



ENEA

ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E L'AMBIENTE



IT0700209

ISSN/0393-3016

IL RADON E LA SUA MISURAZIONE

SILVIA PENZO

*ENEA - Grande Servizio Paese, Protezione dalle Radiazioni Ionizzanti
Centro Ricerche "Ezio Clementel", Bologna*

RT/2006/3/ION



ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E L'AMBIENTE

IL RADON E LA SUA MISURAZIONE

SILVIA PENZO

ENEA - Grande Servizio Paese, Protezione dalle Radiazioni Ionizzanti
Centro Ricerche "Ezio Clementel", Bologna

RT/2006/3/ION

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Ente.

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

IL RADON E LA SUA MISURAZIONE

SILVIA PENZO

Riassunto

Il presente lavoro passa in rassegna diverse delle problematiche connesse con la presenza del radon e con la sua misurazione. La prima parte tratta gli aspetti generali del radon: dalla scoperta dal punto di vista storico, ai meccanismi di formazione all'interno delle rocce, dai fenomeni che determinano il trasporto in atmosfera, alle modalità di ingresso negli edifici. Viene presentata la distribuzione delle concentrazioni di radon nelle diverse regioni italiane, confrontata con il valore di concentrazione media mondiale. Un ruolo importante viene dato alla presentazione della normativa italiana relativa alla radioprotezione dalle radiazioni ionizzanti di origine naturale. Viene quindi riportata la situazione europea, riguardo sia i luoghi di lavoro che le abitazioni, in particolare indicando le differenze tra i livelli d'azione nazionali per l'esposizione al radon, e la tipologia dei luoghi di lavoro soggetti al controllo.

Nel capitolo 3 si passa alla descrizione e all'analisi dei diversi metodi e strumenti per la misurazione della concentrazione del radon e dei suoi prodotti di decadimento, per passare poi alle procedure operative per la corretta misurazione della concentrazione di radon secondo le linee guida del Coordinamento delle Regioni e delle Province autonome di Trento e Bolzano, documento di riferimento a livello nazionale e gli organismi più autorevoli in campo internazionale (protocollo inglese HPA e protocollo americano EPA), sia per i luoghi di lavoro che per le abitazioni. Come esempio tipico di strumento per la misurazione del radon viene descritto il dispositivo passivo a tracce progettato e realizzato dal Servizio Radon dell'Istituto di Radioprotezione dell'ENEA.

L'Allegato 1 è interamente dedicato alle azioni di rimedio necessarie per ridurre la concentrazione di radon, sia nel caso di edifici esistenti che da costruire, mentre l'allegato 2 riporta le principali grandezze relative al radon e alla radioprotezione.

Parole chiave: Radon, prodotti di decadimento del radon, radon indoor, normativa, misurazione del radon, rischio.

Summary

The work reviews the topics concerning the problem of the indoor radon and its measurement. The initial stage deals with the general features of radon, from the historical remarks about its discovery to the formation mechanisms in the soil, then passing to describe the transport processes that lead the radon to enter into the buildings. The mean radon concentration distribution among the Italian regions is reported and compared with the situation in the other countries of the world. A particular importance is given to present the national law concerning the radioprotection from the natural sources of ionizing radiations; a paragraph is completely devoted to this argument and to discuss the differences between the Italian approach and the regulations applied in the rest of Europe for both workplaces and dwellings.

Chapter 3 describes the different detectors and methods to measure the radon and its short mean live decay products concentrations, together with the operative procedures and guides provided by the Italian law and by the international bodies. As an example of typical radon passive measurement device, the new ENEA detector developed at the Institute of Radioprotection is presented and discussed.

Appendix 1 is entirely devoted to discuss the main remedial actions for decreasing the radon indoor concentration both for old and new buildings; appendix 2 reports the main quantities related to radon and radioprotection.

Keywords: Radon, radon decay products, indoor radon, law, radon measurement, radon risk.

INDICE

1. INTRODUZIONE	7
2. IL RADON	9
2.1 La storia del radon	9
2.2 La radioattività naturale	10
2.3 La formazione del radon	14
2.4 Il radon indoor	15
2.5 Modalità di risalita del radon negli edifici	16
2.5.1 Depressione	16
2.5.2 Infiltrazione	16
2.6 Azioni di rimedio	16
2.6.1 Strategie di intervento	16
2.7 La situazione italiana	17
2.8 Il quadro normativo nazionale ed europeo	18
2.8.1 Luoghi di lavoro	18
2.8.2 Abitazioni	19
2.9 Valutazione del rischio da esposizione al radon	21
3. LA MISURAZIONE DEL RADON E DEI SUOI PRODOTTI DI DECADIMENTO	23
3.1 Metodi di misurazione della concentrazione di radon in aria	23
3.2 Strumenti per la misura istantanea e continua	23
3.2.1 Camere a ionizzazione	23
3.2.2 Celle a scintillazione (o celle di Lucas)	24
3.2.3 Metodo dei due filtri	24
3.3 Strumenti passivi ad integrazione	25
3.3.1 Rivelatori di tracce nucleari a stato solido (Solid State Nuclear Track Detectors)	25
3.3.2 Camera a ionizzazione ad Elettret	27
3.3.3 Rivelatori a carbone attivo	28
3.4 Metodi di misurazione della concentrazione dei prodotti di decadimento del radon	30
3.4.1 Tecnica a un conteggio	30
3.4.2 Tecnica a due conteggi	31
3.4.3 Tecnica a tre conteggi	31

3.4.3.1 Conteggio alfa totale	31
3.4.3.2 Spettrometria alfa	32
3.5 Normativa per la misurazione del radon nei luoghi di lavoro	33
3.5.1 La normativa italiana	33
3.5.1.1 Le linee guida del Coordinamento delle Regioni e delle Province autonome di Trento e Bolzano	34
3.5.2 La normativa internazionale	35
3.5.2.1 Il protocollo inglese	35
3.5.2.2 Il protocollo americano	36
3.6 Normativa per la misurazione del radon nelle abitazioni	36
3.6.1 Il protocollo inglese	36
3.6.2 Il protocollo americano	37
3.7 Progettazione e realizzazione di un dispositivo di campionamento passivo a tracce per la misurazione del radon	38
3.7.1 Il DPT ENEA-IRP	39
4. CONCLUSIONI	44
BIBLIOGRAFIA	45
ALLEGATO 1. AZIONI DI RIMEDIO	47
ALLEGATO 2. GRANDEZZE E UNITÀ DI MISURA RELATIVE AL RADON E AI SUOI PRODOTTI DI DECADIMENTO	54

1. INTRODUZIONE

Il radon è un gas radioattivo naturale inodore e incolore e costituisce la principale sorgente di esposizione alle radiazioni per la popolazione. E' prodotto dal decadimento radioattivo del ^{226}Ra , uno degli elementi radioattivi naturali esistenti sulla terra appartenente alla catena radioattiva con capostipite il ^{238}U . L'uranio, è distribuito ubiquitariamente nella crosta terrestre, con concentrazioni che variano da luogo a luogo. Gli stessi materiali da costruzione possono contenere uranio, alcuni dei quali anche in quantità elevate (ad es. tufi, pozzolane e graniti).

Le caratteristiche geologiche del sito su cui è costruito l'edificio, l'uso di particolari materiali da costruzione e le tipologie edilizie, sono gli elementi più rilevanti ai fini della presenza del radon nelle abitazioni e nei locali confinati in genere.

E' da tempo accertata l'ipotesi di una correlazione tra esposizione al radon, ed in particolare ai suoi prodotti di decadimento, con l'incidenza di tumore polmonare. E' certa anche l'interazione del radon con altri fattori, principalmente il fumo di sigaretta: una sinergia che aumenta notevolmente i rischi di insorgenza di detta patologia.

Il radon è quindi una realtà con la quale l'intera popolazione del pianeta convive da sempre, ed i cui effetti sull'uomo, riscontrati già nel I° secolo a.C. nei minatori delle miniere dell'Europa centrale, diventano certi a metà del secolo scorso, tanto che nel 1988 l'Agenzia Internazionale di Ricerca sul Cancro dell'Organizzazione Mondiale della Sanità classifica il radon come cancerogeno di gruppo 1 e lo pone al 2° posto dopo il fumo quale causa di tumore polmonare.

Con la pubblicazione del D.Lgs. 241/2000, la normativa di radioprotezione estende il controllo dell'esposizione alle radiazioni ionizzanti di origine naturale e in particolare al radon negli ambienti lavorativi sotterranei. Si tratta di luoghi di lavoro adibiti per lo più a magazzini, depositi, ecc dove la cultura di radioprotezione è generalmente assente. La situazione dopo la pubblicazione del D.Lgs. 241/00 è la seguente: una parte del mondo produttivo è obbligata a misurare un gas radioattivo, il radon, senza una sufficiente conoscenza del problema; dall'altra parte la popolazione generale si domanda sempre più perché si effettui una misura dove si lavora e non anche dove si vive, ovvero nei luoghi in cui si passa la maggior parte del tempo.

In questo contesto l'Istituto di Radioprotezione (IRP) dell'ENEA nel 2000 ha dato il via ad un programma di ricerca finalizzato all'istituzione di un Servizio di valutazione della concentrazione di radon indoor, in modo che i soggetti interessati all'applicazione delle norme in vigore (capo III-bis, D.Lgs. 230/95 e s.m.i. - Esposizioni da attività lavorative a sorgenti naturali di radiazioni) potessero disporre in tempo utile di una struttura riconosciuta idonea per le misurazioni di cui all'articolo 10-ter, c. 4, nell'ambito delle norme di buona tecnica come indicato all'art. 107 c. 3 del medesimo D.Lgs.

Grazie alla ricerca sperimentale effettuata presso i laboratori di Montecuccolino (Bologna) il Servizio è stato in grado di presentare un nuovo dispositivo passivo per la misurazione del radon, fondato sulla tecnica dei rivelatori passivi di tracce nucleari a base di PADC (Poly Allyl Diglycol Carbonate) (CR-39).

Rispettando i tempi indicati nella norma, il Servizio ha completato la campagna di monitoraggio nei C.R. ENEA per gli ambienti lavorativi sotterranei e contemporaneamente ha raggiunto interessanti quote di mercato nei confronti di un'utenza esterna diffusa su scala nazionale.

L'attività di ricerca e sviluppo che affianca da sempre quella di routine del Servizio, ha permesso la realizzazione di un Servizio che utilizza esclusivamente dispositivi e procedure di

propria progettazione che hanno consentito di raggiungere un'alta qualità della misura con costi contenuti. Il sistema presenta un forte grado d'automazione che insieme alla sperimentata affidabilità dei componenti permette al Servizio di rafforzare le linee di ricerca sulla radioprotezione delle radiazioni ionizzanti di origine naturale, integrando le competenze di dosimetria interna presenti nell'Istituto. Tra i risultati più importanti ricordiamo gli sviluppi del dispositivo passivo a tracce del Servizio, dettati da esigenze sia di qualità che di ottimizzazione d'impiego da parte dell'utente, che hanno portato alla brevettazione di un nuovo dispositivo, che andrà nel 2006 a sostituire quello attualmente in uso.

A fianco di queste attività il Servizio Radon ha in corso attività di informazione e formazione dei lavoratori e della popolazione sui rischi dell'esposizione al radon e sulle problematiche della sua misurazione; risulta sempre più chiara, infatti, l'importanza di migliorare la diffusione dell'informazione su questi temi.

Questo lavoro si pone diversi obiettivi: da un lato intende fornire gli strumenti tecnici aggiornati e le indicazioni operative relative all'esecuzione di una corretta misurazione di radon a tutti coloro che sono coinvolti nell'applicazione della normativa italiana, con particolare riguardo ai professionisti che devono effettuare valutazioni del rischio d'esposizione al radon. In secondo luogo, tramite la presentazione più divulgativa contenuta nei primi paragrafi del capitolo 2, ci si propone di soddisfare una crescente domanda generica di maggior cultura e conoscenza del problema radon, rivolgendosi pertanto ai non tecnici. Infine si ritiene utile l'aver raccolto in un unico documento i principali aspetti che caratterizzano una corretta misurazione della concentrazione di radon e dei suoi prodotti di decadimento con indicazioni tecniche aggiornate.

2. IL RADON

2.1 La storia del radon

L'esistenza di un'alta mortalità tra i minatori delle miniere dell'Europa centrale era stata riscontrata già nel I° secolo a.C.: Tito Lucrezio Caro nella sua opera "De Rerum Natura" riporta i danni polmonari subiti da minatori a causa di "gas provenienti dal sottosuolo".

Nel 1500 G. Agricola in "De Re Metallica" descrive i danni a livello dell'apparato respiratorio nei minatori. Ipotizza che nell'aria delle miniere ci sia un tipo di polvere che corrode i polmoni. Contemporaneamente Paracelso riscontra l'alta mortalità dovuta a malattie polmonari tra i lavoratori delle miniere d'argento nella regione di Schneeberg in Sassonia (Germania).

Bisogna però aspettare la fine del 1800 per vedere identificata la maggior causa di morte nel tumore al polmone: nel 1879 infatti due medici tedeschi (Haertinge Hesse) classificano il danno come cancro polmonare.

Nel 1900 Dorn scopre il radon e lo definisce "emanazione di radio". Successivamente nel 1908 Ramsay e Gray chiamano l'emanazione di radio "niton" e ne determinano la densità, che risulta la più alta tra i gas allora conosciuti. Infine nel 1923 viene definitivamente chiamato "radon".

Nel 1924 Ludewig e Lorensen ipotizzano che il cancro al polmone sia attribuibile all'esposizione al radon. Iniziano le prime misure di radon "outdoor".

Negli anni '50 iniziano le prime campagne di misurazione "indoor": le prime misurazioni vengono eseguite in 225 abitazioni svedesi, e mettono in evidenza valori relativamente alti di concentrazione di radon, dovuti all'uso di particolari materiali da costruzione. In Italia nasce l'interesse per il radon negli ambienti di vita a partire dagli anni '70.

Nel 1950 iniziano gli studi di dosimetria polmonare che dimostrano il ruolo preminente dei prodotti di decadimento del radon rispetto al radon stesso nell'indurre il tumore al polmone, in quanto la dose impartita dai primi è molto superiore a quella impartita dal radon.

Dal punto di vista sanitario, i prodotti di decadimento del radon più significativi sono i quattro radioisotopi a vita media breve, ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po . Questi elementi hanno un tempo di dimezzamento breve (fino a trenta minuti) e, a differenza del radon, una volta formati, possono attaccarsi alle particelle di aerosol sospese nell'atmosfera ("frazione attached") o depositarsi su qualunque superficie solida ("plate out"). Solo una piccola frazione di essi rimane in forma libera ("frazione unattached"), a seconda di diversi fattori quali la concentrazione e la dimensione delle particelle di aerosol presenti nell'ambiente, la ventilazione, ecc. Quando il radon e i suoi prodotti di decadimento vengono inalati, il danno al tessuto polmonare è dovuto principalmente alle particelle α emesse dai prodotti di decadimento; l'inalazione di questi elementi avviene sotto forma di aerosol sia di piccole (particolato ultrafine) che di grandi dimensioni (frazione aerodinamica), oppure in forma libera (unattached). L'aerosol si deposita lungo l'albero respiratorio in modo non omogeneo, con una dipendenza molto importante dalla distribuzione granulometrica; nel caso dei prodotti di decadimento del radon una accentuata deposizione avviene in particolare a livello dei bronchi che vengono così irradiati ad alte dosi (con alti LET). Per queste cellule e tessuti esposti maggiormente alle radiazioni ionizzanti aumenta significativamente la probabilità di sviluppare patologie tumorali.

Il contributo alla dose al polmone dovuto esclusivamente al radon è trascurabile, in quanto il gas una volta inalato, viene pressoché completamente eliminato con l'aria espirata e la probabilità che possa decadere mentre si trova nel polmone è piuttosto bassa.

Negli anni '60 iniziano le prime indagini epidemiologiche sulle miniere di uranio, a seguito delle quali iniziano a essere emanate normative di radioprotezione. Questi studi hanno messo

in luce gli effetti sanitari dell'esposizione al radon e rivelato una stretta relazione tra esposizione al radon, e incidenza di tumore polmonare.

Nello stesso tempo si accerta l'interazione del radon con altri fattori di rischio, principalmente il fumo: una sinergia che aumenta notevolmente i rischi di insorgenza di tumore al polmone.

Nel 1977 L'UNSCEAR (Comitato Scientifico delle Nazioni Unite sugli Effetti della Radiazione Atomica) classifica il radon come principale sorgente di esposizione alle radiazioni per la popolazione mondiale (1). Nel 1988 l'Agenzia Internazionale di Ricerca sul Cancro dell'Organizzazione Mondiale della Sanità dichiara che il radon è una delle 75 sostanze cancerogene per l'uomo assieme al benzene, amianto, fumo di tabacco, ecc; in più lo identifica come cancerogeno di gruppo 1 e lo pone al 2° posto dopo il fumo quale causa di tumore polmonare.

A partire dagli anni '80 vengono pubblicati i rapporti dell'International Commission on Radiological Protection (ICRP) relativi al radon e ai suoi prodotti di decadimento: nel 1981 l'ICRP-32 (2), nel 1986 l'ICRP-50 (3), nel 1990 l'ICRP-60 (4) e nel 1993 l'ICRP-65 (5).

Nel 1996 la Direttiva 96/29/Euratom (6) stabilisce i criteri per la protezione dei lavoratori dall'esposizione alla radioattività naturale ed in particolare al radon, che viene recepita in Italia nel 2000 con la pubblicazione del D.Lgs. 241/00 (7).

2.2 La radioattività naturale

La radioattività naturale determina il maggior contributo (86%, vedi Figura 2.1 e Tabella 2.1) alla dose ricevuta dalla popolazione mondiale, con una variabilità da regione a regione, dipendente prevalentemente dalla diversa composizione del suolo.

Il maggior contributo alla radioattività naturale è dato dai radionuclidi primordiali, prodotti al momento della formazione della Terra e ancora attivi a causa del lungo tempo di dimezzamento radioattivo. Sono costituiti dai radioisotopi delle tre serie radioattive del ^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U , e dal ^{40}K .

Gli altri contributi alla radioattività naturale sono dovuti ai raggi cosmici, responsabili di circa il 16% della dose annua all'uomo, e ai radionuclidi cosmogenici, che danno un contributo trascurabile.

I raggi cosmici sono nuclei ad altissima energia (88% protoni, 11% alfa, elettroni) che si originano nello spazio galattico e interagiscono con i nuclei negli strati più alti dell'atmosfera, producendo sciame di radiazione secondaria (neutroni, pioni, X, γ ed elettroni), mentre i radionuclidi cosmogenici (^{14}C , ^3H , ^7Be , ^{22}Na) sono prodotti continuamente da reazioni nucleari tra raggi cosmici e nuclei presenti nell'atmosfera, nella litosfera e idrosfera. Essendo la loro concentrazione molto bassa, l'effetto sulla salute è trascurabile.

Gli isotopi del radon

Per radon si intende l'isotopo ^{222}Rn , appartenente alla serie radioattiva del ^{238}U (riportata in Figura 2.3).

Gli altri due isotopi del radon sono il ^{220}Rn e il ^{219}Rn , chiamati rispettivamente thoron e actinon, e appartengono alle due serie radioattive del ^{232}Th e del ^{235}U (Figure 2.4 e 2.5).

L'abbondanza del ^{232}Th nella crosta terrestre è leggermente superiore a quella del ^{238}U , ma poiché il ^{232}Th ha un tempo di dimezzamento più lungo, il rateo di produzione del ^{220}Rn è circa lo stesso di quello del ^{222}Rn .

L'abbondanza relativa in peso degli isotopi dell'Uranio è 99,28% per ^{238}U e 0,71% per ^{235}U .

Dei tre isotopi del radon, solo il ^{222}Rn ha un tempo di dimezzamento sufficientemente lungo (3,82 g) da consentire il rilascio dal suolo e dalle rocce, dove si è generato, all'atmosfera.

Il breve tempo di dimezzamento del ^{220}Rn (55,6 s) limita la distanza che può percorrere prima del decadimento, quindi la quantità di ^{220}Rn che raggiunge l'atmosfera è minore. Nelle tabelle

2.2 e 2.3 sono riportate rispettivamente le caratteristiche del decadimento del radon e del thoron.

Il ^{219}Rn , infine, può essere ignorato sia a causa del suo breve tempo di dimezzamento (4 s) che per la scarsità del ^{235}U .

In conclusione dal punto di vista di interesse radioprotezionistico risulta predominante il ^{222}Rn .

Il radon

Il radon è la principale sorgente di radioattività naturale (quasi il 50%, vedi Figura 2.2) e costituisce la prima fonte di esposizione alle radiazioni per la popolazione (8).

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 (9), circa 8 volte più denso dell'aria). Inoltre è moderatamente solubile in acqua (coefficiente di solubilità pari a 0,25 a 20°C); 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 (10).

