

Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Area Didattica di Scienze Matematiche Fisiche e
Naturali

Dipartimento di Fisica “Ettore Pancini”



Laurea triennale in Fisica

Esposizione alla radioattività di origine naturale in un edificio in tufo nel centro storico di Napoli

Relatori:

Prof. Mariagabriella Pugliese
Dott. Fabrizio Ambrosino

Candidato:

Rosaria Russo
Matricola N85001395

A.A. 2021/2022

Nothing safe is worth the drive
-Taylor Swift

Indice

Introduzione	3
Capitolo 1: La radioattività	4
1.1 Radioattività ambientale	4
1.2 Radiazioni ionizzanti e non ionizzanti	5
1.3 I raggi X, i raggi gamma e i decadimenti alfa e beta	5
Capitolo 2: Il gas radon e la normativa	7
2.1 Il gas radon	7
2.2 Il tufo giallo e la geologia campana	9
2.3 Radon indoor	11
2.4 Gli effetti sanitari dell'esposizione al gas radon	12
2.4.1 Danno radioindotto al polmone	14
2.5 Aspetti normativi	15
Capitolo 3: Set sperimentale e discussione dei risultati	16
3.1 Strumentazione	16
3.1.1 Rivelatori di radon E-PERM	16
3.1.2 Dosimetri a termoluminescenza (TLD)	18
3.2 Descrizione dell'esperimento	21
3.3 Risultati e discussione	23
Conclusioni	27
Bibliografia	28
Ringraziamenti	29

Introduzione

Questo lavoro di tesi discute della radioattività ambientale ed in particolare del radon e la sua misura in ambienti indoor e la stima della dose annua di esposizione. Il radon è un elemento che ritroviamo in natura allo stato gassoso, ma nel suo decadimento produce particelle alfa (radiazione ionizzante), per tale motivo è provato essere causa di tumore ai polmoni. Gli edifici costruiti con materiali vulcanici (ad esempio il tufo) rilasciano quantità di radon notevoli. La normativa vigente fissa un livello di riferimento a 300 Bq/m^3 la concentrazione di attività radon indoor (D.lgs 101/2020).

L'attività sperimentale è consistita in misure di radon indoor tramite rivelatori a diffusione ad elettret (E-PERM) in un antico palazzo del centro storico di Napoli costruito in tufo giallo, risalente al XV secolo.

Le misure sono state svolte da dicembre 2022 ad aprile 2023 in due locali differenti del palazzo: il primo sito ad un piano terra tenuto chiuso per tutta la durata dell'esperimento, il secondo è invece un appartamento in un primo piano abitato e continuamente aerato. Inoltre, parallelamente alle misure di radon indoor, si è provveduto anche a misure di dose dovuta alla radiazione gamma naturale indoor mediante l'utilizzo di dosimetri a termoluminescenza (TLD).

Il fine ultimo del lavoro è quello di stimare la dose annua di esposizione indoor alla radioattività naturale negli ambienti monitorati.

Il lavoro si articola in tre capitoli: il primo riguardante la radioattività, il secondo tratta del gas radon e della normativa attuale in materia di radioprotezione, ed il terzo riporta, in dettaglio, l'esperimento condotto descrivendo la strumentazione utilizzata ed i risultati ottenuti con una discussione approfondita nell'ottica della normativa vigente.

Capitolo 1: La radioattività

1.1 Radioattività ambientale

Nel 1896 il fisico francese Becquerel scoprì che i composti dell'uranio emettevano spontaneamente radiazioni capaci di impressionare le lastre fotografiche e attraversare la materia. Per questo motivo il fenomeno fu chiamato emissione di raggi uranici. La scienziata Marie Curie si accorse che il fenomeno si verificava anche per altri elementi e ribattezzò l'emissione di raggi uranici con il termine di radioattività.

Possiamo distinguere due tipologie di radioattività ambientale: la radioattività artificiale e la radioattività naturale. Quest'ultima comprende circa l'80% della radioattività ambientale. La radioattività artificiale comprende i radionuclidi prodotti dall'attività umana, esperimenti nucleari degli anni '50 e '60, incidenti nelle centrali nucleari e tutto ciò che concerne la medicina nucleare.

La radioattività naturale è dovuta alla presenza di radiazioni provenienti dal cosmo (radiazione cosmica primaria), alle interazioni tra queste e l'atmosfera (radiazione cosmica secondaria) e alla presenza di molti elementi radioattivi esistenti fin dalle origini della Terra, che non si sono ancora trasformati completamente e ancora non hanno raggiunto lo stato di stabilità finale. La radiazione cosmica primaria proviene dal profondo spazio interstellare ed è costituita principalmente da particelle cariche positivamente (protoni, particelle alfa). Comprende anche una componente solare che trae origine dalle esplosioni nucleari sul sole e consiste essenzialmente di protoni. Per la maggior parte i raggi cosmici primari sono assorbiti nello strato più alto dell'atmosfera.

La radiazione cosmica secondaria comporta l'emissione di numerosi prodotti secondari, quali ad esempio mesoni, elettroni, fotoni, protoni e neutroni che a loro volta possono creare particelle secondarie. La radioattività terrestre comprende i principali radionuclidi primordiali come il ^{40}K , e gli elementi delle serie radioattive ^{238}U ^{232}Th . La concentrazione dei radionuclidi naturali nel suolo e nelle rocce varia fortemente da luogo a luogo in dipendenza dalla conformazione geologica delle diverse aree.

In generale le rocce ignee e i graniti contengono ^{238}U in concentrazioni più elevate delle rocce sedimentarie come il calcare e il gesso. Il becquerel (Bq) è l'unità di misura del sistema internazionale dell'attività di un radionuclide, ed è definito come l'attività di un radionuclide che ha un decadimento al secondo. Per esprimere la concentrazione di attività di un dato radionuclide nell'unità di volume si utilizza come unità di misura Bq/m^3 .

1.2 Radiazioni ionizzanti e non ionizzanti

La radioattività naturale comprende le radiazioni non ionizzanti (NIR) e le radiazioni ionizzanti (RI). Fanno parte delle radiazioni non ionizzanti le radiazioni ultraviolette, radiazioni del campo visibile, radiazioni infrarosse, microonde, radiofrequenze, ELF e le radiazioni prodotte da laser. Le sorgenti naturali di queste radiazioni sono ad esempio il Sole e il magnetismo terrestre. Sono onde elettromagnetiche di energia inferiore ai 10 eV (energia necessaria a spostare un elettrone dall'orbita periferica).

La loro energia associata non è sufficiente ad indurre nella materia il fenomeno della ionizzazione, ovvero non possono dare luogo alla creazione di atomi o molecole elettricamente cariche. La radiazione NIR non provoca un danno direttamente alla cellula, ma realizza modificazioni termiche, meccaniche e bioelettriche.

Fanno parte delle radiazioni ionizzanti le radiazioni elettromagnetiche (raggi X e raggi gamma) e le radiazioni corpuscolari (raggi alfa, beta). Possiedono la capacità di produrre ioni nell'interazione con la materia che attraversano (energia > 12 eV), quindi possono danneggiare direttamente le cellule.

Tra le radiazioni ionizzanti distinguiamo invece le radiazioni indirettamente ionizzanti e direttamente ionizzanti.

Sono radiazioni indirettamente ionizzanti la radiazione X, la radiazione gamma e i neutroni. Interagiscono con il mezzo attraversato cedendo ai nuclei ed agli atomi parte o tutta la loro energia. Questo tipo di interazione porta alla generazione di elettroni secondari che a loro volta possono indurre ionizzazione secondaria.

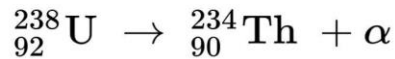
Le radiazioni direttamente ionizzanti sono le particelle alfa e le particelle beta, le quali possono quindi direttamente danneggiare le cellule.

