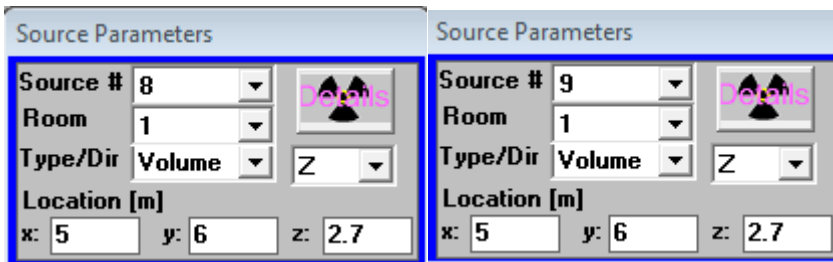
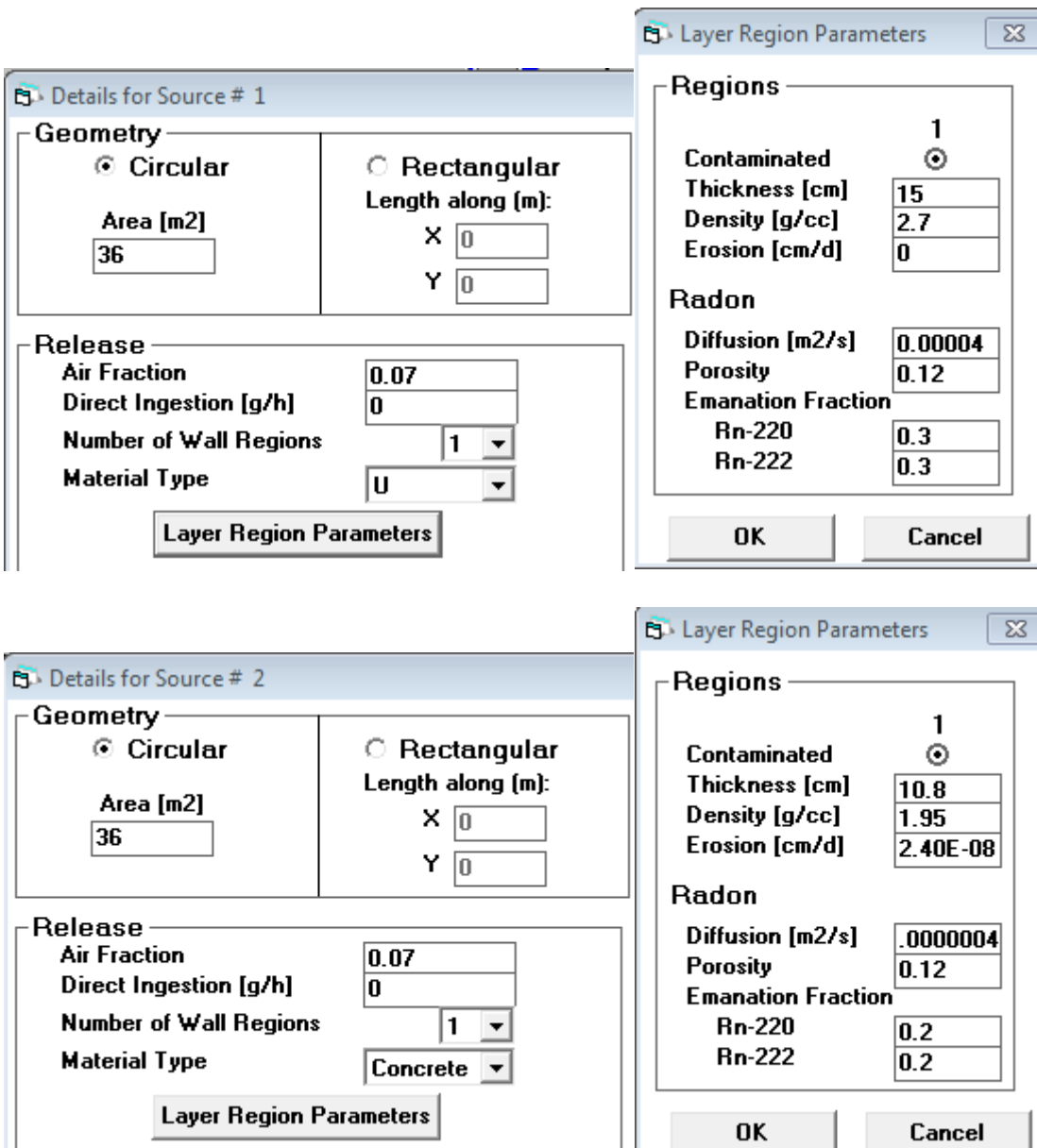


Figura 30. Parametri sulla locazione delle sorgenti di radiazione utilizzati su resrad build



Details for Source # 3

**Geometry**

Circular       Rectangular

Area [m2]  
36

Length along (m):  
X 0  
Y 0

**Release**

Air Fraction: 0.07  
Direct Ingestion [g/h]: 0  
Number of Wall Regions: 1  
Material Type: Concrete

Layer Region Parameters

Layer Region Parameters

**Regions**

1

Contaminated

Thickness [cm]: 10.08  
Density [g/cc]: 1.05  
Erosion [cm/d]: 2.40E-08

**Radon**

Diffusion [m2/s]: .0000004  
Porosity: 0.12  
Emanation Fraction:  
Rn-220: 0.2  
Rn-222: 0.2

OK      Cancel

Details for Source # 3

**Geometry**

Circular       Rectangular

Area [m2]  
36

Length along (m):  
X 0  
Y 0

**Release**

Air Fraction: 0.07  
Direct Ingestion [g/h]: 0  
Number of Wall Regions: 1  
Material Type: Concrete

Layer Region Parameters

Layer Region Parameters

**Regions**

1

Contaminated

Thickness [cm]: 4.76  
Density [g/cc]: 1.95  
Erosion [cm/d]: 0.00E+00

**Radon**

Diffusion [m2/s]: 0.000000  
Porosity: 0.12  
Emanation Fraction:  
Rn-220: 0.2  
Rn-222: 0.2

OK      Cancel

Details for Source # 3

**Geometry**

Circular       Rectangular

Area [m2]  
36

Length along (m):  
X 0  
Y 0

**Release**

Air Fraction: 0.07  
Direct Ingestion [g/h]: 0  
Number of Wall Regions: 1  
Material Type: Concrete

Layer Region Parameters

Layer Region Parameters

**Regions**

1

Contaminated

Thickness [cm]: 4.76  
Density [g/cc]: 1.05  
Erosion [cm/d]: 0

**Radon**

Diffusion [m2/s]: .0000004  
Porosity: 0.12  
Emanation Fraction:  
Rn-220: 0.2  
Rn-222: 0.2

OK      Cancel

Details for Source # 3

**Geometry**

Circular       Rectangular

Area [m2]  
36

Length along (m):  
X 0  
Y 0

**Release**

Air Fraction: 0.07  
Direct Ingestion [g/h]: 0  
Number of Wall Regions: 1  
Material Type: Concrete

Layer Region Parameters

Layer Region Parameters

**Regions**

1

Contaminated

Thickness [cm]: 4.76  
Density [g/cc]: 1.95  
Erosion [cm/d]: 0.00E+00

**Radon**

Diffusion [m2/s]: 0.000000  
Porosity: 0.12  
Emanation Fraction:  
Rn-220: 0.2  
Rn-222: 0.2

OK      Cancel

Details for Source # 3

**Geometry**

Circular       Rectangular

Area [m2]  
36

Length along (m):  
X 0  
Y 0

**Release**

Air Fraction: 0.07  
Direct Ingestion [g/h]: 0  
Number of Wall Regions: 1  
Material Type: Concrete

Layer Region Parameters

Layer Region Parameters

**Regions**

1

Contaminated

Thickness [cm]: 4.76  
Density [g/cc]: 1.05  
Erosion [cm/d]: 0

**Radon**

Diffusion [m2/s]: .0000004  
Porosity: 0.12  
Emanation Fraction:  
Rn-220: 0.2  
Rn-222: 0.2

OK      Cancel

Details for Source # 2

**Geometry**

Circular       Rectangular

Area [m2]  
36

Length along (m):  
X 0  
Y 0

**Release**

Air Fraction: 0.07  
Direct Ingestion [g/h]: 0  
Number of Wall Regions: 1  
Material Type: Concrete

Layer Region Parameters

Layer Region Parameters

**Regions**

1

Contaminated

Thickness [cm]: 10.8  
Density [g/cc]: 1.95  
Erosion [cm/d]: 2.40E-08

**Radon**

Diffusion [m2/s]: .0000004  
Porosity: 0.12  
Emanation Fraction:  
Rn-220: 0.2  
Rn-222: 0.2