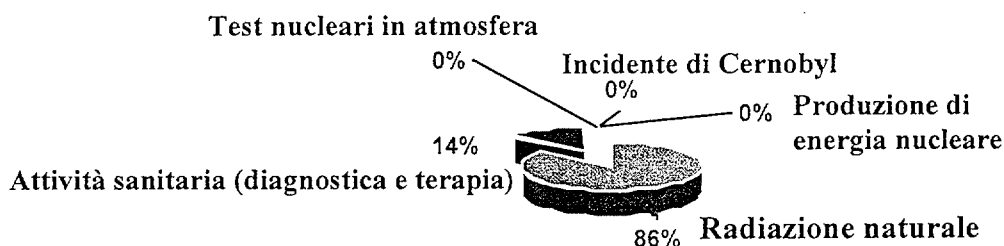


Figura 2.1 Componenti della radioattività naturale e artificiale (8)

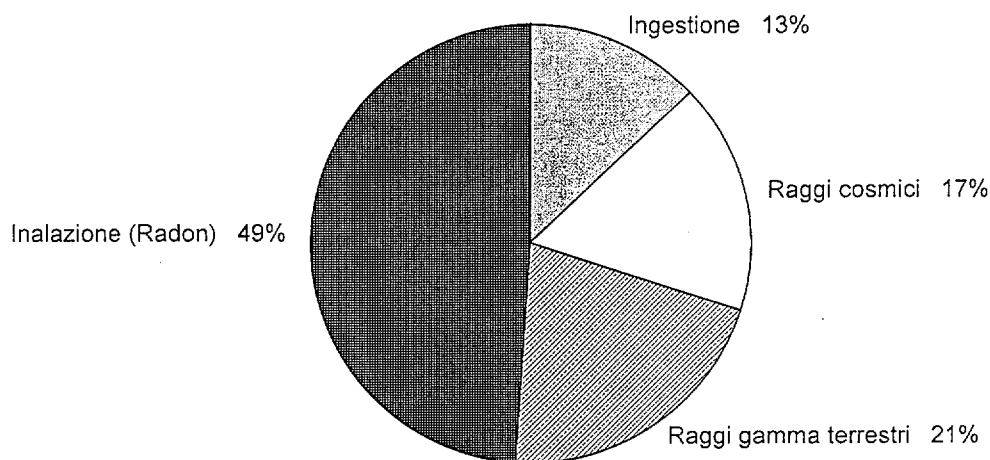


Figura 2.2 Componenti della radioattività naturale (8)

Tabella 2.1 Dosi medie da radiazioni nell'anno 2000 causate da sorgenti naturali ed artificiali, espresse in mSv (8)

Sorgente	Media mondiale di dose efficace annuale (mSv)
Fondo naturale	2,4
Esami medici diagnostici	0,4
Test nucleari in atmosfera	0,005
Incidente di Chernobyl	0,002
Produzione di energia nucleare	0,002

Tabella 2.2 Caratteristiche del radon e dei suoi prodotti di decadimento a vita media breve (5)

Radio-nuclide	$T_{1/2}$	α		β		γ	
		Energia (MeV)	Resa d'emissione (%)	Energia max (MeV)	Resa d'emissione (%)	Energia (MeV)	Resa d'emissione (%)
^{222}Rn	3,8235 d	5,48948	99,920	-	-	-	-
^{218}Po	3,10min	6,00235	99,9789	-	-	-	-
^{214}Pb	26,8 min	-	-	1,02	6	0,35	37
				0,70	42	0,30	19
				0,65	48	0,24	8
^{214}Bi	19,9 min	-	-	3,27	18	0,61	46
				1,54	18	1,77	16
				1,51	18	1,12	15
^{214}Po	164,3 μs	7,68682	100	-	-	-	-

Tabella 2.3 Caratteristiche del thoron e dei suoi prodotti di decadimento (11)

Radionuclide	$T_{1/2}$	Tipo di decadimento	Energia (MeV)	Resa d'emissione (%)
^{220}Rn	55,6 s	alfa	6,29	100
^{216}Po	0,15 s	alfa	6,78	100
^{212}Pb	10,64 h	Beta, gamma		
^{212}Bi	60,55 min	Beta, gamma		
^{212}Po	304 ns	alfa	8,785	100

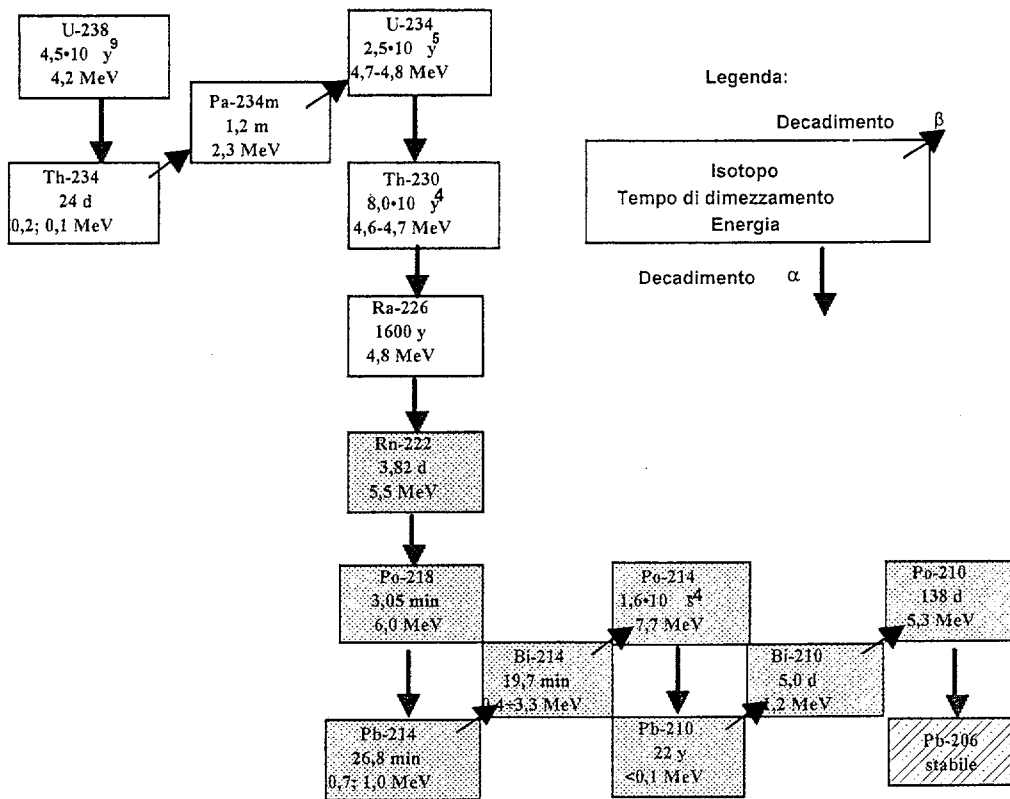


Figura 2.3 Schema di decadimento del ²³⁸U (11)

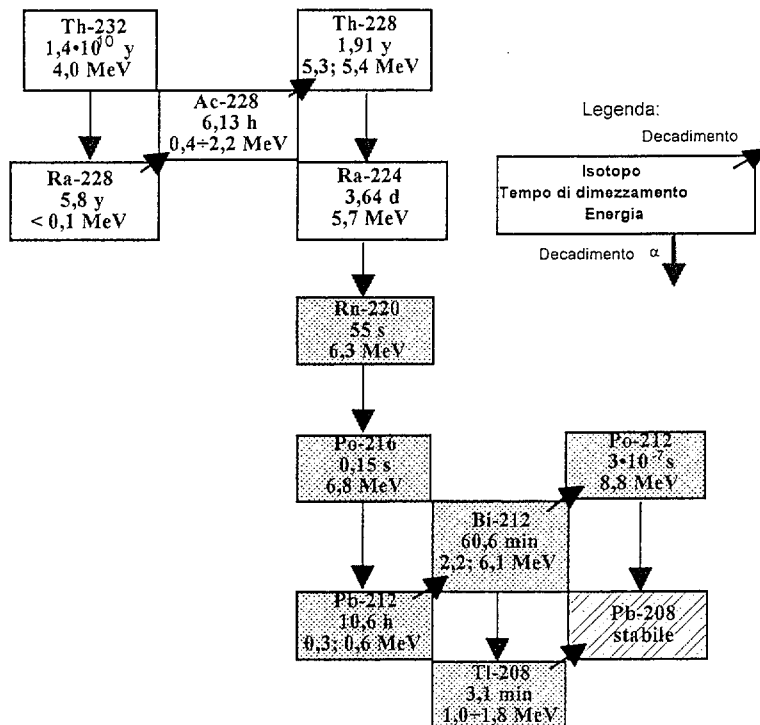


Figura 2.4 Schema di decadimento del ²³²Th (11)

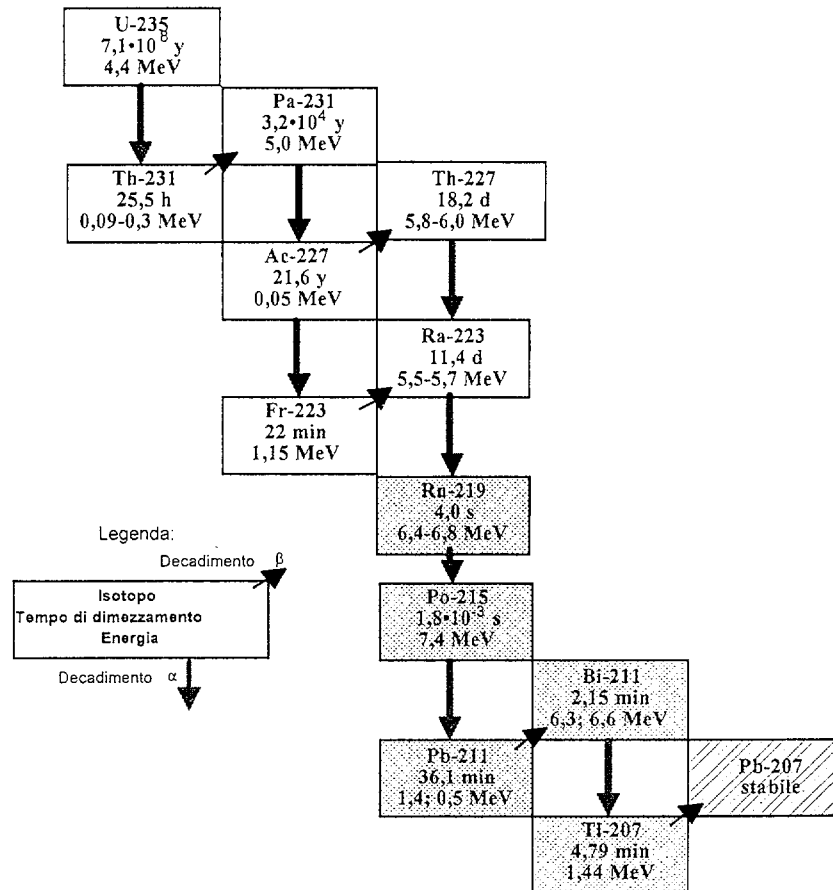


Figura 2.5 Schema di decadimento del ^{235}U (11)

2.3 La formazione del radon

Il radon si forma nel suolo in seguito al decadimento del ^{226}Ra . 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 radon si riscontrano però solo dove il radon riesce a fuoriuscire dal reticolo cristallino dei minerali che lo contengono. Durante il decadimento del ^{226}Ra viene emessa una particella α 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. Come si è detto, infatti, il radon è moderatamente solubile in acqua (tanto più quanto minore è la temperatura dell'acqua); pertanto può trovarsi in soluzione nelle acque che scorrono tra le rocce ed i sedimenti sabbiosi ed essere trasportato da esse.

Il trasporto del radon

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 lo spostamento del radon su distanze dell'ordine dei centimetri o al massimo 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, oltre al contenuto d'acqua presente negli spazi intergranulari. Ad esempio in corrispondenza di rocce fratturate (quindi permeabili), o di terreni ghiaiosi (quindi porosi) si ritrovano alte concentrazioni di radon mentre terreni alluvionali compatti (argille) sono associati a basse concentrazioni di radon. Le zone in corrispondenza di fratture geologiche e faglie sono solitamente caratterizzate da concentrazioni elevate di uranio in quanto questo viene facilmente rimosso dagli strati profondi e trasportato negli strati superiori del suolo.

Mentre nel suolo le concentrazioni di radon possono essere molto elevate (anche fino a dei MBq/m^3 (10)), all'aperto il radon si disperde rapidamente (normalmente la concentrazione di radon outdoor è circa 10 Bq/m^3) (8).

2.4 Il radon indoor

Le principali fonti di ingresso del radon negli ambienti interni sono (vedi Figura 2.6):

- il suolo adiacente l'edificio,
- i materiali da costruzione,
- l'acqua (presente nel sottosuolo, es. attinta da pozzi artesiani).

Di queste, l'ingresso del radon tramite l'acqua si può considerare trascurabile; anche i materiali da costruzione solitamente danno un contributo trascurabile rispetto al suolo a parte particolari situazioni in cui vengono utilizzati nell'edilizia materiali che contengono elevate quantità di uranio o torio. Si può quindi affermare che l'ingresso del ^{222}Rn in un edificio avviene generalmente dal suolo sottostante; per questo motivo vengono di seguito trattate in dettaglio solo le modalità di ingresso del radon dal suolo.

La quantità di aria disponibile per la diluizione in un ambiente confinato è minore di quella disponibile all'esterno, quindi i livelli di radon indoor sono tipicamente molto maggiori di quelli che si trovano all'esterno ("outdoor").

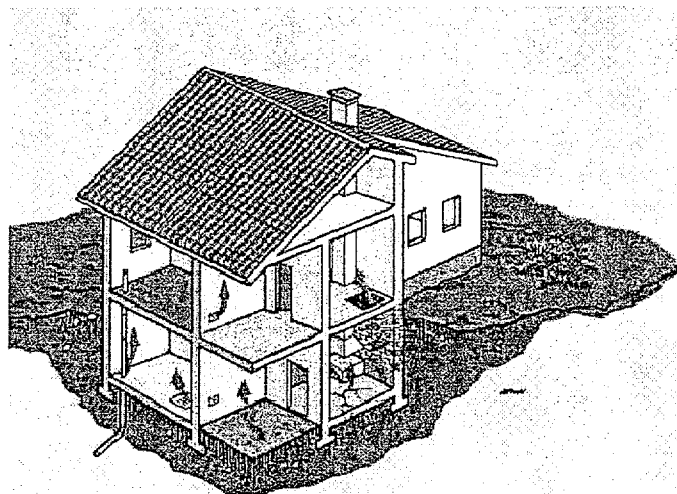


Figura 2.6 Vie d'ingresso del radon in un edificio

2.5 Modalità di risalita del radon negli edifici

2.5.1 *Depressione*

La depressione esistente tra i locali abitati e il suolo è la causa principale dell'ingresso del radon all'interno degli edifici. Essa è indotta in primo luogo dalla differenza di temperatura tra l'edificio e il suolo, e risente delle aperture come camini, finestre, lucernari, nonché da impianti di aspirazione delle cucine, bagni ecc. che provocano un tiraggio aggiuntivo a quello dovuto alla semplice differenza di temperatura.

Gli effetti di questa depressione si traducono nell'aspirazione dell'aria dal suolo e con essa del radon contenuto (*effetto camino*).

I principali fattori che producono una differenza di pressione tra suolo ed edificio sono:

- la differenza di temperatura, che produce un gradiente di pressione dal basso verso l'alto. In conseguenza di questa depressione interna l'aria fredda contenente radon viene risucchiata dal terreno. Quanto più caldo è l'interno della casa e quanto più freddo è l'esterno, tanto più marcato sarà l'effetto. Normalmente la concentrazione di radon nei locali è maggiore in inverno e nelle prime ore del mattino ed è minore se il locale non è riscaldato. Tale differenza di temperatura può venire accentuata da elementi come il vano dell'ascensore o le prese d'aria.
- Il vento può aggravare notevolmente il problema del radon. Gli effetti del vento hanno un ruolo importante soprattutto nelle regioni dove i venti sono forti e costantemente presenti. In tali situazioni meteorologiche si possono determinare forti depressioni anche in funzione della posizione e dell'isolamento dell'edificio.
- La presenza di ventilatori elettrici aspiranti presenti nei vari ambienti, può aumentare la depressione se l'approvvigionamento d'aria dall'esterno risulta insufficiente.
- Il tiraggio delle canne fumarie di stufe e caminetti non dotati di una presa d'aria esterna aumenta la differenza di pressione.
- La differenza di pressione può essere accentuata anche dal deflusso di aria attraverso gli impianti di scarico domestici di lavelli, lavandini, ecc.

2.5.2 *Infiltrazione*

L'infiltrazione costituisce il secondo fattore in ordine d'importanza nel determinare l'ingresso del radon negli edifici. Essa può verificarsi in presenza di:

- crepe e giunti in pavimenti e pareti, cavedii per il passaggio di cavi, tubazioni e fognature;
- pozzetti di drenaggio o d'ispezione;
- prese di luce e altre aperture nelle pareti della cantina, camini, montacarichi, ecc.;
- zone critiche di grande estensione come pavimenti naturali in terra battuta, in ghiaia, in lastre di pietra o ciottoli;
- componenti costruttivi permeabili (solai in legno, laterizi forati, muri in pietra e simili);
- utilizzo di mattoni forati, ad esempio per le pareti della cantina.

2.6 Azioni di rimedio

2.6.1 *Strategie d'intervento*

Le azioni per ridurre la concentrazione di radon indoor sono principalmente orientate a limitare l'ingresso del radon dal suolo.

I metodi più efficaci e più usati sono i seguenti:

- depressurizzazione del suolo;
- ventilazione del vespaio;
- sigillatura delle vie d'ingresso;
- pressurizzazione dell'edificio.

E' possibile, inoltre, ridurre la concentrazione di radon dopo il suo ingresso all'interno dell'edificio tramite:

- la diluizione per mezzo della ventilazione forzata;
- la filtrazione dell'aria.

La scelta dei metodi d'intervento differisce a seconda che si voglia proteggere un edificio nuovo o risanare un edificio esistente.

Per una descrizione dettagliata, si rimanda all'Allegato 1, in cui sono raccolte le esperienze dell'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente di Bolzano (10) e dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia (12).

2.7 La situazione italiana

La concentrazione di radon è stata misurata in oltre 11000 abitazioni italiane, nell'ambito di diverse campagne di misura su scala nazionale e regionale. La stima dei valori rappresentativi nazionali si basa principalmente sui risultati dell'*indagine nazionale sull'esposizione della popolazione italiana alla radioattività naturale nelle abitazioni* (13). In questa indagine, effettuata su un campione di oltre 5000 abitazioni, la media nazionale pesata per la popolazione è risultata di 70 Bq/m^3 ; per confronto si noti come la concentrazione media mondiale di radon sia stata stimata pari a 40 Bq/m^3 (1, 8).

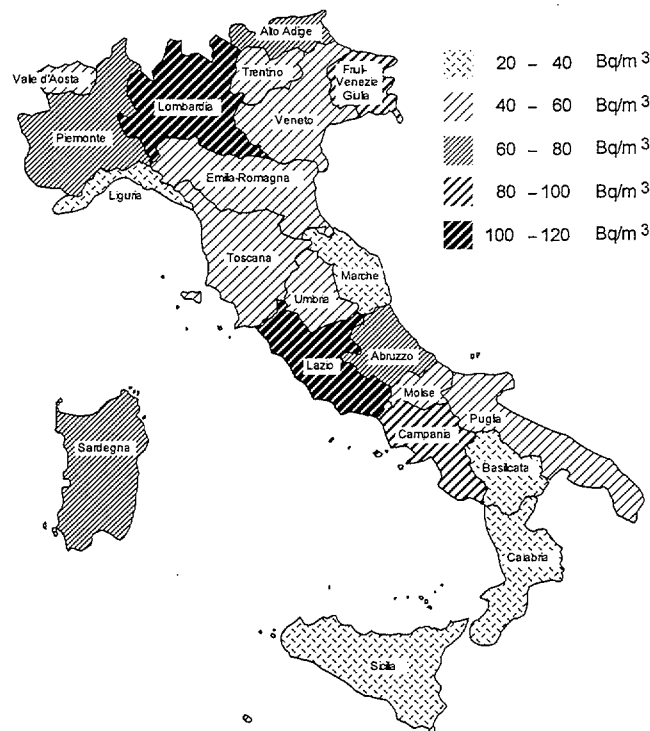


Figura 2.7 Mappa dei valori medi regionali di concentrazione di radon nelle abitazioni italiane, ottenuta nell'ambito dell'Indagine nazionale sulla radioattività naturale nelle abitazioni" (13)

In Figura 2.7 è riportata la situazione italiana in cui sono indicati i valori medi regionali ottenuti nell'ambito dell'indagine nazionale. Come si vede, nell'ambito delle regioni italiane esiste una situazione molto diversificata: si passa da concentrazioni medie di 20-40 Bq/m³ presenti in Liguria, Marche e Basilicata a valori di 120 Bq/m³ tipici di Campania, Lazio, Lombardia e Friuli Venezia Giulia.

