

**DETERMINAZIONE DELLA CONCENTRAZIONE DEL  
GAS RADIOATTIVO RADON ATTRAVERSO  
L'ANALISI DELLE TRACCE NUCLEARI PRODOTTE  
DAI PRODOTTI DI DECADIMENTO DEL RADON  
SU MATRICI POLIMERICHE (PADC)**

## INDICE

1. **PREMESSA**
2. **MATERIALI “POLIMERICI”**
3. **PADC: ORIGINE E PRINCIPALI UTILIZZI: che cosa è, com’è e dove si produce, utilizzi principali)**
4. **SORGENTI NATURALI DI RADIAZIONI IONIZZANTI**
5. **RADON**
6. **QUADRO LEGISLATIVO IN MATERIA DI PROTEZIONE DALLE RADIAZIONI IONIZZANTI**
7. **MODALITA’ E STRUMENTAZIONE PER LA RILEVAZIONE E MISURA DEL RADON GAS**
8. **SISTEMA DI MISURA DELLA CONCENTRAZIONE DEL GAS RADON ATTRAVERSO IL CONTEGGIO DELLE TRACCE NUCLEARI PRODOTTE DAI PRODOTTI DI DECADIMENTO DEL RADON SU MATRICI POLIMERICHE (PADC)**
9. **DESCRIZIONE DEI VANTAGGI DEL SISTEMA DI MISURA BASATO SULL’USO DI PADC**
10. **RISULTATI DI CAMPAGNE DI RILEVAZIONE CONCENTRAZIONE RADON GAS EFFETTUATE IN DIVERSE REALTA’:**
  - **ABITAZIONI**
  - **TERME**
  - **INSEDIAMENTI PRODUTTIVI**
11. **CONCLUSIONI**

**ALLEGATI:**

**BIBLIOGRAFIA:**

**PREMESSA**  
*(DA SVILUPPARE)*

## **2- MATERIALI POLIMERICI**

### **2.1- STRUTTURA DEI POLIMERI**

Con il termine polimero si intende una sostanza formata dall'unione di un numero elevato di piccole molecole, dette monomeri, che si ripetono lungo la catena polimerica. All'interno di ciascuna molecola gli atomi sono legati tra loro da legami interatomici covalenti. Per la maggior parte dei polimeri le molecole si presentano sotto forma di catene lunghe e flessibili, la cui struttura portante è una fila di atomi di carbonio; spesso ciascun atomo di carbonio presenta un legame singolo con altri due atomi di carbonio. Ciascuno dei due elettroni di valenza rimanenti in ogni atomo di carbonio può essere interessato da legami laterali con atomi o radicali che si posizionano adiacentemente alla catena. La formula di un polimero può essere indicata come ripetizione  $n$  volte di quella che viene definita unità ripetente, cioè la porzione della macromolecola che si ripete continuamente lungo la catena polimerica. Il numero di unità ripetenti presenti nella molecola di un polimero determina il grado di polimerizzazione.

La nomenclatura dei polimeri utilizza sia nomi d'uso sia regole sistematiche. Per i polimeri naturali si utilizzano di solito i nomi d'uso (cellulosa); per i polimeri artificiali si utilizza il nome d'uso del polimero naturale opportunamente modificato (acetato di cellulosa); per i polimeri sintetici generalmente si premette il prefisso "poli" al nome del monomero o dell'unità ripetente (polipropilene). Se nella formazione del polimero sono coinvolti gruppi funzionali, li si può denominare premettendo il prefisso "poli" al nome del gruppo funzionale (poliesteri). Un metodo per identificare i polimeri più comuni è l'uso di sigle, per cui, per esempio, PA identifica le poliammidi, PET è il polietilene tereftalato.

Quando tutte le unità monomeriche presenti in una catena polimerica sono dello stesso tipo, il polimero risultante è chiamato omopolimero. Quando nella polimerizzazione le catene sono composte da unità appartenenti a due o più unità monomeriche differenti si parla di copolimero.

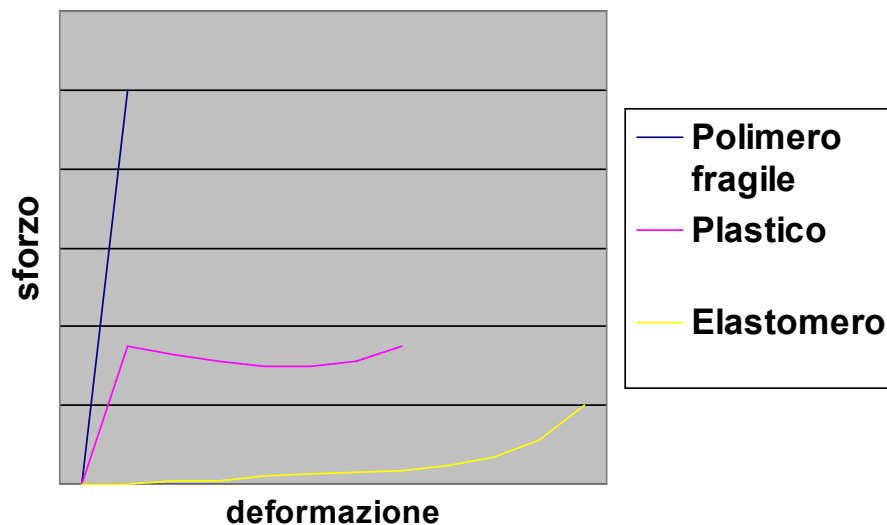
I copolimeri presentano migliori proprietà rispetto agli omopolimeri e in funzione del processo di polimerizzazione e delle quantità relative dei monomeri sono possibili diverse distribuzioni dei monomeri lungo la catena del polimero. Nel copolimero random le due differenti unità monomeriche sono casualmente disperse lungo la catena. Nel copolimero a blocchi c'è un'alternanza di blocchi costituiti dalla medesima unità monomerica, in quello alternato le unità monomeriche si succedono alternandosi lungo la catena, mentre nel copolimero ad innesto, su una catena principale costituita da un omopolimero, possono essere innestati rami laterali costituiti da un omopolimero diverso.

Le caratteristiche fisiche di un polimero dipendono dalla sua forma, dal suo peso molecolare e dalle differenze di configurazione strutturale delle catene molecolari. Principalmente esistono quattro strutture: lineare, ramificata, a legami incrociati e reticolata. I polimeri lineari sono quelli in cui le unità monomeriche sono unite da un estremo all'altro in una singola catena nella quale sono presenti numerosi legami di Van der Waals. Tra i polimeri lineari più noti ricordiamo il polistirene ed il nylon. I polimeri ramificati presentano una struttura tale che dalla catena si dipartano ramificazioni laterali. I rami sono generati da reazioni laterali che avvengono durante la sintesi del polimero. Con la formazione delle ramificazioni si riducono le capacità di impacchettamento della catena per cui la densità del polimero diminuisce. Nei polimeri a legami incrociati, le catene lineari adiacenti sono unite l'una all'altra in vari punti da legami covalenti. Lo sviluppo di legami incrociati è ottenuto sia durante la sintesi, sia con una reazione chimica non reversibile che viene effettuata ad elevata temperatura. Spesso questi legami incrociati si ottengono mediante aggiunte di atomi o molecole che si legano alla catena principale con legami covalenti. Si definiscono poi polimeri reticolati quei polimeri in cui le unità monomeriche trifunzionali hanno tre legami covalenti e formano reti tridimensionali.