OK      Cancel

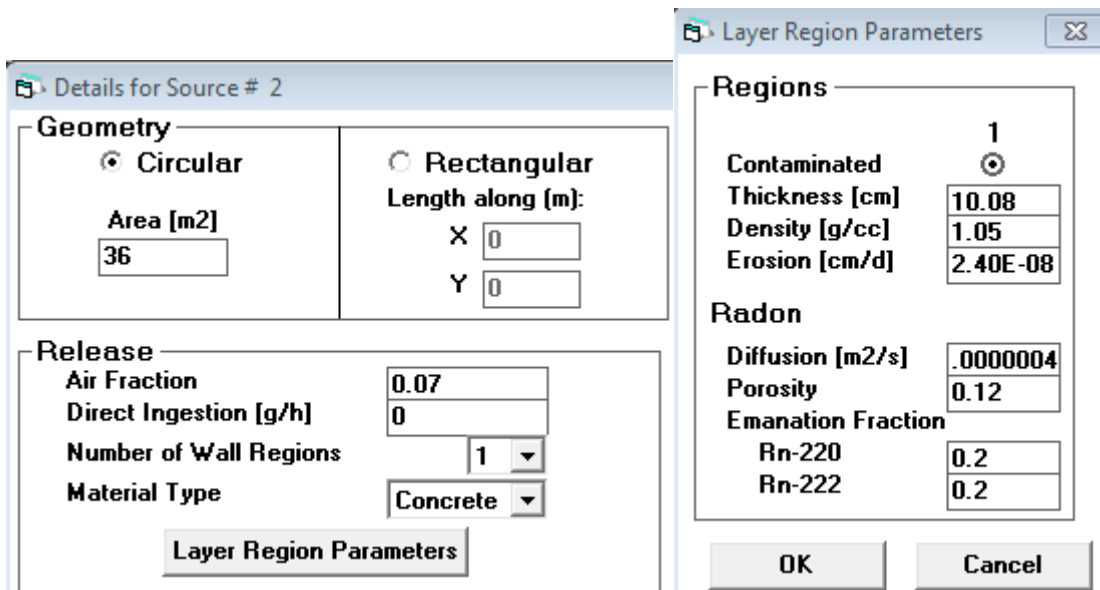


Figura 31. Parametri sulle caratteristiche delle sorgenti di radiazione utilizzati su resrad build

**Source type:** La sorgente può essere definita come un volume, un'area, un segmento o un punto. È a discrezione dell'utente modellizzare in maniera opportuna la sorgente a seconda del caso: se per esempio la distanza tra il recettore e una sorgente identificata come un'area è molto maggiore rispetto alla dimensione più lunga dell'area, allora la sorgente può essere modellizzata come un punto.

Se invece consideriamo la sorgente come un volume o come una superficie, l'area della sorgente è definita come l'area della sorgente a contatto con l'aria ed è assunta dal codice come circolare. L'altro parametro da definire è la direzione della sorgente, inteso come il segmento perpendicolare all'area esposta

**Source direction:** indica la direzione della sorgente in relazione al piano xyz. Per una sorgente lineare, la direzione è definita come l'asse parallela al segmento, per una sorgente superficiale e volumetrica la direzione è definita l'asse normale alla superficie della sorgente.

**Source location:** questo parametro definisce le coordinate del centro della sorgente rispetto al piano cartesiano.

**Source length area:** questo parametro è applicabile per tutti i tipi di sorgente tranne che per le sorgenti puntiformi e serve a specificare l'estensione dell'area contaminata. La contaminazione è

considerata uniforme lungo l'area/segmento che consideriamo. Il valore di default dato dal codice è di 36 m<sup>2</sup>/m.

**Air release fraction:** questo parametro definisce il quantitativo di materiale contaminato rimosso dalla sorgente che poi è rilasciato in aria nel range del particolato respirabile. Il valore può variare da zero, quindi tutto il materiale eroso è rimosso istantaneamente dal compartimento, a 1, quindi tutto il materiale eroso è sospeso istantaneamente in aria.

Nell'handbook DOE sulle particelle sospese in aria e respirabili troviamo i risultati di prove sperimentali atte a determinare il valore di questo parametro. Dopo uno studio statistico si è giunti al risultato di 0,07 come rateo più probabile.

**Direct ingestion rate:** questo parametro si riferisce all'ingestione incidentale di materiale contaminato direttamente dalla sorgente. L'ingestione potrebbe avvenire nel caso di lavori di manutenzione o altre attività che possono far entrare in contatto il recettore e la sorgente. Il rateo di ingestione diretta è settato a zero per la maggiorparte dei calcoli.

**Number of wall regions:** questo parametro si riferisce al numero di layer distinti in una sorgente volumetrica. La sorgente può essere divisa in massimo 5 layers, quest' operazione è utile se solo parte dello spessore del compartimento è contaminato. Nel nostro caso le caratteristiche fisiche della sorgente sono omogenee quindi questo parametro è pari a 1.

**Source region thickness:** questo parametro si riferisce allo spessore dei layer della sorgente. Il valore più probabile emerso da dati sperimentali per lo spessore della sorgente nella matrice in cui è contenuta è pari a 15 cm.

**Source density:** questo parametro si riferisce alla densità media della matrice in cui è contenuta la sorgente, ed è utilizzata dal codice per calcolare la quantità totale di radionuclidi. Nella seguente tabella sono mostrati i valori della densità media del cemento secondo diversi autori.

Aggregate	Concrete Density (g/cm <sup>3</sup> )		
	Shleien (1992)	Neville (1996)	Merritt et al. (1995)
Ordinary (silicacious) or normal weight	2.2–2.4	2.2–2.6	2.3
Heavy weight	- <sup>a</sup>	-	2.4–6.15
Limonite (goethite, hyd. Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2.6–3.7	-	-
Ilmenite (nat. FeTiO <sub>3</sub> )	2.9–3.9	-	-
Magnetite (nat. Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	2.9–4.0	-	-
Limonite and magnetite	-	-	3.35–3.59
Iron (shot, punchings, etc.) or steel	4.0–6.0	-	4.0–4.61
Barite	3.0–3.8	-	3.72
Lightweight	-	0.3–1.85	0.55–1.85
Pumice	-	0.8–1.8	1.45–1.6
Scoria	-	1.0–1.85	1.45–1.75
Expanded clay and shale	-	1.4–1.8	-
Vermiculite	-	0.3–0.8	0.55–1.2
Perlite	-	0.4–1.0	0.8–1.3
Clinker	-	1.1–1.4	-
Cinders without sand	-	-	1.36
Cinders with sand	-	-	1.75–1.85
Shale or clay	-	-	1.45–1.75

Figura 32. Densità dei vari cementi secondo diversi autori

Per i calcoli il codice suggerisce il valore di 3 g/cm<sup>3</sup>.

**Source erosion rate:** questo parametro si riferisce al materiale contaminato rimosso dalla matrice contenente la sorgente per unità di tempo. Questo termine dipende profondamente dalla locazione della sorgente. Se la sorgente si trova nei muri della stanza, il rateo di erosione è molto basso se non sottoposti frequentemente a trattamenti, al contrario del pavimento che entra in contatto coi recettori molto frequentemente. Per questo per le sorgenti localizzate nei muri questo valore è pari a zero mentre per la sorgente localizzata nel pavimento utilizziamo il valore di default del programma di  $2,4 \cdot 10^{-8}$ .

**Source porosity:** questo parametro si riferisce al rateo tra il volume dei pori e il volume totale della sorgente. è usato per calcolare la diffusione del radon da una sorgente volumetrica quindi è selezionabile solo se tra i radionuclidi scelti sono presenti i suoi precursori.

Nel nostro caso i precursori scelti sono: uranio 238 e radio 226 per quanto riguarda il radon 222, torio 232 per quanto riguarda il radon 220.



La porosità stimata per il cemento portland varia da 0,04 a 0,20, nel nostro caso viene scelto il valore medio di 0,12.

**Radon effective diffusion coefficient:** questo parametro si riferisce alla diffusività del radon nell'aria. La diffusione può essere descritta dalla legge di Fick, che stabilisce che la densità del flusso del gas è linearmente proporzionale al gradiente di concentrazione. Il reale valore del coefficiente di diffusione varia in un range molto elevato, a seconda del mezzo di diffusione. Il massimo valore attribuibile è pari al coefficiente di diffusione in aria, ovvero  $1,1 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s, mentre se al contrario è poco permeabile il valore può raggiungere un minimo di  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. per il cemento consideriamo un valore di  $4 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s e di  $4 \cdot 10^{-5}$  per il terreno.