1.3 I raggi X, i raggi gamma e i decadimenti alfa e beta

I raggi X (o raggi Röntgen) sono quella porzione di spettro elettromagnetico con lunghezza d'onda compresa approssimativamente tra 10 nanometri (nm) e 1/1000 di nanometro (1 picometro). Classificati come radiazioni ionizzanti, hanno un potere di penetrazione molto elevato: solo spessori dell'ordine di centimetri di piombo o di decimetri di calcestruzzo possono fermarli. A lunghezza d'onda superiore a 0,1 nm sono chiamati raggi X molli; a lunghezze minori, sono chiamati raggi X duri. I raggi X duri si affiancano ai raggi gamma, più energetici, ma vengono distinti da essi a seconda della loro origine: i fotoni X sono prodotti da variazioni della cinetica degli elettroni, mentre quelli gamma da transizioni e decadimenti all'interno di un nucleo atomico (origine nucleare), o dall'annichilazione tra un positrone ed un elettrone.

Sono usati principalmente per fini medici, ad esempio per radiografie.

Il primo decadimento radioattivo scoperto da Rutherford nel 1899 fu il decadimento alfa (da cui il nome). Nel decadimento alfa un nucleo atomico instabile (radionuclide) trasmuta emettendo una particella α , ossia un nucleo di ${}^4\text{He}$. In tal modo il numero di massa del radionuclide viene ridotto di quattro e il suo numero atomico di due; il nuclide così prodotto può, a sua volta, essere ancora radioattivo oppure risultare stabile. Il decadimento alfa è tipico dei radionuclidi che presentano un eccesso di protoni rispetto ai neutroni. Un tipico decadimento alfa è quello dell'uranio.



Il decadimento alfa è un fenomeno fisico che si basa sull'effetto tunnel, e quindi non spiegabile dalla meccanica classica.

Con il termine decadimento beta si intende l'emissione spontanea da parte di un nucleo di un elettrone o un positrone, quindi distinguiamo due tipologie di decadimento beta: il decadimento beta negativo e beta positivo.

Il decadimento beta negativo è un decadimento tipico dei nuclei aventi un eccesso di neutroni rispetto ai loro isobari stabili; il nucleo si trasforma in un suo isobaro con contestuale emissione di un elettrone e di un antineutrino elettronico secondo la legge:

$$A(Z, N) \rightarrow A(Z + 1, N - 1) + e^{-} + \bar{\nu}_e.$$

Il decadimento beta positivo è un decadimento tipico dei nuclei aventi un difetto di neutroni rispetto ai loro isobari stabili; il nucleo si trasforma in un suo isobaro con contestuale emissione di un positrone e di un neutrino elettronico secondo la legge:

$$A(Z, N) \rightarrow A(Z - 1, N + 1) + e^{+} + \nu_e.$$

L'emissione di radiazione elettromagnetica di alta frequenza (raggi gamma) avviene a seguito dei decadimenti alfa e beta.

56 sec, il ^{219}Rn ha un tempo di dimezzamento di 4 sec, pertanto quando si parla di radon ci riferiamo a ^{222}Rn .

Dal punto di vista chimico il radon è un gas nobile, quindi chimicamente inerte, incolore, inodore, insapore e pesante (densità pari a 9,73 g/l a 0°C), circa otto volte più denso dell'aria. Inoltre è moderatamente solubile in acqua; ciò significa che a temperatura ambiente il radon si distribuisce preferibilmente in aria piuttosto che in acqua; il radon infatti fuoriesce facilmente dall'acqua facendovi gorgogliare dell'aria oppure semplicemente agitandola vigorosamente. Anche nel caso di una sorgente dove l'acqua scaturisce dalla roccia, la maggior parte del radon si volatilizza velocemente.

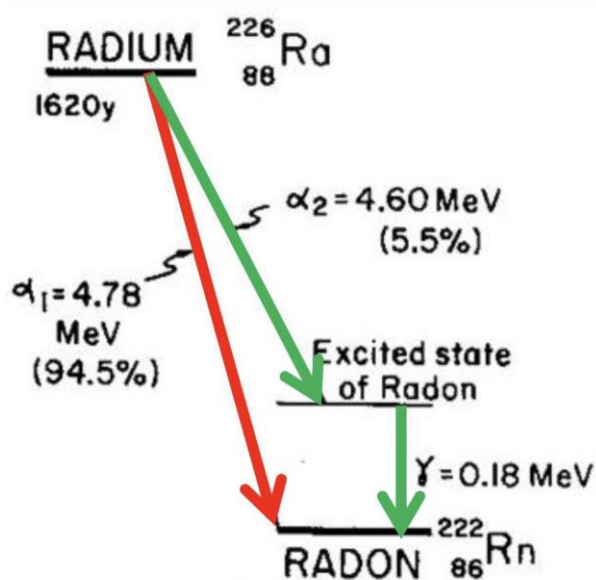


fig.2. decadimento del radon

Nel decadimento in rosso in fig.2 il ^{226}Ra decade nello stato fondamentale del ^{222}Rn con una probabilità del 94,5% in cui la particella α emessa ha energia di 4,78 MeV.

Nel decadimento in verde in fig.2 il ^{226}Ra decade nello stato eccitato del ^{222}Rn con una probabilità del 5,5% ed energia della particella α emessa pari a 4,60 MeV. Il radon eccitato passerà nel suo stato fondamentale emettendo un fotone γ di energia pari a 0,18 MeV.

Il radon si forma nel suolo in seguito al decadimento del radio. I precursori del radon (dall'uranio al radio) sono presenti in tutti i tipi di rocce in quantità che dipendono dalle caratteristiche geologiche del sito: le rocce che contengono le maggiori quantità di uranio, quindi di radon, sono le rocce ignee intrusive, formate dal raffreddamento del magma (come i graniti), le rocce metamorfiche che derivano da rocce magmatiche, le rocce vulcaniche e le rocce carsiche.

Elevate concentrazioni di attività di radon si riscontrano però solo dove il radon riesce a fuoriuscire dal reticolo cristallino dei minerali che lo contengono. Durante il decadimento del radio viene emessa una particella alfa e l'atomo di radon formato rincula nella direzione opposta. La posizione dell'atomo di radio e la direzione di rinculo dell'atomo di radon

determinano la possibilità di migrazione del radon negli spazi interstiziali (o porosità) del suolo.

Nella maggior parte dei casi solo una piccola percentuale del radon prodotto entra nei pori dove è libero di migrare, aiutato dai gas del suolo e dall'acqua; pertanto può trovarsi in soluzione nelle acque che scorrono tra le rocce ed i sedimenti sabbiosi ed essere trasportato da esse. I processi che determinano il trasporto del radon sono essenzialmente la diffusione e il trasporto da parte di un fluido (acqua e gas del suolo). La distanza che il radon può percorrere dipende in gran parte dal suo tempo di dimezzamento fisico. La diffusione consente in genere spostamenti del radon su distanze dell'ordine dei centimetri o al più dei metri, mentre il trasporto da parte di un altro fluido può in alcuni casi determinare migrazioni per distanze molto maggiori.

I principali fattori che influenzano la migrazione del radon sono la permeabilità e porosità della roccia dove si origina e del suolo sovrastante, e la presenza di acqua. La porosità di un materiale è il rapporto tra il volume complessivo dei vuoti in un campione e il volume totale. La permeabilità è la proprietà di certi corpi di lasciarsi attraversare o penetrare da liquidi o gas. Infatti, in corrispondenza di rocce fratturate (permeabili), o di terreni ghiaiosi (porosi) si ritrovano alte concentrazioni di attività di radon mentre in terreni alluvionali compatti (argille) sono associati a basse concentrazioni di attività di radon.

Nel suolo la quantità di radon presente dipende dalla quantità dei progenitori, pertanto dipende dal tipo di suolo su cui ci troviamo. La distribuzione eterogenea dei progenitori del radon nei diversi tipi di rocce causa una produzione non uniforme di radon.

Nei punti di risalita di materiale roccioso, dal mantello verso la crosta, si riscontrano le maggiori concentrazioni. Non tutto il radon prodotto in un materiale poroso per decadimento del radio in esso contenuto è disponibile per il passaggio nell'aria, ma soltanto una parte di esso. Solo il radon che proviene dallo strato più superficiale può sfuggire all'esterno, la maggior parte vi resta intrappolata.