## 2.2 CARATTERISTICHE MECCANICHE E TERMOMECCANICHE

Nella figura sono riportati i tre tipici comportamenti sforzo-deformazione dei materiali polimerici. Il polimero fragile si rompe in campo elastico, il materiale plastico inizialmente subisce una deformazione plastica, seguita poi dallo snervamento e da una regione a comportamento plastico. La deformazione mostrata dall'elastomero è completamente elastica. Le caratteristiche meccaniche dei polimeri sono molto sensibili alle variazioni di temperatura: in particolare, l'aumento di temperatura determina una diminuzione del modulo elastico, riduzione del carico di rottura e aumento della duttilità. Lo stesso effetto è ottenuto al diminuire della velocità di deformazione.

### curva sforzo-deformazione



## 2.3- CLASSIFICAZIONE DEI POLIMERI

Una possibile classificazione dei materiali polimerici si basa sulla risposta meccanica che hanno ad elevate temperature e in questo caso si distinguono i polimeri termoplastici dai polimeri termoindurenti.

### **2.3.1- POLIMERI TERMOPLASTICI E TERMOINDURENTI**

I materiali termoplastici hanno struttura bidimensionale, rammolliscono o fondono ad alta temperatura, passano irreversibilmente dallo stato solido ad una fase intermedia gommosa e quindi allo stato liquido e tendono a sciogliersi in determinati solventi. Possono essere lavorate per riscaldamento fino a fusione del polimero e successivo raffreddamento e questa operazione può essere ripetuta indefinitamente. A livello molecolare, all'aumentare della temperatura si indeboliscono le forze di legame secondario in modo tale da facilitare il movimento relativo di catene adiacenti sotto l'applicazione di una pressione. In questi polimeri si determina una degradazione irreversibile quando vengono portati allo stato fuso ad una temperatura alla quale le vibrazioni molecolari raggiungono una violenza tale da rompere i legami covalenti.

I materiali termoindurenti hanno una struttura tridimensionale, decompongono al calore in modo irreversibile, sono infusibili e insolubili e inadatti ad un processo di filatura. Inoltre sono più duri e più fragili dei termoplastici. Essi induriscono in seguito ad un'iniziale applicazione di calore ma non subiscono alcun ammorbidimento se sottoposti a riscaldamenti successivi. Durante il trattamento iniziale di riscaldamento si formano legami incrociati covalenti tra catene molecolari adiacenti; questi legami ancorano le catene fra di loro in maniera tale che esse sono in grado di resistere ai moti vibratorii e rotazionali imposti alle catene alle alte temperature. Soltanto un riscaldamento a temperature molto elevate è in grado di spezzare questi legami incrociati e provocare la degradazione del polimero.

### **2.3.2- ELASTOMERI**

Un'altra categoria particolare di polimeri è rappresentata dalla classe degli elastomeri. Un requisito caratteristico del comportamento di un elastomero è che la struttura molecolare sia a legami incrociati. Il processo di realizzazione dei legami incrociati negli elastomeri è detto vulcanizzazione, ottenuta con una reazione non reversibile e condotta ad alta temperatura. In questa reazione vengono aggiunti atomi di zolfo all'elastomero riscaldato; le catene di atomi di zolfo si legano con le catene di base del polimero adiacente e formano con esse legami incrociati. I legami incrociati che si formano nella catena principale sono dovuti agli atomi di carbonio aventi il legame doppio prima della vulcanizzazione e che sono diventati a legame singolo. Gli elastomeri hanno la capacità di essere deformati raggiungendo deformazioni abbastanza grandi e poi riportarsi velocemente alla loro forma originale. Quando non è sollecitato, un elastomero è amorfo e composto da catene molecolari molto ritorte e attorcigliate. La deformazione elastica si trasforma in un parziale districamento, raddrizzamento e stiramento delle catene ed al loro allineamento ed

allungamento nella direzione della sollecitazione. Al cessare della sollecitazione, le catene si riportano istantaneamente nella loro configurazione precedente e il campione riacquista la sua forma necessaria. Le proprietà degli elastomeri dipendono dal grado di vulcanizzazione e dall'utilizzo o meno di rinforzi. L'elastomero sintetico più importante è lo SBR, che trova impiego nei pneumatici per automobile, rinforzato con nerofumo. Il nerofumo è usato come additivo per migliorare la resistenza a trazione, abrasione e rigidità delle gomme.

### **2.3.3- FIBRE**

I polimeri fibrosi hanno la proprietà di essere filati in lunghi filamenti che presentano un rapporto lunghezza/diametro di almeno 100:1. Essi devono avere alta resistenza alla trazione e all'abrasione e elevato modulo elastico. Queste proprietà dipendono dalla struttura chimica delle catene del polimero e dal processo di filatura delle fibre. Il peso molecolare dei materiali per fibre dovrebbe essere abbastanza alto ed inoltre le fibre polimeriche devono presentare stabilità chimica in una gamma piuttosto estesa di ambienti (acidi, basi, candeggianti), essere non infiammabili e facili ad asciugarsi.

### 3- PADC

Con la sigla PADC o CR39, si intende un materiale polimerico normalmente usato per occhiale da sole, salva schermi, il cui uso scientifico è quello di rivelatore nucleare a tracce. Le particelle cariche, passando attraverso il CR39, creano dei danni nelle catene del polimero. Tali danni possono essere evidenziati dopo appropriati attacchi chimici. Dopo l'attacco chimico, il percorso della particella carica appare nella forma di fori.

L'origine del CR39 risale agli inizi della seconda guerra mondiale, quando una filiale dell'industria PPG, la Columbia Southern Chemical Company, iniziò un programma chiamato "Columbia Resins" per la ricerca di materiali termoplastici, in seguito alla scarsità delle materie prime. Nel maggio 1940 i ricercatori misero a punto un monomero, l'Allil Diglicol Carbonato (ADC). Negli anni successivi vennero sintetizzati e studiati ben 180 derivati di questo monomero ed il 39esimo si dimostrò essere il più significativo per le sue proprietà.

#### 3.1 OTTICA

Il CR39, in virtù delle sue caratteristiche fisiche e del suo potere di rifrazione, viene considerato un polimero ottico ed attualmente è il più diffuso in campo oftalmico.

In tabella 1 si riportano le caratteristiche chimico-fisiche dei due polimeri ottici più utilizzati in relazione a quelle del vetro crown, che è il vetro più comunemente utilizzato per la realizzazione di lenti solari afocali e correttive.