**Radon emanation factor:** questo parametro si riferisce alla frazione di radon prodotto che viene emanata dalla matrice del materiale contaminato e si inserisce nei pori del mezzo. È di fondamentale importanza per quanto riguarda l'esposizione a radon tramite inalazione.

Il valore varia a seconda della porosità totale e del contenuto di acqua del mezzo. Maggiore è la porosità maggiore è la probabilità di fuoriuscita del radon dal suolo. Questo valore può assumere valori con un minimo di 0,12 ed un massimo di 0,3. In questo lavoro abbiamo scelto il valore di 0,2 per quanto riguarda il cemento e il valore di 0,3 per quanto riguarda il suolo.

## 5.6 PARAMETRI PER I MATERIALI DI SHIELDING

		Source #								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Receptor #	1	7.92	7.92	7.92	3.74	3.74	3.74	3.74	7.92	7.92
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
		Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete
Receptor #	2	7.92	7.92	7.92	3.74	3.74	3.74	3.74	7.92	7.92
	3	2.4	3	3	3	3	3	3	3	3
		Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete

Figura 33. Parametri di shielding del cemento utilizzati su resrad build

**Shielding thickness:** questo parametro si riferisce all'effettiva spessore del materiale di shielding tra la sorgente e il recettore. Questo parametro è importante solo per l'esposizione diretta alle radiazioni, per situazioni nel quale è presente solo aria tra la sorgente e il recettore il valore assunto

è pari a zero. Lo spessore del pavimento e dei muri dipende dal tipo di struttura e dalle tecniche di costruzione, in questo lavoro assumiamo uno spessore di shielding pari a 12 cm.

**Shielding density:** questo parametro si riferisce alla densità media del materiale di shielding tra il recettore e la sorgente. questo parametro è importante solo per l'esposizione diretta alle radiazioni, per situazioni nel quale è presente solo aria tra la sorgente e il recettore il valore assunto è pari a zero.

Nel codice l'utente deve inserire caratteristiche dello shielding per ogni coppia ricettore sorgente, in questo caso quindi dovremo inserire 12 valori. Considerando il cemento come materiale di shielding, inseriremo una densità media di 3 g/cm<sup>3</sup>.

## 6 RISULTATI

Studieremo diversi casi di dose assorbita dai recettori, variando i parametri precedentemente citati e in particolar modo l'air exchange rate.

Considereremo quattro valori per questo parametro, ciascuno rappresentante una diversa stagione dell'anno:

- 0,55 [1/h] per l'autunno;
- 0,41 [1/h] per l'inverno;
- 0,65 [1/h] per la primavera;
- 1,5 [1/h] per l'estate.

I precedenti valori sono stati ricavati empiricamente da Murray e Burnmaster e rappresentano una media tra i valori trovati per 2844 abitazioni negli Stati Uniti.

Di seguito verranno presentati i risultati ottenuti con RESRAD BUILD:

### 6.1 PRIMO CASO: STAGIONE AUTUNNALE

I seguenti risultati si riferiscono al primo anno di occupazione dell'abitazione da parte dei residenti e considerando un valore per l'air exchange rate pari a 0,55. Oltre ai valori totali di dose, è stata ricavata la distribuzione di dose a seconda della via di esposizione, e la dose causata dai principali nuclidi.

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	1.35E-01	6.12E-02	1.34E-01	3.14E-02	6.49E-02	2.95E-02	6.12E-02	5.16E-02	1.18E-01	6.87E-01
Receptor 2	1.15E-01	4.73E-02	9.07E-02	1.75E-02	3.90E-02	1.80E-02	3.98E-02	3.83E-02	8.99E-02	4.96E-01
Total	2.50E-01	1.09E-01	2.24E-01	4.90E-02	1.04E-01	4.74E-02	1.01E-01	8.99E-02	2.08E-01	1.18E+00

Figura 34. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, stagione autunnale

Pathway Detail of Doses

[mSv]

Source: 1							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	3.34E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.02E-01	0.00E+00	
2	1.35E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.02E-01	0.00E+00	
Total	4.69E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.03E-01	0.00E+00	

Source: 2							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	3.53E-02	1.40E-08	1.09E-10	4.82E-05	2.59E-02	4.50E-07	
2	2.14E-02	1.40E-08	1.09E-10	3.58E-05	2.59E-02	4.50E-07	
Total	5.67E-02	2.79E-08	2.19E-10	8.40E-05	5.18E-02	9.00E-07	

Source: 3							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	7.43E-02	2.41E-08	1.87E-10	4.37E-05	5.93E-02	6.65E-07	
2	3.13E-02	2.41E-08	1.87E-10	3.25E-05	5.93E-02	6.65E-07	
Total	1.06E-01	4.82E-08	3.74E-10	7.63E-05	1.19E-01	1.33E-06	

Source: 4							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	1.95E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.19E-02	0.00E+00	
2	5.65E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.19E-02	0.00E+00	
Total	2.52E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.38E-02	0.00E+00	

Source: 5							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	3.64E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.85E-02	0.00E+00	
2	1.05E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.85E-02	0.00E+00	
Total	4.70E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.69E-02	0.00E+00	

Source: 6							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	1.76E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.19E-02	0.00E+00	
2	6.08E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.19E-02	0.00E+00	
Total	2.36E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.38E-02	0.00E+00	

Source: 7						
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion
1	3.27E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.85E-02	0.00E+00
2	1.13E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.85E-02	0.00E+00
Total	4.40E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.69E-02	0.00E+00

Source: 8						
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion
1	2.74E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.42E-02	0.00E+00
2	1.40E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.42E-02	0.00E+00
Total	4.14E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.85E-02	0.00E+00

Source: 9						
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion
1	5.89E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.93E-02	0.00E+00
2	3.06E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.93E-02	0.00E+00
Total	8.95E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.19E-01	0.00E+00

Figura 35. Distribuzione del valore di dose a seconda della via d'esposizione, stagione autunnale.

Dose [mSv]	Recettore uomo	Recettore donna
External	3,355E-1	1,95E-1
Deposition	5,81E-8	5,81E-8
Immersion	2,96E-10	2,96E-10
Inhalation	9,19E-5	6,83E-5
Radon	3,315E-1	3,315E-1
Ingestion	1,1E-6	1,1E-6

Tabella 16. Distribuzione del valore di dose a seconda della via d'esposizione, stagione autunnale.

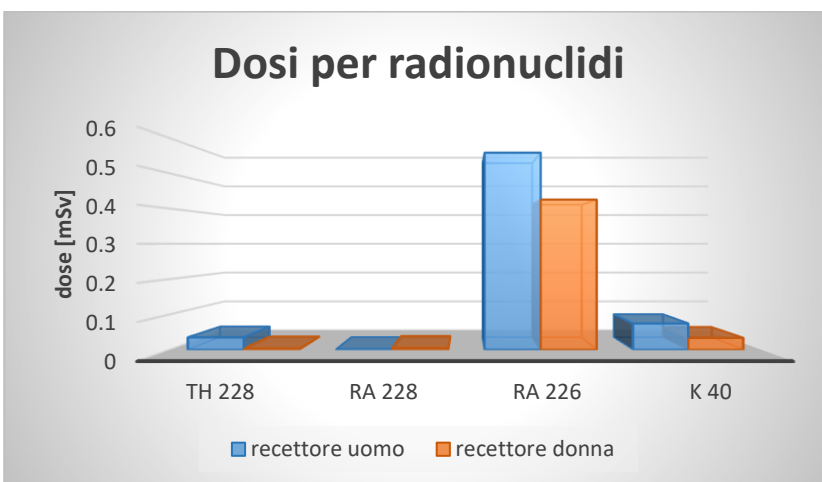


Grafico 1. Dose ricevuta causa decadimento dei principali radionuclidi, stagione autunnale

## 6.2 SECONDO CASO: STAGIONE INVERNALE

I seguenti risultati si riferiscono al primo anno di occupazione dell'abitazione da parte dei residenti e considerando un valore per l'air exchange rate pari a 0,41. Oltre ai valori totali di dose, è stata ricavata la distribuzione di dose a seconda della via di esposizione, e la dose causata dai principali nuclidi.