2.2 Il tufo giallo e la geologia campana

Il tufo giallo napoletano (fig.3) è una roccia vulcanica prodotta dall'attività vulcanica dei Campi Flegrei (Campania) e si è formato dalla cenere vulcanica di colore biancastro detta "pozzolana" (lapis puteolanus, da Pozzuoli), sedimentatasi nel mare e successivamente emersa a seguito di pressioni tettoniche, datate fra i 35 000 e i 10 500 anni fa (Secondo Periodo Flegreo). Il tufo giallo napoletano corrisponde ad un immenso edificio vulcanico, avente un cratere di 15 km di diametro (con epicentro corrispondente all'attuale città di Pozzuoli), i cui bordi residui si riconoscono nella collina di Posillipo, la collina dei Camaldoli, la dorsale settentrionale del cratere di Quarto, i monti di San Severino, l'acropoli di Cuma, e il rilievo di Monte di Procida. All'interno di questo cratere primordiale si sono inseriti successivamente tutti gli altri edifici

vulcanici dei Campi Flegrei (corrispondenti al c.d. Terzo Periodo Flegreo), ad eccezione delle isole flegree di Procida, Vivara, e Ischia che si collocano al di fuori di esso. All'interno del cratere primordiale spicca ancora l'imponente massiccio in tufo giallo del Monte Gauro (320 m), situato tra Pozzuoli e il Monte Nuovo.



fig.3 tufo giallo napoletano

In uno studio condotto nel 2021, è stata studiata la caratterizzazione radiologica dei materiali da costruzione di origine naturale in Campania (Italia meridionale) [1].

I materiali raccolti dalle aziende locali di estrazione, sono comunemente utilizzati nelle costruzioni edili in Italia e in tutto il mondo. Il territorio campano è ricco di roccia vulcanica e sedimenti piroclastici, rocce siliciclastiche, rocce carbonatiche e sedimenti alluvionali/costali (fig.4). Eseguendo misure di spettrometria alfa sui campioni prelevati è stato possibile stimare la concentrazione di attività di radon emanata dai materiali. I risultati hanno dimostrato che il contenuto naturale di radioattività dei campioni dipende fortemente dalle caratteristiche litologiche del materiale e, quindi, dalle diverse strutture geologiche da cui provengono i campioni. Inoltre i materiali da costruzione di origine rocciosa vulcanica e le sedi piroclastiche presentano il più alto livello di radioattività naturale, specialmente nei campioni del vulcano Vesuvio. In particolare, i tufi gialli, le pomice, le rocce siliciclastiche e i sedimenti alluvionali/costali mostrano i valori più alti dei coefficienti di emanazione del radon. Lo studio ha portato anche al calcolo degli indici di pericolo della radiazione proveniente dai materiali analizzati, e ne è derivato che i materiali da costruzione naturali di origine rocciosa vulcanica (quali il tufo) e i sedimenti piroclastici, superano i livelli di riferimento oltre i quali i materiali sono considerati comportare rischi per la salute radiologica. Invece, materiali da costruzione naturali provenienti da rocce carbonatiche, rocce siliciclastiche e sedimenti alluvionali/costieri sono inferiori a quei livelli di riferimento e possono essere utilizzati con sicurezza radiologica nella costruzione di edifici. Tra i principali fattori che influenzano l'emanazione di radon dal materiale ritroviamo la distribuzione del radio e la porosità del campione. Il tufo

giallo è un materiale particolarmente poroso, che permette al radon di fuoriuscire e dispersi nell'ambiente facilmente.

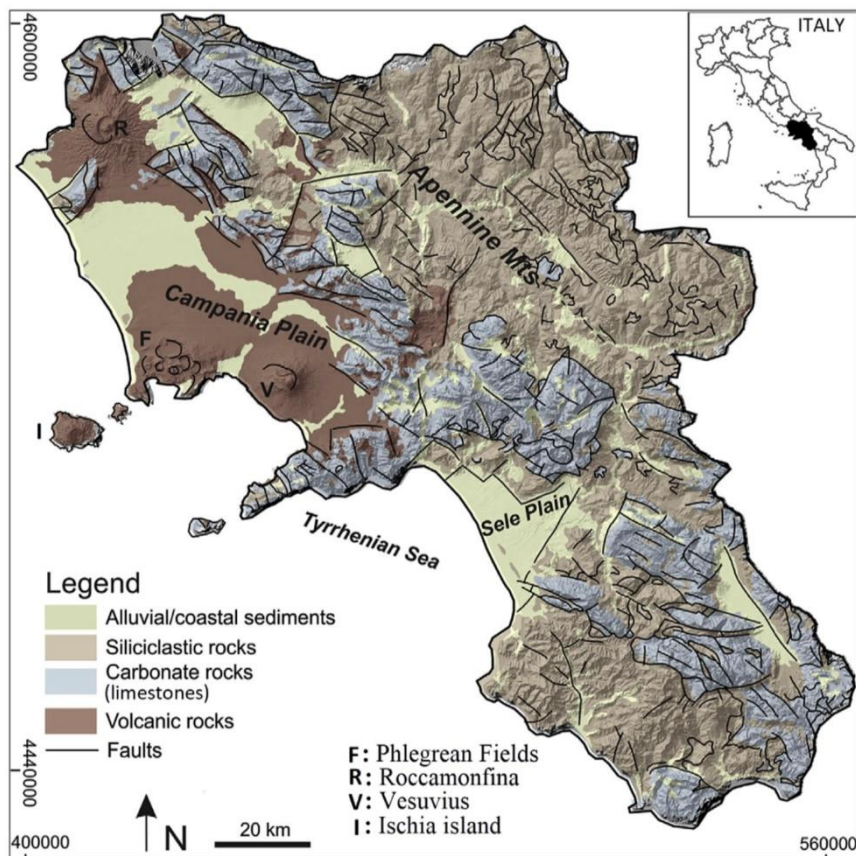


fig.4 geologia della Campania

2.3 Radon indoor

A causa della sua natura gassosa e della sua inerzia chimica, il radon diffonde rapidamente dal luogo di formazione fino a raggiungere lo spazio esterno.

Nei luoghi chiusi il radon si concentra e, accumulandosi, rappresenta un inquinante degli ambienti indoor. Dal punto di vista fisico, il radon risente delle condizioni ambientali.

Nel caso di differenze di pressione e di temperatura si creano dinamiche che favoriscono o meno l'accumulo del gas. Durante la stagione fredda notiamo l'effetto camino: la temperatura interna risulta maggiore della temperatura esterna, quindi c'è un'azione di risucchio e viene favorito l'ingresso e accumulo del gas indoor.

Durante la stagione calda, invece, notiamo l'effetto vento. La temperatura esterna è maggiore di quella interna e c'è un'azione di diluizione favorendo l'uscita del gas, anche per una maggiore frequenza di apertura delle finestre.

La pioggia (o neve) ha un duplice effetto: se da un lato l'acqua ostruisce le vie di esalazione del radon dal suolo, esercitando sul terreno la sua stessa pressione; dall'altro aumenta la differenza di pressione negativa tra l'interno dell'edificio e il suolo, favorendo le forze convettive e quindi l'effetto camino.

Fattori che influenzano la concentrazione di attività di radon negli ambienti chiusi sono:

- radon nel suolo e nei materiali da costruzione (composizione)
- propagazione attraverso il suolo e i materiali (porosità)
- convezione (differenza di pressione)
- diffusione (differenza di concentrazione)
- presenza di microfratture nei pavimenti e di tubature (acqua e gas)
- distanza dell'abitazione dal suolo
- tasso di ventilazione dell'ambiente

2.4 Gli effetti sanitari dell'esposizione al gas radon

Si definisce linear energy transfer (LET o in italiano trasferimento lineare di energia) l'energia trasferita da una radiazione ionizzante ad un materiale, per unità di distanza.

L'unità di misura più utilizzata è il keV/μm. Più il valore del LET è alto, più la radiazione cede energia in un breve percorso. Pertanto, una radiazione ad alto LET comporterà un maggiore danno biologico, ma una minima capacità penetrativa poiché ha perso gran parte dell'energia in un breve percorso.

Le particelle alfa sono radiazioni ad alto LET (presentano valori di 10–200 keV/μm per percorsi di pochi millimetri di tessuto), i raggi X e gamma sono invece a basso LET (valori che variano da 0,2 a 3 keV/μm per percorsi di molti centimetri di tessuto).