2.8 Il quadro normativo nazionale ed europeo

2.8.1 Luoghi di lavoro

Nel 1996 l'Unione Europea, con la direttiva 96/29/EURATOM (6) ha stabilito i criteri per la protezione dei lavoratori e della popolazione dall'esposizione alla radioattività naturale e al radon in particolare. Tale direttiva è stata recepita in Italia il 31 agosto 2000 con il D.Lgs. 241/00 (7), che modifica e integra il precedente D.Lgs. 230/95. Tra le novità da sottolineare l'introduzione del Capo III-bis, che tratta l'esposizione dei lavoratori a sorgenti naturali di radiazioni.

Le attività lavorative oggetto della norma sono:

- a) attività che si svolgono in luoghi di lavoro sotterranei (compresi tunnel, sottovie, catacombe e grotte)
- b) attività che si svolgono in zone ad alta concentrazione di radon ("prone area"),
- c) attività che utilizzano materiali che contengono radionuclidi naturali,
- d) attività che producono rifiuti di lavorazione contenenti radionuclidi naturali,
- e) attività termali e miniere non uranifere,
- f) attività lavorative su aerei per quanto riguarda il personale navigante.

Il D.Lgs. 241/00 non si applica all'esposizione al radon nelle abitazioni, al fondo naturale di radiazioni dovuto ai radionuclidi presenti nell'organismo umano, all'esposizione esterna ai raggi cosmici e a quella proveniente dal terreno non perturbato; inoltre sono escluse le operazioni di aratura, di scavo o di riempimento effettuate nel corso di attività agricole o di costruzione. L'esclusione riguarda quindi anche la fase di costruzione di tunnel (art.2, comma c).

Limiti temporali di applicazione e livelli d'azione

Per la prima tipologia di attività (a), l'esercente ha 24 mesi di tempo, a partire dal 1/03/2002 (o dall'inizio dell'attività se successiva) per misurare la concentrazione media annuale di radon; mentre per i luoghi di lavoro situati nelle prone area (b) ha tempo fino al 31/8/2007.

Per le prime due tipologie di attività (nelle quali il radon costituisce la principale fonte di radioattività naturale) il livello d'azione¹ è fissato in 500 Bq/m³; in caso di superamento, se i lavoratori sono esposti ad una dose efficace superiore a 3 mSv/anno, l'esercente deve effettuare azioni di rimedio per abbassare il livello di concentrazione e ripetere le misurazioni; se si mantengono le condizioni di superamento di 3 mSv/anno deve sottoporre i lavoratori alla sorveglianza fisica e medica e adottare tutti i provvedimenti previsti al capo VIII del D.Lgs. 230/95 e s.m.i.; nel caso invece venga superato l'80% del livello d'azione (400 Bq/m³) deve ripetere le misure l'anno successivo.

Per le restanti attività (escluse quelle su aerei) l'esercente ha 24 mesi di tempo, a partire dal 1/09/2003 (o dall'inizio dell'attività se successiva) per valutare la dose efficace; il livello d'azione è fissato in 1 mSv/anno per i lavoratori e 0,3 mSv/anno per la popolazione.

¹ Il livello d'azione è definito in termini di concentrazione di attività di radon media in un anno

Sezione speciale della Commissione tecnica

Per tutte le tipologie di attività le misurazioni vanno effettuate secondo le linee guida emanate dalla Sezione speciale della Commissione tecnica per le esposizioni a sorgenti naturali di radiazioni. Tale Commissione si sarebbe dovuta insediare entro il 1/3/2001 ed avrebbe dovuto elaborare entro il 1 marzo 2002 linee-guida sulle metodologie e tecniche più appropriate di misurazione di radon e toron in aria ed entro il 1 marzo 2003 linee-guida per le restanti attività.

Avrebbe dovuto inoltre elaborare criteri per l'individuazione delle zone o luoghi di lavoro con caratteristiche determinate ad elevata probabilità di alta concentrazione di radon entro il 1 marzo 2002. Tuttavia fino ad oggi la Commissione non si è ancora insediata.

Coordinamento delle Regioni e delle Province autonome di Trento e Bolzano

Per colmare l'assenza delle linee guida della Commissione, il Coordinamento delle Regioni e delle Province autonome di Trento e Bolzano ha redatto nel febbraio 2003 un documento di indirizzo per le misurazioni della concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei (14).

Tale documento, elaborato dalle Regioni Emilia-Romagna, Lombardia, Toscana, Umbria e Veneto, comprende:

- la definizione di luogo di lavoro sotterraneo e i criteri generali per l'impostazione delle misurazioni di radon;
- i metodi di misurazione;
- i requisiti minimi degli organismi che effettuano le misurazioni.

La situazione europea

A livello europeo quasi tutti i paesi (Norvegia, Polonia, Lettonia, Finlandia, Danimarca, Svezia, Grecia, Belgio, Irlanda, Ucraina, Slovenia, Serbia&Montenegro, Germania, Lituania, Repubblica Ceca, Ungheria, Svizzera, Bulgaria) hanno stabilito livelli standard nazionali relativi all'esposizione al radon nei luoghi di lavoro; due paesi (Estonia e Slovenia) lo stanno facendo, mentre 3 paesi (Olanda, Portogallo e Spagna) non hanno livelli di riferimento per la protezione dei lavoratori da esposizioni a radon e altre sorgenti di origine naturale (15).

La Tabella 2.4 riassume i livelli d'azione nazionali relativi all'esposizione al radon nei luoghi di lavoro (sono escluse le miniere, le attività termali, le attività che utilizzano materiali che contengono radionuclidi naturali e le attività che producono rifiuti contenenti radionuclidi naturali).

2.8.2 Abitazioni

Per quanto riguarda le abitazioni, detti anche ambienti vita, non esiste in Italia una normativa specifica ma solo delibere o circolari a livello regionale.

Nel 1990 la Regione Lombardia ha emanato una circolare (16) in recepimento della Direttiva Europea del 1990 (17) relativa al rischio radon, in particolare attenzione agli interventi di sorveglianza negli ambienti di vita e di lavoro. In pratica tale circolare sottolinea l'importanza della verifica della concentrazione di radon.

Nel 1998 la Provincia di Bolzano inserisce una nota sul radon nel formulario per la progettazione edilizia.

Nel 2000 la Regione Lazio costituisce una proposta di legge regionale relativa al radon.

Nel 2002 la Regione Veneto emana una delibera che fissa il valore di 200 Bq/m³ come livello oltre il quale raccomanda di intraprendere azioni di rimedio e raccomanda alla popolazione di effettuare misure di radon annuali, soprattutto nei Comuni a rischio (18).

Nel 2003 un'altra delibera della Regione Veneto fornisce un elenco delle strutture che effettuano misure di radon (19).

Infine per gli anni 2002 – 2004 la Regione Lombardia aveva previsto un piano di monitoraggio della concentrazione di radon indoor.

Attualmente gran parte delle Regioni (le più attive sono Lombardia, Friuli Venezia Giulia, Toscana, Veneto, Piemonte, Alto Adige) sono impegnate nella definizione delle “aree a rischio radon”, e stanno effettuando monitoraggi del radon in abitazioni.

I singoli Comuni invece non si sono ancora attivati a causa soprattutto della mancanza di finanziamenti e d'informazione.

Tabella 2.4 Livelli d'azione europei nei luoghi di lavoro (15)

Stato Europeo	Livello obbligatorio	Livello consigliato
Belgio	800 Bq/m ³	-
Bulgaria	4 WLM/anno (3125 Bq/m ³)	-
Repubblica Ceca	1000 Bq/m ³ per luoghi di lavoro sotterranei	400 Bq/m ³ per uffici, scuole, ospedali
Danimarca	400 Bq/m ³	-
Finlandia	400 Bq/m ³ per tutti i luoghi di lavoro	-
Germania	1000 Bq/m ³	200 Bq/m ³ per uffici, scuole, ospedali
Grecia	400 Bq/m ³ per tutti i luoghi di lavoro	-
Ungheria	1000 Bq/m ³	-
Irlanda	400 Bq/m ³ per tutti i luoghi di lavoro	200 Bq/m ³ per scuole
Italia	500 Bq/m ³ per i luoghi di lavoro sotterranei	-
Lettonia	400 Bq/m ³ per i luoghi di lavoro sotterranei 200 Bq/m ³ per uffici, scuole, ospedali	-
Lituania	1000 Bq/m ³ per luoghi di lavoro sotterranei 400 Bq/m ³ per industrie, uffici, scuole, ospedali	-
Norvegia	1000 Bq/m ³ per luoghi di lavoro sotterranei 200 Bq/m ³ per industrie, uffici, scuole, ospedali	-
Polonia	2 µJ/m ³ (900 Bq/m ³)	-
Serbia&Montenegro	1000 Bq/m ³ per luoghi di lavoro sotterranei 200 Bq/m ³ per uffici, scuole, ospedali	-
Rep. Slovacca	1000 Bq/m ³ per luoghi di lavoro sotterranei 500 Bq/m ³ per uffici, scuole, ospedali	-
Slovenia	-	1000 Bq/m ³ per luoghi di lavoro sotterranei 600-1000 Bq/m ³ per uffici, scuole, ospedali
Svezia	400 Bq/m ³ per luoghi di lavoro sotterranei 200 Bq/m ³ per uffici, scuole, ospedali	-
Svizzera	3000 Bq/m ³ per luoghi di lavoro sotterranei 1000 Bq/m ³ per uffici, scuole, ospedali	-
Ucraina	750 Bq/m ³ per luoghi di lavoro sotterranei 250 Bq/m ³ per uffici, scuole, ospedali (150 Bq/m ³ per nuove costruzioni)	-

Situazione internazionale

A livello europeo è in vigore la Raccomandazione 90/143/Euratom del 21/02/90 (17) che indica per gli edifici esistenti un livello di riferimento pari ad una dose efficace di 20 mSv/anno, la quale può essere considerata equivalente ad una concentrazione media annuale di radon di 400 Bq/m³, mentre per quanto riguarda gli edifici da costruire raccomanda un livello di progettazione di 10 mSv/anno di dose efficace, equivalente ad una concentrazione media annuale di radon di 200 Bq/m³. Tali valori di concentrazione, sia per gli edifici esistenti che da costruire, sono analoghi a quelli indicati dall'ICRP 65 (5). Quasi tutti i paesi europei hanno emesso linee guida per le misurazioni di radon in abitazioni, che raccomandano misure a lungo termine con rivelatori passivi (20).

A livello internazionale l'EPA, l'Ente per la Protezione Ambientale Statunitense, raccomanda per le abitazioni un livello d'azione di 148 Bq/m³; rispettando tale valore, secondo l'EPA, un terzo delle morti attribuite al radon potrebbe essere evitata (21).

2.9 Valutazione del rischio da esposizione al radon

Una parte dei prodotti di decadimento del radon (PD) una volta inalati si depositano lungo il tratto respiratorio: gli epiteli dove i PD si depositano o sono ritenuti vengono irraggiati principalmente dalle radiazioni di tipo alfa emesse nel processo di decadimento di questi radioisotopi. Si tratta di esposizioni in grado di somministrare nel tempo ai tessuti dosi assorbite elevate che giustificano un aumento di probabilità di insorgenza di tumori polmonari. Il processo dipende dal numero e dal tipo di particelle depositate internamente e quindi non soltanto dalla concentrazione di radon nell'aria inalata, ma anche dal fattore di equilibrio² tra il radon e i suoi PD, dalla percentuale di prodotti di decadimento che si attacca al particolato e dalle dimensioni degli aerosol.

A differenza del radon, i suoi PD coagulano rapidamente tra loro e con l'aerosol ambientale, determinando due frazioni: la frazione *attached*, costituita dai prodotti di decadimento aggregati all'aerosol ambientale e quella *unattached* o frazione libera non ancora associata³. Quasi tutti i prodotti di decadimento del radon si trovano in forma *attached*, mentre circa il 10% è presente in forma *unattached*. Il grado di attaccamento all'aerosol ambientale dipende fortemente dalla concentrazione di aerosol nell'ambiente (ambienti puliti e filtrati sono caratterizzati da una frazione *unattached* superiore a quella presente in ambienti polverosi e fumosi).

In tutti i modelli dosimetrici la frazione *unattached* ha un ruolo fondamentale nella stima della dose efficace impegnata⁴. La maggior parte della frazione *unattached* si deposita nelle prime vie aeree (naso – laringe, dove rilascia la maggior parte della dose assorbita; una parte di dose viene però rilasciata anche negli altri tessuti del tratto respiratorio, in maggior misura rispetto agli aerosol di dimensioni maggiori che costituiscono la frazione *attached*. Essendo la

² La definizione di fattore di equilibrio è riportata nell'Allegato 2.

³ La frazione non attaccata è costituita da ioni o atomi liberi associati preferibilmente a particolato ultrafine e forma aggregati aventi alta mobilità e grande coefficiente di diffusione; ciò è da attribuirsi alla breve vita del ²¹⁸Po e al grande numero di processi fisici e chimici che può subire prima di aggregarsi all'aerosol ambientale: circa l'80-82% del ²¹⁸Po è infatti costituito da ioni positivi che reagiscono con vapori di NO, NO₂, H₂O ed altre molecole, formando composti che a causa di processi di ricombinazione divengono elettricamente neutri. Dopo questi processi, gli aggregati si attaccano alle particelle di aerosol in aria formando un aerosol radioattivo. L'energia di rinculo del ²¹⁴Pb, prodotto dal decadimento del ²¹⁸Po, può staccare l'atomo stesso dall'aerosol, dando origine ad una frazione non attaccata. Questo fenomeno non si presenta per il decadimento del ²¹⁴Pb e del ²¹⁴Bi in quanto decadono β, mentre per il ²¹⁴Po il fenomeno non ha valenza dosimetrica visto la longevità del figlio ²¹⁰Pb.

⁴ La definizione di dose efficace impegnata è riportata nell'Allegato 2.

frazione *attached* meno mobile di quella *unattached*, riesce a penetrare più in profondità nel tratto respiratorio e a raggiungere il polmone (bronchi e zona alveolare). Tuttavia la maggior parte di questa frazione viene eliminata con l'aria espirata, e solo il 30% è ritenuta nelle vie respiratorie, due terzi della quale si depositano nella regione alveolare (22).

Il 75% dei tumori polmonari si origina nell'albero bronchiale, dovuti soprattutto alla dose rilasciata dalla frazione *unattached* (8).

Per la valutazione del rischio da esposizione al radon indoor sono stati utilizzati sia approcci dosimetrici che epidemiologici. La pubblicazione ICRP 65 raccomanda l'utilizzo dell'approccio epidemiologico, sia nel caso di ambienti di vita che lavorativi. I due diversi approcci, dosimetrico ed epidemiologico, portano a stime del rischio che nonostante le diverse assunzioni divergono solamente per un fattore 3.

3. LA MISURAZIONE DEL RADON E DEI SUOI PRODOTTI DI DECADIMENTO

3.1 Metodi di misurazione della concentrazione di radon in aria

La tipologia di monitoraggio è distinta secondo la durata temporale del campionamento:

- Istantaneo: il campionamento è effettuato con un unico prelievo di durata inferiore ad 1 h. Questo tipo di campionamento permette di eseguire una misurazione estremamente definita nel tempo ed è utile, per esempio, al fine di caratterizzare puntualmente vie di accesso o di riflusso dell'aria.
- Continuo: il campionamento è effettuato mediante una serie di prelievi contigui tra loro. Le misurazioni eseguite permettono di rilevare le variazioni temporali delle grandezze in osservazione.
- Ad integrazione: il campionamento è effettuato senza soluzione di continuità temporale per periodi compresi, generalmente, tra qualche giorno e diversi mesi, fino ad un anno. La misurazione fornisce il valore dell'esposizione al radon e quindi della concentrazione media nel periodo monitorato.

La tipologia istantanea è da utilizzare con cautela in quanto la concentrazione del radon è estremamente variabile sia su base giornaliera che stagionale.

La modalità di campionamento è distinta secondo il tipo di dispositivo utilizzato:

- Attivo: l'aria viene prelevata ed introdotta nell'elemento sensibile mediante dispositivi che richiedono l'apporto di energia esterna al sistema (es. pompe da vuoto o da flussaggio).
- Passivo: l'aria diffonde spontaneamente nell'elemento sensibile senza richiedere l'apporto di energia esterna; per evitare l'ingresso dei prodotti di decadimento del radon, l'aria entra per diffusione attraverso un mezzo filtrante o per permeazione attraverso una membrana.

3.2 Strumenti per la misurazione istantanea ed in continuo

3.2.1 Camere a ionizzazione

Le camere a ionizzazione (23) consistono generalmente in volumi a geometria cilindrica con pareti metalliche, con due elettrodi, uno costituito dalle pareti stesse e l'altro da un filo centrale che funziona come anodo (raramente come catodo); con un'opportuna differenza di potenziale tra i due elettrodi si ottiene un regime di saturazione che permette la raccolta sull'anodo di tutti gli elettroni prodotti dalla ionizzazione dell'aria campionata da parte delle particelle alfa del radon e dei suoi prodotti di decadimento (PD). I volumi sensibili possono variare da pochi litri fino ad 1 m³. Per la misura della concentrazione di radon si possono usare camere a ionizzazione sigillate, nelle quali l'aria, una volta campionata (quindi un campionamento grab o istantaneo), viene mantenuta ermeticamente fino al raggiungimento dell'equilibrio radioattivo, oppure camere a flusso costante d'aria. In queste ultime non si raggiunge mai l'equilibrio ($F < 1$) poiché il tempo di transito dato dal rapporto del volume con la portata non lo permette. In entrambi i casi l'aria immessa nelle camere a ionizzazione deve essere preliminarmente filtrata per impedire l'ingresso di impurezze, contaminanti, polveri e soprattutto i PD presenti esternamente.

Questi dispositivi hanno prestazioni ottimali solo se, ad esempio, si riescono ad eliminare le impurezze elettronegative, come l'ossigeno ed il vapore acqueo; si capisce quindi che il loro uso è apprezzato soprattutto in laboratorio, dove sono essenziali le caratteristiche di accuratezza e precisione della misurazione che questa classe di strumenti, costosi ed ingombranti, è in grado di fornire. Con una camera di 2 l e con un conteggio di 12 ore è possibile ottenere valori di LLD⁵ pari a 0,35 Bq/m³.

3.2.2 Cella a scintillazione (o Celle di Lucas)

Le celle a scintillazione (24, 25) sono dispositivi di misurazione costituiti da camere di volume compreso tra 100 e 1500 cm³ circa, con pareti interne rivestite da uno spessore di 20 mg cm⁻² di ZnS(Ag), scintillatore solido particolarmente sensibile alle radiazioni alfa.

Il principio di funzionamento consiste nel conteggio dei fotoni che provengono dall'interazione delle particelle alfa del radon e progenie con lo strato di ZnS(Ag). La cella, una volta riempita con il campione d'aria contenente radon, viene accoppiata con un fotomoltiplicatore per il conteggio degli impulsi luminosi proveniente dai fosfori. E' importante calibrare ogni cella con il proprio fotomoltiplicatore.

La cella a scintillazione è il dispositivo classico per la tipologia di campionamento istantaneo; la modalità è sempre di tipo attivo: infatti il campionamento può avvenire o facendo fluire l'aria nella cella attraverso le valvole di ingresso e di uscita, per un periodo sufficiente (10 volte il tempo medio di transito dell'aria nella cella) per uguagliare la concentrazione di radon interna alla cella con quella esterna. In alternativa dopo avere fatto il vuoto nel dispositivo, si aspira l'aria ambiente attraverso l'apertura della valvola di ingresso fino a riempire la cella. Tutta l'aria aspirata deve sempre passare attraverso un filtro per eliminare i PD. A riempimento avvenuto, occorre aspettare un periodo di tempo sufficiente a portare in equilibrio il radon con i suoi PD, prima di eseguire il conteggio dei fotoni. Il LLD per questi sistemi è dell'ordine di 10 Bq/m³.

Le celle di Lucas possono essere utilizzate anche per il campionamento in continuo (vedi ad es. lo strumento AB-5 della Pylon). Tuttavia l'uso di tale dispositivo di misurazione pone problemi di contaminazione della cella da parte dei PD, che tendono più o meno facilmente a depositarsi sulle pareti (anche in funzione del livello di umidità presente), e quindi ad aumentare il fondo ed i problemi di calibrazione. Occorre infine mettere in rilievo come questa classe di strumenti fornisca il valore medio della concentrazione del radon durante il periodo di misura, e quindi non è adatto quando la concentrazione cambia rapidamente.