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	1.47E-01	6.50E-02	1.42E-01	3.31E-02	6.90E-02	3.11E-02	6.53E-02	5.51E-02	1.27E-01	7.35E-01
Receptor 2	1.27E-01	5.11E-02	9.93E-02	1.92E-02	4.31E-02	1.96E-02	4.39E-02	4.17E-02	9.85E-02	5.43E-01
Total	2.74E-01	1.16E-01	2.42E-01	5.23E-02	1.12E-01	5.07E-02	1.09E-01	9.68E-02	2.25E-01	1.28E+00

Figura 36. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, stagione invernale

Source: 1							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	3.34E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.13E-01	0.00E+00	
2	1.35E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.13E-01	0.00E+00	
Total	4.69E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.27E-01	0.00E+00	
Source: 2							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	3.53E-02	1.60E-08	1.25E-10	5.52E-05	2.96E-02	5.15E-07	
2	2.14E-02	1.60E-08	1.25E-10	4.11E-05	2.96E-02	5.15E-07	
Total	5.67E-02	3.20E-08	2.50E-10	9.63E-05	5.92E-02	1.03E-06	
Source: 3							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	7.43E-02	2.76E-08	2.14E-10	5.01E-05	6.80E-02	7.61E-07	
2	3.13E-02	2.76E-08	2.14E-10	3.73E-05	6.80E-02	7.61E-07	
Total	1.06E-01	5.53E-08	4.28E-10	8.74E-05	1.36E-01	1.52E-06	
Source: 4							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	1.95E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.35E-02	0.00E+00	
2	5.65E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.35E-02	0.00E+00	
Total	2.52E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.71E-02	0.00E+00	
Source: 5							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	3.64E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.26E-02	0.00E+00	
2	1.05E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.26E-02	0.00E+00	
Total	4.70E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.51E-02	0.00E+00	
Source: 6							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	1.76E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.35E-02	0.00E+00	
2	6.08E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.35E-02	0.00E+00	
Total	2.36E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.71E-02	0.00E+00	

Source: 7

Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion
1	3.27E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.26E-02	0.00E+00
2	1.13E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.26E-02	0.00E+00
Total	4.40E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.51E-02	0.00E+00

Source: 8

Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion
1	2.74E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.77E-02	0.00E+00
2	1.40E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.77E-02	0.00E+00
Total	4.14E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.54E-02	0.00E+00

Source: 9

Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion
1	5.89E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.80E-02	0.00E+00
2	3.06E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.80E-02	0.00E+00
Total	8.95E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.36E-01	0.00E+00

Figura 37. Distribuzione del valore di dose a seconda della via d'esposizione, stagione invernale.

Dose [mSv]	Recettore uomo	Recettore donna
External	3,355E-1	1,952E-1
Deposition	4,36E-8	4,36E-8
Immersion	3,79E-10	3,79E-10
Inhalation	1,053E-4	7,84E-5
Radon	3,985E-1	3,985E-1
Ingestion	1,276E-6	1,276E-6

Tabella 17. Distribuzione del valore di dose a seconda della via d'esposizione, stagione invernale.

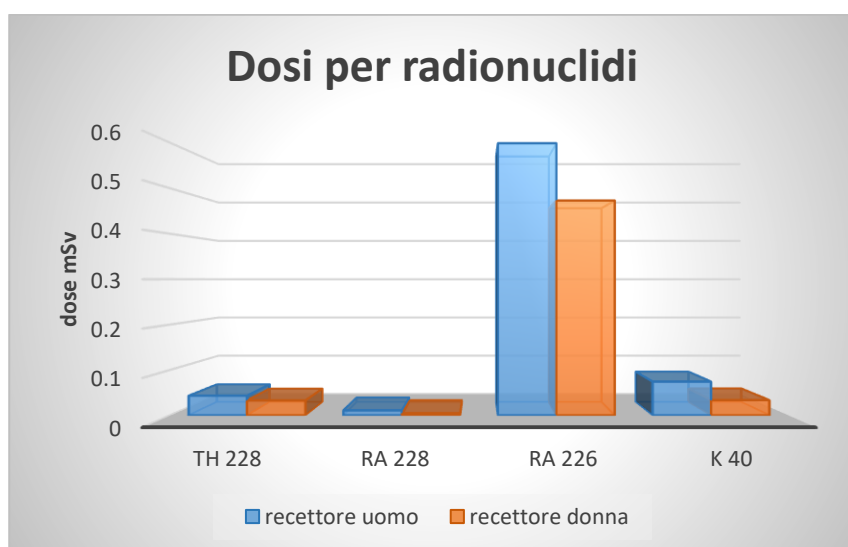


Grafico 2. Dose ricevuta causa decadimento dei principali radionuclidi, stagione primaverile.

### 6.3 TERZO CASO: STAGIONE PRIMAVERILE

I seguenti risultati si riferiscono al primo anno di occupazione dell'abitazione da parte dei residenti e considerando un valore per l'air exchange rate pari a 0,65. Oltre ai valori totali di dose, è stata ricavata la distribuzione di dose a seconda della via di esposizione, e la dose causata dai principali nuclidi.

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	1.21E-01	5.68E-02	1.23E-01	2.95E-02	6.00E-02	2.75E-02	5.63E-02	4.75E-02	1.08E-01	6.30E-01
Receptor 2	1.01E-01	4.29E-02	8.02E-02	1.56E-02	3.40E-02	1.60E-02	3.48E-02	3.41E-02	7.95E-02	4.38E-01
Total	2.22E-01	9.96E-02	2.03E-01	4.50E-02	9.40E-02	4.35E-02	9.11E-02	8.16E-02	1.87E-01	1.07E+00

Figura 38. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, stagione primaverile.

Source: 1							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	3.34E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.77E-02	0.00E+00	
2	1.35E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.77E-02	0.00E+00	
Total	4.69E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.75E-01	0.00E+00	

Source: 2							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	3.53E-02	1.15E-08	9.04E-11	3.98E-05	2.14E-02	3.72E-07	
2	2.14E-02	1.15E-08	9.04E-11	2.96E-05	2.14E-02	3.72E-07	
Total	5.67E-02	2.31E-08	1.81E-10	6.93E-05	4.28E-02	7.43E-07	

Source: 3							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	7.43E-02	1.99E-08	1.54E-10	3.61E-05	4.89E-02	5.49E-07	
2	3.13E-02	1.99E-08	1.54E-10	2.68E-05	4.89E-02	5.49E-07	
Total	1.06E-01	3.98E-08	3.09E-10	6.29E-05	9.78E-02	1.10E-06	

Source: 4							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	1.95E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.92E-03	0.00E+00	
2	5.65E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.92E-03	0.00E+00	
Total	2.52E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.98E-02	0.00E+00	

Source: 5							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	3.64E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.35E-02	0.00E+00	
2	1.05E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.35E-02	0.00E+00	
Total	4.70E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.71E-02	0.00E+00	

Source: 6							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	1.76E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.92E-03	0.00E+00	
2	6.08E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.92E-03	0.00E+00	
Total	2.36E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.98E-02	0.00E+00	



Source: 7							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	3.27E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.35E-02	0.00E+00	
2	1.13E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.35E-02	0.00E+00	
Total	4.40E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.71E-02	0.00E+00	

Source: 8							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	2.74E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.01E-02	0.00E+00	
2	1.40E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.01E-02	0.00E+00	
Total	4.14E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.01E-02	0.00E+00	

Source: 9							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	5.89E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.89E-02	0.00E+00	
2	3.06E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.89E-02	0.00E+00	
Total	8.95E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.78E-02	0.00E+00	

Figura 39. Distribuzione del valore di dose a seconda della via d'esposizione, stagione primaverile.

Dose [mSv]	Recettore uomo	Recettore donna
External	3,355E-1	1,952E-1
Deposition	3,14E-8	3,14E-8
Immersion	2,44E-10	2,44E-10
Inhalation	7,59E-5	5,64E-5
Radon	3,139E-1	3,139E-1
Ingestion	9,21E-7	9,21E-7

Tabella 18. Distribuzione del valore di dose a seconda della via d'esposizione, stagione autunnale.

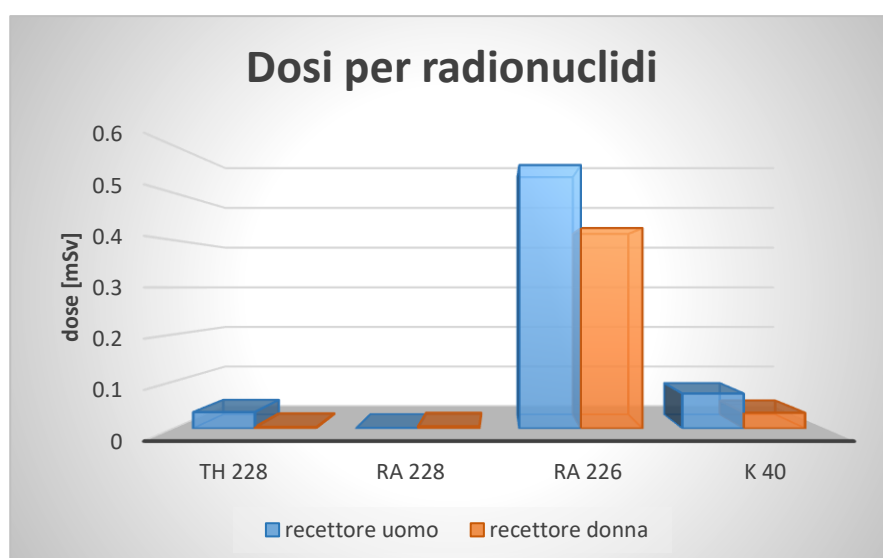


Grafico 3. Dose ricevuta causa decadimento dei principali radionuclidi, stagione invernale.