Gli effetti delle radiazioni ionizzanti si manifestano quando si verifica una cessione di energia al mezzo attraversato. Per studiare questa condizione si tiene conto della dose assorbita (D) definita come il quoziente tra l'energia media ceduta dalle radiazioni ionizzanti alla materia in un certo elemento di volume e la massa di materia contenuta in tale elemento. La dose assorbita si misura in gray (Gy). La dose equivalente (H) misura il danno biologico provocato dalla radiazione su un organismo, e tiene conto del differente danno causato dalle radiazioni: la formula è la seguente $H = W_R * D$, dove W_R è il fattore di qualità della radiazione (tabella 1) [2,3]. Il sievert (Sv) è l'unità di misura della dose equivalente di radiazione. L'esposizione di diversi tessuti ad organi alla stessa dose equivalente può comportare un differente detrimento sanitario a causa della loro specifica radiosensibilità. La dose efficace (E) è definita come la sommatoria della dose equivalente al tessuto/organo (T) irradiato moltiplicata per un fattore peso W_T (tabella 2) [2,3]: $E = \sum T W_T H_T$. L'unità di misura della dose efficace è il Sievert (Sv).

tabella. 1. fattori di qualità della radiazione W_R [2,3]

Radiazione	Energia	Fattori di qualità W_T
Fotoni	Tutte le energie	1
Elettroni e muoni	Tutte le energie	1
Protoni (escluso rinculo)	>2 MeV	5
Alfa, frammenti di fissione, nuclei pesanti	Tutte le energie	20
Neutroni	< 1 MeV	$2,5+18,2 e^{-[\ln(E_n)]^2/6}$
	1-50 MeV	$5,0+17,0 e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}$
	> 50 MeV	$2,5+3,25 e^{-[\ln(0,04E_n)]^2/6}$

tabella. 2. fattori peso W_T [2,3]

Organi	Fattori di peso W_T
Gonadi	0,08
Midollo osseo	0,12
Colon	0,12
Polmone e vie respiratorie	0,12
Stomaco	0,12
Mammelle	0,12
Vescica	0,04
Fegato	0,04
Esofago	0,04
Tiroide	0,04
Pelle	0,01
Superficie ossea	0,01
Cervello	0,01
Ghiandole salivari	0,01
Tessuti rimanenti	0,12
Corpo intero	1

Le raccomandazioni della Commissione Internazionale per la Protezione Radiologica (ICRP) suggeriscono di adottare il modello LNT (Linear no Threshold) che presuppone che il rischio associato al danno da radiazione cresca linearmente al crescere della dose, e questo anche per valori piccoli della dose. Pertanto il modello LNT (fig.5) asserisce che non vi sia alcuna soglia di esposizione al di sotto della quale la risposta cessi di essere lineare, e quindi possa non esserci alcun danno.

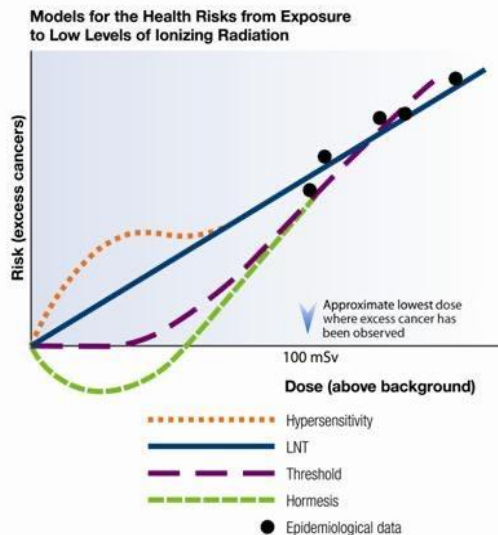


fig. 5. modello LNT

2.4.1 Danno radioindotto al polmone

Prima di giungere agli alveoli (unità elementare dei polmoni) l'aria viene filtrata attraverso il naso, attraverso la trachea e dal muco dei bronchi ma, nonostante questo meccanismo di filtrazione, può accadere che sostanze tossiche giungano ai polmoni producendo dei danni in funzione della sostanza, della sua concentrazione e della durata dell'esposizione.

L'operazione di pulizia svolta dalle ciglia impiega circa 30 minuti. Se in questo periodo i prodotti di decadimento del radon (in particolare quelli a vita breve) decadono emettendo particelle alfa, queste ultime possono danneggiare le cellule basali che si trovano in vicinanza, all'interno del polmone.

Essendo un gas nobile, il radon non è reattivo e, inalato, non si deposita nei polmoni, ma viene rapidamente espulso, con trascurabile contributo di dose ai polmoni.

Gli effetti dannosi sono prodotti dai suoi 'discendenti' radioattivi, gli emettitori solidi ^{218}Po e ^{214}Po .

Hanno una emivita dell'ordine di alcuni secondi, tempo inferiore all'atto respiratorio e quindi in grado di interagire con i tessuti. Le particelle dei prodotti di decadimento del radon hanno un'energia (circa 5,5 MeV) tale da riuscire a penetrare la membrana cellulare senza oltrepassare la cellula e rilasciano quindi la gran parte del danno (ionizzazione) nel bersaglio critico, il DNA. La prima reazione che avviene all'interno della cellula è l'arresto immediato del ciclo cellulare, in modo che vengano rimossi i danni prima che questi siano convertiti in mutazioni. Nel caso si tratti di tagli su un filamento, viene utilizzato il filamento complementare per eventuale sintesi delle basi mancanti. Per i tagli a doppio filamento la cellula utilizza meccanismi di ricombinazione, invece per danni di notevole entità, la cellula va in apoptosi. In alcuni altri casi, i sistemi di riparazione possono produrre delle mutazioni.

La presenza di una mutazione può portare ad esempio alla trasformazione di proto-oncogeni (deputati al controllo della proliferazione) in oncogeni (promotori della proliferazione incontrollata) che possono generare tumori.

Pertanto il radon è classificato come causa di tumore ai polmoni (categoria A).

“Il rischio di contrarre un tumore polmonare causato dall’esposizione al radon è 25 volte più alto per chi fuma un pacchetto al giorno di sigarette rispetto a chi non ha mai fumato ” ISS istituto superiore di sanità.

2.5 Aspetti normativi

Considerati i rischi alla salute causati dall’inalazione di gas radon, normative per tutelare la salute dei lavoratori e delle persone nelle abitazioni sono adoperate.

L’ICRP (International Commission on Radiological Protection) ha sviluppato i principi fondamentali della radioprotezione e ha indicato i limiti di dose per la protezione sanitaria degli addetti ad attività che comportano esposizione alle radiazioni. L’ICRP è riconosciuto come organismo scientifico dalla Comunità Europea per la definizione delle direttive di protezione sanitaria contro le radiazioni ionizzanti. L’EURATOM è l’organismo della Comunità Europea che sovrintende tutti gli aspetti connessi all’impiego pacifico delle radiazioni ionizzanti e che provvede ad emettere direttive sulla base delle raccomandazioni dell’ICRP.

La direttiva EURATOM/59/2013 ha introdotto nuove disposizioni riguardo la protezione dal gas radon indoor, disposizioni recepite in Italia nell’attuale decreto legislativo vigente n.101/2020 [2] con gli articoli dal 10 al 19, titolo IV capo I. Tale D.lgs 101/2020 riporta come livello di riferimento di concentrazione di attività di radon indoor 300Bq/m^3 in abitazioni ed ambienti di lavoro, ed il livello di riferimento della dose efficace annua di radon indoor in ambienti di lavoro di 6 mSv/anno . Per gli scenari lavorativi, in caso di superamento dei 300 Bq/m^3 , è necessario progettare azioni di rimedio che portino alla riduzione della concentrazione di attività di radon. Se e solo se le azioni di rimedio non risultino efficaci, bisogna procedere con il calcolo della dose, tramite la seguente formula (con 2000 h di lavoro annue):

$$D (\text{dose}) = \text{conc. radon} \left(\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right) * \text{ore di esposizione (h)} * \left(6,7 * 10^{-9} \frac{\text{Sv}}{\text{Bq h m}^{-3}} \right).$$

Capitolo 3: Set sperimentale e discussione dei risultati

3.1 Strumentazione

3.1.1 Rivelatori di radon E-PERM

Per monitorare il radon negli ambienti interni in maniera passiva (senza alimentazione), si possono utilizzare camere di diffusione ad elettrete (E-PERM, fig.6). Tali rivelatori sono costituiti da una camera di diffusione alla quale è agganciato un disco di teflon precedentemente caricato elettricamente ad una tensione di riferimento nota [4].