3.2.3 Metodo dei due filtri

Nei dispositivi per la misurazione della concentrazione di radon con il metodo due filtri (26) l'aria è campionata in modo attivo attraverso due filtri in serie separati da una camera di decadimento. Nel passaggio attraverso il primo filtro vengono rimossi tutti i PD associati ad aerosol del volume campionato in modo che nella camera di decadimento entri solo il radon. Per evitare la presenza di toron, che può interferire sulla misura, si inserisce un'ulteriore camera di ritardo prima del primo filtro. Durante il tempo di transito all'interno della camera, dato dal rapporto tra il volume della camera e la portata di campionamento, una frazione costante di ²²²Rn decade nei suoi PD che sono raccolti sul secondo filtro, dove sono misurati da un opportuno sistema di misurazione dell'attività alfa accoppiato al secondo filtro. In particolare viene misurata l'attività del ²¹⁸Po.

⁵ LLD (Low Limit Detection) è definito come la minima esposizione rilevabile

Thomas (26) ha calcolato i coefficienti di correzione necessari per tenere conto della perdita del ^{218}Po dal punto di generazione al secondo filtro, tenendo in considerazione la dipendenza del suo coefficiente di diffusione dal grado di umidità.

L'attività alfa del secondo filtro viene generalmente misurata con uno scintillatore a $\text{ZnS}(\text{Ag})$, oppure mediante sistemi di spettrometria alfa, ad esempio semiconduttori (rivelatori di Silicio a barriera superficiale). Con i più recenti miglioramenti delle catene di conteggio spettrometriche si riescono ad ottenere sensibilità migliori di $0,4 \text{ Bq/m}^3$.

Questo metodo può essere utilizzato sia con campionamenti a breve termine (grab o istantanei), sia in continuo, laddove in quest'ultimo caso il campionamento e la misurazione dell'attività sul secondo filtro avvengono in contemporanea.

3.3 Strumenti passivi ad integrazione

La determinazione della concentrazione di radon con sistemi passivi di misurazione dipende, oltre che dal tipo di elemento sensibile adottato per la rivelazione delle radiazioni, dalle modalità di campionamento del gas, dalla geometria del contenitore del rivelatore, nonché dal tipo di protezione adottata per il dispositivo prima e dopo l'esposizione. I criteri e i requisiti minimi di detto campionamento sono finalizzati a garantire una misura integrata della concentrazione di radon il più indipendente possibile dalle particolari condizioni ambientali, nonché dalla presenza di prodotti di decadimento del radon, del thoron (e relativi prodotti di decadimento), di aerosol, di polvere, di turbolenza e vortici di aria, ecc.

3.3.1 Rivelatori di tracce nucleari a stato solido (*Solid State Nuclear Track Detectors*)

I rivelatori di tracce nucleari (27, 28) sono film costituiti da polimeri sensibili alle radiazioni alfa. L'interazione delle particelle alfa con il materiale plastico causa un danno ai legami chimici del polimero, formando la cosiddetta "traccia latente". Questo tipo di traccia non è visibile se non con particolari tecniche di microscopia elettronica. Pertanto per rendere la traccia visibile al microscopio ottico, occorre ingrandirla, mediante un trattamento chimico od elettrochimico. Il trattamento chimico consiste nell'immersione dei rivelatori per un certo tempo in una soluzione basica (costituita generalmente da NaOH o KOH), a una data temperatura; la sua azione porta in soluzione il materiale del rivelatore con una velocità maggiore nella zona della traccia latente rispetto al materiale circostante non danneggiato, venendo così a formare dei fori conici che costituiscono la traccia visibile otticamente. Si possono scegliere diverse condizioni di attacco chimico per ottenere tracce di area più o meno grande. L'attacco elettrochimico utilizza, oltre all'attacco chimico, un campo elettrico che amplifica ulteriormente le tracce.

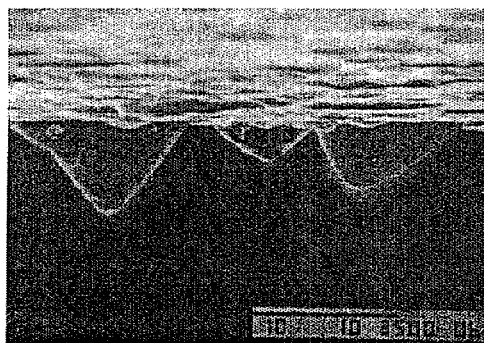


Figura 3.1 Tracce in un SSNTD

Le tracce così ottenute, mostrate in Figura 3.1, sono in seguito analizzate mediante tecniche ottiche o elettroniche. Le prime sono caratterizzate dall'uso di un microscopio ottico interfacciato con un calcolatore. Tramite una telecamera le tracce vengono visualizzate sul video dell'elaboratore e mediante un adeguato software di analisi d'immagini vengono contate e analizzate sulla base delle loro caratteristiche geometriche.

Le altre tecniche, elettroniche o opto-elettroniche, solitamente meno diffuse, usano in generale analizzatori di immagini o contatori a scintille (questi ultimi sono adatti solo per film sottili).

I rivelatori più usati sono costituiti dai policarbonati come il CR-39[®], mostrato in Figura 3.2, e dal nitrato di cellulosa (in particolare il film Kodak LR-115[®]).

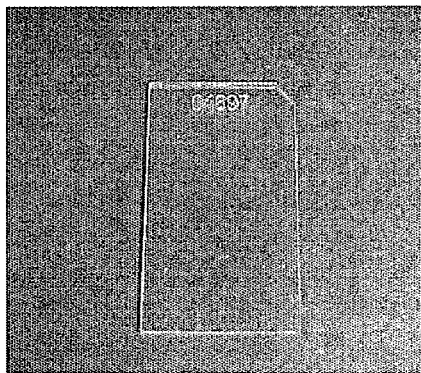


Figura 3.2 Rivelatore di CR-39[®] (con codice laser di identificazione)

I dispositivi passivi a tracce (DPT) di misurazione del radon sono distinti in dispositivi di tipo chiuso o aperto.

Nei DPT di tipo chiuso il rivelatore è posto all'interno di un volume sensibile, nel quale il radon entra per diffusione o per permeazione, mentre è impedito l'ingresso dei suoi PD (tramite un filtro o una membrana, o a causa della stessa configurazione geometrica del dispositivo). Il rivelatore registra le particelle alfa prodotte all'interno del volume sensibile dal radon e dai suoi PD a vita media breve (^{218}Po e ^{214}Po): la densità di tracce sulla superficie del rivelatore è proporzionale alla concentrazione di radon.

Le caratteristiche dei rivelatori di tracce nucleari sono sommariamente di seguito elencate:

- sono sensibili alle radiazioni α e insensibili ad altri tipi di radiazioni, in particolare alla radiazione γ ;
- forniscono un valore della concentrazione media di radon su lunghi periodi (da alcuni mesi a un anno) per cui sono gli strumenti che meglio soddisfano le richieste della normativa italiana;
- forniscono una risposta in genere indipendente dalle condizioni ambientali;
- consentono un conteggio automatico delle tracce, quindi permettono un notevole risparmio dei tempi di analisi;
- si possono conservare e rianalizzare anche dopo decenni;
- sono robusti;
- hanno un basso costo.

I rivelatori di tracce nucleari costituiscono la tecnica più usata a livello internazionale.

Dagli interconfronti dei rivelatori passivi di radon che si tengono annualmente presso l'HPA (Health Protection Agency, l'Agenzia per il Ministero della Salute britannico) risulta che il

sistema più diffuso è quello che usa rivelatori di tracce nucleari inseriti in un contenitore di tipo chiuso.

3.3.2 Camera a ionizzazione a Elettrete

La misurazione si basa sull'utilizzo di un dispositivo noto come camera a ionizzazione a elettrete. Il campionamento del gas radon avviene per diffusione.

Le radiazioni emesse dal radon e dai suoi PD generati all'interno della camera ionizzano l'aria. L'elettrete, carico positivamente, attira gli ioni negativi (elettroni) e questo produce una diminuzione della carica netta e quindi del potenziale superficiale dell'elettrete stesso. Gli ioni positivi si neutralizzano sulla superficie della camera. La variazione di tensione dell'elettrete è proporzionale alla concentrazione radon e al tempo di esposizione.

La misurazione richiede quindi due letture di voltaggio: prima dell'esposizione e alla fine di essa. La differenza di voltaggio e il tempo di esposizione, tramite fattori di calibrazione determinati sperimentalmente, permettono di calcolare la concentrazione radon per una data combinazione camera-elettrete.

Il dispositivo schematizzato in Figura 3.3, è formato da una camera di plastica conduttrice a volume noto che contiene l'elettrete, un disco di materiale dielettrico (teflon), carico elettrostaticamente ad un dato potenziale. L'elettrete funge da sorgente di campo elettrico e da sensore. La camera viene messa in contatto con l'aria ambiente e il radon diffonde in essa passivamente attraverso un filtro. Gli ioni generati nel volume sensibile vengono raccolti sull'elettrete, riducendone la carica. La riduzione di carica è funzione (nota) della ionizzazione complessiva durante il periodo di misura e del volume della camera. La misura della variazione di potenziale in funzione del tempo di esposizione e del volume della camera determina la concentrazione di radon nell'ambiente. Le camere sono costruite in modo da poter essere aperte e chiuse, rispettivamente ad inizio e fine misura.

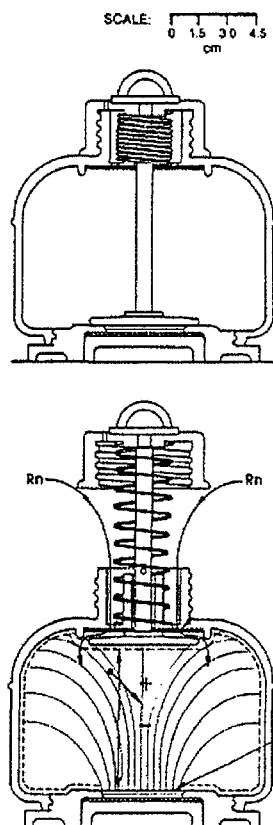


Figura 3.3 Dispositivo ad elettrete chiuso (in alto) e aperto (in basso)

Tramite opportune combinazioni di elettreti e camere si possono effettuare misure di diverse durate, da alcuni giorni a vari mesi.

La camera viene aperta ad inizio misura cossiché il radon può diffondere al suo interno. A fine misura si chiude, si estrae l'elettrete e si misura la tensione con un voltmetro.

Per calcolare la concentrazione radon a partire dalla differenza di voltaggio dell'elettrete e dal tempo di esposizione è necessario effettuare due operazioni. Innanzitutto bisogna determinare il fattore di calibrazione CF. Il fattore di calibrazione (CF), fissata una combinazione camera-elettrete, è definito come la variazione di voltaggio dell'elettrete per esposizione ad una concentrazione radon di 1 Bq/m^3 per un giorno. Il CF è in relazione lineare con la caduta di tensione dell'elettrete nel range 150-750 V.

Il principale svantaggio di questo metodo è che gli elettreti sono sensibili anche ai raggi γ ambientali e ai raggi cosmici per cui devono essere accompagnati da dosimetri addizionali sistemati in contenitori impermeabili al radon per permettere la stima della dose dovuta alle radiazioni diverse dalle particelle α del radon. La misura data da questi dosimetri addizionali viene sottratta a quella precedente.

I principali vantaggi sono:

- possono essere riutilizzati più volte fino all'esaurimento della carica iniziale;
- possono dare risposte immediate;
- sono versatili (diverse dimensioni di camere e tipi di elettreti);
- sono moderatamente economici.

3.3.3 Rivelatori a carbone attivo

Il dispositivo di misurazione, denominato "canestro" e mostrato in Figura 3.4, è costituito da un contenitore all'interno del quale è presente una quantità nota di carbone attivo. Il canestro è munito di coperchio a tenuta di gas per evitare fughe parziali del radon adsorbito durante il periodo compreso fra la fine della raccolta del campione di gas e l'inizio della misurazione dell'attività gamma.

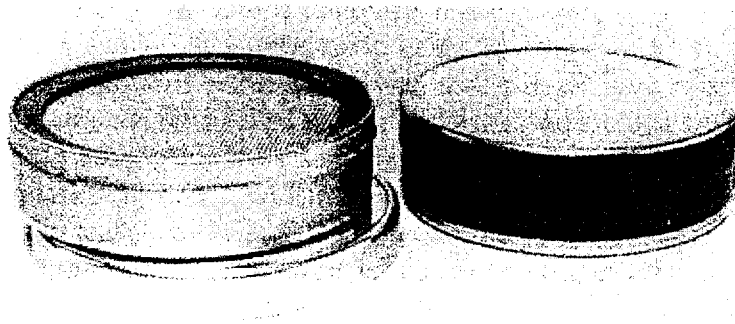


Figura 3.4 Rivelatore a carbone attivo

La rilevazione del gas radon con i canestri di carbone attivo è un metodo economico ed adatto per rilievi di breve-media durata (da due o tre giorni sino al massimo di una settimana), con una tecnica che presenta una sensibilità in genere molto elevata ed indicata per misurare concentrazioni di radon anche di poche decine di $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$.

Il carbone attivo presenta forti affinità con diversi gas e vapori incluso il radon, grazie al suo enorme sviluppo superficiale (29). Il radon viene adsorbito dai grani di carbone ed emettendo particelle alfa, decade nei suoi prodotti di decadimento ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po e ^{210}Pb . In particolare il ^{214}Pb ed il ^{214}Bi sono isotopi gamma emittenti con una vita media breve rispetto al radon, per cui in tre ore sono in equilibrio secolare con il ^{222}Rn . E' così possibile

determinare la concentrazione di radon misurando, mediante spettrometria gamma, l'attività delle emissioni a 295 keV, 352 keV del ^{214}Pb e a 609 keV del ^{214}Bi .

Per l'utilizzo di questo dispositivo, va posta attenzione ad alcune condizioni legate alla natura dell'elemento sensibile:

- la natura passiva del rivelatore permette sia l'adsorbimento che il desorbimento del gas radon;
- il radon adsorbito è soggetto a decadimento radioattivo durante il tempo di esposizione;
- il carbone attivo adsorbe il gas radon ma anche l'acqua presente in atmosfera. A causa di questo fenomeno il carbone ha a disposizione un numero di siti inferiore per il radon, oppure alcuni siti in cui è già adsorbito il radon possono venire rimpiazzati dall'acqua. Questo processo è legato alla temperatura del luogo dove viene esposto il canestro.

Il canestro di carbone attivo non può quindi integrare uniformemente sull'intero periodo di esposizione. Tuttavia secondo la procedura indicata dall'Ente di Protezione Ambientale Americano (EPA) il rivelatore viene calibrato per una esposizione di 48 ore a 20-25 °C e per determinati valori di umidità. Per ottenere precisi risultati di concentrazione di radon presente nell'ambiente da monitorare, si devono introdurre dei fattori correttivi che tengano in conto un periodo di esposizione diverso dalle 48 h, le condizioni sperimentali di temperatura ed umidità. Il non tenere in conto delle variazioni di temperatura, se queste si discostano molto dai valori di calibrazione, in genere di 20-25 °C, porta ad introdurre grossi errori nella misurazione. Inoltre per un'esposizione maggiore di 48 ore la temperatura e l'umidità possono fluttuare in modo significativo: si introducono così ulteriori variazioni nel processo di adsorbimento e desorbimento e quindi una maggiore incertezza nell'analisi dei dati.

Il metodo è conveniente e semplice ma richiede un controllo rigoroso sui fattori di calibrazione e di correzione. I fattori che influenzano l'accuratezza delle misure sono:

- il tempo di esposizione;
- il peso del carbone (correlato all'adsorbimento dell'acqua presente nell'atmosfera circostante);
- il decadimento radioattivo del ^{222}Rn adsorbito;
- l'accuratezza delle misure di spettrometria γ .

Il tempo di raccolta varia usualmente fra 3 e 7 giorni; quindi i canestri sono in genere utili per misurazioni integrate per un tempo breve, ad es. per una campagna di screening.

Il canestro, una volta utilizzato, può essere rigenerato per un nuovo impiego sottoponendolo ad un ciclo termico: il carbone in forno ad alta temperatura si riattiva, eliminando gli elementi (veleni) adsorbiti in precedenza.

Altri vantaggi dei rivelatori a carbone attivo sono

- hanno un basso costo;
- non richiedono particolari accorgimenti nella fase di raccolta del radon;
- il campionamento è di tipo passivo per diffusione;
- la precisione è buona.

Gli svantaggi di questi sistemi sono sostanzialmente: l'impiego limitato a brevi periodi di monitoraggio e la sensibilità del carbone attivo all'umidità e alla presenza di altre sostanze gassose che, analogamente al radon, possono adsorbirsi saturando almeno in parte il materiale. È necessaria quindi un'accurata calibrazione del sistema nelle reali condizioni di applicazione.

3.4 Metodi di misurazione della concentrazione dei prodotti di decadimento del radon

Per conoscere il valore della concentrazione dei prodotti di decadimento a vita media breve del radon (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po) (PD) occorre risolvere un sistema di 4 equazioni. In realtà l'attività del ^{214}Po , visto il suo breve tempo di dimezzamento, coincide con quella del ^{214}Bi , ed il sistema da risolvere si riduce alle seguenti 3 equazioni:

$$\begin{aligned}^{218}\text{Po} &= (a_{1,1} \cdot C_1 + a_{1,2} \cdot C_2 + a_{1,3} \cdot C_3 - a_{1,4} \cdot f) / Q E \\^{214}\text{Pb} &= (a_{2,1} \cdot C_1 + a_{2,2} \cdot C_2 + a_{2,3} \cdot C_3 - a_{2,4} \cdot f) / Q E \\^{214}\text{Bi} \text{ (}^{214}\text{Po)} &= (a_{3,1} \cdot C_1 + a_{3,2} \cdot C_2 + a_{3,3} \cdot C_3 - a_{3,4} \cdot f) / Q E\end{aligned}$$

dove:

C_1 , C_2 e C_3 sono i conteggi alfa totali in 3 determinati intervalli di campionamento (differenti per ogni metodo);

f è l'intensità di conteggio del fondo;

Q è la portata di campionamento;

E è l'efficienza del sistema di acquisizione spettrometrica;

$a_{i,j}$ sono costanti, il cui valore dipende dal tipo di metodo.

Tutti i metodi disponibili si basano sull'aspirazione su di un filtro ad alta efficienza di un volume noto d'aria, e sul conteggio alfa dei prodotti di decadimento del radon ad intervalli di tempo che sono specificati per ciascun metodo.

Dall'andamento temporale dell'attività presente sul filtro, ottenuto con una serie di conteggi alfa totale o con misure di spettrometria alfa, è possibile risalire alle concentrazioni dei singoli prodotti di decadimento. Dalla conoscenza delle singole concentrazioni o con metodi diretti si ricava anche la concentrazione dell'energia potenziale alfa (PAEC⁶).

A seconda delle modalità di conteggio dei decadimenti dei PD del radon raccolti sul filtro di campionamento, i metodi di misura possono essere classificati in tre diverse categorie: a uno, a due, o a tre conteggi.

3.4.1 Tecnica a un conteggio

Questi metodi (30, 31) consentono di misurare la concentrazione dell'energia potenziale alfa, ma non quella dei prodotti di decadimento del radon.

Il metodo di Kuznetz (30), pubblicato nel 1956, segue la seguente procedura:

- campionamento su filtro a una portata di $5 \div 10 \text{ l min}^{-1}$ per un tempo compreso fra 5 e 10 minuti;

- conteggio dell'attività alfa totale del filtro per un tempo compreso fra 5 e 10 minuti, dopo un tempo di attesa compreso, in generale, fra 40 e 90 minuti.

La concentrazione dell'energia potenziale alfa viene calcolata con la seguente formula:

$$\text{PAEC} = C / (E F t_c t_m k)$$

dove:

PAEC = concentrazione dell'energia potenziale alfa;

C = N° di conteggi alfa;

E = efficienza di rivelazione del sistema di misura;

F = portata di aspirazione;

t_c = tempo di campionamento;

t_m = tempo di misura del conteggio

⁶ La definizione di PAEC è riportata nell'Allegato 2.

k = efficienza di raccolta del filtro.

Sono state messe a punto diverse versioni del metodo a un conteggio, caratterizzate da una scelta diversa degli intervalli temporali di campionamento, di attesa tra fine campionamento ed inizio conteggio e infine di conteggio; Rolle (31) ha ottimizzato questi parametri in funzione dell'errore massimo di misura richiesto.

3.4.2 *Tecnica a due conteggi*

Tutti questi metodi (32, 33) effettuano due conteggi dell'attività presente sul filtro di campionamento, in diversi intervalli di tempo. Rispetto ai metodi ad un solo conteggio, hanno il vantaggio di una migliore accuratezza e di consentire oltre alla determinazione della PAEC anche quella delle concentrazioni individuali dei prodotti di decadimento del radon.

Esistono numerose versioni di tali metodi ottenute mediante l'assegnazione di opportuni valori ai tempi di campionamento, di attesa e di conteggio.

A titolo di esempio citiamo la procedura pubblicata da Markov (32), che consente di determinare sia la concentrazione dell'energia potenziale alfa, sia le concentrazioni individuali dei prodotti di decadimento del ^{222}Rn , con un'incertezza intrinseca nominale inferiore al 12%, sulla base di un ciclo di misura della durata complessiva di 15 minuti. Il conteggio alfa totale del filtro di campionamento ha luogo in due fasi successive, rispettivamente da 1 a 3 minuti e da 7 a 10 minuti dopo un'aspirazione della durata di 5 minuti.