	Policarbonato	CR39	Vetro Crown
Indice rifrazione	1.586	1.495	1.525
Peso specifico	1.2	1.31	2.53
N° di Abbe	30.00	57.80	58.40
Riflessione	10%	7.7%	8.4%
Trasmissione UV			
A 300 nm	0.00%	0.00%	10.00%
A 350 nm	0.00%	1.00%	8.5%
A 380 nm	2.00%	45.00%	91.00%

L'indice di rifrazione esprime la capacità di un mezzo ottico di deviare il raggio luminoso che lo attraversa. Il numero di Abbe è un numero che esprime il grado di dispersione cromatica di un mezzo ottico. In pratica esprime la tendenza del mezzo ottico a scomporre la luce bianca nei colori fondamentali che la



compongono, compromettendo la nitidezza dell'immagine. I materiali otticamente migliori sono caratterizzati da valori elevati. Dal peso specifico del materiale ottico dipende il peso dell'occhiale: le lenti in polimero ottica la metà delle corrispondenti lenti in vetro.

Il CR39 è più resistente al graffio degli altri materiali plastici e non necessita di un trattamento antigraffio. Confrontando il peso specifico del CR39 con quello del vetro si osserva che, a parità di spessore, il peso di una lente in CR39 è inferiore di circa il 48% di un'analogha lente in vetro. Inoltre la resistenza all'urto è 4 volte superiore a quella del vetro Crown ed infine la lente in CR39 è facilmente lavorabile e colorabile in superficie.

### 3.2 USO SCIENTIFICO

Il CR39 usato in ambito scientifico è il risultato di numerosi studi sulla rivelazione di ioni pesanti e particelle alfa. Si tratta di una resina termoindurente ottenuta mediante un processo di polimerizzazione. La realizzazione del polimero avviene in due stadi. Prima viene preparato un polimero lineare, detto prepolimero, allo stato liquido, con basso peso molecolare. Questo materiale è trasformato nel prodotto finito in una seconda fase di lavorazione, che viene effettuata usando uno stampo della forma desiderata. Questa fase è detta cura ed avviene con riscaldamento; durante questa fase, avvengono modificazioni chimiche e strutturali a livello molecolare e si forma una struttura a legami incrociati o reticolati.

La miscela che costituisce il CR39 è composta per il 69,86% dal monomero Allil Diglicol Carbonato (ADC) e per il 30% da polipropilene isotattico (iPP) catalizzatore. Sciolto nella miscela si scalda scindendosi in due radicali che innescano una reazione a catena con la molecola del monomero. La miscela è addizionata inoltre con lo 0,01% di Naugaard 445 (N445) antiossidante, che permette di mantenere inalterate più a lungo le caratteristiche delle lastre e 0,1% di Dioctiftalato (DOP) plastificante, in grado di garantire la trasparenza della superficie della plastica finale anche dopo attacchi chimici prolungati. Un inconveniente che si presenta quando il CR39 è sottoposto ad un attacco chimico, per alcune ore, è l'opacità della superficie finale. Il CR39 con l'aggiunta di 0,1% di DOP conserva una notevole trasparenza anche a seguito di prolungati attacchi, ma la sensibilità del prodotto risulta minore del CR39 puro.

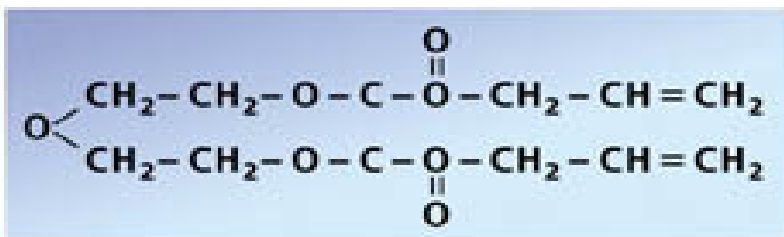


Figura 2 Struttura molecolare del CR39

**NOTA PER PIETRO:**

**DEVO INTRODURRE UNA FRASE DI COLLEGAMENTO FRA USO SCIENTIFICO DEL CR 39 CON LA RADIOATTIVITA' ED IL RADON**

**4. SORGENTI NATURALI DI RADIAZIONI**

La radioattività è una componente naturale dell'ambiente in cui viviamo ed ha accompagnato lo sviluppo dell'ecosistema terrestre e del genere umano fin dalla sua origine.

Le radiazioni naturali, presenti ovunque nell'ambiente, sono originate da tre componenti fondamentali:

- raggi cosmici, costituiti da radiazioni emesse dai corpi stellari, che raggiungono la terra. L'intensità dei raggi cosmici che può raggiungere l'uomo dipende dall'altitudine sul livello del mare e varia moderatamente con la latitudine;
- radioisotopi cosmogenici, prodotti dalla interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera e con la superficie terrestre (principalmente C-14);
- radioisotopi naturali già presenti all'epoca di formazione del sistema solare, che lentamente decadono con l'invecchiamento della terra (radioisotopi primordiali). Questi radioisotopi sono ubiquitari, cioè presenti in ogni materia, vivente e non vivente. La loro concentrazione varia molto con le caratteristiche geomorfologiche dei terreni. Particolare menzione merita il gas radon perché è inalato ovunque e dà il maggior contributo alla dose da sorgenti naturali.

In termini di dose da radiazione all'uomo la componente raggi cosmici provoca irraggiamento esterno; la componente radioisotopi cosmogenici provoca essenzialmente irraggiamento interno, prevalentemente da ingestione; la componente radioisotopi primordiali provoca irraggiamento sia esterno che interno.

Nella tabella 2 seguente sono indicati i valori tipici delle dosi annue individuali, mediate rispettivamente a livello mondiale e a livello nazionale<sup>1</sup>:

---

<sup>1</sup> I dati sono stati desunti da:

- Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation- UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, UN, New York, 1993.

- F Bocchicchio, G. Campos Venuti, C. Nucciatelli, S. Piermattei, S. Risica, L. Tommasino, G. Torri (ANPA, ISS), "Results of the representative Italian national survey on radon indoors", Health Physics, 71, pg. 721-748, 1996.

- G. Campos Venuti, S. Piermattei, "Il radon indoors: stato ed evoluzione della normativa", Rapporto ISTISAN 98/3, ISS, Roma, 1998.

<b>Dosi efficaci annuali da sorgenti naturali, per individui adulti</b>			
<i>Sorgente</i>	<i>Tipo di esposizione</i>	<i>Dose efficace (media mondiale) (mSv/anno)</i>	<i>Dose efficace (media italiana) (mSv/anno)</i>
Raggi cosmici	Esterna	0,39	0,30
Radioisotopi cosmogenici	Interna (ingestione)	0,01	0,01
Radioisotopi primordiali	Esterna	0,46	0,58
	Interna (escluso radon)	0,23	0,23
	Interna da radon	1,3	2,0
Totale	Esterna, interna	2,4	3,1

I valori relativi alla situazione italiana sono stati desunti da stime basate sulle misure sin qui effettuate. Nel valutare i dati presentati in tabella occorre tenere nel debito conto le notevolissime fluttuazioni su base geografica, specie per quanto riguarda il contributo dei radionuclidi primordiali. Limitandosi al solo territorio nazionale, i valori tipici dei contributi ad essi dovuti variano fortemente in relazione alla conformazione geomorfologica dei terreni, alla tipologia delle abitazioni ed ai materiali da costruzione utilizzati, risultando grossolanamente compresi tra 0,3 e 1,2 mSv/anno, per il solo irraggiamento esterno, e tra 0,3 e 2,5 mSv/anno, per la sola esposizione al radon.