Il radon diffonde insieme all'aria all'interno della camera di raccolta, raggiunge l'equilibrio e decade. Quando un atomo di radon decade e la particella alfa emessa ionizza l'aria contenuta nella camera, il disco di teflon raccoglie gli ioni prodotti e perde una parte della sua carica. Pertanto misurando il voltaggio del disco all'inizio e alla fine della misurazione, è possibile poi calcolare la concentrazione di attività di radon nell'ambiente, tramite fattori di calibrazione.

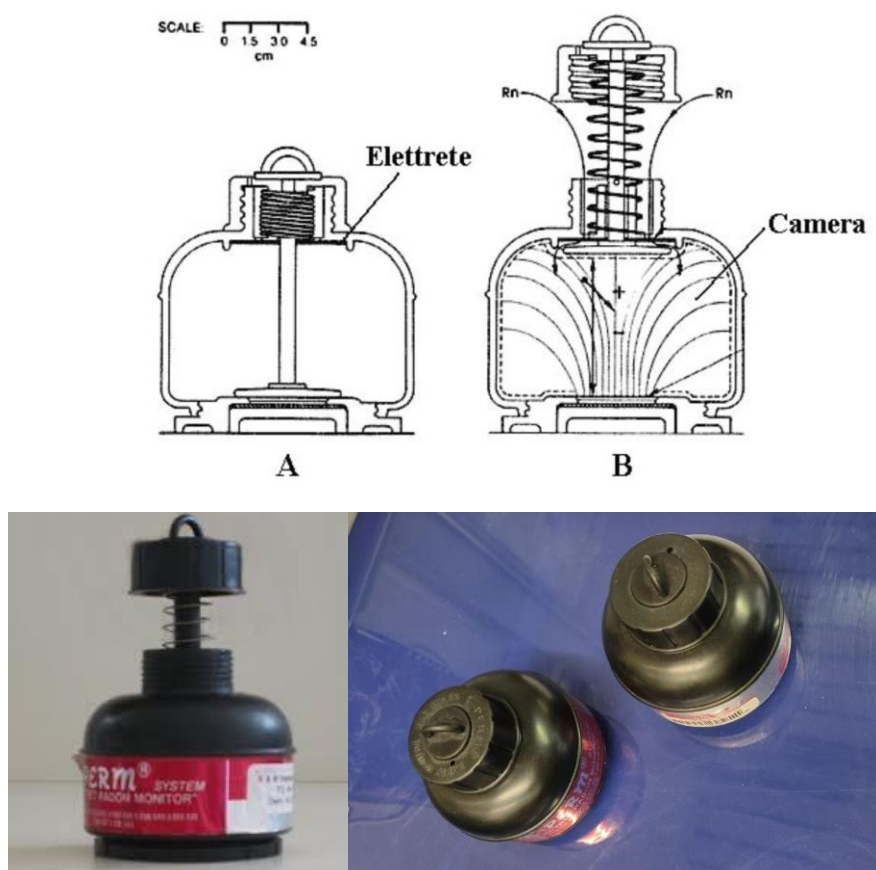


fig.6. E-PERM

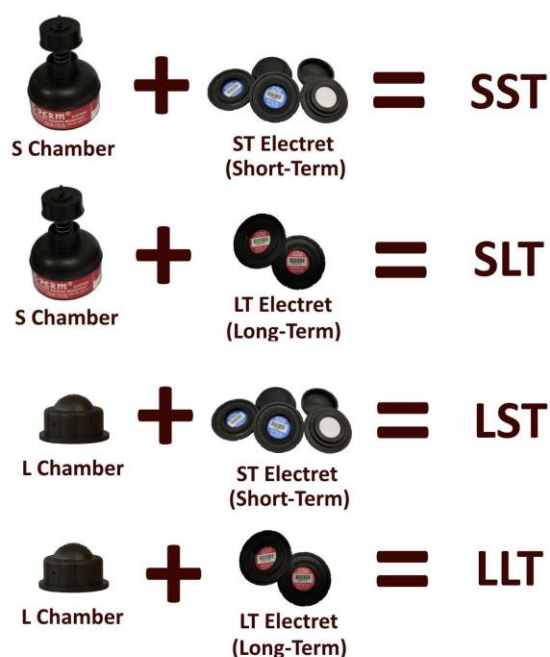


fig.7. varie configurazioni di E-Perm

A seconda del modello di camera e elettrete ci sono diverse configurazioni (fig.7)

Il modello di rivelatore utilizzato è SLT, camera short e elettrete long term: camera short di 127 ml di volume per misure di breve durata dai 30 ai 90 giorni. Ogni configurazione permette di esporre il rivelatore per giorni differenti.

La lettura del voltaggio iniziale e finale dell'elettrete è stato utilizzato il voltmetro Rad Elec SPER-1E (fig.8)



fig.8. voltmetro RAd Elec SPER-1E

Nella parte superiore del lettore è presente il display in cui vengono visualizzati i risultati della misura. Sotto il display è presente l'otturatore per la lettura del voltaggio dell'elettrete, mentre in basso a destra è presente la maniglia dell'otturatore. Tirando verso il basso la maniglia apre l'otturatore e inizia la lettura dell'elettrete.

La procedura per ottenere la concentrazione di attività di radon si articola nei seguenti passaggi [4]:

1. Si rimuove il coperchio di protezione dell'elettrete e si misura il voltaggio iniziale utilizzando il lettore SPER-1.
2. Si avvita l'elettrete nella parte inferiore della camera S.
3. Per iniziare la misura nel luogo scelto, si svita il dispositivo sulla parte superiore della camera. Una molla spingerà verso l'alto il tappo ponendo la camera in funzione.
4. Il dispositivo viene posizionato e viene registrata l'ora e la data di inizio esposizione.
5. Dopo il periodo di esposizione (30-90 giorni per il modello SLT), si riavviata il tappo riportando la camera in posizione off, si registra l'ora e la data e il voltaggio finale dell'elettrete.
6. Si calcola la concentrazione di attività di radon (RnC in Bq/m^3) attraverso la seguente formula

$$RnC (Bq/m^3) = \left(\frac{I - F}{CF * D} - (C * R_\gamma) \right) * H$$

dove

R_γ È il rateo di fondo gamma in nGy/h [per SLT 150 nGy/h]

I e F sono il voltaggio iniziale e finale dell'elettrete [V]

D è il periodo di esposizione in giorni [gg]

CF è il fattore di calibrazione [per SLT 0.0043 ($V \cdot m^3$)/(Bq·gg)]

H è un fattore correttivo per l'altitudine [per SLT 100 m slm]

C è la costante di calcolo per una data configurazione di E-PERM [per SLT 0,35]

3.1.2 Dosimetri a termoluminescenza (TLD)

Per misurare la dose dovuta alla radiazione gamma naturale sono stati utilizzati dosimetri a termoluminescenza (TLD) (fig.9).

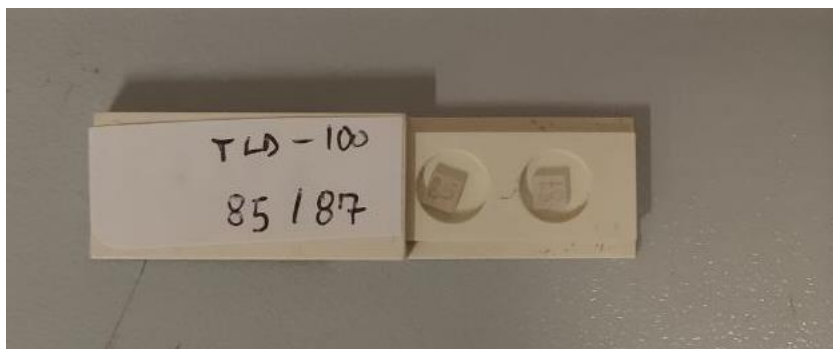


fig.9. due dei TLD utilizzati

I TLD utilizzati sono dei cristalli isolanti molto piccoli (3mm lunghezza x 3mm larghezza x 0.9 mm spessore) e facili da impiegare, sia in ambito personale che in quello

clinico/interventistico: i TLD sono, infatti, dosimetri tessuto-equivalente, ovvero, manifestano la stessa attitudine del tessuto biologico nell'assorbimento della dose di radiazioni [5].