## 6.4 QUARTO CASO: STAGIONE ESTIVA

I seguenti risultati si riferiscono al primo anno di occupazione dell'abitazione da parte dei residenti e considerando un valore per l'air exchange rate pari a 1,5. Oltre ai valori totali di dose, è stata ricavata la distribuzione di dose a seconda della via di esposizione, e la dose causata dai principali nuclidi.

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	7.80E-02	4.34E-02	9.21E-02	2.35E-02	4.52E-02	2.15E-02	4.15E-02	3.50E-02	7.68E-02	4.57E-01
Receptor 2	5.80E-02	2.95E-02	4.92E-02	9.63E-03	1.93E-02	1.01E-02	2.01E-02	2.16E-02	4.84E-02	2.66E-01
Total	1.36E-01	7.29E-02	1.41E-01	3.31E-02	6.45E-02	3.16E-02	6.16E-02	5.66E-02	1.25E-01	7.23E-01

Figura 40. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, stagione autunnale

Source: 1							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	3.34E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.45E-02	0.00E+00	
2	1.35E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.45E-02	0.00E+00	
Total	4.69E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.90E-02	0.00E+00	
Source: 2							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	3.53E-02	4.33E-09	3.39E-11	1.48E-05	8.09E-03	1.39E-07	
2	2.14E-02	4.33E-09	3.39E-11	1.10E-05	8.09E-03	1.39E-07	
Total	5.67E-02	8.66E-09	6.78E-11	2.59E-05	1.62E-02	2.79E-07	
Source: 3							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	7.43E-02	7.45E-09	5.77E-11	1.35E-05	1.78E-02	2.06E-07	
2	3.13E-02	7.45E-09	5.77E-11	1.00E-05	1.78E-02	2.06E-07	
Total	1.06E-01	1.49E-08	1.15E-10	2.35E-05	3.57E-02	4.12E-07	
Source: 4							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	1.95E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.98E-03	0.00E+00	
2	5.65E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.98E-03	0.00E+00	
Total	2.52E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.96E-03	0.00E+00	
Source: 5							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	3.64E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.80E-03	0.00E+00	
2	1.05E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.80E-03	0.00E+00	
Total	4.70E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.76E-02	0.00E+00	
Source: 6							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	1.76E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.98E-03	0.00E+00	
2	6.08E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.98E-03	0.00E+00	
Total	2.36E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.96E-03	0.00E+00	

Source: 7							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	3.27E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.80E-03	0.00E+00	
2	1.13E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.80E-03	0.00E+00	
Total	4.40E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.76E-02	0.00E+00	

Source: 8							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	2.74E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.60E-03	0.00E+00	
2	1.40E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.60E-03	0.00E+00	
Total	4.14E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.52E-02	0.00E+00	

Source: 9							
Receptor	External	Deposition	Immersion	Inhalation	Radon	Ingestion	
1	5.89E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.78E-02	0.00E+00	
2	3.06E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.78E-02	0.00E+00	
Total	8.95E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.57E-02	0.00E+00	

Figura 41. Distribuzione del valore di dose a seconda della via d'esposizione, stagione estiva.

Dose [mSv]	Recettore uomo	Recettore donna
External	3,355E-1	1,952E-1
Deposition	3,14E-8	3,14E-8
Immersion	2,44E-10	2,44E-10
Inhalation	7,59E-5	5,64E-5
Radon	3,139E-1	3,139E-1
Ingestion	9,21E-7	9,21E-7

Tabella 20. Distribuzione del valore di dose a seconda della via d'esposizione, stagione estiva.

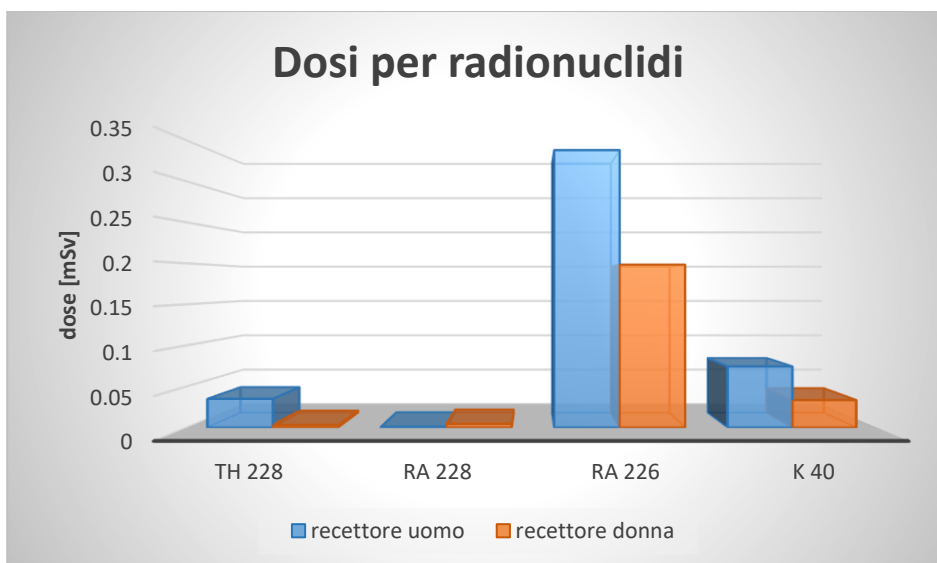


Grafico 4. Dose ricevuta causa decadimento dei principali radionuclidi, stagione estiva

## 6.5 EVOLUZIONE TEMPORALE DELLA DOSE TOTALE

In questo paragrafo verrà valutato l'andamento temporale della dose totale assorbita dai recettori nel corso degli anni, considerando un air exchange medio di 0,8. Supporremo che i recettori trascorrano 30 anni nell'abitazione, e considereremo tutti i parametri costanti nel tempo

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	1.02E-01	5.07E-02	1.09E-01	2.68E-02	5.33E-02	2.48E-02	4.95E-02	4.18E-02	9.36E-02	5.51E-01
Receptor 2	8.19E-02	3.68E-02	6.61E-02	1.29E-02	2.73E-02	1.33E-02	2.81E-02	2.84E-02	6.53E-02	3.60E-01
Total	1.84E-01	8.75E-02	1.75E-01	3.96E-02	8.06E-02	3.81E-02	7.76E-02	7.02E-02	1.59E-01	9.11E-01

Figura 42. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, anno 1.

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	2.66E-01	6.33E-02	1.23E-01	3.59E-02	6.23E-02	3.35E-02	5.82E-02	5.28E-02	1.06E-01	8.01E-01
Receptor 2	2.39E-01	4.67E-02	7.56E-02	1.93E-02	3.37E-02	1.98E-02	3.45E-02	3.68E-02	7.48E-02	5.80E-01
Total	5.05E-01	1.10E-01	1.99E-01	5.51E-02	9.60E-02	5.33E-02	9.27E-02	8.96E-02	1.81E-01	1.38E+00

Figura 43. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, anno 5.

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	4.49E-01	7.56E-02	1.36E-01	4.52E-02	7.08E-02	4.24E-02	6.64E-02	6.36E-02	1.17E-01	1.07E+00
Receptor 2	4.15E-01	5.65E-02	8.39E-02	2.60E-02	3.98E-02	2.66E-02	4.07E-02	4.52E-02	8.29E-02	8.16E-01
Total	8.64E-01	1.32E-01	2.20E-01	7.12E-02	1.11E-01	6.90E-02	1.07E-01	1.09E-01	2.00E-01	1.88E+00

Figura 44. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, anno 10.