3.4.3 *Tecnica a tre conteggi*

I metodi che usano la tecnica a tre conteggi (34, 35, 36, 37) si basano sulla misura del numero dei decadimenti dei PD del ^{222}Rn in tre intervalli di tempo dopo (o durante) il campionamento sul filtro.

Tali metodi presentano una migliore accuratezza in quanto, essendo basati su formule matematiche non approssimate, sono praticamente privi di incertezze intrinseche; essi consentono la determinazione delle concentrazioni individuali dei prodotti di decadimento del radon.

In relazione alle tecniche di conteggio questi metodi possono essere classificati in due categorie: metodi a conteggio alfa totale, con i quali viene misurata l'attività totale alfa del ^{218}Po e del ^{214}Po , e metodi spettrometrici, con i quali le attività alfa del ^{218}Po e del ^{214}Po vengono misurate separatamente.

3.4.3.1 *Conteggio alfa totale*

Un esempio della prima categoria è il metodo di Tsivoglou, basato sulla misura del rateo di conteggio alfa totale del campione raccolto sul filtro in tre intervalli di tempo dopo la fine del campionamento.

Il filtro è installato nell'apposito porta-filtro e collegato ad una pompa volumetrica. Quest'ultima campiona per un tempo di 5 min. Finito il tempo di campionamento, si estrae il filtro e lo si alloggia sul rivelatore per il conteggio delle alfa.

Si determina l'attività alfa totale a 5, 15 e 30 minuti dopo il campionamento. Le concentrazioni di ^{218}Po , ^{214}Pb e ^{214}Po (^{214}Bi) sono calcolate da combinazioni lineari dei tre ratei di conteggi netti (34).

Il metodo di Tsivoglou è stato sviluppato per l'utilizzo nelle miniere e non è abbastanza sensibile per le misure nella maggior parte degli ambienti indoor. Non è molto accurato, soprattutto nella determinazione del ^{218}Po .

Per la generalità delle applicazioni è più conveniente usare il cosiddetto metodo di Tsivoglou modificato, noto anche come metodo di Thomas (35): tale metodo riduce l'errore e migliora la sensibilità in quanto, a differenza del primo, si basa sulla misura dei conteggi integrata su intervalli di tempo, invece della misura del rateo di conteggio come nel caso del metodo di Tsivoglou.

Thomas raccomanda un campionamento di 5 minuti ad una portata di 10 lpm, seguito da 3 conteggi alfa da 2 a 5 minuti, da 6 a 20 minuti e da 21 a 30 minuti dopo la fine del campionamento. Il limite di rilevazione di questo metodo è dell'ordine di 40 Bq/m³.

Le concentrazioni di ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb e ²¹⁴Po (²¹⁴Bi) in Bq/m³ sono calcolate risolvendo un sistema di equazioni differenziali lineari di Bateman che porta alle seguenti soluzioni:

$$\begin{aligned} {}^{218}\text{Po} &= 37 \times (0,1689 C_1 - 0,0820 C_2 + 0,0775 C_3 - 0,5662 f) / Q E \\ {}^{214}\text{Pb} &= 37 \times (0,0012 C_1 - 0,0206 C_2 + 0,0491 C_3 - 0,1571 f) / Q E \\ {}^{214}\text{Bi} \text{ (} {}^{214}\text{Po)} &= 37 \times (-0,0225 C_1 + 0,0332 C_2 - 0,0377 C_3 - 0,058 f) / Q E \end{aligned}$$

dove:

C₁, C₂ e C₃ sono i conteggi alfa totali negli intervalli 2-5 min, 6-20 min, e 21-30 min dopo il termine del campionamento (in cpm);

f è l'intensità di conteggio del fondo (in cpm);

Q è la portata di campionamento (lpm);

E è l'efficienza del sistema di conteggio, data dal rapporto dei conteggi con le disintegrazioni nell'unità di tempo.

Se gli errori sulla portata di campionamento e sull'efficienza sono compresi entro 1-3 %, le deviazioni standard sui singoli prodotti di decadimento del radon (esprese in Bq/m³) sono date dalle seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} \text{DS} ({}^{218}\text{Po}) &= 37 \times 0,1 \times (2,854 C_1 + 0,672 C_2 + 0,601 C_3 + 0,31 f/T_f)^{1/2} / Q E \\ \text{DS} ({}^{214}\text{Pb}) &= 37 \times 0,1 \times (0,00014 C_1 + 0,042 C_2 + 0,241 C_3 + 2,5 f/T_f)^{1/2} / Q E \\ \text{DS} ({}^{214}\text{Bi}, {}^{214}\text{Po}) &= 37 \times 0,1 \times (0,051 C_1 + 0,110 C_2 + 0,142 C_3 + 0,34 f/T_f)^{1/2} / Q E \end{aligned}$$

dove:

T_f è il tempo di conteggio del fondo.

3.4.3.2 Spetrometria alfa

I metodi spettrometrici sono basati sul principio della discriminazione dell'energia alfa del ²¹⁸Po (6,00 MeV) e del ²¹⁴Po (7,69 MeV) durante il conteggio mediante un rivelatore a stato solido. È possibile ottenere uno spettro energetico delle particelle α depositate sul filtro sia durante il periodo di campionamento che alla fine di esso, scegliendo opportunamente intervalli di tempo di esposizione e di rivelazione. Il conteggio del filtro deve essere effettuato al minimo due volte per determinare le due distinte attività di ²¹⁸Po e di ²¹⁴Po.

Il primo utilizzo di tale metodo viene riportato da Martz et al. (36): viene impiegato un rivelatore a semiconduttore e un analizzatore multicanale per misurare i conteggi del ²¹⁸Po e del ²¹⁴Po depositati su un filtro a membrana in due diversi periodi: 5 e 30 minuti dopo la fine del campionamento. Per determinare le concentrazioni di ²¹⁸Po e del ²¹⁴Po è necessario risolvere solo due equazioni (anziché le tre richieste dal metodo di Tsivoglou). Paragonato al metodo di Tsivoglou, Martz trovò che il metodo spettrometrico permette di ottenere

concentrazioni dei prodotti di decadimento del radon molto più accurate, in particolare per il ^{218}Po (DS del 8% in confronto alla DS del 29% del metodo di Tsivoglou).

L'ottimizzazione di tale tecnica fu studiata da Nazarov (37) relativamente alla scelta dei due intervalli di conteggio per minimizzare la deviazione standard della misura. Il miglior risultato si ottiene minimizzando il tempo tra la fine del campionamento e l'inizio del primo conteggio (al più 1 minuto). In questo modo, con modeste efficienze e modeste portate e un tempo di misura di 40 minuti, si ottengono deviazioni standard sui singoli prodotti di decadimento del radon dell'ordine del 20% a circa 40 Bq/m^3 (1 pCi/l).

Poiché l'incertezza sulla concentrazione di ^{218}Po aumentava al crescere del tempo tra fine campionamento e conteggio, Trembley et al. (38) hanno sviluppato un metodo dove il primo conteggio viene effettuato durante il campionamento stesso: con un tempo di campionamento di 15-20 minuti e un tempo di conteggio da 0 a 20 minuti per il ^{218}Po e da 0 a 20 minuti e da 25 a 40 minuti per il ^{214}Po (dove 0 minuti corrisponde all'inizio del campionamento), le incertezze associate alla determinazione delle concentrazioni dei figli del radon vengono minimizzate comparabilmente ad un accorciamento significativo del tempo complessivo di misura.

3.5 Normativa per la misurazione del radon nei luoghi di lavoro

3.5.1 La normativa italiana

La normativa italiana prescrive la misurazione della concentrazione media annuale di radon nei "luoghi di lavoro quali tunnel, sottovie, catacombe, grotte e, comunque, in tutti i luoghi di lavoro sotterranei" (art. 10-bis comma a) D. Lgs. 230/95 e s.m.i).

Nel caso in cui la concentrazione media annuale di radon risulti maggiore del livello d'azione (500 Bq/m^3), la norma italiana prevede l'adozione di azioni di rimedio nel caso l'Esperto Qualificato dimostri che i lavoratori sono potenzialmente esposti ad una dose efficace superiore a 3 mSv/anno .

Per valutare il valore di dose efficace partendo dalla misura di concentrazione o di esposizione di radon, l'Allegato I-bis del D.Lgs. 230/95 e s.m.i. riporta il fattore convenzionale di conversione ($3 \times 10^{-9} \text{ Sv / Bq h m}^{-3}$). Questo fattore di conversione si applica ai luoghi di lavoro dove il valore del fattore di equilibrio F è assunto pari a 0,4.

La valutazione della dose efficace pertanto si ottiene nel modo seguente: partendo dalla misura della concentrazione media di radon, si ricava il valore di esposizione del lavoratore moltiplicando la concentrazione media per il numero di ore annuali trascorse nel locale, quindi si valuta la dose efficace moltiplicando l'esposizione così ottenuta per il fattore $3 \times 10^{-9} \text{ Sv / Bq h m}^{-3}$.

Per ambienti di lavoro dove l'esposizione alle radiazioni ionizzanti di origine naturale è riconducibile ad una pratica (comma 1 lett. b, art. 1), come ad esempio nelle miniere uranifere o in altre tipologie particolari in cui non si conosce il valore del fattore di equilibrio F, il calcolo della dose è più complicato in quanto non è sufficiente valutare la concentrazione del radon, ma è necessaria la misurazione dei suoi prodotti di decadimento a vita media breve. Nell'Allegato IV del D.Lgs. 230/95 e s.m.i. sono riportati i coefficienti di conversione che esprimono la dose efficace per unità di esposizione all'energia potenziale alfa ed i fattori di conversione da concentrazione equivalente all'equilibrio in aria dei prodotti di decadimento del radon⁷ e del toron alle rispettive PAEC.

⁷ per le definizioni si veda l'Allegato 2

In questo caso, per calcolare la dose efficace è necessario conoscere l'esposizione ai prodotti di decadimento del radon, che si ricava tramite la misurazione dalla concentrazione equivalente all'equilibrio (EEC). Moltiplicando la EEC per il tempo di esposizione si ricava l'esposizione ai prodotti di decadimento del radon espressa in $Bq\ h\ m^{-3}$; moltiplicando tale valore per il coefficiente di conversione riportato nell'Allegato IV (comma 12.3) del D.Lgs. 230/95 e s.m.i. ($5,56 \times 10^{-9}\ J/Bq$) si ricava l'esposizione ai prodotti di decadimento del radon espressa in $J\ h\ m^{-3}$. Infine per ottenere la dose efficace occorre moltiplicare quest'ultimo valore per il fattore di conversione, $1,4\ Sv\ per\ J\ h\ m^{-3}$, indicato sempre nell'Allegato IV (comma 12.2) del D.Lgs. 230/95 e s.m.i..

La normativa italiana richiede che il valore di concentrazione di radon corrisponda al valore medio annuale. Poiché in Italia le conoscenze sui fattori di correzione stagionali necessari per poter effettuare misurazioni di durata inferiore all'anno non sono disponibili, le tecniche di misurazione da utilizzare devono consentire di coprire interamente l'arco di un anno solare, mediante una o meglio più misurazioni.

3.5.1.1 Le linee guida del Coordinamento delle Regioni e delle Province Autonome di Trento e Bolzano

Come detto nel capitolo precedente (2.8.1), la normativa italiana mediante la sezione speciale della Commissione tecnica di cui all'art. 10-septies avrebbe dovuto fornire indicazioni sulle metodologie e sulle tecniche di misurazione da usare per la determinazione della concentrazione del radon; poiché al momento la Commissione non è ancora stata insediata, vengono prese come riferimento le linee guida emanate dal Coordinamento delle Regioni e delle Province autonome di Trento e Bolzano (14), le cui principali indicazioni sono di seguito riportate.

Metodi di misurazione

Le linee guida indicano che i sistemi di misurazione da utilizzare devono essere di tipo passivo ad integrazione e che le tecniche di misura idonee sono quelle che utilizzano sia rivelatori a tracce nucleari (LR115[®], CR39[®] e policarbonati) che elettretti.

Per quanto riguarda la durata dell'esposizione, indicano una durata non inferiore a un anno con una periodicità che varia da un mese a un anno.

Indicazioni per il monitoraggio

La misura deve essere effettuata in tutti i luoghi di lavoro sotterranei, cioè nei locali o ambienti con almeno tre pareti interamente sotto il piano di campagna, indipendentemente dal fatto che queste siano a diretto contatto con il terreno circostante. Tale definizione include quindi anche i locali che hanno un'apertura verso l'esterno e i locali che sono circondati da un'intercapedine areata.

Per decidere in quali locali sotterranei di uno stesso edificio effettuare le misure, bisogna tenere conto del fatto che le misurazioni devono essere pianificate in modo da essere rappresentative dell'esposizione del personale. Pertanto in linea di massima le misurazioni non devono essere effettuate nei locali che non siano occupati con continuità dai lavoratori, come per esempio i locali di servizio, gli spogliatoi e gli ambienti di passaggio come i corridoi. Altri ambienti come ad es. magazzini, bunker e comunque locali con un utilizzo sporadico, non dovranno essere sottoposti al controllo a meno che il personale nel suo complesso non vi trascorra una frazione di tempo significativa, indicata in 10 ore al mese.

Dimensionamento delle misurazioni

In generale il controllo deve essere effettuato in ogni locale fisicamente separato, a causa della variabilità della concentrazione di radon evidenziata anche fra ambienti contigui da numerosi studi. Nel caso di luoghi di lavoro in cui vi sia un numero elevato (dell'ordine delle decine) di ambienti "analoghi", sulla base di considerazioni riguardanti le caratteristiche della costruzione e dell'uso degli ambienti, inclusa la ventilazione e il tipo di attività, potrà essere giustificata una riduzione del numero di locali da controllare. Tale scelta dovrà essere oggetto di una relazione che resti a disposizione degli organi di vigilanza e che dovrà necessariamente essere sottoposta a verifica: se la media dei valori misurati risulterà sostanzialmente inferiore al livello d'azione e la loro variabilità contenuta, l'operazione risulterà giustificata anche a posteriori; in caso contrario, sarà necessario estendere in una seconda fase i controlli a tutti i locali.

Per quanto riguarda il numero dei dispositivi di misurazione per ogni locale soggetto a controllo, le linee guida stabiliscono una divisione degli ambienti di lavoro in due categorie in base alle loro dimensioni; la tabella 3.1 indica tale suddivisione ed il relativo criterio.

Infine le linee guida prescrivono che i dispositivi di misurazione debbano essere posizionati ad un'altezza compresa tra circa 1 e 3 metri, non in prossimità di fonti di calore e di punti cospicui di ricambio d'aria.

Nel caso di particolari luoghi di lavoro sotterranei (come tunnel, sottovie, grotte e catacombe) le misure dovranno essere eseguite nei luoghi dove normalmente stazionano gli operatori addetti, ad esempio lungo il percorso di visita guidata nelle grotte/catacombe e nelle postazioni di guida dei macchinisti nel caso delle metropolitane cittadine.

Tabella 3.1 Numero dei punti di misurazione raccomandato dal Coordinamento delle Regioni e delle Province autonome di Trento e Bolzano in funzione dell'ampiezza del locale (14)

Categoria	Numero di punti raccomandato
Locali separati di piccole dimensioni (< 50 m ²)	1 ogni locale, salvo quanto sopra previsto
Ambienti di medie e grandi dimensioni	1 ogni 100 m ² di superficie

3.5.2 La normativa internazionale

A livello internazionale, tra le fonti più autorevoli ricordiamo il protocollo inglese HPA ex NRPB) e il protocollo americano EPA, che di seguito andiamo a riassumere.

3.5.2.1 Il protocollo inglese

Poiché la norma inglese impone l'obbligo della misurazione del radon non solo negli ambienti sotterranei, il protocollo sviluppato dal Health Protection Agency (HPA) prevede il posizionamento dei dispositivi di misurazione del radon anche al piano terra degli edifici.

Il numero dei punti di controllo dipende dalla dimensione del luogo di lavoro e dalla sua collocazione rispetto al piano di campagna (sotterraneo o piano terra), come è mostrato nelle tabelle 3.2 e 3.3. Per i locali sotterranei, per esempio, il protocollo HPA prevede un punto di misurazione in ogni locale, stanza o area indipendentemente dalle dimensioni e dal grado di occupazione (39).

Tabella 3.2 Numero punti di controllo in locali sotterranei secondo il protocollo HPA (39)

Categoria	Numero punti di controllo
Locali sotterranei	1 in ogni locale, stanza, area, indipendentemente dalle dimensioni e dal grado di occupazione

Tabella 3.3 Numero punti di controllo in locali situati al piano terra secondo il protocollo HPA (39)

Categoria	Numero di dosimetri
Uffici di piccole dimensioni Negozio di piccole dimensioni Banche	1 ogni 100 m ² di superficie (per gli uffici 1 ogni 2-3 uffici)
Uffici di grandi dimensioni Negozio con dimensione maggiore di 1000 m ² Aree ad accesso pubblico Scuole, Alberghi Industrie leggere	1 ogni 250 m ² di superficie
Come sopra, con dimensione maggiore di 5000 m ²	1 ogni 500 m ² di superficie
Aree con dimensione maggiore di molte migliaia di m ²	1 ogni 1000 m ² di superficie

3.5.2.2 Il protocollo americano

Il protocollo americano EPA fornisce indicazioni molto dettagliate sul posizionamento dei dispositivi di misurazione (40). Innanzitutto il dispositivo deve essere posto in punti in cui non possa essere rimosso o spostato durante il periodo di esposizione. La misurazione non deve avvenire vicino a porte e a correnti d'aria causate dall'impianto di riscaldamento e di ventilazione. Deve essere condotta lontano almeno 90 cm da finestre o altre aperture nella parete esterna. Posizioni vicine a fonti eccessive di calore, come camini, o in aree ad alta umidità dovrebbero essere evitate.

Il dispositivo dovrebbe essere posizionato a 30 cm dalla parete, a 50 cm dal pavimento e al minimo a 10 cm da altri oggetti. L'altezza ottimale corrisponde al punto di respirazione di un adulto.

3.6 Normativa per la misurazione del radon nelle abitazioni

A differenza di quanto esiste in altre nazioni, la norma italiana (D.Lgs. 230/95 e s.m.i.) non prevede limitazioni alla presenza del radon nelle abitazioni, né esistono raccomandazioni o linee guida a livello nazionale su tale argomento.

Si riportano quindi le raccomandazioni di altri paesi, in particolare l'esperienza inglese e quella degli Stati Uniti.

3.6.1 Il protocollo inglese

L'HPA ha stabilito un protocollo, approvato dal Governo inglese nel marzo 2000, che prevede la misurazione della concentrazione media annuale di radon nelle abitazioni con il

posizionamento di due dispositivi, uno in salone e uno in camera da letto, per un periodo di esposizione non inferiore a tre mesi.

Il periodo di esposizione ottimale è un anno; nel caso in cui sia inferiore, l'HPA riporta una tabella contenente i fattori di correzione stagionali (indicati in Tabella 3.4), validi per l'Inghilterra, con i quali correggere la misura.

Quest'ultima, secondo il protocollo HPA, viene calcolata come media pesata delle concentrazioni di radon in salone e camera da letto (pesi: 0,45 per salone e 0,55 per camera da letto) moltiplicata per il fattore di correzione stagionale.

Se è disponibile solo un risultato (es. un dosimetro è stato perso) la concentrazione media annuale di radon in abitazione si ricava moltiplicando la concentrazione di radon in salone per 0,83 o dividendo la concentrazione in camera da letto per 0,83 (41).

Tabella 3.4 Fattori di correzione stagionali validi per l'Inghilterra (HPA) (41)

Mese iniziale	Durata (mesi)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Gennaio	0,68	0,70	0,74	0,78	0,84	0,90	0,97	1,03	1,05	1,05	1,03
Febbraio	0,73	0,77	0,83	0,89	0,96	1,05	1,11	1,13	1,12	1,09	1,05
Marzo	0,81	0,88	0,96	1,04	1,15	1,20	1,23	1,20	1,15	1,10	1,04
Aprile	0,97	1,06	1,15	1,29	1,34	1,33	1,28	1,21	1,14	1,07	1,02
Maggio	1,18	1,27	1,45	1,49	1,45	1,35	1,26	1,17	1,08	1,03	1,01
Giugno	1,40	1,64	1,64	1,54	1,40	1,27	1,16	1,07	1,02	0,99	0,99
Luglio	2,00	1,79	1,59	1,40	1,25	1,14	1,04	0,98	0,96	0,96	0,98
Agosto	1,63	1,45	1,28	1,14	1,04	0,96	0,92	0,90	0,91	0,93	0,96
Settembre	1,31	1,16	1,04	0,96	0,89	0,85	0,85	0,86	0,89	0,92	0,97
Ottobre	1,03	0,94	0,88	0,82	0,80	0,80	0,82	0,85	0,89	0,94	0,98
Novembre	0,87	0,82	0,76	0,76	0,77	0,79	0,83	0,88	0,94	0,98	1,00
Dicembre	0,77	0,72	0,73	0,74	0,78	0,83	0,88	0,94	0,99	1,02	1,02

3.6.2 Il protocollo americano

Il protocollo EPA contiene indicazioni sul posizionamento dei dosimetri e sulle modalità da seguire per effettuare la misura, nel caso si usino sistemi passivi a breve o a lungo termine.