Dal momento che la risposta in dose varia a seconda della radiazione (fotoni, particelle cariche o neutroni), esistono varie tipologie di TLD che rispondono ad altrettante esigenze dosimetriche nei vari ambiti di applicazione. Per l'esperimento in esame il modello di TLD usato è TLD-100 (fluoruro di litio attivato con magnesio, titanio e concentrazione isotopica di litio naturale) dell'azienda ThermoFisher Scientific.

La caratteristica principale di questi cristalli è che, se esposti a radiazioni ionizzanti e successivamente riscaldati a temperature sopra i 100 °C, emettono radiazione elettromagnetica prevalentemente nella regione visibile dello spettro; questo fenomeno è denominato termoluminescenza (TL). La termoluminescenza si manifesta solo per solidi isolanti, perché hanno una struttura elettronica a bande tale da consentirne il fenomeno.

L'utilizzo dei dosimetri richiede diversi passaggi: in una prima fase, è stato utilizzato un forno (TLD Annealing Oven) dell'azienda RadPro (fig.10) Per controllare il processo di annealing, il forno è connesso ad un computer interfacciato con il software Thermosoft. La temperatura del forno viene aumentata linearmente fino al raggiungimento dei 400°C, tale valore viene mantenuto costante per un'ora realizzando ciò che viene definito un annealing ad elevata temperatura; segue poi, in modo del tutto analogo, un annealing a bassa temperatura funzionale allo svuotamento e stabilizzazione delle trappole più superficiali e realizzato mantenendo i TLD alla temperatura costante di 100°C per 2 ore. Successivamente i TLD vengono posti in un contenitore schermante realizzato in piombo per evitare eventuali irraggiamenti indesiderati prima dell'effettivo utilizzo [5].

Se il cristallo viene poi esposto ad una radiazione ionizzante (come la radiazione gamma), possiamo poi attraverso un lettore ricavare la dose di radiazione nell'ambiente. Quindi in una seconda fase, sono stati posti i dosimetri nelle abitazioni per rilevare la radiazione gamma.

Successivamente i dosimetri sono stati portati in laboratorio per analizzare i risultati attraverso il lettore. Il lettore utilizzato è il lettore ThermoFisher Scientific™ Harshaw TLD™ Model 3500 Manual Reader dell'azienda Harshaw Chemical Company (fig.11). Il lettore è interfacciato con il software WinREMS™. Il lettore dispone di un piccolo cassetto metallico dove è possibile posizionare e analizzare un TLD per volta, un sistema di riscaldamento lineare e programmabile, e tubi fotomoltiplicatori.

Come primo passaggio è stato aperto il cassetto a metà per il calcolo del rumore dei tubi fotomoltiplicatori (rumore di fondo). Successivamente, con il cassetto aperto completamente è stato misurato il segnale di reference light.



fig.10. TLD Annealing Oven



fig.11. lettore ThermoFisher ScientificTM Harshaw (

Se il cristallo viene riscaldato con continuità e si rappresenta la dipendenza funzionale dell'intensità luminosa emessa dal cristallo in funzione della temperatura, si ottiene una curva detta curva di luminescenza o glow-curve. L'integrale dell'intensità (I) della luce emessa durante il riscaldamento fornisce una grandezza proporzionale alla dose assorbita (D) dal TLD (in nC). Ogni TLD restituisce un valore di carica che è legato alla dose secondo un fattore di calibrazione (noto a priori). Il fattore di calibrazione è ottenuto esponendo ogni TLD ad una dose nota secondo le formule

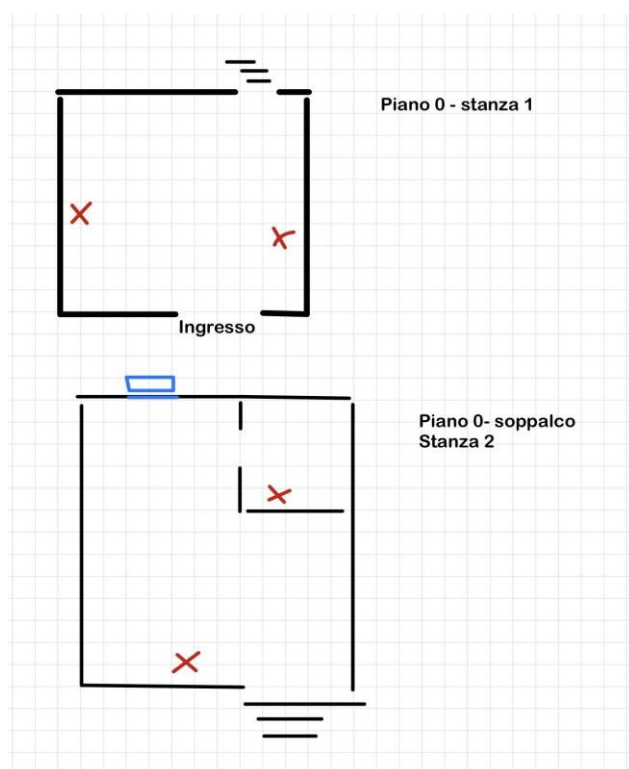
$$\frac{\int IdI}{D} = \alpha \left[\frac{nC}{mGy} \right] \Rightarrow D = \frac{\int IdI}{\alpha}$$

Dove α è il fattore di calibrazione e D la dose.

Dopo aver ricavato la carica in nC tramite il software, il valore di carica va corretto perché ogni TLD (seppur dello stesso modello) può avere una risposta diversa anche alla stessa radiazione. Questa correzione viene effettuata misurando i fattori di sensibilità, per ogni TLD. Questi fattori si stimano irraggiando un gruppo di dosimetri ad una stessa dose di radiazione e valutando per ciascuno di essi il rapporto tra la lettura di ogni TLD e la lettura media: $S_i = R_i / R_{medio}$ dove $R = \int IdI$. Siccome i TLD, anche se non esposti direttamente, riportano sempre un valore diverso dallo zero, è importante correggere tenendo conto del fondo andando a sottrarre le letture (nC): $R_{corretto} = R_i - R_{fondo}$. Di conseguenza, la dose assorbita si può calcolare come: $D = R_{corretto} / (S_i * \alpha)$. La dose annua è poi calcolata: $D_{annua} = (D * 365 \text{ giorni}) / \text{tempo di esposizione (giorni)}$.

3.2 Descrizione dell'esperimento

L'esperimento è stato condotto, in due stanze di due locali, in un palazzo costruito in tufo giallo del XV secolo nel centro storico di Napoli. Il primo locale (locale 1) in cui sono stati posizionati i rivelatori è un piano terra con due stanze (fig.12). La prima stanza si trova all'ingresso al piano terra, per la seconda stanza si accede dalla prima con un paio di scalini. Il primo locale è stato non aerato e non abitato durante tutta la durata dell'esperimento. Sono stati posizionati due rivelatori SLT nella prima stanza, e due nella seconda stanza. Ad ogni SLTs è stata abbinata una bustina contenente due TLD-100.