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	5.63E-01	8.32E-02	1.43E-01	5.09E-02	7.61E-02	4.79E-02	7.14E-02	7.02E-02	1.24E-01	1.23E+00
Receptor 2	5.24E-01	6.24E-02	8.89E-02	3.01E-02	4.35E-02	3.08E-02	4.45E-02	5.03E-02	8.79E-02	9.62E-01
Total	1.09E+00	1.46E-01	2.32E-01	8.10E-02	1.20E-01	7.87E-02	1.16E-01	1.20E-01	2.12E-01	2.19E+00

Figura 45. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, stagione anno 15

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	6.27E-01	8.74E-02	1.47E-01	5.41E-02	7.90E-02	5.10E-02	7.42E-02	7.39E-02	1.27E-01	1.32E+00
Receptor 2	5.86E-01	6.57E-02	9.17E-02	3.25E-02	4.56E-02	3.32E-02	4.66E-02	5.31E-02	9.06E-02	1.04E+00
Total	1.21E+00	1.53E-01	2.39E-01	8.65E-02	1.25E-01	8.41E-02	1.21E-01	1.27E-01	2.18E-01	2.37E+00

Figura 46. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, anno 20

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	6.62E-01	8.97E-02	1.50E-01	5.58E-02	8.05E-02	5.27E-02	7.57E-02	7.60E-02	1.29E-01	1.37E+00
Receptor 2	6.20E-01	6.76E-02	9.32E-02	3.38E-02	4.67E-02	3.45E-02	4.77E-02	5.47E-02	9.21E-02	1.09E+00
Total	1.28E+00	1.57E-01	2.43E-01	8.96E-02	1.27E-01	8.71E-02	1.23E-01	1.31E-01	2.21E-01	2.46E+00

Figura 47. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, anno 25

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	6.82E-01	9.09E-02	1.51E-01	5.67E-02	8.13E-02	5.36E-02	7.65E-02	7.70E-02	1.30E-01	1.40E+00
Receptor 2	6.38E-01	6.85E-02	9.39E-02	3.45E-02	4.73E-02	3.52E-02	4.83E-02	5.55E-02	9.28E-02	1.11E+00
Total	1.32E+00	1.59E-01	2.45E-01	9.12E-02	1.29E-01	8.87E-02	1.25E-01	1.33E-01	2.23E-01	2.51E+00

Figura 48. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, anno 30

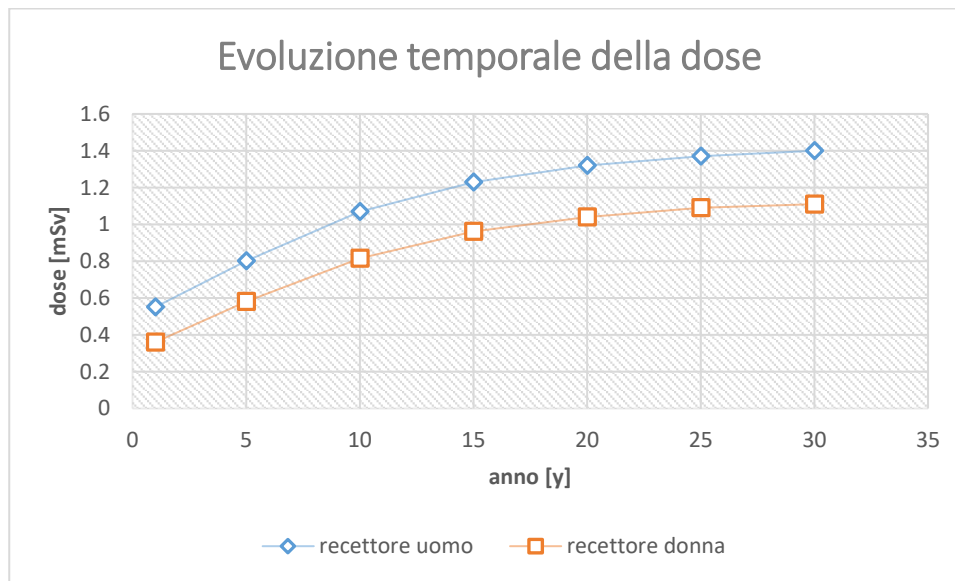


Grafico 5. Evoluzione temporale della dose

## 6.6 DIPENDENZA DELLA DOSE DAL COEFFICIENTE DI AIR EXCHANGE RATE

Come mostrato dal precedente grafico, la dose dopo il decimo anno di permanenza supera il valore di accettabilità stabilito da Euratom di 1 mSv. In questo capitolo valuteremo l'air exchange rate minimo affinché questo limite venga rispettato. Considereremo la dose assorbita al trentesimo anno di permanenza in quanto in questo caso troviamo il valore massimo di dose.

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	5.67E+00	5.41E+05	4.86E+05	7.63E-01	1.84E+00	7.60E-01	1.84E+00	1.57E+00	3.85E+00	1.03E+06
Receptor 2	5.62E+00	4.03E+05	3.62E+05	7.40E-01	1.81E+00	7.41E-01	1.81E+00	1.54E+00	3.81E+00	7.65E+05
Total	1.13E+01	9.45E+05	8.48E+05	1.50E+00	3.65E+00	1.50E+00	3.65E+00	3.11E+00	7.66E+00	1.79E+06

Figura 49. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, air exchange rate pari a 0.

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	7.21E-01	9.95E-02	1.70E-01	6.08E-02	9.07E-02	5.76E-02	8.58E-02	8.50E-02	1.50E-01	1.52E+00
Receptor 2	6.77E-01	7.71E-02	1.13E-01	3.85E-02	5.67E-02	3.92E-02	5.77E-02	6.36E-02	1.12E-01	1.24E+00
Total	1.40E+00	1.77E-01	2.83E-01	9.93E-02	1.47E-01	9.68E-02	1.44E-01	1.49E-01	2.62E-01	2.75E+00

Figura 50. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, air exchange rate pari a 0,5.

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	6.77E-01	9.00E-02	1.49E-01	5.63E-02	8.04E-02	5.31E-02	7.55E-02	7.62E-02	1.28E-01	1.39E+00
Receptor 2	6.34E-01	6.77E-02	9.21E-02	3.40E-02	4.64E-02	3.47E-02	4.74E-02	5.47E-02	9.10E-02	1.10E+00
Total	1.31E+00	1.58E-01	2.41E-01	9.04E-02	1.27E-01	8.79E-02	1.23E-01	1.31E-01	2.19E-01	2.49E+00

Figura 51. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, air exchange rate pari a 1,5.

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	6.22E-01	8.19E-02	1.32E-01	5.21E-02	7.17E-02	4.89E-02	6.68E-02	6.86E-02	1.11E-01	1.25E+00
Receptor 2	5.79E-01	5.96E-02	7.48E-02	2.98E-02	3.77E-02	3.05E-02	3.87E-02	4.71E-02	7.37E-02	9.71E-01
Total	1.20E+00	1.42E-01	2.06E-01	8.20E-02	1.09E-01	7.95E-02	1.06E-01	1.16E-01	1.85E-01	2.23E+00

Figura 52. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, air exchange rate pari a 2.

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	5.94E-01	7.92E-02	1.26E-01	5.05E-02	6.88E-02	4.73E-02	6.40E-02	6.60E-02	1.06E-01	1.20E+00
Receptor 2	5.50E-01	5.69E-02	6.95E-02	2.82E-02	3.48E-02	2.89E-02	3.58E-02	4.45E-02	6.84E-02	9.18E-01
Total	1.14E+00	1.36E-01	1.96E-01	7.87E-02	1.04E-01	7.63E-02	9.98E-02	1.11E-01	1.74E-01	2.12E+00

Figura 53. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, air exchange rate pari a 2,5.

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	5.70E-01	7.73E-02	1.23E-01	4.93E-02	6.69E-02	4.61E-02	6.20E-02	6.42E-02	1.02E-01	1.16E+00
Receptor 2	5.26E-01	5.50E-02	6.61E-02	2.70E-02	3.29E-02	2.77E-02	3.39E-02	4.27E-02	6.50E-02	8.77E-01
Total	1.10E+00	1.32E-01	1.89E-01	7.63E-02	9.98E-02	7.38E-02	9.59E-02	1.07E-01	1.67E-01	2.04E+00

Figura 54. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, air exchange rate pari a 3.

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	5.48E-01	7.59E-02	1.20E-01	4.83E-02	6.54E-02	4.51E-02	6.06E-02	6.28E-02	9.99E-02	1.13E+00
Receptor 2	5.05E-01	5.36E-02	6.37E-02	2.60E-02	3.14E-02	2.67E-02	3.25E-02	4.13E-02	6.26E-02	8.42E-01
Total	1.05E+00	1.29E-01	1.84E-01	7.44E-02	9.69E-02	7.19E-02	9.30E-02	1.04E-01	1.62E-01	1.97E+00

Figura 55. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, air exchange rate pari a 3,5.

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	5.10E-01	7.38E-02	1.17E-01	4.67E-02	6.33E-02	4.35E-02	5.85E-02	6.08E-02	9.66E-02	1.07E+00
Receptor 2	4.67E-01	5.14E-02	6.03E-02	2.44E-02	2.93E-02	2.51E-02	3.03E-02	3.93E-02	5.93E-02	7.86E-01
Total	9.77E-01	1.25E-01	1.77E-01	7.12E-02	9.27E-02	6.87E-02	8.88E-02	1.00E-01	1.56E-01	1.86E+00

Figura 56. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, air exchange rate pari a 4.