L'EPA raccomanda di effettuare le misure nei locali che si trovano al livello più basso dell'abitazione, che siano correntemente occupati (esempio taverne), o in quelli più bassi (a livello delle fondamenta) anche se al momento non usati, ma che un futuro compratore potrebbe decidere di usare.

La misurazione dovrebbe essere effettuata in una stanza che sia usata regolarmente, come salone, stanza per i giochi, camera da letto. Sono da evitare la cucina, il bagno, l'ingresso e lo sgabuzzino.

Nel caso in cui si usi un sistema di misurazione passivo a breve termine è bene tenere chiuse le finestre e la porta d'ingresso per il maggior tempo possibile durante l'esposizione. Sistemi di condizionamento dell'aria che fanno ricircolano l'aria possono rimanere in funzione, mentre quelli che immettono aria dall'esterno dovrebbero essere spenti. Il tempo di esposizione delle misurazioni a breve termine non deve comunque essere inferiore a 2 - 3 giorni; in questo caso è bene chiudere le finestre e la porta d'ingresso almeno 12 ore prima dell'inizio del controllo.

Per avere misure più affidabili è bene comunque scegliere sistemi passivi a lungo termine (con periodi di esposizione minimi di tre mesi) (42).

3.7 Progettazione e realizzazione di un dispositivo di campionamento passivo a tracce per la misurazione del ^{222}Rn

Progettazione

La progettazione di un dispositivo di campionamento passivo a tracce (DPT) per la valutazione dell'esposizione al radon può essere efficacemente eseguita con l'aiuto di tecniche di simulazione stocastica (analisi Montecarlo). Questa tecnica permette di analizzare velocemente e con la necessaria precisione la risposta del dispositivo a secondo delle differenti scelte progettuali e in diverse condizioni d'esposizione, in modo da ottimizzarne la risposta in termini di efficienza, omogeneità di tracce sul rivelatore ed indipendenza della risposta dalle variazioni standard delle condizioni ambientali.

Questi test, svolti utilizzando il codice di calcolo MCNPX (43), hanno consentito la determinazione dello spettro energetico delle particelle α emesse dal radon e dai suoi prodotti di decadimento incidenti sul rivelatore, ipotizzando diverse modalità di distribuzione dei radioisotopi alfa emettitori all'interno del volume efficace del DPT (la più realistica è quella che prevede il radon distribuito omogeneamente nel volume del dosimetro e i suoi prodotti di decadimento depositati completamente sulle superfici del volume efficace del DPT); inoltre lo studio è stato completato simulando diverse realistiche condizioni atmosferiche.

La traccia di una particella alfa incidente sul rivelatore è visibile solo se il suo angolo d'incidenza (definito come l'angolo tra la direzione della particella e la normale al rivelatore al punto d'incidenza) è minore del cosiddetto "angolo critico" ϑ_c ; pertanto non tutte le particelle alfa emesse dai prodotti di decadimento del radon depositati sulle pareti del dosimetro sono rivelate. Esiste un angolo ottimale tra le pareti del dispositivo ed il rivelatore che ottimizza il numero di particelle alfa osservabili, determinando una delle condizioni necessarie per ottimizzare l'efficienza del dispositivo. L'angolo critico dipende oltre che dall'energia della particella incidente anche dalle condizioni di attacco chimico e di analisi delle tracce.

In fase progettuale è quindi necessario conoscere l'andamento dell'angolo critico in funzione dell'energia $\vartheta_c(E)$ che descrive la geometria del DPT e applicare tale funzione all'interno dell'analisi Montecarlo per ricavare l'efficienza o sensibilità del dispositivo.

La conoscenza accurata di $\vartheta_c(E)$ è un punto critico della progettazione di un DPT per la misurazione del radon, in quanto permette di simulare accuratamente nuove soluzioni o situazioni d'uso anomale, ottimizzando una fase di progettazione altrimenti non percorribile se non tramite un dispendioso ricorso a prototipi e calibrazioni, che in tal modo risultano indispensabili soltanto nella fase di realizzazione e caratterizzazione finale.

Calibrazione

Una volta realizzato il DPT sulla base dell'ottimizzazione di progetto, è necessario calibrarlo. Attraverso la calibrazione, infatti, si certifica la sensibilità sperimentale non solo del DPT, ma dell'intero sistema di misurazione

Noti i valori di esposizione della calibrazione (non meno di tre esposizioni), la sensibilità (o risposta del DPT) viene determinata dal rapporto tra la densità superficiale di tracce efficaci e il valore di esposizione. Il numero di tracce efficaci è dato dal numero totale di tracce contate sul rivelatore dalle quali vengono sottratte le tracce dovute al fondo e quelle non dovute a esposizione al radon (come sporcizia, graffi e difetti del rivelatore). L'area efficace è data dal prodotto dell'area effettiva del campo di visione al microscopio ottico per il numero di campi di visione attualmente analizzati.

Una volta determinata la sensibilità del DPT, con la sua varianza, nonché le caratteristiche del fondo della partita di rivelatori, il dispositivo può essere utilizzato in campo.

Per calcolare il valore di esposizione al radon del locale dove è stato collocato il DPT, è sufficiente dividere la densità di tracce efficaci per la sensibilità del DPT; infine la concentrazione media di radon si ottiene dividendo l'esposizione per la durata del monitoraggio.

3.7.1 Il DPT ENEA-IRP

Il sistema scelto dal Servizio Radon ENEA è un sistema di misurazione passivo, basato sull'impiego di un rivelatore di tracce nucleari (CR-39[®]) inserito all'interno di un nuovo dispositivo di tipo "chiuso", che permette cioè l'entrata del radon per diffusione mentre impedisce l'ingresso dei suoi prodotti di decadimento (Figura 3.5) (44).



Figura 3.5 Dosimetro ENEA-IRP

L'ingresso all'interno del dosimetro dei prodotti di decadimento del radon (nella loro forma *attached* e *unattached*) e del toron è impedito grazie alla particolare geometria del DPT (inserimento di un *air gap*) (Figura 3.6).

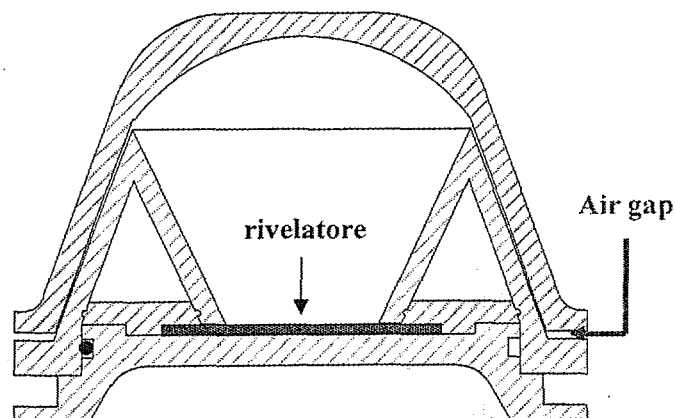
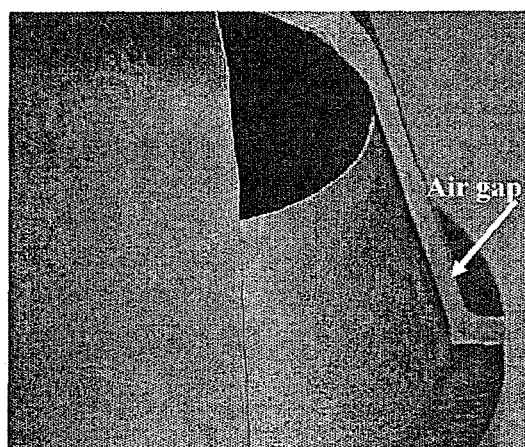


Figura 3.6 Particolare dell'air gap del dosimetro ENEA-IRP in foto e in sezione

Il DPT ENEA-IRP è costituito in particolare da una camera di diffusione in nylon grafitato e da un rivelatore di CR-39[®], posizionato nella sua parte inferiore.

Si è scelto come materiale il nylon grafitato perché presenta una buona conducibilità elettrica superficiale, in modo da avere una deposizione omogenea dei prodotti di decadimento a vita media breve del radon sulle superfici del DPT. Anche il rivelatore è ricoperto da una sottile pellicola di mylar alluminizzato (conduttivo) in modo tale che tutto il volume sensibile

interno al dosimetro (superfici interne del volume efficace del DPT e finestra di mylar) sia conduttivo; questo assicura una densità di tracce omogenea sul rivelatore, verificata entro i limiti di variazione statistica dei decadimenti radioattivi; si tratta di una specifica molto importante, in quanto non solo semplifica l'operazione di conteggio delle tracce, ma soprattutto perché previene errori di accuratezza e garantisce condizioni per l'ampliamento del campo di analisi, essenziale per ridurre la componente di errore di precisione.

La camera di diffusione si compone di tre parti (Figura 3.7):

- Il "tappo" di chiusura in ABS trasparente, che serve essenzialmente come base d'appoggio del DPT, supporto inferiore del rivelatore attraverso cui si può leggere il codice di identificazione del rivelatore (e del DPT);
- La parte denominata "pareti laterali", di forma tronco-conica, in nylon grafitato, determina le superfici inclinate fondamentali per il funzionamento del DPT (quella interna dove si depositano parte dei prodotti di decadimento del radon, e quella esterna per l'ingresso del radon nel dosimetro).
- La "calotta" sferica, in nylon grafitato, è formata da un tronco di cono terminante in una calotta sferica. La parte conica accoppiata alle pareti laterali determina lo spazio d'ingresso, o air gap, del gas nel DPT.

Il rivelatore passivo di tracce nucleari è composto da una lastrina di Poly-Allyl Diglycol Carbonato (CR-39[®]), rettangolare con dimensioni 36,0 × 25,0 × 1,4 mm, prodotta protetta da due pellicole trasparenti. Sulla superficie posteriore (quella da non esporre al radon) è inciso un codice numerico di 5 cifre per l'identificazione del rivelatore (vedi Figura 3.2).

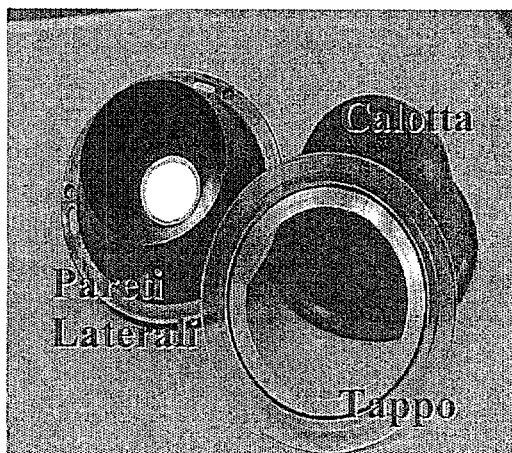


Figura 3.7 Componenti del dosimetro ENEA-IRP

Progettazione

Il DPT è stato progettato utilizzando anche tecniche di analisi Montecarlo, per trovare la migliore geometria del volume efficace, dal punto di vista dell'efficienza e dell'omogeneità delle tracce sul rivelatore.

Come spiegato in precedenza, la particella alfa non viene rivelata se la direzione di incidenza della particella è superiore all'angolo critico; per cui la geometria del volume efficace, in particolare l'angolo tra la parete laterale interna ed il rivelatore, deve essere realizzata in modo tale da tenere conto dei valori degli angoli critici delle particelle alfa emesse dai prodotti di decadimento del radon presenti sulle pareti laterali che incidono sul rivelatore. Inoltre occorre tenere in considerazione il massimo percorso delle alfa in aria, in particolare per la componente meno energetica emessa dal ^{222}Rn .

La progettazione del volume sensibile richiede la conoscenza della funzione $\vartheta_c(E)$, che fornisce l'andamento dell'angolo critico in funzione dell'energia delle particelle alfa che entrano nel rivelatore. Per prima cosa quindi si è valutata tale funzione (45, 46), che è stata introdotta nell'analisi Montecarlo per ottimizzare la progettazione del volume efficace del DPT.

Per calcolare $\vartheta_c(E)$ si sono esposti diversi rivelatori a differenti angoli di incidenza e a diverse energie (usando una sorgente elettrodepositata di ^{244}Cm) e si sono testate due differenti condizioni di attacco chimico (rispettivamente di durata 6 e 12 ore). Si è ricavata $\vartheta_c(E)$ nei due casi di differente attacco per ottimizzare la risposta del DPT anche in funzione dello spessore rimosso dall'attacco.

In Figura 3.8 è mostrato l'andamento tipico dell'efficienza di rivelazione delle tracce in funzione dell'angolo di incidenza, per una delle energie utilizzate e la rispettiva funzione di interpolazione. Invertendo le funzioni di interpolazione relative a tutte le energie si sono ricavati i valori degli angoli critici ϑ_c , corrispondenti al 50 % dell'efficienza di registrazione; i dati così ottenuti con i loro errori sono stati analizzati per determinare la relazione con l'energia, ricavando l'andamento della funzione $\vartheta_c(E)$ (45, 46). Quest'ultima (per la migliore condizione di attacco, risultata della durata di 6 ore) è stata introdotta nell'analisi Montecarlo e si è ricavata la sensibilità teorica del sistema ($4,072 \pm 0,002 \text{ tracce cm}^{-2} \text{ kBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ m}^3$) (44).

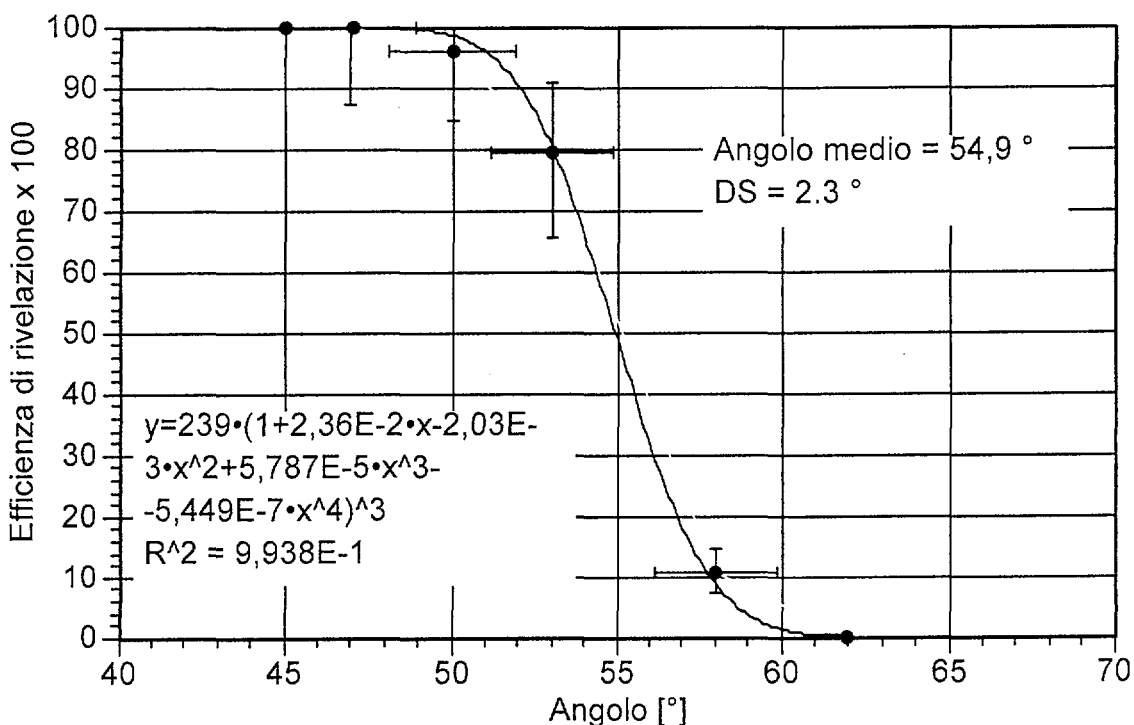


Figura 3.8 Andamento tipico dell'efficienza di registrazione in funzione dell'angolo di incidenza insieme alla funzione di interpolazione per l'energia di 5011 keV ed uno spessore rimosso di 7,5 μm (6 h).

Calibrazione

Il sistema di valutazione della concentrazione di radon del Servizio Radon ENEA è stato calibrato presso l'HPA con tre valori di esposizione: bassa, media e alta (200 kBq h m^{-3} , 600 kBq h m^{-3} , $2000 \text{ kBq h m}^{-3}$ rispettivamente), logicamente equidistanti, tali da coprire il campo di esposizioni che normalmente si trovano negli ambienti di misura.

La retta di taratura è illustrata in Figura 3.9. La relazione tra densità di tracce ed esposizione è lineare e porta ad avere una sensibilità pari a $4,26 \pm 0,06$ tracce $\text{cm}^{-2} \text{ kBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ m}^3$, in ottimo accordo con quella teorica ricavata dall'analisi Montecarlo.

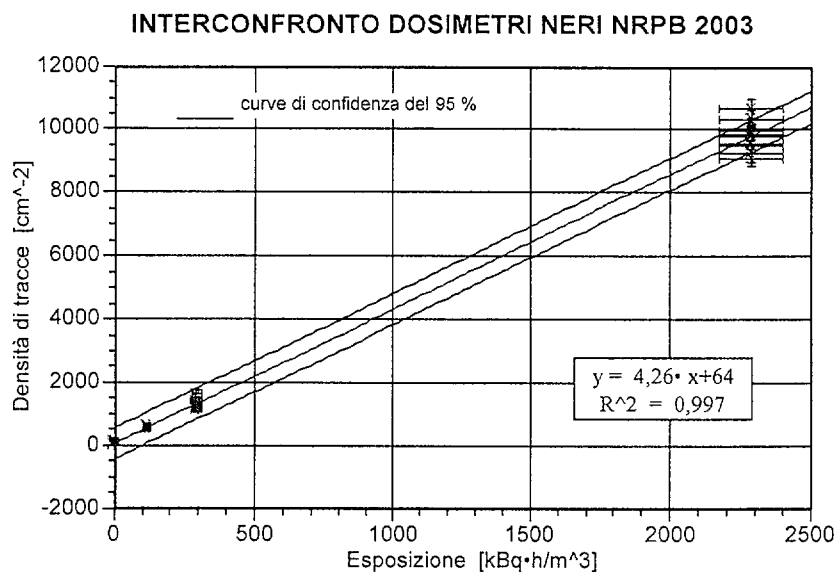


Figura 3.9 Calibrazione del DPT ENEA ION-IRP

Si riportano in sintesi le caratteristiche tecniche ed operative del DPT del Servizio Radon ENEA.

Caratteristiche tecniche:

- Rileva solo il ^{222}Rn gas e i suoi prodotti di decadimento generati all'interno del DPT;
- impedisce l'ingresso della frazione *attached* e *unattached* dei prodotti di decadimento del radon;
- è di tipo chiuso ma senza utilizzare filtri (il filtro comporterebbe un aumento dei costi, dei tempi di confezionamento del tempo di risposta, o di equilibrio);
- ha un tempo di equilibrio breve (la concentrazione all'interno del dispositivo deve essere rappresentativa di quella dell'ambiente di misurazione nel più breve tempo possibile);
- ha dimensioni ridotte (la distanza massima del volume sensibile è inferiore al range in aria delle particelle alfa emesse dal ^{222}Rn , cioè non superiore a 42 mm), in modo che tutta l'attività del ^{218}Po e del ^{214}Po è depositata sulle superfici del volume efficace del DPT (pareti + rivelatore) (*plate out* completo);
- ha la superficie interna conduttrice, in modo da evitare punti d'accumulo di cariche elettrostatiche e garantire le migliori condizioni per una deposizione omogenea delle tracce sul rivelatore;
- ha una sensibilità di risposta ottimale, in quanto la geometria del volume efficace massimizza il numero di particelle rivelabili da un rivelatore di CR-39, con un attacco chimico di 6 ore con una soluzione di NaOH, 6,25N, a 70°C.

Caratteristiche operative:

- L'alloggiamento del rivelatore avviene con una semplice manovra, univoca ovvero senza possibilità di errore, facilmente attuabile dall'utilizzatore.

- Con l'inserimento del rivelatore nel DPT si realizza l'identificazione del dispositivo di misurazione (impiego di un codice unico per rivelatore e DPT, che sia facilmente leggibile).
- Il DPT è costituito da materiale leggero, robusto e infrangibile.