*fig.12.
Planimetria locale 1 -
piano 0: in blu sono
riportate le finestre e in
rosso la posizione dei
rivelatori E-PERM e TLD.*

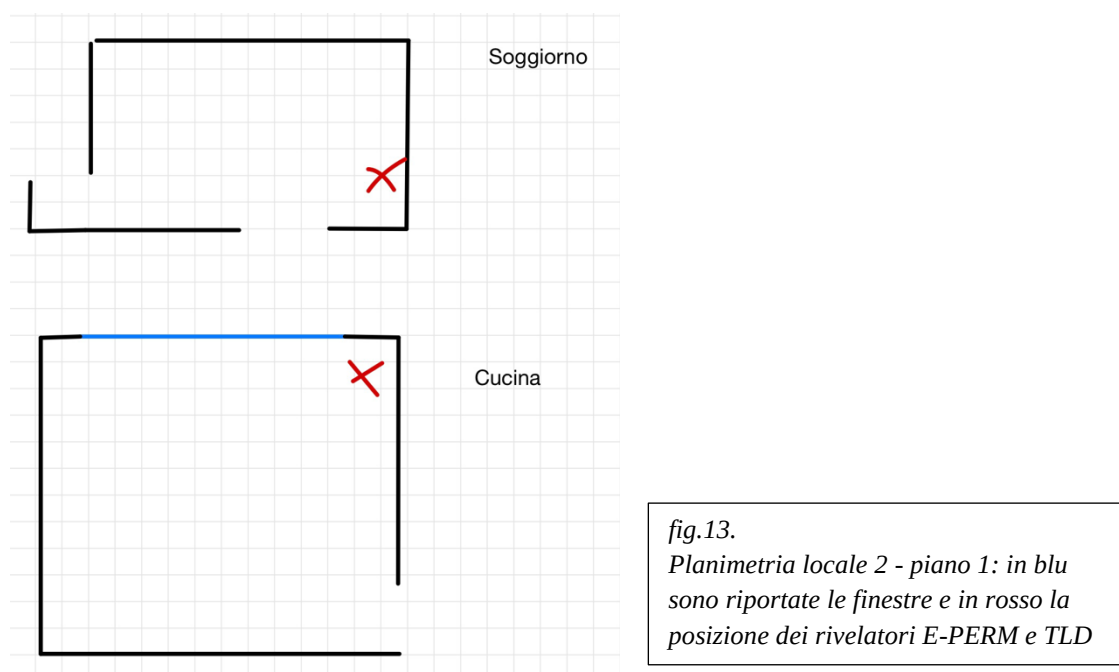
Locale 1- Piano 0 - stanza 1

- Rivelatore E-PERM LM3125 con 2 TLD-100 89 e 90
- Rivelatore E-PERM LS6266 con 2 TLD-100 16 e 95
- Superficie del locale 35 mq
- Numero di porte: 1
- Numero di finestre: 0
- Durata dell'esperimento: 45 giorni

Locale 1- Piano 0 - stanza 2

- Rivelatore E-PERM LV6044 con 2 TLD-100 85 e 87
- Rivelatore E-PERM LX4178 con 2 TLD-100 92 e 93
- Superficie del locale 35 mq
- Numero di porte: 0
- Numero di finestre: 1
- Durata dell'esperimento: 45 giorni

Il secondo locale (locale 2) in esame è situato al primo piano del palazzo: due stanze sono state analizzate (fig.13). Il locale è abitato, ed è stato aerato più ore al giorno durante la durata dell'esperimento. Sono stati posizionati n° 1 rivelatore SLT nella prima stanza (soggiorno), e n°1 rivelatore nella seconda stanza (cucina). Ad ogni SLT è stata abbinata una bustina contenente due TLD-100.



Locale 2 - Piano 1 - cucina

- Rivelatore LX4649 con 2 TLD-100 80 e 81
- Superficie del locale 14 mq
- Numero di porte: 0
- Numero di finestre : 1
- Durata dell'esperimento: 25 giorni

Locale 2 - Piano 1 - soggiorno

- Rivelatore LX4508 con 2 TLD-100 82 e 83
- Superficie del locale 10 mq
- Numero di porte: 1
- Numero di finestre: 0
- Durata dell'esperimento: 25 giorni

3.3 Risultati e discussione

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti durante l'esperimento condotto. La tabella 3 presenta le concentrazioni di attività di radon indoor misurate nelle 4 stanze monitorate dei due locali (piano 0 e piano 1) selezionati del palazzo in tufo del XV secolo nel centro storico di Napoli.

tabella 3: concentrazione di attività di radon indoor (Bq/m³): (a) nelle due stanze (stanza 1 e stanza 2) del locale 1 posto al piano 0, (b) nelle due stanze (soggiorno e cucina) del locale 2 posto al piano 1

(a) Locale 1 (piano 0)

	concentrazione di attività di radon (Bq/m ³)	incertezza (Bq/m ³)
stanza 1-LS6266	1187	62
stanza 1-LM3125	1256	66
stanza 2-LX4178	1615	84
stanza 2- LV6044	1622	84

(b) Locale 2 (piano 1)

	concentrazione di attività di radon (Bq/m ³)	incertezza (Bq/m ³)
soggiorno-LX4508	308	21
cucina-LX4649	502	30

La tabella 4 presenta le dosi assorbite dai TLDs durante il tempo di esposizione nelle 4 stanze monitorate dei due locali (piano 0 e piano 1) selezionati del palazzo in tufo del XV secolo nel centro storico di Napoli. Inoltre la dose media assorbita annua per ogni locale analizzato è anche riportata.

tabella 4: dose assorbita dai TLDs posizionati: (a) nelle due stanze (stanza 1 e stanza 2) del locale 1 posto al piano 0, (b) nelle due stanze (soggiorno e cucina) del locale 2 posto al piano 1

(a) Locale 1 (piano 0)

TLD-100	Dose assorbita (mGy)
stanza 1-95	0,340
stanza 1-16	0,265
stanza 1-89	0,190
stanza 1-90	0,281
stanza 2-93	0,384
stanza 2-92	0,193
stanza 2-87	0,291
stanze 2-85	0,479

Dose media assorbita annua (mGy/anno)
2,51

(b) Locale 2 (piano 1)

TLD-100	D (mGy)
cucina-80	0,084
cucina-81	0,008
soggiorno-82	0,062
soggiorno-83	0,046

Dose annua assorbita (mGy/anno)
0,73

Per stimare la dose efficace annua di radon indoor, ci si è riferiti al decreto legislativo 101 del 2020 [2], tramite la seguente formula:

$$D \left(\frac{mSv}{anno} \right) = conc. radon \left(\frac{Bq}{m^3} \right) * 7000 (h) * (6,7 * 10^{-9} \frac{Sv}{Bq h m^{-3}})$$

dove 7000 ore il fattore di occupazione indoor annuo di una persona (19 ore al giorno) [6].

I risultati di dose efficace annua di radon indoor ottenuti, mediati per stanza e per locale, sono riportati di seguito nella tabella 5 e tabella 6 rispettivamente.

tabella 5: dose efficace annua di radon indoor (mSv/anno): (a) nelle due stanze (stanza 1 e stanza 2) del locale 1 posto al piano 0, (b) nelle due stanze (soggiorno e cucina) del locale 2 posto al piano 1

		<i>Dose efficace annua di radon indoor (mSv/anno)</i>
(a)	stanza 1- piano 0	57
	stanza 2- piano 0	76
(b)	soggiorno-piano 1	14
	cucina- piano 1	24

tabella 6: dose efficace annua di radon indoor (mSv/anno): (a) nel locale 1 posto al piano 0, (b) nel locale 2 posto al piano 1

		<i>Dose efficace annua di radon indoor (mSv/anno)</i>
(a)	locale 1 – piano 0	66
	locale 2 - piano 1	19

Per stimare la dose efficace annua di radiazione gamma indoor, si è moltiplicato i risultati della dose media assorbita annua della tabella 4, per il fattore di qualità W_R dei fotoni che è pari a 1 [2,3] (vedi capitolo 2.4, tabella 1); tali valori sono poi stati moltiplicati per il fattore di peso W_T per il corpo intero che è pari a 1 (vedi capitolo 2.4, tabella 2). I risultati ottenuti per locale, sono riportati di seguito nella tabella 7.

tabella 7: dose media efficace annua di radiazione gamma indoor: (a) nel locale 1 posto al piano 0, (b) nel locale 2 posto al piano 1