Source Contributions to Receptor Doses										
[mSv]										
	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor 1	4.78E-01	7.22E-02	1.15E-01	4.55E-02	6.18E-02	4.23E-02	5.69E-02	5.92E-02	9.43E-02	1.02E+00
Receptor 2	4.34E-01	4.98E-02	5.81E-02	2.32E-02	2.78E-02	2.39E-02	2.88E-02	3.77E-02	5.70E-02	7.41E-01
Total	9.12E-01	1.22E-01	1.73E-01	6.86E-02	8.95E-02	6.61E-02	8.57E-02	9.69E-02	1.51E-01	1.77E+00

Figura 57. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, air exchange rate pari a 4,5.

Source Contributions to Receptor Doses

		[mSv]									
		Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Source 6	Source 7	Source 8	Source 9	Total
Receptor	1	4.63E-01	7.15E-02	1.14E-01	4.49E-02	6.11E-02	4.17E-02	5.63E-02	5.86E-02	9.34E-02	1.00E+00
Receptor	2	4.20E-01	4.91E-02	5.72E-02	2.26E-02	2.71E-02	2.33E-02	2.81E-02	3.71E-02	5.61E-02	7.21E-01
Total		8.83E-01	1.21E-01	1.71E-01	6.75E-02	8.82E-02	6.50E-02	8.44E-02	9.56E-02	1.50E-01	1.73E+00

Figura 58. Valori totali di dose per entrambi i ricettori, air exchange rate pari a 5.

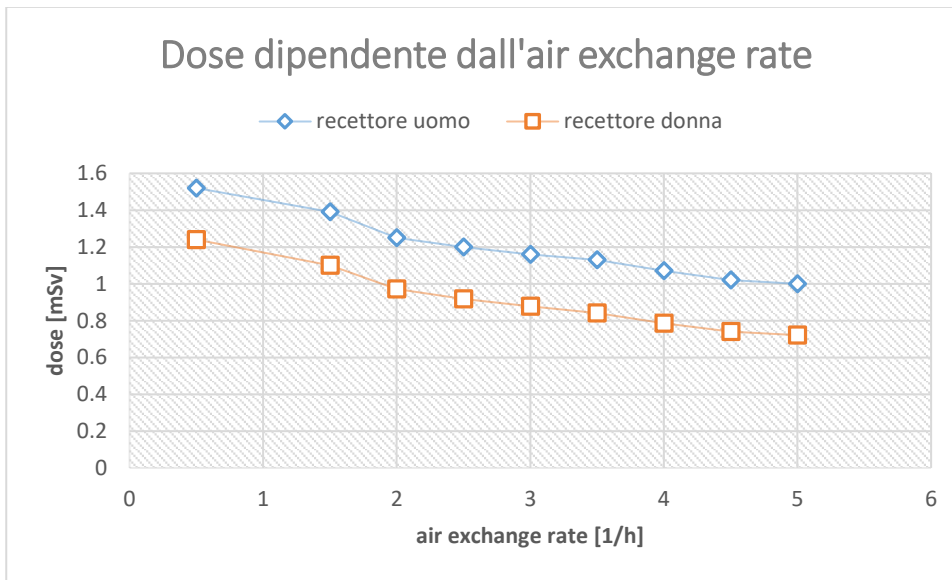


Grafico 6. Valori della dose assorbita in funzione dell'air exchange rate



## 6.7 COMMENTI

La prima osservazione da fare sui risultati riguarda la dipendenza del valore della dose dall' air exchange rate: possiamo notare come il valore della dose aumenti quando il valore di questo parametro diminuisce.

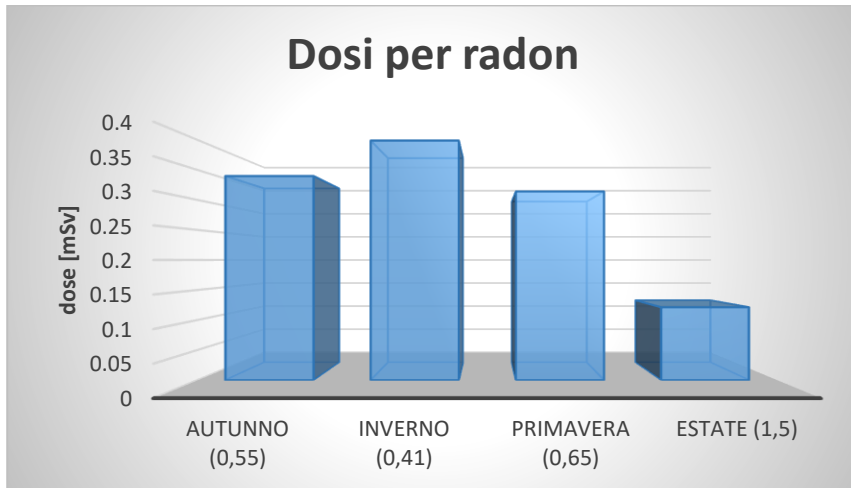


Grafico 7. Valori di dose al variare dell'air exchange rate

Dose [mSv]	Recettore uomo inverno	Recettore uomo estate
Radon	3,985E-1	3,139E-1

Tabella 22. Valori di dose al primo anno di occupazione invernali e estivi a confronto.

Come mostrato nella tabella, nella stagione invernale il valore della dose è all'incirca il 27% maggiore rispetto alla dose estiva. Questo è dovuto al maggiore air exchange rate presente nella stagione estiva con un valore pari a 1,5, quasi il quadruplo rispetto al valore assunto per la stagione invernale, pari a 0,41. La differenza di valori è dovuta alla frequenza di apertura delle finestre presenti in casa, ovviamente maggiore nella stagione estiva. Aumentando il ricambio dell'aria presente nell'abitazione, diminuisce di conseguenza la concentrazione di radon indoor.

Un altro dato che salta all'occhio è l'elevato valore di dose assorbito tramite esposizione diretta alla sorgente, che contribuisce al valore totale di dose all'incirca con la stessa percentuale del radon.

Il valore insolitamente alto è probabilmente dovuto alla grande presenza di cenere volante presente nel cemento, ricordiamo composto dal 65% di clinker e dal 35% di cenere volante. È bene specificare che questo tipo di cemento è raramente utilizzato come materiale da costruzione in quanto

contenente un rifiuto pericoloso, ma in questo lavoro è stato utilizzato per valutare il peggior caso possibile di dose assorbita.

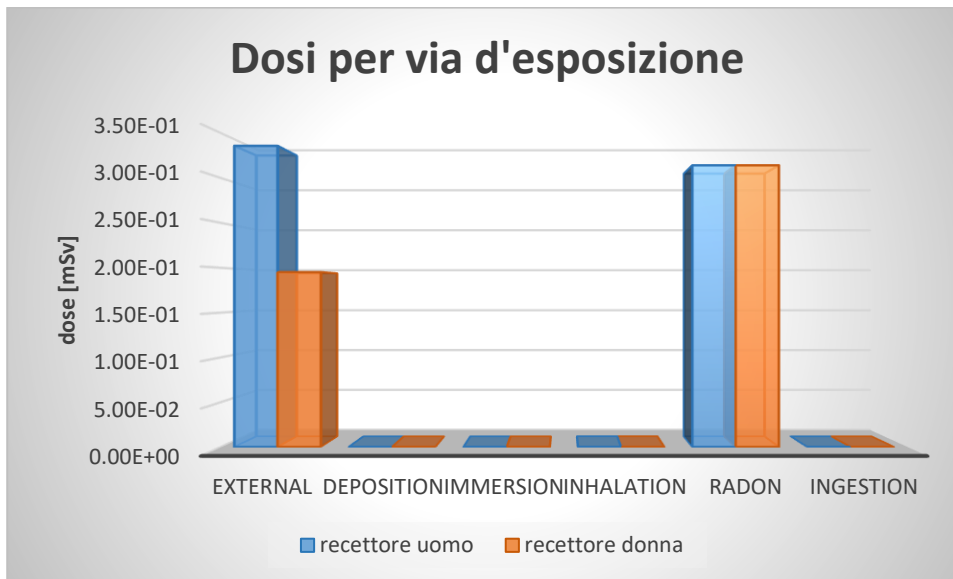


Grafico 8. Dosi assorbite a seconda delle varie vie d'esposizione, stagione primaverile.

Come possiamo notare dal grafico, la dose per esposizione diretta assorbita dal recettore donna è molto minore rispetto a quella assorbita dal recettore uomo, questo però è solamente dovuto alle limitazioni del codice, in quanto la posizione del recettore rimane fissa durante i calcoli.

La maggiore vicinanza alle sorgenti da parte di un recettore fa sì che il valore di dose per esposizione diretta sia maggiore.