La dose media mondiale individuale è pertanto stimata pari a 2,4 mSv/anno, mentre la media nazionale si colloca attorno a 3,1 mSv/anno.

Significativi incrementi alle dosi medie individuali possono derivare dai voli, interessando sia gli equipaggi sia i passeggeri. L'intensità di dose efficace cresce al crescere delle quote di volo: si passa infatti da un valore medio dell'ordine di 0,003 mSv/h ad 8000m sul livello del mare a circa 0,013 mSv/h a 15000-16000m. Pur trattandosi di valori significativi a livello individuale, le dosi collettive corrispondenti non sono tuttavia tali da alterare i valori medi sopra indicati.

#### **4.1- LA RADIAZIONE COSMICA**

Un contributo fondamentale alla radiazione naturale di fondo deriva dai raggi cosmici, che raggiungono la superficie terrestre con un'intensità dipendente dalla latitudine e dall'altitudine, e che hanno due componenti distinte: la radiazione primaria e la secondaria.

I raggi cosmici primari sono costituiti prevalentemente da particelle di carica positiva, in gran parte protoni e positroni (elettroni con carica positiva).

Emesse dai corpi stellari, giungendo in prossimità della Terra le particelle risentono dell'azione deviante del campo magnetico terrestre in misura legata alla loro energia; infatti solo quelle dotate di energia superiore a qualche GeV possono contribuire al fondo di radiazioni al livello del suolo, mentre quelle con energia minore sono imprigionate dal campo magnetico terrestre in zone situate a qualche migliaio di chilometri dalla superficie terrestre formando le cosiddette cinture (o fasce) di Van Allen.

I raggi cosmici secondari sono generati dall'interazione dei raggi cosmici primari con l'atmosfera terrestre. Quando le particelle ad alta energia urtano gli atomi presenti nell'aria, vengono emesse radiazioni secondarie (mesoni, elettroni, fotoni, protoni e neutroni).

Le nuove particelle prima di giungere sulla superficie della Terra possono decadere, oppure creare a loro volta altre radiazioni secondarie: da un singolo raggio primario può così risultare uno sciame di milioni di particelle secondarie.

I raggi cosmici primari vengono quasi totalmente assorbiti negli strati più alti dell'atmosfera, e già a circa 20 km dal livello del mare i raggi cosmici sono quasi interamente di natura secondaria.

La dose generata dai raggi cosmici aumenta dall'estremo limite dell'atmosfera - sebbene l'intensità della radiazione primaria decresca - fino alla quota di circa 20 km a causa della crescita della componente secondaria. Sotto i 20 km le particelle secondarie subiscono una progressiva attenuazione, e la dose decresce.

Nella radiazione cosmica al livello del suolo si distinguono due componenti: neutronica e ionizzante. In termini di dosi assorbite, la prima dà un contributo nettamente inferiore a quello della componente ionizzante, ma tale contributo diviene più rilevante in termini di dose efficace.

Nella tabella 3 sono riportati i valori di dose efficace annua per siti che vanno dal livello del mare fino a circa 4.000 m di altitudine. Il corrispondente valore medio mondiale è di 0,38 mSv.

In Italia si valuta una dose efficace annua mediata su tutta la popolazione di 0,30 mSv. Nei viaggi aerei ad una quota di 8.000 m i passeggeri sono esposti a ratei di dose efficace di circa 0,003 mSv/ora, che diventano circa 0,03 mSv/ora alla quota di 15.000 m (valori medi tipici).

Tabella 3 - Esposizione media annua ai raggi cosmici in alcune città poste a differenti altitudini

Località	Popolazione (milioni)	Altitudine (m)	Dose efficace annua (mSv/anno)		
			Ionizzante	Neutroni	Totale
Città in altitudine					
La Paz, Bolivia	1,0	3.900	1,120	0,900	2,020
Lhasa, Cina	0,3	3.600	0,970	0,740	1,710
Quito, Ecuador	11,0	2.840	0,690	0,440	1,130
Mexico City, Messico	17,3	2.240	0,530	0,290	0,820
Nairobi, Kenya	1,2	1.660	0,410	0,170	0,580
Denver, USA	1,6	1.610	0,400	0,170	0,570
Teheran, Iran	7,5	1.180	0,330	0,110	0,440
Livello del mare			0,240	0,030	0,270
Media mondiale			0,300	0,080	0,380

#### 4.2- LA COMPONENTE DOVUTA AI RADIOISOTOPI COSMOGENICI

L'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera, la biosfera e la litosfera porta alla formazione di numerosi radioisotopi, le cui caratteristiche sono riportate in tabella 4. I radioisotopi cosmogenici (i più rilevanti sono il trizio, il berillio-7, il carbonio-14 e il sodio-22) inducono un irraggiamento interno di scarsa entità dovuto per lo più al carbonio-14, quantificabile come riportato nella tabella 5. L'irraggiamento esterno è assolutamente trascurabile.

Tabella 5 - Introduzione annua da ingestione di radioisotopi cosmogenici e dosi efficaci per gli adulti.

Radioisotopo	Introduzione (Bq/anno)	Dose efficace annua ( $\mu$ Sv/anno)
$^3\text{H}$	500	0,01
$^7\text{Be}$	1.000	0,03
$^{14}\text{C}$	20.000	12
$^{22}\text{Na}$	50	0,15

#### 4.3- LA RADIAZIONE TERRESTRE

Un diverso contributo alla radiazione naturale di fondo deriva dai radioisotopi naturali presenti a diversa concentrazione nelle acque, nelle rocce e nei terreni. Gran parte di questi radioisotopi si originano gli uni dagli altri nel corso del processo di decadimento e vengono perciò raggruppati in "famiglie", ciascuna originata da un radioisotopo "capostipite" e composta da tutti i radioisotopi che si generano nel decadimento del capostipite o di uno dei nuclei risultanti. La maggior parte dei radioisotopi naturali può essere in tal modo raggruppata in tre famiglie:

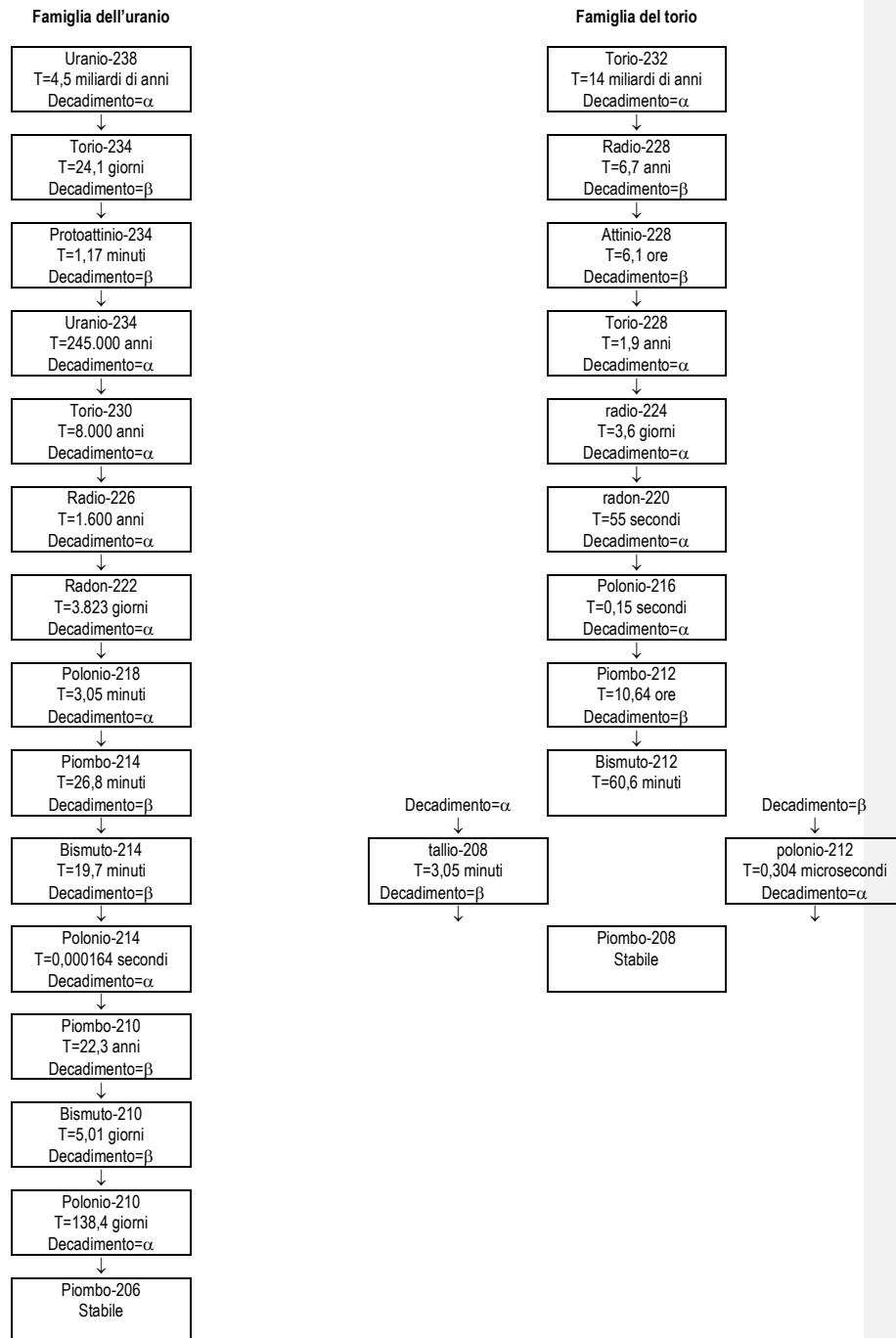
- la famiglia dell'uranio, avente come capostipite l'uranio-238,

- la famiglia dell'attinio, avente come capostipite l'uranio-235,
- la famiglia del torio, avente come capostipite il torio-232.

L'irradiazione, interna ed esterna, del corpo umano è causata in massima parte dai radioisotopi delle famiglie dell'uranio e del torio.

Nella figura 3 sono illustrati i componenti di queste due famiglie.

Figura 3 - Famiglie radioattive naturali dell'uranio e del torio.



L'uranio-238, il torio-232 e i loro discendenti (specie il radio-226, il radon-220, il radon-222, il polonio-210 e il piombo-210), sono tutti presenti in maniera ubiquitaria nelle principali matrici ambientali e nei materiali impiegati nella costruzione degli edifici.

La composizione e la concentrazione della radioattività naturale nel terreno variano tuttavia largamente con le caratteristiche geomorfologiche del sito considerato.

Nei materiali usati in edilizia si hanno normalmente  $10 \div 100$  Bq/kg di radio-226 e torio-232, con picchi fino a qualche migliaio di Bq/kg, come si verifica per lo scisto di allume (Svezia), per le scorie di silicato di calcio (USA) e per i residui delle miniere di uranio (USA).

Il tufo vulcanico è caratterizzato da concentrazioni di radio-226 e torio-232 di  $100 \div 300$  Bq/kg.

Un altro radionuclide naturale (che non discende dalle suddette catene naturali dell'uranio e del torio) particolarmente presente in natura è il potassio-40 (K-40). Il potassio-40 è presente nei materiali usati in edilizia in concentrazioni di attività per lo più comprese tra qualche centinaio ed oltre un migliaio di Bq/kg.

#### **4.3.1- IRRAGGIAMENTO ESTERNO**

L'esposizione esterna (con riferimento al corpo umano) è dovuta principalmente ai raggi gamma emessi da radioisotopi naturali presenti nel suolo e nei materiali da costruzione.

Essa assume valori diversi all'aperto (*outdoor*) e all'interno degli edifici (*indoor*). Il rateo di dose assorbita (in aria) *outdoor*, pesato sulla popolazione mondiale, è valutato in 57 nGy/h, dato che coincide con il valore medio italiano. In alcune zone del mondo si hanno valori anche molto più alti, come nei delta del Nilo ( $20 \div 400$  nGy/h) e del Gange ( $260 \div 440$  nGy/h). In un'area ricca di carbonati al torio nei pressi di Mombasa (Kenya) si sono rilevati ratei di dose fino a 12.000 nGy/h; a Ramsar (Iran) si arriva fino a 30.000 nGy/h, ed in prossimità di aree ricche di rocce uranifere in Svezia si raggiungono i 100.000 nGy/h.



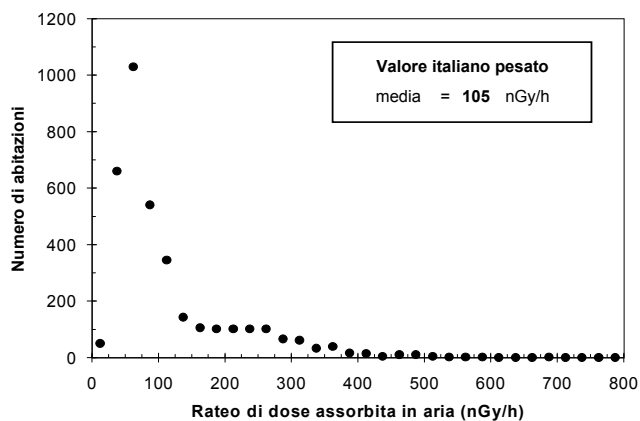


Figura 4 - Distribuzione del rateo di dose assorbita in aria dovuta alla radiazione gamma nel campione di abitazioni (detratto il contributo della radiazione cosmica).

Il valore medio italiano riportato nel riquadro è stato ottenuto dai valori medi di ogni regione pesati sulla base del numero di famiglie residenti

Il rateo di dose (in aria) *indoor*, sempre pesato sulla popolazione mondiale, si aggira intorno a 80 nGy/h. Anche per questo aspetto la variabilità tra i diversi paesi e le diverse località dello stesso paese è assai elevata.

Per quanto riguarda l'Italia, nell'*Indagine nazionale sulla radioattività naturale nelle abitazioni* condotta da ISS e ANPA (1994) si è determinato il rateo di dose *indoor* per radiazione gamma di origine terrestre (suolo e materiali edili) rappresentato nella figura 4; la media italiana risulta pari a 105 nGy/h.