4. CONCLUSIONI

Gli effetti sulla salute dell'esposizione al radon, che costituisce la maggior sorgente di esposizione alle radiazioni ionizzanti per la popolazione mondiale, erano già stati riscontrati nel I° secolo a.C.; tuttavia solo negli ultimi anni del secolo che si è appena concluso vengono pubblicate raccomandazioni da parte dell'International Commission on Radiological Protection e Direttive Europee in cui si fa specifico riferimento al radon e alla necessità della sua misurazione. In particolare prima nel 1996 la Direttiva 96/29/Euratom stabilisce i criteri per la protezione dei lavoratori dall'esposizione al radon e poi nel 2000 viene pubblicato il D.Lgs. 241/00 che prescrive la misurazione di radon in particolari luoghi di lavoro, mentre ancora non esiste alcun obbligo per le abitazioni.

Dal 2000 l'Istituto di Radioprotezione dell'ENEA ha istituito il Servizio di valutazione della concentrazione di radon mettendo a disposizione del sistema paese uno strumento per effettuare la misurazione del radon secondo quanto dovrebbe essere richiesto dalla normativa in vigore.

Il presente RT riassume molte delle problematiche relative al radon ed alla sua misurazione: vengono fornite indicazioni per l'applicazione della normativa e procedure operative per l'esecuzione di una corretta misurazione di radon; viene spiegato e mostrato come valutare il rischio da esposizione al radon con indicazioni relative alla misura dei suoi prodotti di decadimento; viene fornita inoltre una bibliografia essenziale per approfondire i diversi aspetti trattati. Dal testo sono stati tuttavia stralciati alcuni aspetti tecnici che riguardano parti critiche dell'attività del Servizio Radon Enea, che, essendo in fase di brevettazione, non possono ancora essere menzionate. Ed infine, si è opportunamente deciso di presentare la parte modellistica degli effetti sanitari dell'esposizione al radon e quindi dei diversi approcci modellistici di valutazione del rischio in un secondo rapporto, che abbia più caratteristiche di review, e che una volta redatto, completerà il presente lavoro.

Sugli argomenti trattati può essere utile consultare il corso "Il radon: un vicino da conoscere", un corso di formazione a distanza realizzato dall'ENEA basato su tecniche WEB, un nuovo modo di apprendimento sempre più largamente utilizzato, dinamico, flessibile e adattabile all'utente. Il corso, accessibile a chiunque indipendentemente dal grado di formazione scolastica e di specifico interesse, oltre a descrivere gli aspetti generali del radon, gradualmente affronta gli aspetti più tecnici e specialistici legati alla sua misurazione.

All'interno del corso vi è la possibilità di link con diversi documenti e siti, che offrono la possibilità all'utente di approfondire gli argomenti di interesse grazie ad una facile navigazione in rete. Per ogni argomento trattato sono proposti dei test di autovalutazione costituiti da domande a risposta multipla; l'utente ha la possibilità di verificare l'esito del proprio test verificando la correttezza delle risposte e usufruendo di una spiegazione per quelle sbagliate. Il corso comprende inoltre un ampio glossario e una bibliografia nella quale sono inseriti anche i siti Internet relativi agli argomenti trattati. Come supporto pratico, l'utente può infine seguire cinque filmati, che mostrano l'esecuzione della misurazione di radon, le corrette procedure di analisi e la strumentazione necessaria ad un Servizio che opera in tale campo.

Il corso è disponibile in rete all'indirizzo:

http://odl.casaccia.enea.it/FADIIIGen/FadIIISite/MDS_radon.htm

BIBLIOGRAFIA

1. UNSCEAR (1977). Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, with scientific annexes, United Nations, New York.
2. ICRP (1981). Limits for inhalation of radon daughters by workers, ICRP Publication 32, Pergamon Press, Oxford.
3. ICRP (1986). Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters, ICRP Publication 50, Pergamon Press, Oxford.
4. ICRP (1990). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP Vol. 21 No 1-3, Pergamon Press, Oxford.
5. ICRP (1995). Protection against Radon-222 at Home and at Work, ICRP Publication 65, Annals of the ICRP Vol. 23 No 2, Pergamon Press, Oxford.
6. Council Directive 96/29/EURATOM del 13 Maggio 1996 laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionizing radiation. Official Journal of the European Communities. L 159, Vol.39, 1996.
7. Decreto Legislativo 26 maggio 2000 n.241, Attuazione della direttiva 96/29/EURATOM in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti, pubblicato in G.U. n. 203 del 31/08/2000.
8. UNSCEAR (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, with scientific annexes, United Nation, New York.
9. Handbook of Chemistry, (1961). Tenth Edition, Compiled and edited by Norbert Adolph Lange.
10. Minach, L. Laboratorio di chimica fisica, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente di Bolzano (2003). Radon in Alto Adige: Stato delle indagini (www.provincia.bz.it/agenzia-ambiente/2908/radon/index_i.htm).
11. ICRP (1983). Radionuclide transformations – Energy and intensity of Emissions, ICRP Publication 38, Annals of the ICRP, Volumes 11-13.
12. Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia, Indicazioni e proposte per la protezione degli edifici dal radon, Editore ARPA FVG, Udine; ISBN 88-88735-00-3.
13. Bochiccio, F. e Risica, S. (2001). Esposizione della popolazione italiana a radiazioni ionizzanti di origine naturale, AIRP- Convegno Nazionale di Radioprotezione: Dosimetria personale ed ambientale, La Maddalena, 26-28 settembre 2001, ISSN/1120/5555.
14. Conferenza dei Presidenti delle regioni e delle Province Autonome di Trento e Bolzano, Linee guida per le misure di concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei, a cura del Coordinamento delle Regioni e delle Province Autonome di Trento e Bolzano, 6/02/2003 (www.unipv.it/safety/norme/radio/radon.pdf).
15. Lopez M. A., Currivan, L., Falk R., Olko, P., Wernli, C. and Castellani, C. M. (2004). Workplace monitoring for exposures to radon and to other natural sources in Europe: integration of monitoring for internal and external exposure, Radiation Protection Dosimetry Vol. 112, n.1, pp. 121-139.
16. Regione Lombardia (1990). – Circolare sanità n.103/SAN.
17. Council Directive 90/143/EURATOM del 21 Febbraio 1990, Recommendation on the protection of the public against indoor exposure to radon, Indirizzo Internet: http://radiopro.biz/normativa/euratom_143-90.pdf
18. Regione Veneto – Delibera Regionale n. 79, 18/01/2002.
19. Regione Veneto – Delibera Regionale n. 1172 del 18/04/2003.
20. ERRICA 2 (1999). – European research into Radon in Construction Concerted Action.
21. <http://www.epa.gov/RadonPubs/physics.html#SOL6>
22. Kendall, G. M. e Smith, T. J. (2002). Doses to organs and tissues from radon and its decay products, Journal of Radiological Protection n. 22, pp. 389-406.
23. NCRP (1988). Measurement of Radon and Radon Daughter in Air, NCRP Report n. 97.
24. George, A. C. (1976). Scintillation Flasks for the determination of Low Level Concentrations of Radon, Proceedings of the Ninth Midyear Health Physics Symposium (Health Physics Society), McLean, Virginia.

25. Lucas, H. L. (1957). Improved Low-Level Alpha-Scintillation Counter for Radon, *Rev. Sci. Instrum.*, 28, 680.
26. Thomas, J. W., e LeClaire, P. C. (1970). A Study of the Two-filter Method for Radon-222, *Health Phys.*, 18, 113-122.
27. Azimi-Garakami, D. et al (1888). Radon Gas Sampler for Indoor and Soil Measurements and its Applications, *Rad. Prot. Dosimetry*, 24, 269.
28. Cross W. G. e Tommasino, L. (1970). Rapid Reading Technique for Nuclear particle Damage Tracks in Thin Foils, *Radiat. Eff.*, 5, 85.
29. Gray, D. J., e Windham, S. T. (1987). EERf Standard Operating Procedures for Radon-222 Measurement Using Charcoal Canisters, EPA 520/587-005.
30. Kusnetz, H. L. (1956). Radon Daughters in Mine Atmospheres: a Field Method for Determining Concentrations, *Am. Industr. Hyg. Assoc. Q.*, 17, 85.
31. Rolle, R. (1972). Rapid Working Level Monitoring, *Health Phys.*, 22, 233.
32. Markov, K. P., Ryabov, N. V. and Stas', K. N. (1962). A Rapid Method for Estimating the radiation Hazard associated with the presence of Radon Daughter Products in Air, *Soviet J. At. Energy*, 12 333.
33. Shreve, J. D., Miller, R. W. e Cleveland, J. E. (1977). A New Instrument for Quick Determination of Radon and Radon Daughter Concentrations in Air, *Proceedings of Fourth Int. Congr. of the Int. Rad. Prot. Ass.*, Fontanay Aux Roses, France, 111.
34. Tsivoglou, E. C., Ayer, H. E. e Holaday, D. A. (1953). Occurrence of Non-Equilibrium Atmospheric Mixtures of Radon and Its Daughters, *Nucleonics*, 11(9), 40.
35. Thomas, J. W. (1972). Measurement of Radon Daughters in Air, *Health Phys.*, 23, 783.
36. Martz, D.E., Holleman, D. F., McCurdy, D. E. e Schiager, K. J. (1969). Analysis of Atmospheric Concentrations of RaA, RaB and RaC by Alpha Spectroscopy, *Health Phys.*, 17, 131.
37. Nazaroff, W. W. (1983). Optimizing the Total-Alpha-Three-Count Technique for Measuring Concentrations of Radon progeny in Residences, *Health Phys.*, 46, 395.
38. Tremblay, R.J., Leclerc, A., Mathieu, C., Pepin, R. and Townsend M.G. (1979) Measurement of radon progeny concentrations in air by α -particle spectrometric counting during and after air sampling *Health Phys.*, 36, 401-411.
39. <http://www.hpa.org.uk/radiation/services/radon/work.htm>
40. <http://www.epa.gov/radon/pubs/devprot2.html#1.2>
41. Miles, J. C. H. and Howarth, C. B. (2000). Validation Scheme for Laboratories making Measurements of radon in Dwellings: 2000 revision.
42. <http://www.epa.gov/radon/pubs/citguide.html>
43. Laurie S. Waters, Editor (November 1999). "MCNPXTH USER'S MANUAL Version 2.1.5", Report TPO-E83-G-UG-X-00001, Los Alamos National Laboratories.
44. Calamosca, M., Penzo, S. e Gualdrini, G. (2003). The features of the new radon gas CR-39 dosimeter developed at the ENEA Institute of Radioprotection, Radiation Measurement, 36, pp. 221-224.
45. Calamosca, M., Penzo, S. e Gualdrini, G. (2001). Servizio Dosimetrico Radon Enea. Efficienza di rivelazione delle radiazioni α di un SSNTD (CR-39) in funzione dell'energia e dell'angolo d'incidenza, AIRP – Convegno Nazionale di Radioprotezione: Dosimetria personale ed ambientale, La Maddalena, 26-28 settembre 2001, ISSN/1120/5555.
46. Calamosca, M., Penzo, S. e Gualdrini, G. (2003). Experimental determination of CR-39 counting efficiency to alpha particles to design the holder of a new radon gas dosimeter, *Radiation Measurements*, 36, pp. 217-219.

ALLEGATO 1. AZIONI DI RIMEDIO

Come riportate dall'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente di Bolzano – Laboratorio di chimica fisica “ Radon in Alto Adige – Stato delle indagini ” (10) e dall'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia “ Indicazioni e proposte per la protezione degli edifici dal radon ” (12)

Protezione dei nuovi edifici

Molte scelte effettuate a livello di progettazione possono aumentare o diminuire il rischio d'esposizione al radon.

I fattori più importanti sono (10):

- La scelta dei materiali da costruzione: cemento armato, mattoni, legno, pietra, ecc.
Normalmente per la realizzazione delle fondamenta e i muri nelle parti interrato, il cemento dà le maggiori garanzie di isolamento da radon e sono da preferire ai mattoni forati.
Riguardo alla parte superiore della casa, da questo punto di vista, la scelta dei materiali è meno critica.
- La progettazione e destinazione dei locali: di regola il problema del radon riguarda soprattutto ambienti a contatto diretto con il terreno, soprattutto in edifici costruiti su pendii.
Sono colpite però anche abitazioni al piano terreno situate sopra cantine o ambienti vuoti. Perciò sarebbe opportuno scoraggiare l'utilizzo d'interrati o seminterrati a scopo abitativo. Garage o depositi sempre aperti, al piano terra o interrato, possono proteggere le stanze superiori dal radon.
Questo vale in particolare per i cosiddetti vespai.
Tutte le strategie che mirano a “ separare ” dal suolo i locali, contribuiscono a prevenire l'ingresso del radon.
- I giroscale, i vani degli ascensori, i condotti verticali, i camini: in fase di progettazione devono essere evitati o minimizzati i canali di comunicazione tra aree abitate ed aree a contatto con il terreno che possono facilitare il trasporto del radon nella parte abitata della casa.
Le scale che conducono a cantine dovrebbero poter essere chiuse almeno in un punto con una porta ben sigillata. Meglio ancora sarebbe un accesso esterno e separato alle cantine.
A maggior ragione questo accorgimento risulta importante se la cantina possiede una pavimentazione naturale (terra).
- I passaggi di condotte dal terreno: qualsiasi parte impiantistica dell'edificio che penetri nel terreno, costituisce un potenziale punto d'infiltrazione di radon.
Le condotte dell'acqua e del gas, le condotte del gasolio da riscaldamento provenienti da serbatoi interrati, serbatoi per la raccolta dell'acqua piovana, ecc. andrebbero introdotte dalle pareti laterali e non dal pavimento, assicurando una buona ventilazione della tubazione in prossimità della casa (riempimento con ghiaia, lastre di drenaggio).
Lo stesso vale sostanzialmente anche per condutture di piccolo diametro, come cavi elettrici e d'antenna, che devono essere sigillati con materiali elastici.
L'impianto di fognatura dovrebbe attraversare il pavimento della cantina nel minor numero possibile di punti.

- L'isolamento termico: un edificio costruito o risanato a regola d'arte dovrebbe essere munito di uno strato d'isolamento termico e di una guaina a tenuta stagna appropriata tra i locali riscaldati e quelli non riscaldati.
Anche nel caso dell'isolamento esterno delle mura di una casa bisogna prestare attenzione al radon.
Se il rivestimento isolante penetra nel terreno, il radon può diffondersi fino ai piani alti della casa attraverso gli spazi vuoti dello strato isolante.
E' importante sigillare completamente lo strato isolante o interromperlo per un breve tratto, per permettere al radon di uscire all'aperto.
- Il sistema di aerazione: progettare il sistema di aerazione in modo tale da evitare che al piano terra e in cantina si creino depressioni.
Si ricorda che la depressione aumenta in presenza di: finestre aperte sul lato dell'edificio protetto dal vento, ventilatori in bagni e cucine (cappe di ventilazione), correnti termiche ascensionali in camini in caso d'aperture di aerazione assenti o insufficienti.
- L'impianto di riscaldamento: per esempio riscaldamento a pavimento, stufa a legna, centralizzato con termosifoni, impianto di condizionamento con ricambio forzato dell'aria, ecc. Nel caso del riscaldamento a pavimento bisogna prestare la massima attenzione ad un buon isolamento, poiché con il calore si dilatano le crepe.
Le stufe a legna senza un proprio rifornimento d'aria esterna aumentano la depressione in casa. Un impianto di condizionamento con ricambio forzato dell'aria normalmente riduce il problema del radon.
- La ventilazione naturale del suolo: l'aria presente nel sottosuolo che trasporta il radon dal suolo, originariamente è aria esterna, che viene continuamente rinnovata e scambiata.
Conviene favorire questo scambio naturale per esempio collegando opportunamente lo strato (relativamente permeabile) al di sotto della piastra di fondazione con il materiale di riempimento laterale, altrettanto permeabile.
In questo modo l'aria sotto l'edificio si rinnoverà più rapidamente e la concentrazione di radon diminuirà.

Sempre in fase di progetto, se l'edificio è situato in una regione a rischio radon la principale misura precauzionale consiste nel prevedere un ottimo isolamento del fondamento.

Allo scopo esistono diverse soluzioni (10):

- Fondamento a platea in cemento armato: in zone a rischio radon si consiglia di realizzare un fondamento a platea in cemento armato (spessore di circa 30 cm) che ricopra tutta la superficie orizzontale dello scavo della futura casa; di realizzare tutte le mura esterne (verticali) nella parte interrata in cemento armato (spessore circa 30 cm), prestando la massima attenzione alla congiunzione tra muro e platea (punto estremamente critico). Importante sarebbe anche evitare assolutamente di bucare la platea. Se questo non fosse possibile, si consiglia di isolare tutte le perforazioni (condotte di tubazioni, corrente elettrica ecc.) con materiali isolanti o flange elastiche.
In aggiunta è possibile realizzare il fondamento a platea su di uno strato in cemento armato e fra questi posare uno strato isolante (membrane impermeabilizzanti in polimeri bituminosi plastificati o membrane di plastica).
- Fondazioni a strisce: in linea di massima per piccoli edifici in zone con elevata concentrazione di radon, alle fondazioni a strisce, è da preferire la fondazione a platea.
Se contrariamente a quanto detto vengono progettate delle fondazioni a strisce, è assolutamente necessario realizzare la pavimentazione in cemento, con uno strato isolante d'ottima fattura.

Lo strato isolante dovrebbe ricoprire completamente la pavimentazione, ed estendersi senza soluzioni di continuità fino ad una altezza di 50 cm sulle pareti interne. Occorre in ogni caso prestare la massima attenzione a non danneggiare le membrane isolanti, evitando curvature a spigoli.

- Isolamento tra i diversi piani: anche dal punto di vista dell'isolamento termico conviene prevedere uno strato d'isolamento tra il piano interrato (cantina) ed il piano rialzato, con ad esempio delle membrane di plastica. Se possibile conviene realizzare un'intercapedine ventilata (vespaio) che assicura un'ottima protezione dal radon.

Al di fuori delle regioni ad alta concentrazione di radon, normalmente sarà sufficiente che il piano interrato sia interamente costruito in cemento armato per proteggere sufficientemente dal radon proveniente dal sottosuolo.

Accanto ai requisiti progettuali sopra elencati esistono dei sistemi per minimizzare l'entrata del radon. I principali sono (12):

- sistema di depressurizzazione passiva controterra;
- sistema di depressurizzazione attiva controterra (impiego di un ventilatore).

Il primo sistema è di costo limitato e spesso è sufficiente a impedire l'ingresso del radon. L'edificio, una volta abitato, può essere sottoposto a misurazioni ed il sistema può essere trasformato in "attivo" se queste rivelassero un livello di radon ancora elevato. È quindi consigliabile adottare, già nella prima fase, quegli accorgimenti che facilitino la successiva installazione di un aspiratore.

Il secondo sistema è di sicura efficacia; va tuttavia considerato che i sistemi attivi consumano energia elettrica (un ventilatore da 90W consuma circa 780 kWh l'anno per un esercizio continuo), hanno bisogno di manutenzione ed hanno una durata sensibilmente inferiore a quella dell'edificio.

Se per l'edificio si prevede una soletta controterra, il radon deve potersi muovere liberamente sotto questa verso il suo punto di raccolta costituito da una canna d'aspirazione. Quest'ultima ha il compito di convogliare all'esterno il gas proveniente dal sottosuolo. Penetra nel terreno e si fa salire oltre il tetto. Le soluzioni di base da adottare per questo tipo di fondazione dipendono dalla natura del terreno e sono, sostanzialmente:

- Soluzione con vespaio

In terreni morbidi e poco permeabili, al di sotto della prima soletta del piano terra, seminterrato o scantinato, si realizza un vespaio per preservare l'edificio dall'umidità. I vespai sono molto permeabili all'aria e quindi, mettendo in comunicazione il vespaio con un ambiente esterno a pressione inferiore tramite la canna d'aspirazione, si permette il deflusso dell'aria contenente radon;

- Soluzione con anello di tubi perforati

Nel caso in cui il terreno di fondazione sia abbastanza permeabile, al fine di prelevare l'aria contenente radon, si possono scavare canali nel terreno e disporre al loro interno tubi collegati alla canna d'aspirazione.

Se invece per l'edificio si prevede una fondazione con intercapedine tra il terreno e il primo solaio, per evitare che l'aria carica di radon proveniente dal terreno si accumuli nell'intercapedine e possa poi penetrare nei locali abitati, occorre ventilare adeguatamente l'intercapedine, oppure impedire che il radon penetri al suo interno.

Nel caso ci si affidi alla ventilazione naturale, i risultati non sono sempre soddisfacenti.

Utilizzando, invece, la ventilazione meccanica, i risultati sono buoni. La seconda soluzione si attua isolando completamente il terreno dal vano intercapedine, disponendo sulla superficie del terreno stesso una membrana isolante costituita da una serie contigua di fogli di polietilene. Occorre consentire la fuoriuscita dell'aria proveniente dal terreno e che viene a contatto con la membrana tramite una canna di aspirazione che penetra nel terreno.

Risanamento di edifici esistenti

L'opera di risanamento di edifici esistenti, con elevate concentrazioni di radon, può essere estremamente più difficile, incerta e costosa dell'azione di prevenzione effettuata per le nuove costruzioni.