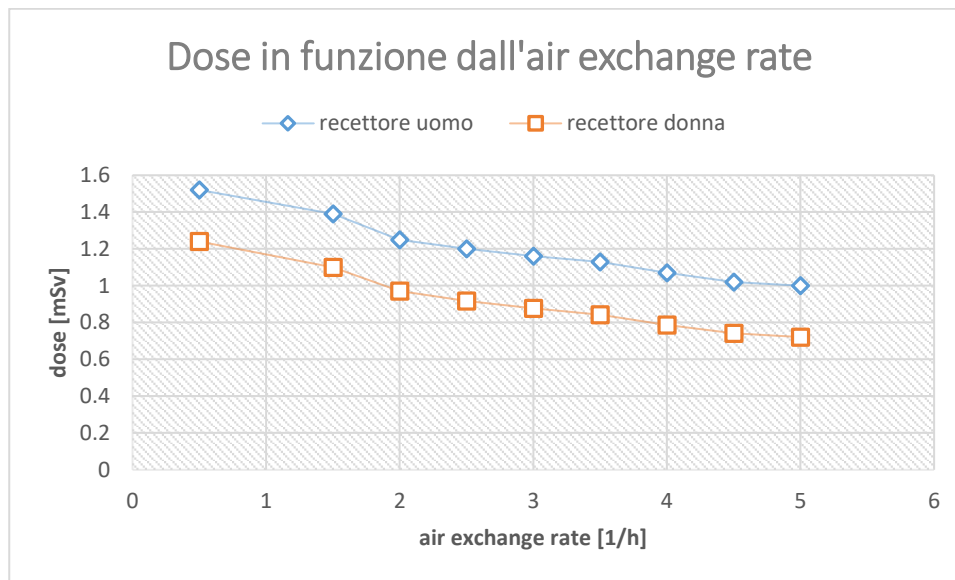
Per quanto riguarda l'andatura temporale della dose, è anomalo il fatto che la dose assorbita totale aumenti col tempo. L'unica spiegazione plausibile è che col passare degli anni aumenti in modo considerevole la concentrazione di torio 228 per decadimento del capostipite, il torio 232.

Nuclide	Receptor 1	Receptor 2	Total
TH-232	2.96E-05	2.21E-05	5.17E-05
TH-228	1.43E-03	1.17E-03	2.60E-03
RA-228	1.35E-03	8.25E-04	2.17E-03
RA-226	3.44E-02	2.70E-02	6.14E-02
PB-210	8.05E-08	7.18E-08	1.52E-07
K-40	1.42E-02	8.57E-03	2.28E-02

Figura 59. Dosi per radionuclidi contenuti nella cenere

Come possiamo vedere in figura, la dose assorbita a causa del torio 232 è di due ordini di grandezza inferiore rispetto a quella assorbita a causa del torio 228.

A causa dell'elevata radioattività del torio 228, al trentesimo anno abbiamo il picco di dose assorbita dai recettori, e considerando i valori di air exchange rate utilizzati nei calcoli precedenti, otterremo un valore di dose che supererebbe il limite imposto da Euratom, come mostrato nel seguente grafico



Non potendo intervenire sulla dose assorbita per esposizione diretta, le nostre attenzioni devono spostarsi sul radon, la cui concentrazione indoor può essere diminuita aumentando sensibilmente l'air exchange rate, che in questo grafico è considerato costante durante l'anno.

Notiamo come per rientrare nel limite previsto dalla legge di 1 mSv, il parametro debba assumere un valore all'incirca sei volte superiore a quello considerato da Murray e Burnmaster come valore medio pesato durante l'anno, pari a 0,8.

## 7 CONCLUSIONI

In questo lavoro abbiamo affrontato le problematiche dovute alla presenza di radionuclidi naturali in rifiuti trattati presso il centro situato ad Orbassano di proprietà dell'azienda Ambienthesis, soffermandoci successivamente sul problema radioprotezionistico dovuto al radon indoor.

Nonostante siano stati misurati valori di attività superiori alla cosiddetta radiazione di fondo, possiamo affermare che in ogni caso i rifiuti presi in considerazione non siano radioattivi a tal punto da obbligare l'azienda a dichiararli non omologabili. I rifiuti possono essere trattati e poi smaltiti in discarica senza pericolo alcuno per il pubblico.

Diverso è il discorso per quanto riguarda il radon indoor, i cui prodotti di decadimento se inalati possono essere causa di tumore ai polmoni. La concentrazione di radon raggiunge livelli molto elevati soprattutto in zone con terreno di origine vulcanica, essendo l'uranio molto abbondante in tufi e pozzolane.

Le abitazioni di queste zone devono essere munite di adatti impianti di ventilazione, che espellendo grandi quantità d'aria impediscono al radon di raggiungere concentrazioni pericolose. Inoltre, l'impianto di ventilazione ridurrebbe la depressurizzazione all'interno dell'abitazione, diminuendo così l'entrata del radon in casa.

Un buon impianto di ventilazione può ridurre la concentrazione di radon indoor dal 50 al 99%.

Considerando il caso studio di questa tesi, dobbiamo anche prendere in considerazione la radioattività del cemento portland. La composizione considerata, 65% clinker e 35% cenere volante è alquanto in disuso, ed è stata utilizzata al fine di considerare il peggior caso possibile.

Dopo aver effettuato i calcoli, possiamo affermare che la dose assorbita per la presenza della cenere nel cemento è rilevante in quanto i recettori sono già esposti fortemente alla radiazione da radon indoor. In caso contrario, la pericolosità dell'inerte dal punto di vista radioprotezionistico sarebbe irrilevante.

## Bibliografia

- Decreto Legislativo del Governo 17 marzo 1995 n° 230 modificato dal D. Lgs. 26 maggio 2000 n. 187, dal D. Lgs. 26 maggio 2000 n. 241 e dal D. Lgs. 9 maggio 2001 n. 257 "Attuazione delle direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 92/3/Euratom e 96/29/Euratom in materia di radiazioni ionizzanti."
- Massimo Zucchetti, *"Modello per l'analisi di impatto ambientale e sulla salute di materiali ai limiti della radiaattività secondo la legge disposti nei siti di smaltimento di Baricalla"*;
- Massimo Zucchetti, *"Technologically enhanced naturally occurring radioactive materials and radiation protection case studies"*- journal of environmental protection and ecology 18, No3, 1137-1145 (2017)
- Massimo Zucchetti, Hysen Mankolli, *"The natural radioactivity of waste materials and their use as building materials: an Italian case study"*-(2011);
- IAEA, *"uranium 2016: resources, production and demand"*;
- Federico Valerio, *"impatti ambientali delle ceneri e dei residui solidi prodotti dall'incenerimento dei rifiuti urbani: rassegna bibliografica"*;
- Paolo Plescia, Emanuela Tempesta, Daniela Musto, Diana Croci, Antonino Paratore, Agata Di Stefano, Salvo D'Amico, Rosario Contarino, *"Rifiuti pericolosi, il sistema per l'inertizzazione"*;
- Andrea Corti, *"trattamenti termici dei rifiuti"*;
- B.A.Napier, R.A.Peloquin, D.L.Streng, J.V.Ramsdell, *"Genii – The Handford Environmental Radiation Dosimetry Software System"*, Report Pnl-6584, December 1988;
- Felice Colangelo, slides del corso di "Tecnica delle costruzioni";
- Luigi Coppola, *"I cementi comuni e la norma uni-en 197-1"*;
- ARPA Lazio, *"Il monitoraggio del gas radon nel Lazio"*, (2013);
- Mauro Castelluccio, Paola Tuccimei, Michele Soligo, Domenico Cosentino *"STUDIO DEL SOIL RADON NEL TEST-SITE DELLA VALLE DELLA CAFFARELLA (ROMA)"*;
- European Commission, *"Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials"*;

- Murray, D.M., and D.E. Burmaster, 1995, *“Residential Air Exchange Rates in the United States: Empirical and Estimated Parametric Distributions by Season and Climatic Region”* Risk Analysis 15:459–465.

## Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutte le persone che hanno contribuito alla realizzazione di questo lavoro, in primis il professor Massimo Zucchetti per la professionalità con cui mi ha seguito in questo mese, e l'azienda Ambienthesis, in particolare il dottor Davide Galfrè per la cortesia dimostratami.

Ringrazio tutti i miei amici che mi hanno supportato in questi lunghi anni, soprattutto durante i periodi difficili che mi avevano quasi fatto mollare.

Last, but not the least, ringrazio la mia famiglia che ha permesso grazie al sostegno economico e affettivo il compimento di questo percorso.

Grazie di cuore a tutti,

Lorenzo Di Renzo