Utilizzando il coefficiente di conversione 0,7 Sv/Gy per convertire la dose assorbita in aria in dose efficace<sup>2</sup> e assumendo un fattore di occupazione *indoor* pari a 0,8, è possibile combinare le esposizioni *outdoor* (57 nGy/h) e *indoor* (105 nGy/h) per stimare in circa 0,58 mSv/anno la dose efficace media in Italia dovuta ad irradiazione esterna da radioisotopi primordiali. Questo valore può essere confrontato con il valor medio mondiale di 0,46 mSv/anno indicato nei rapporti UNSCEAR. Per neonati e bambini ambedue i valori indicati vanno maggiorati del 30% e del 10% rispettivamente.

<sup>2</sup> Questo coefficiente utilizzato dall'UNSCEAR nel 1988 si riferisce ad adulti per l'esposizione ambientale a raggi gamma emessi da radioisotopi naturali presenti nelle rocce.

Si è già accennato alla grande variabilità delle dosi esterne da radioattività naturale. A livello nazionale si valutano margini di variabilità, compresi fra la metà e il doppio del valore medio sopra indicato. Esistono zone del pianeta in cui si hanno dosi maggiori anche di più di un ordine di grandezza.

#### **4.3.2- IRRAGGIAMENTO INTERNO**

La radioattività di origine terrestre determina oltre all'esposizione esterna anche una dose interna (rispetto al corpo umano), derivante dall'ingestione, dall'inalazione e dalla metabolizzazione dei radioisotopi già indicati. I terreni agricoli, ad esempio, contengono mediamente circa 300 kBq/m<sup>3</sup> di potassio-40, un radionuclide che emette radiazioni  $\beta$  e  $\gamma$  e viene metabolizzato dalle piante utilizzate per l'alimentazione animale e umana, e che ritroviamo perciò nei cibi di origine vegetale e animale in concentrazioni variabili fra i 50 e i 150 Bq/kg.

Nel corpo umano sono presenti complessivamente circa 4.000 Bq di potassio-40, oltre ai radionuclidi cosmogenici di cui si è già parlato: 4.000 Bq di carbonio-14 e 4.000 Bq di idrogeno-3 (trizio). La dose efficace annua dovuta al potassio-40 (in massima parte per le radiazioni beta) vale 0,165 mSv per gli adulti e 0,185 mSv per i bambini.

Radioisotopi delle serie dell'uranio e del torio, distribuiti in modo molto più disuniforme del potassio-40 e dei radionuclidi cosmogenici, vengono anch'essi introdotti nell'organismo perché presenti nei cibi, nell'acqua e nell'aria. Nel caso dell'ingestione i radioisotopi dominanti sono il piombo-210 ed il polonio-210.

Per l'inalazione (escludendo il radon ed i suoi figli a vita breve) il radioisotopo dominante è il piombo-210. I radioisotopi della serie dell'uranio e del torio danno in media dosi efficaci annue pari a 0,062 mSv/anno, sempre non considerando il contributo del radon (esaminato a parte nel paragrafo che segue).

Complessivamente la dose efficace impegnata in media in un anno nel mondo per introduzione di radioisotopi primordiali in aria, cibo e acqua è stimata in 0,23 mSv, di cui 0,17 mSv derivano dal potassio-40 e 0,06 mSv da radioisotopi delle serie dell'uranio e del torio. Questi valori possono essere considerati rappresentativi anche della situazione italiana.

Il contributo del radon, non compreso nel valore indicato, è trattato nel paragrafo seguente.

La notevole variabilità delle concentrazioni di attività nei cibi può portare al superamento dei valori medi, anche di ordini di grandezza. Ad esempio si riscontrano ~~ad esempio~~ elevati livelli di polonio-210 in *yerba maté*, una pianta largamente utilizzata nell'America Latina per produrre una bevanda. Per importanza radiologica, comunque, il maggior incremento rispetto ai livelli medi si riscontra nelle regioni artiche e sub-artiche, dove il piombo-210 e il polonio-210 si accumulano nella carne di renna e caribù che costituiscono una parte importante nella dieta degli abitanti di quelle regioni.

## 5. IL RADON

Il termine radon indica l'elemento con la massa atomica 222 ed il numero atomico 86, cioè l'isotopo  $^{222}\text{Rn}$ .

In totale esistono 26 isotopi del radon, compresi tra il  $^{199}\text{Rn}$  ed il  $^{226}\text{Rn}$ .

Solo tre di questi si riscontrano in natura:

- l'attinon ( $^{219}\text{Rn}$ ) della serie dell'uranio ( $^{235}\text{U}$ ),
- il toron ( $^{220}\text{Rn}$ ) della serie di decadimento del torio ( $^{232}\text{Th}$ )
- il radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) della serie di decadimento dell'uranio ( $^{238}\text{U}$ ).

Questi gas radioattivi **si**

diffondono negli ambienti interni mescolandosi con l'aria e dando luogo a fenomeni di accumulo.

Ogni sostanza radioattiva ha una propria velocità di decadimento, caratterizzata dal suo tempo di dimezzamento, ovvero il tempo dopo il quale rimane la metà del numero iniziale degli atomi radioattivi.

Di preminente importanza è il radon-222 che ha un tempo di dimezzamento di 3,823 giorni. Meno rilevante è l'emanazione di radon-220 (toron) che, in virtù del suo tempo di dimezzamento molto più breve ( $T=55\text{ s}$ ), può decadere con maggiore probabilità nei prodotti solidi suoi discendenti prima di raggiungere l'atmosfera. Trascurabile è l'emanazione di radon-219 (attinon), sia per il brevissimo tempo di dimezzamento ( $T=4,0\text{ s}$ ) sia per la bassa frazione del capostipite della famiglia cui appartiene, l' $^{235}\text{U}$ , nell'uranio naturale (0,725%).

Il decadimento naturale **dell'uranio** ( $^{238}\text{U}$ ) produce in totale altri tredici prodotti radioattivi. I rappresentanti più noti della serie sono il radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) ed il suo diretto predecessore, il radio ( $^{226}\text{Ra}$ ). La catena di decadimento termina con il  $^{206}\text{Pb}$ , stabile.

**IMMAGINE SERIE DECADIMENTO (GIA' MESSA ???)**

A differenza degli altri prodotti di questa serie, il radon è gassoso e può spostarsi dal punto d'origine. Affinché da un materiale comune possa verificarsi un'efficiente emanazione di radon, esso deve formarsi entro i primi 0,02-0,07  $\mu\text{m}$  dalla superficie. Tale è la distanza di rinculo di un atomo di radon all'istante della sua formazione da un atomo di radio. Il radon che si forma più in profondità rimane imprigionato e decade sul posto nei suoi sottoprodotti solidi. Il potere d'emanazione non dipende quindi esclusivamente dal contenuto di radio, ma essenzialmente dalle caratteristiche strutturali del materiale. Poiché l'uranio ed il torio sono abbondantemente presenti nella crosta terrestre, questi gas vengono continuamente prodotti e tendono a diffondersi attraverso la superficie terrestre. I loro prodotti di decadimento (emettitori di radiazioni  $\alpha$  e  $\beta$  ad elevata energia e breve tempo di dimezzamento) a loro volta si attaccano al pulviscolo normalmente presente nell'aria rendendolo più o meno radioattivo (in funzione della concentrazione più o meno elevata di radon). L'inalazione di tale pulviscolo comporta un trasferimento di radioattività all'interno dell'organismo con un conseguente irraggiamento dell'apparato respiratorio.