(a) Locale 1 - Piano 0	2,51 mSv/anno
(b) Locale 2 - Piano 1	0,73 mSv/anno

I risultati ottenuti nella tabella 3 evidenziano come tutte concentrazioni di attività di radon indoor superano il livello di riferimento di 300 Bq/m³ stabilito dal D.lgs 101/2020 [2]. Da tali valori si ottengono valori elevati di dose efficace annua di radon indoor (vedi tabelle 5 e 6), con valori medi di 66 mSv/anno al locale 2 posto al 1 piano e 19mSv/anno al locale 1 posto al piano 0. Dalla letteratura, questi valori di dose media efficace annua di radon indoor superano la media italiana stimata in 1,2 mSv/anno [7]. Secondo la Summary of ICRP Recommendations on Radon [8], i valori di dose media efficace annua di radon indoor trovati in questo lavoro sono superiori al valore di 14 mSv/anno, quest'ultimo calcolato sul livello di riferimento di 300 Bq/m³ nelle abitazioni [2]. Il locale 1 analizzato (fig. 12) è un piano terra ed è stato chiuso e non aerato durante tutta la durata dell'esperimento. Pertanto, la vicinanza al suolo e il mancato ricambio d'aria hanno favorito un'alta concentrazione di attività di radon nell'abitazione, e quindi l'elevato valore medio di dose efficace annua di radon indoor. Al contrario, nel locale 2 situato al primo piano (fig.13) la concentrazione di attività di radon risulta notevolmente minore rispetto al locale 1: la maggiore distanza dal suolo e il continuo ricambio d'aria, hanno influito sulla minore concentrazione di attività di radon nell'abitazione, e quindi di dose efficace. Il tufo giallo, utilizzato come materiale da costruzione, è uno dei materiali che contribuisce alle elevate concentrazioni di attività di radon indoor, grazie alla sua porosità che favorisce la fuoriuscita di radon dal materiale vulcanico [1]. Tale esperimento ha evidenziato come, dal punto di vista sanitario, il primo rimedio efficace per abbattere i livelli di concentrazione di attività di radon in ambienti indoor è proprio l'aumento dell'aerazione, per tutelare la salute degli abitanti.

I valori di dose efficace annua di radiazione gamma indoor (tabella 7) risultano maggiori della media italiana, stimata in 0,4 mSv/anno [7]. La locazione ed il materiale da costruzione utilizzato nei locali monitorati influiscono su tali valori, cioè il suolo Napoletano di origine vulcanica ed il tufo giallo come materiale da costruzione. In particolare, si evince la differenza dei valori nel locale 1 e 2 dello stesso edificio, con valore più elevato nel locale 1 dovuto alla vicinanza al suolo ed il contributo del tufo giallo, diversamente dal locale 2 dove il contributo del materiale tufo influisce sul valore di dose efficace annua di radiazione gamma indoor.

Conclusioni

Questo lavoro di tesi ha riguardato la misura delle concentrazioni di attività di radon indoor e la stima della dose efficace annua indoor di radon e della radiazione gamma indoor in un palazzo in tufo giallo del XV secolo nel centro storico di Napoli.

Le concentrazioni di attività di radon in alcuni locali del palazzo in esame sono stati misurati tramite rivelatori E-PERM, abbinati a rivelatori TLD. Le misure sono state effettuate al piano terra del palazzo in un locale non abitato e non aerato, ed in un secondo locale situato al primo piano del palazzo, ma in questo caso abitato e aerato. Il periodo di misurazione è stato Dicembre 2022 – Aprile 2023.

Nel locale al piano terra la concentrazione media di attività di radon rilevata è stata di 1420 Bq/m³ (dose efficace annua di 66 mSv/anno) e la dose efficace annua di radiazione gamma è stata di 2,51 mSv/anno.

Nel secondo locale al piano primo è stata trovata una concentrazione media di attività di radon di 405 Bq/m³ (dose efficace annua di 19 mSv/anno) e una di dose efficace annua di radiazione gamma annua di 0,73 mSv/anno.

Le concentrazioni di attività di radon riscontrate superano il livello di riferimento imposto dalla normativa vigente, il D.lgs 101/2020, a 300 Bq/m³. I valori di dose efficace annua di radon indoor superano la media italiana di 1,2 mSv/anno. Il tufo giallo, di origine vulcanica, utilizzato come materiale da costruzione influenza la fuoriuscita di radon in ambienti chiusi. La differenza tra i valori riscontrati nei due locali, seppur nello stesso palazzo, è da imputare al diverso livello dal suolo in cui si trovano le due abitazioni, e principalmente al ricambio d'aria nelle stanze del locale posto al primo piano. Quest'ultima è una condizione fondamentale per la fuoriuscita del radon dagli ambienti chiusi: infatti il primo rimedio, efficace e soprattutto economico ed immediato da attuare, per abbattere i livelli di concentrazione di attività di radon in ambienti indoor è proprio l'aumento dell'aerazione aumentando il tempo di apertura delle finestre verso l'esterno.

La dose efficace annua di radiazione gamma indoor in entrambi i locali del palazzo supera la media italiana di 0,4 mSv/anno. Tale differenza è da imputare alla composizione del suolo napoletano e al tufo giallo, entrambi di natura vulcanica, fonte di radiazione gamma.

Tale lavoro di tesi ha permesso di stimare la dose annua di esposizione indoor alla radioattività naturale in un palazzo tipo, costruito in tufo, nel centro storico di Napoli.

Bibliografia

- [1] C. Sabbarese, F. Ambrosino, A. D’Onofrio, V. Roca. 2020 Radiological characterization of natural building materials from the Campania region (Southern Italy). *Costr. Build. Mater.* 268, 121087
- [2] D.lgs 101/2020, Decreto Legislativo n. 101 del 31 Luglio. Attuazione della direttiva 2013/59/Euratom che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall’esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le Direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom E 2003/122/Euratom e riordino della normative di settore in attuazione dell’articolo 20, comma 1, lettera A, della Legge 4 Ottobre 2019, n. 177; *Gazz. Uff. N.201*: Roma, Italy (2020)
- [3] ICRP 2017. The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP publication 103. *Ann. ICRP*, 37 (2-4) (2007)
- [4] P. Kotrappa, J.C. Dempsey, R.W. Ramsey, L.R. Stieff. 1990. A practical E-PERM (Electret Passive Environmental radon Monitor) System for Indoor ^{222}Rn Measurement. *Health Phys.* 58, 461–467
- [5] V. D’Avino, F. Ambrosino, R. Bedogni, A.I.C. Campoy, G. La Verde, S. Vernetto, C.F. Vigorito, M. Pugliese. 2022. Characterization of Thermoluminescent Dosimeters for Neutron Dosimetry at High Altitudes. *Sensors*, 22(15), 5721
- [6] ICRP 2007. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP publication 137. *Ann. ICRP*, 46 (3/4) (2017)
- [7] M. Quarto, M. Pugliese, F.Loffredo, V. Roca. 2016. Indoor radon concentration and gamma dose rate in dwellings of the Province of Naples, South Italy, and estimation of the effective dose to the inhabitants. *Radioprotection* 51(1), 31-36
- [8] ICRP ref 4836-9756-8598 del 2018: ‘Summary of ICRP Recommendations on Radon’.

Ringraziamenti

Ringrazio la professoressa Pugliese per avermi dato la possibilità di fare un'esperienza nel suo ambito, per la sua disponibilità e cordialità e per avermi guidata in questo lavoro di tesi.

Ringrazio Fabrizio Ambrosino e Francesco Manna per la loro disponibilità e il loro prezioso aiuto.

Ringrazio Tullio, Carmine e Rossana, per aver creduto in questo progetto. Senza di voi questo lavoro non sarebbe stato possibile.

Ringrazio Chiara per il suo supporto e i suoi consigli. Sei stata la mia migliore amica in questo percorso.

Ringrazio Sabrina, per la sua gentilezza e la sua pazienza. Ci sei sempre stata quando avevo bisogno di chiedere aiuto. Sei una persona speciale.

Ringrazio Annalisa, per le ore di studio insieme, i suoi consigli e il suo incoraggiamento.

Ringrazio i miei genitori perché hanno sempre creduto in me, e in particolare papà che mi ha sempre stimolata alla scienza.

Ringrazio mio fratello, per tutto quello che fa per me e per il mio studio. Insieme siamo una squadra.

Ringrazio mia nonna Maria, perché i mesi che ho passato con lei sono stati bellissimi. Senza il suo amore e il suo supporto questo traguardo non sarebbe stato possibile.

E infine ringrazio Lorenzo, che ha vissuto intensamente con me l'ultimo (e difficile) anno di questo percorso. Non dimenticherò mai tutto quello che hai fatto per me, e come hai reso semplice il dover mettere lo studio al primo posto. Voglio condividere tutti i miei traguardi con te, ti amo.