Nel caso possano essere intraprese azioni nell'ambito di interventi di ristrutturazione o manutenzione straordinaria degli edifici, esse potranno essere simili in metodologia, costo ed efficacia a quelle già illustrate per la protezione preventiva dei nuovi edifici.

Diversamente può essere opportuno procedere gradualmente, attuando per primi quegli interventi che sono meno costosi ed invasivi e che potrebbero da soli risolvere il problema.

L'applicazione di qualunque tipo di risanamento, dal più semplice al più complesso, richiede la raccolta preventiva di informazioni puntuali sulla costruzione, i materiali, il sottosuolo, le condutture, ecc. Sulla base delle informazioni raccolte sarà possibile scegliere i tipi di intervento più adatti al singolo edificio e l'eventuale gradualità con cui eseguirli.

Le azioni di risanamento, analogamente alle azioni che possono essere intraprese per la protezione preventiva dei nuovi edifici, devono essere concepite in maniera da eliminare o almeno ridurre in modo significativo la risalita di radon negli edifici dovuta alla depressione dei locali abitati rispetto al suolo e/o all'infiltrazione.

I metodi di risanamento contro il radon più comunemente utilizzati sono di seguito illustrati, cominciando dai più semplici ed economici (10):

- Tenere non completamente chiusa la finestra della cantina.

Come precedentemente spiegato, il radon penetra nelle case per via dell'effetto camino, cioè in conseguenza della depressione che viene a crearsi nella parte bassa della casa.

Se porte e finestre della casa sono ben chiuse, verrà anche aspirata aria dalla fondazione.

Un mezzo efficace per ridurre la depressione in casa è quello di tenere socchiusa una finestra in cantina, oppure di realizzare una apertura di ventilazione nel muro della stanza.

Questo accorgimento molto semplice può ridurre di molto la concentrazione del radon.

- Sigillare crepe, fessure e fughe con materiali isolanti e membrane adatti, tenendo conto che la zona di collegamento tra pavimento e muro è un punto particolarmente critico. In caso di valori elevati ($> 1000 \text{ Bq/m}^3$) e di grandi superfici, un isolamento duraturo è costoso e difficile da realizzare e difficilmente da solo risolve la situazione.

In ogni caso, se il radon penetra attraverso grosse crepe nella roccia sottostante la casa, sarà importante sigillare queste aperture in modo adeguato.

Occorre anche fare attenzione agli scarichi ed alle condutture elettriche.

Le perforazioni rimaste aperte ai lati dei tubi, i rivestimenti delle tubazioni e le canalizzazioni di plastica possono essere ottime vie di risalita per il radon dalla cantina ai piani superiori.

- In presenza di un terreno naturale in cantina, spesso un metodo valido è quello di isolare e cementare il pavimento della cantina.

In presenza di concentrazioni elevate ($> 1000 \text{ Bq/m}^3$) questo provvedimento normalmente non è sufficiente, dato che con il tempo è normale che si formino delle crepe.

Come punti deboli rimangono le congiunzioni tra le pareti ed il pavimento. Sigillare questi punti in maniera duratura è molto difficile.

Qualora nell'ambito di una generale ristrutturazione venisse rifatta la pavimentazione, converrebbe in ogni caso prevedere al di sotto di essa una specie di intercapedine o una rete di tubi di drenaggio incorporati nella ghiaia per bloccare ed asportare l'aria carica di radon.

- Aerazione ed espulsione di aria da cantine e vespai: in molti casi può essere sufficiente aumentare il ricambio d'aria nelle cantine o in un vespaio eventualmente presente sotto le stanze con valori elevati di radon.

Ove possibile, si può anche aspirare con un ventilatore l'aria dal vespaio creando così una depressione in questo spazio.

- Aspirazione dell'aria dal sottosuolo.

Nella maggiore parte dei casi questo metodo è semplice da adottare, è molto efficace e pertanto particolarmente indicato per elevate concentrazioni di radon.

In pratica consiste nello scavare un pozzetto nel pavimento della casa dal quale in modo adeguato si estrae l'aria carica di radon dal sottosuolo prima che possa entrare in casa, ad esempio aspirandola mediante un ventilatore.

Per una maggiore efficienza, il pozzetto va realizzato più vicino possibile al punto d'ingresso del radon e possibilmente in un punto centrale della casa.

Se viene rinnovato tutto il pavimento, allo stesso scopo si può realizzare anche una rete di tubi di drenaggio incorporati nella ghiaia.

Il metodo della raccolta dell'aria del sottosuolo in un pozzetto è particolarmente indicato in una casa senza stanze interrato. In questi casi con un pozzetto profondo 1,5 – 2 m e largo circa 0,5 m ed un ventilatore da circa 24 Watt, si riesce a risanare un'area di circa 200 m².

In dipendenza dalla concentrazione di radon misurata, il ventilatore deve funzionare in continuo o può essere utilizzato in modo discontinuo.

Se le stanze a contatto con il terreno si trovano a diverse profondità (per esempio in una casa su di un pendio), le possibilità d'ingresso per il radon aumentano notevolmente e diventa più difficile individuare una buona posizione per il pozzetto radon.

Normalmente in questi casi l'efficienza del pozzetto diminuisce e può essere necessario aspirare l'aria da più buchi posizionati in diverse stanze e collegati tra di loro con un collettore, oppure realizzare sotto l'intera superficie della pavimentazione un sistema con tubi di drenaggio.

Se anche le pareti sono a contatto con il terreno, può essere conveniente scavare il pozzetto orizzontalmente, praticando un foro nelle pareti.

Il costo dell'impianto per una casa di medie dimensioni (100 ÷ 200 m²) va da alcune centinaia di Euro a qualche migliaia di Euro (10).

Affinché il metodo dell'aspirazione dell'aria dal sottosuolo funzioni, è necessario che nel pozzetto si crei una leggera depressione. Solo in questo caso l'aria carica di radon dal terreno convergerà verso quest'ultimo, e potrà essere espulsa, piuttosto che diffondersi in casa.

Dalle esperienze maturate in Alto Adige (10) risulta che questo tipo d'intervento è normalmente molto efficace per terreni con una permeabilità media; in questo caso le probabilità di successo sono dell'ordine del 80%.

Nel caso di terreni molto permeabili, l'afflusso d'aria nel terreno può essere talmente elevato che con un normale sistema d'aspirazione non si riesce a creare il vuoto sufficiente per il buon funzionamento del sistema. In questo caso conviene utilizzare altre tecniche. Anche in presenza di acqua nel sottosuolo della casa il metodo non è applicabile.

Nel caso in cui l'inquinamento da radon interessi più case vicine l'una all'altra ed il terreno sia molto permeabile, è anche possibile realizzare un sistema unico, costituito da un pozzo scavato vicino alle case, dal quale si estrae l'aria con un ventilatore di maggiore potenza. Quest'ultima possibilità va però valutata con molta cura e in ogni caso conviene fare prima delle misure di permeabilità nel terreno.

Sempre sulla base delle esperienze di risanamento di abitazioni in Alto Adige (10), è risultato che il metodo della raccolta dell'aria del sottosuolo in un pozzetto radon non va applicato se nelle stanze abitate che si trovano direttamente sopra il pozzetto o sono adiacenti ad esso, sono utilizzati sistemi per il riscaldamento a fiamma aperta, cioè stufe a legna, caminetti, stufe a gas ecc. che non dispongano di una presa separata per l'aria esterna o se nelle stanze non vi è un'apertura che garantisca in ogni caso una sufficiente ventilazione.

Non si può escludere che in presenza di crepe, già esistenti o prevedibili nella pavimentazione o nelle pareti, il ventilatore possa causare una leggera depressione anche nelle stanze sopra o vicine al pozzetto e, di conseguenza, se le stanze non sono sufficientemente ventilate, provocare una pericolosa emissione di monossido di carbonio (gas tossico) dalla stufa accesa.

- Aspirazione dell'aria da pavimenti con intercapedine.

A volte può risultare più conveniente realizzare un nuovo pavimento con intercapedine e aspirare l'aria dall'intercapedine anziché utilizzare tubi di drenaggio o pozzi per radon sotto il pavimento.

I pavimenti con intercapedine possono essere di vario tipo. Sul mercato ci sono anche diversi prodotti prefabbricati che normalmente vengono impiegati per la costruzione di uffici, dove l'intercapedine viene utilizzata come spazio per le installazioni.

Lo spessore dell'intercapedine necessario è minimo: qualche centimetro di spazio vuoto è più che sufficiente per raccogliere il radon e convogliarlo verso un punto di raccolta, dal quale viene aspirato con un piccolo ventilatore, oppure per mezzo di un tubo che arriva fino al tetto. In quest'ultimo caso può essere anche conveniente realizzare l'intercapedine con dei punti d'ingresso per l'aria esterna.

In questo modo si formerà un ricambio naturale dell'aria presente nell'intercapedine.

Se si aspira aria esterna bisognerà però isolare anche termicamente la pavimentazione per evitare la formazione di condensa nei mesi freddi.

In ogni caso va ricordato che a protezione dal radon sopra l'intercapedine va posata con la massima cura una membrana isolante che deve non solo coprire il pavimento ma essere anche saldamente incollata per almeno mezzo metro alle pareti laterali.

Nel caso di terreni molto permeabili può essere utile isolare anche la superficie inferiore dell'intercapedine, in modo da ridurre l'afflusso d'aria dal terreno.

In questo caso, di volta in volta, dovrà essere valutato se convenga tenere aperti i punti d'ingresso laterali per l'aria esterna (circolazione naturale dell'aria) oppure chiuderli utilizzando un ventilatore che lavori in depressione.

Alcune esperienze di risanamento di abitazioni in Alto Adige (10), suggeriscono di non applicare tale metodo se nelle stanze abitate siano utilizzati sistemi per il riscaldamento a fiamma aperta, senza presa separata per l'aria esterna o se nelle stanze non vi sia un'apertura che garantisca in ogni caso una sufficiente ventilazione.

- Sovrappressione artificiale nell'edificio.

Per impedire infiltrazioni d'aria del sottosuolo ricca di radon, anziché creare una depressione sotto la pavimentazione dell'edificio, si può anche creare una leggera sovrappressione all'interno delle stanze per mezzo ad esempio di un ventilatore.

Affinché il metodo funzioni l'edificio deve essere il più possibile isolato per esempio con guarnizioni alle porte e finestre. Solo allora potrà formarsi una sovrappressione nelle stanze.

Se le stanze sono a tenuta, sono sufficienti ventilatori molto piccoli (circa 10 – 20 W) per ridurre il problema del radon.

D'inverno può essere necessario riscaldare l'aria immessa.

Il metodo è semplicissimo e poco costoso da realizzare (per esempio basta installare un piccolo ventilatore nella finestra).

- Sovrappressione artificiale nel terreno sotto la casa.

Questo metodo è relativamente nuovo e generalmente raramente impiegato. Viene adottato quando, in conseguenza di una permeabilità estremamente alta del terreno, le altre contromisure sono già risultate inefficaci (10).

Il metodo consiste nell'immettere con un ventilatore l'aria interna della cantina, attraverso il pozzetto radon o il sistema di drenaggio, nel terreno sotto l'edificio.

In pratica si crea un cuscino d'aria sotto la casa che riduce l'infiltrazione del radon in casa oppure ne diluisce la concentrazione.

E' estremamente importante che nei mesi freddi non venga pompata aria esterna (fredda) nel sottosuolo, dato che il terreno potrebbe gelare (dilatazione) e compromettere la stabilità dell'edificio.

Il metodo è estremamente efficiente; in un caso sperimentato in Alto Adige (10), è risultato l'unico metodo con il quale è stato possibile abbassare significativamente la concentrazione del radon. Dopo tre anni di funzionamento, non sono stati rilevati problemi all'edificio.

Lo svantaggio del metodo è che a tutt'oggi non vi sono elementi per stabilire se pompare aria nel sottosuolo modifichi sostanzialmente la struttura del terreno e possa quindi nel lungo periodo compromettere la stabilità dell'edificio (per esempio con formazione di ghiaccio sulla parte esterna delle pareti).

Pur trattandosi di un provvedimento molto efficace, rimangono dubbi importanti sulla sicurezza dell'intervento, che ne limitano grandemente l'applicabilità.

Esaminando tutti i diversi metodi sopra elencati e i molti risanamenti effettuati (10), si può concludere che l'aspirazione di aria dal sottosuolo è l'intervento meno problematico e in molti casi è l'unico metodo sufficientemente efficace per risanare una casa con concentrazioni di radon molto elevate; inoltre fino ad oggi le esperienze maturate ad es. in Svizzera ed Alto Adige non hanno evidenziato problemi in merito.

E' bene rimarcare infine che il metodo prescelto non deve essere solo efficace ma anche sicuro e funzionale nell'utilizzo. In ogni caso un controllo del buon funzionamento dell'impianto e il rispetto del modo d'utilizzo è fondamentale.

ALLEGATO 2. GRANDEZZE E UNITÀ DI MISURA RELATIVE AL RADON E AI SUOI PRODOTTI DI DECADIMENTO

- *Energia potenziale alfa (Potential Alpha Energy-PAE) di un atomo della catena di decadimento del radon*

Energia totale alfa emessa nel corso del decadimento di tale atomo fino al ^{210}Pb .

E' quindi la somma dell'energia rilasciata solo dalle particelle alfa prodotte durante la serie di decadimenti radioattivi che portano alla formazione del ^{210}Pb , considerato stabile.

L'unità di misura è il J (Sistema Internazionale di unità (SI)) o il MeV ($1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J}$).

Il maggior contributo all'energia potenziale alfa è dato dal ^{218}Po .

- *Energia potenziale alfa per unità di attività di prodotto di decadimento del radon*

Rapporto tra energia potenziale alfa e costante di decadimento fisico (λ_r) del radionuclide considerato.

L'unità di misura è il J/Bq (SI) o il MeV/Bq.

Il maggior contributo all'energia potenziale alfa per unità di attività è dato dal ^{214}Pb a causa del suo lungo tempo di dimezzamento, come mostrato in tabella A2.1.

Tabella A2.1 Energia potenziale alfa per atomo e per unità di attività (5)

Radionuclide	$T_{1/2}$	Per atomo		Per unità di attività	
		(MeV)	(10^{-12} J)	(MeV Bq $^{-1}$)	(10^{-10} J Bq $^{-1}$)
^{218}Po	3,05 min	13,69	2,19	3615	5,79
^{214}Pb	26,8 min	7,69	1,23	17840	28,6
^{214}Bi	19,9 min	7,69	1,23	13250	21,2
^{214}Po	164 μs	7,69	1,23	3×10^{-3}	3×10^{-6}
Totale all'equilibrio per Bq di radon				34710	55,6

- *Concentrazione in aria di energia potenziale alfa (Potential Alpha Energy Concentration - PAEC) di una miscela di prodotti di decadimento del radon a vita breve*

Somma delle energie potenziali alfa per unità di attività associate a una qualsiasi miscela di prodotti di decadimento a vita media breve nell'unità di volume.

$$\text{PAEC} = \sum_i C_i (\text{PAE}_i / \lambda_{r,i})$$

dove C_i è la concentrazione del prodotto di decadimento i .

L'unità di misura è il J/m 3 (SI) o il MeV/m 3 .

La concentrazione di energia potenziale alfa di una miscela di prodotti di decadimento del radon, può essere espressa in termini di concentrazione equivalente in equilibrio con il radon.

- *Concentrazione equivalente all'equilibrio (Energy Equivalent Concentration - EEC)*

Concentrazione di radon in equilibrio con i suoi prodotti di decadimento che ha la stessa concentrazione di energia potenziale alfa della miscela presa in esame.

L'unità di misura (SI) è il Bq/m 3

$$\text{EEC} = 0,105 \cdot C_1 + 0,515 \cdot C_2 + 0,380 \cdot C_3 + 6 \times 10^{-8} \cdot C_4$$

Dove C_1, C_2, C_3 e C_4 sono rispettivamente le concentrazioni del ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e del ^{214}Po .

I fattori numerici presenti nella formula (K) si ricavano dividendo l'energia potenziale alfa per unità di attività relativa a ciascun radioisotopo per l'energia potenziale alfa per unità di attività totale relativa alla miscela di prodotti di decadimento in equilibrio con il radon (vedi tabella A2.1)

$$\begin{aligned} K(C_1) &= 5,79 / 55,6 = 0,105 \\ K(C_2) &= 28,6 / 55,6 = 0,515 \\ K(C_3) &= 21,2 / 55,6 = 0,380 \\ K(C_4) &= 3 \times 10^{-6} / 55,6 = 6 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

- *Fattore di equilibrio (F)*

Rapporto tra la concentrazione equivalente all'equilibrio e la concentrazione effettiva di radon. Il fattore di equilibrio è un parametro adimensionale utile per la valutazione dei prodotti di decadimento del radon; definisce il disequilibrio fra la miscela dei prodotti di decadimento del radon e il capostipite.

Le condizioni d'equilibrio ($F=1$) non sono mai raggiunte a causa principalmente della deposizione dei prodotti di decadimento su qualsiasi superficie incontrino; la concentrazione di radon risulta sempre maggiore di quella dei suoi prodotti di decadimento, quindi $F < 1$.

L'UNSCEAR 2000 riporta un valore $F = 0,4$ per gli ambienti interni (" indoor ") e $F = 0,6$ all'aperto (" outdoor "); quest'ultimo valore dipende da numerosi fattori ambientali, inclusa l'esalazione del radon dal suolo e le condizioni atmosferiche, per cui ha un'ampia variabilità (da 0,2 a 1).

- *Esposizione*

Integrale della concentrazione di radon nel periodo di tempo considerato. L'unità di misura è il Bq h m^{-3}

- *Esposizione ai prodotti di decadimento del radon*

L'esposizione di un individuo ad una miscela di prodotti di decadimento a vita media breve del radon si definisce o come l'integrale nel tempo della EEC e si esprime in unità di Bq h m^{-3}

$$P_{eq}(T) = \int_0^T EEC(t) dt$$

o come l'integrale nel tempo della concentrazione di energia potenziale alfa e si esprime in unità di J h m^{-3}

$$P_p(T) = \int_0^T PAEC(t) dt$$

Per passare da $P_{eq}(T)$ a $P_p(T)$ si usa il seguente coefficiente di conversione:

$$5,56 \times 10^{-9} \text{ J h / m}^3 \text{ per } \text{Bq h m}^{-3}$$

- *Working Level (WL)*

Ogni miscela di prodotti di decadimento del radon che ha una PAEC di $1,3 \times 10^8 \text{ MeV/m}^3$ ($2,08 \times 10^{-5} \text{ J / m}^3$). Esprimendo il WL in termini di EEC, si ricava che 1 WL corrisponde ad una EEC di 3700 Bq/m^3 .

Il WL è un indice adimensionale, introdotto per la dosimetria nelle miniere.

- *Working Level Month (WLM)*

L'esposizione ad 1 WL per un mese lavorativo assunto pari a 170 ore/mese

Il WLM è l'unità storica dell'esposizione ai prodotti di decadimento del radon (P_p) e riguarda i lavoratori.

$$1 \text{ WLM} = 170 \text{ h} \times 2,08 \times 10^{-5} \text{ J/m}^3 = 3,54 \text{ mJ h m}^{-3}$$

$$\text{o anche } 1 \text{ J h/m}^3 = 1,57 \cdot 10^{-6} \text{ WLM}$$

- *Dose assorbita (D)*

Energia assorbita per unità di massa, cioè il quoziente di dE diviso per dm , in cui dE è l'energia media ceduta dalle radiazioni ionizzanti alla materia in un elemento volumetrico e dm è la massa di materia contenuta in tale elemento volumetrico. La dose assorbita indica la dose media in un tessuto o in organo.

L'unità di misura è il Gray (Gy).

- *Dose equivalente (H_T)*

Dose assorbita media in un organo o tessuto T, ponderata in base al tipo e alla qualità della radiazione.

$$H_{T,R} = w_R \times D_{T,R}$$

L'unità di misura è il Sievert (Sv).

- *Dose efficace (E)*

Somma delle dosi equivalenti nei diversi organi o tessuti, ponderate per opportuni fattori di ponderazione che tengono conto della diversa radiosensibilità dei diversi organi o tessuti del corpo umano.

$$E = \sum_T w_T \times H_T$$

L'unità di misura è il Sievert (Sv).

- *Dose equivalente impegnata ($H_T(t)$)*

Integrale rispetto al tempo dell'intensità di dose equivalente in un tessuto o organo T che sarà ricevuta da un individuo, in quell'organo o tessuto T, a seguito dell'introduzione di uno o più radionuclidi.

L'unità di misura è il Sievert (Sv).

- *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:

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

dove:

t indica il numero di anni per i quali è effettuata l'integrazione.

L'unità di misura è il Sievert (Sv).

Edito dall' **ENEA**
Funzione Centrale Relazioni Esterne
Unità Comunicazione
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - CR Frascati
Finito di stampare nel mese di marzo 2006