### **IMMAGINE CESSIONE RADON DA RADON-I!!**

Chimicamente il radon è un gas nobile, incolore, inodore, insapore e quasi inerte. Il radon è il più pesante dei gas conosciuti e la sua densità è 8 volte superiore a quella dell'aria. Esso è solo moderatamente solubile in acqua. Ad una temperatura di 20°C, il coefficiente di solubilità (rapporto delle concentrazioni di radon tra fase liquida e fase gassosa) è pari a 0,25 e ciò significa che il radon preferisce distribuirsi in aria piuttosto che in acqua. Il radon dunque fuoriesce facilmente dall'acqua facendovi gorgogliare attraverso dell'aria oppure semplicemente agitando vigorosamente. Contrariamente all'acqua, il radon è molto solubile nei liquidi organici, per esempio a 18°C, il suo coefficiente di solubilità nell'olio d'oliva è pari a 29,0.

## **5.1 STORIA DEL RADON**

Gli elementi radioattivi naturali sono stati presenti sulla terra dalla sua origine. Gli elementi a vita più breve sono gradualmente scomparsi. Gli elementi radioattivi a vita lunga che sono presenti nel nostro ambiente includono l'uranio che da origine al radon.

La radioattività venne scoperta nel 1898, quando Marie e Pierre Curie, estraendo del radio da alcuni minerali, identificarono un gas nobile radioattivo prodotto dal decadimento del radio. Nel 1900, il fisico tedesco Ernst Dorn scoprì che i sali di radio producevano un gas radioattivo, il radon.

In precedenza, già nella seconda metà del Cinquecento, pur non essendo nota l'esistenza del radon e della radioattività, i trattati di Agricola e Paracelso

**Comment [CF1]:** Controllare. Sembra la stessa scoperta attribuita a personaggi diversi.

descrivono una particolare malattia polmonare che colpiva i minatori della Sassonia, probabilmente a causa delle polveri inalate nelle miniere e ricche di vari tipi di metalli. L'incidenza di questa malattia si intensificò nei secoli successivi, quando crebbe l'attività nelle miniere di argento, rame e cobalto.

La malattia fu riconosciuta nel 1879 come cancro ai polmoni.

Misure effettuate nel 1901 nelle miniere della Sassonia rivelarono un'alta concentrazione di radon e immediatamente fu lanciata l'ipotesi causa-effetto tra alti livelli di radon e cancro ai polmoni. Questa ipotesi fu rafforzata da più accurate misurazioni condotte nel 1902 nelle miniere della Sassonia e in miniere della Boemia, le stesse da dove provenivano i minerali analizzati dai coniugi Curie.

Tuttavia questi dati non riuscirono a convincere tutti.

L'attività nelle miniere di uranio si intensifica dal 1940, ma i livelli di radon furono misurati regolarmente solo dal 1950. Esperimenti su animali condotti dal 1951 dimostrarono la potenziale cancerogenicità del radon per i polmoni delle specie testate.

Rilevamenti epidemiologici tra i minatori di uranio, dalla metà degli anni Sessanta, hanno infine confermato questo potenziale sull'uomo.

Nel 1967, il Consiglio Federale per la Ricerca degli Stati Uniti ha proposto delle raccomandazioni per controllare i rischi correlati alle radiazioni in miniera. Nonostante non ci fossero più dubbi sulla realtà del pericolo, fu ancora necessario quantificare il rischio in termini di intensità di esposizione, per definire appropriati livelli di esposizione.

A tal fine, numerosi rilevamenti epidemiologici sono stati effettuati negli anni '80 in varie nazioni, non solo tra lavoratori in miniere di uranio, ma anche di stagno e ferro e tali rilevamenti portarono a conclusioni convergenti.

Tuttavia, alcune questioni, come la rispettiva influenza della durata e dell'intensità dell'esposizione, l'influenza dell'età e precise quantificazioni del rischio, non sono ancora state risolte e richiedono ulteriori studi.

Nonostante il premio Nobel per la Fisica Ernest Rutherford avesse fatto notare già dal 1907 che ogni individuo inala radon, le prime misure di radon nelle abitazioni vennero effettuate solo nel 1956 in Svezia. L'elevato livello di radon rilevato in alcune case riscosse poco interesse in campo internazionale e venne considerato un problema esclusivamente locale. Solamente 20 anni dopo si iniziarono studi sistematici su larga scala in numerose nazioni, che mostrarono che l'esposizione era generale e si potevano raggiungere livelli molto alti, comparabili a quelli delle miniere.

Anche in Italia, verso la fine degli anni 1970 ed inizio 1980, iniziano le prime campagne di monitoraggio della concentrazione del Radon a cura dell'ENEA (misure nelle abitazioni e nelle terme) e dell'AGIP NUCLEARE (misure di

radon nelle miniere esplorative di Uranio site in Val Seriana (BG) ed in Valtellina (SO)).

La Commissione Internazionale per la Protezione Radiologica (ICRP) sottolineò la vastità del problema per la salute pubblica e formulò specifiche raccomandazioni sulla pubblicazione numero 65 del 1993.

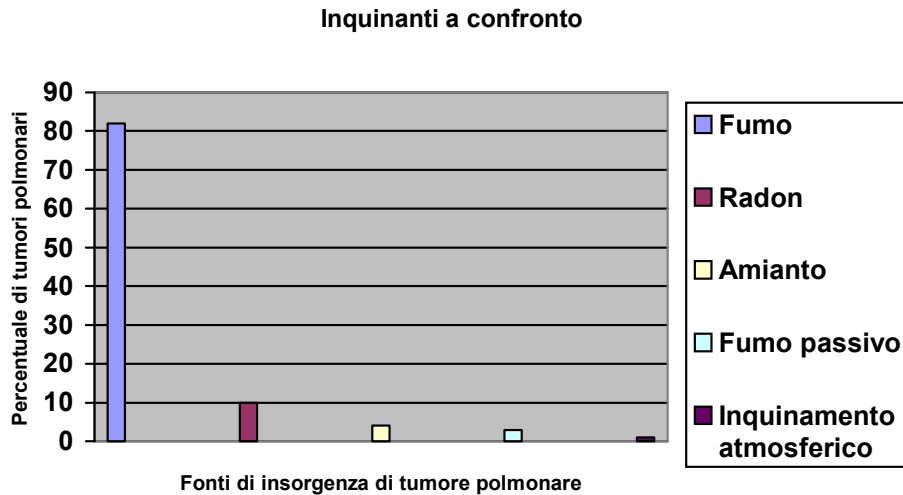
L'ipotesi di un legame tra alta concentrazione di radon e cancro ai polmoni fu messa in primo piano molto presto nel ventesimo secolo. La dimostrazione scientifica di questo legame è molto recente ma definitiva.

## **5.2 EFFETTI SULLA SALUTE**

Studi compiuti negli ultimi decenni hanno dimostrato che il radon e le sostanze radioattive da esso generate costituiscono la seconda causa di insorgenza di tumore al polmone, dopo il fumo di sigaretta. In presenza di radon, sono proprio i fumatori la categoria di individui più a rischio a causa dell'effetto combinato dei due agenti inquinanti.

Il rischio per la salute viene principalmente dai prodotti di decadimento, i cosiddetti figli, del radon. In quanto gas nobile, infatti, il radon è poco attivo dal punto di vista chimico e sarebbe perciò meno dannoso, in quanto la maggior parte del radon inalato verrebbe espulso durante l'espiazione. I prodotti di decadimento del radon, invece, sono chimicamente ed elettricamente reattivi. In parte rimangono liberi in aria, in parte si attaccano al particolato (vapore acqueo, fumi prodotti dalle attività di cucina, polveri sospese e fumo di sigaretta). Durante la respirazione i figli del radon penetrano nelle vie respiratorie. Quelli che vivono più a lungo tendono a essere rimossi dall'apparato respiratorio, ma quelli a vita breve possono raggiungere, prima di decadere, i bronchi e i polmoni. Infatti, i meccanismi di filtraggio che proteggono l'apparato respiratorio non sono in grado di bloccare completamente queste particelle. In particolare, due di queste decadono emettendo radiazioni che rilasciano tutta la loro energia in un sottile strato superficiale della parete dei polmoni, alterando e provocando lesioni alle cellule che lo compongono e che possono portare allo sviluppo di un tumore. La ritenzione dei vari radionuclidi e la dose dipendono, oltre che dalle proprietà chimico-fisiche dell'elemento, anche dall'anatomia e dalla fisiologia dell'apparato respiratorio (età del soggetto e intensità media della respirazione).

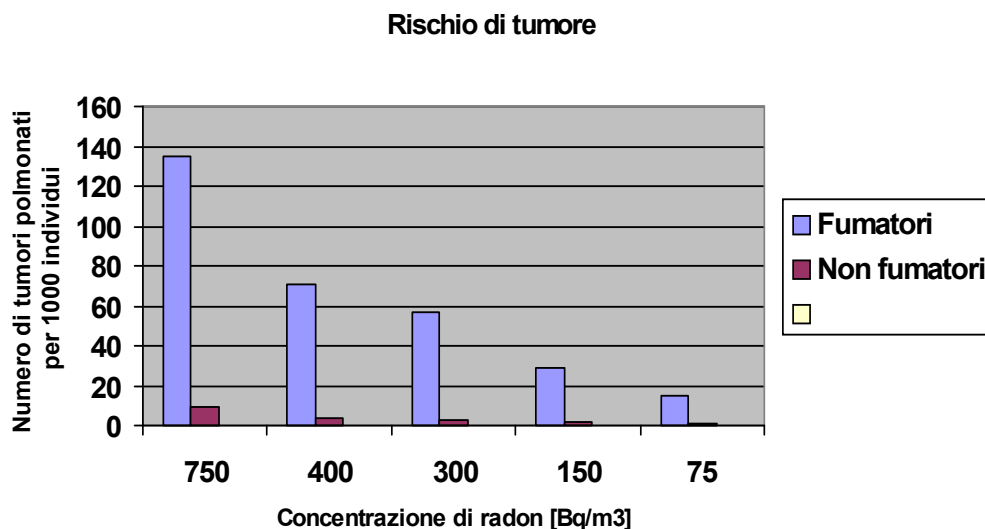
Si stima che in Italia circa il 10% di tutti i tumori polmonari sia attribuibile al radon e le morti legate a questo agente inquinante sono circa 3000 all'anno.



Naturalmente, il rischio dipende dalla concentrazione e dalla durata dell'esposizione, cioè se si vive in un ambiente in cui il livello di radon è maggiore si rischia di più, così come se si resta per più tempo a contatto con le radiazioni.

Per questo motivo è importante misurare la concentrazione del radon all'interno delle abitazioni, nei locali dove si trascorre la maggior parte del tempo. Sotto certe concentrazioni il rischio scende fino a diventare comparabile con altri eventi (incidenti, incendi, ecc.): sopra tale livello di concentrazione di riferimento, il rischio è considerato inaccettabile e si rendono necessari interventi di rimedio.

Un'esposizione a bassi livelli per un tempo prolungato è più pericolosa di un'esposizione di breve tempo a concentrazioni elevate, anche se l'esposizione totale è la stessa.



Nel grafico è indicato il numero di persone che contraggono un tumore al polmone per 1000 individui, fumatori e non, esposti per tutta la vita a varie concentrazioni di radon. Si può dedurre che per i fumatori il rischio è maggiore di circa 15 volte rispetto a quello dei non fumatori.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha dichiarato il radon uno dei 75 agenti accertati come cancerogeni per l'uomo.

La IARC (*International Agency for Research on Cancer*) ha classificato il Radon come agente cancerogeno appartenente al Gruppo 1 ("cancerogeno per l'uomo"), ovvero al gruppo più elevato tra quelli utilizzati nella sua classificazione. Tale classificazione utilizza cinque categorie ("cancerogeno per l'uomo", "probabilmente cancerogeno per l'uomo", "possibilmente cancerogeno per l'uomo", "probabilmente non cancerogeno per l'uomo" e "non classificabile"), basate sulla solidità dell'evidenza scientifica addotta a supporto della presunta cancerogenicità.

### 5.3 - ORIGINE DEL RADON E MODALITA' DI DIFFUSIONE

Il radon è presente in tracce nel sottosuolo quasi ovunque.

La sua concentrazione nel terreno varia da qualche centinaio a più di un milione di Bq/m<sup>3</sup> (il Becquerel è l'unità di misura dell'attività, cioè del numero di disintegrazioni nell'unità di tempo, e corrisponde ad un decadimento al secondo).



Le rocce che hanno il maggior contenuto di uranio e radio (tufi, granito e porfido) possono emanare maggiori quantità di radon e questo vale in particolare per rocce permeabili o fratturate, mentre nelle rocce compatte il radon rimane imprigionato nel materiale.

In terreni con rocce molto fratturate, con molti spazi vuoti, il radon può essere trasportato da correnti d'aria o dall'acqua sorgiva o piovana infiltrata. Molte volte sono proprio le fratture e le faglie ad essere associate a concentrazioni elevate di radon perché è proprio lì che l'acqua trasporta l'uranio favorendone l'accumulo. Più il sottosuolo è permeabile e ricco di detriti, più facilmente il radon riesce ad arrivare in superficie.

Mentre nel suolo le concentrazioni di radon possono essere molto elevate, all'aperto il radon si volatilizza-disperde rapidamente. Negli ambienti chiusi, e quindi anche negli edifici, esso può concentrarsi raggiungendo concentrazioni molto elevate, principalmente per via del ridotto ricambio d'aria.

Il radon penetra nelle case attraverso crepe, fessure o punti aperti delle fondamenta. Le abitazioni nei seminterrati o al pianterreno sono particolarmente esposte al fenomeno.

#### **5.4 - IL RADON ALL'INTERNO DEGLI EDIFICI**

La concentrazione del radon nell'atmosfera dipende da numerosi fattori:

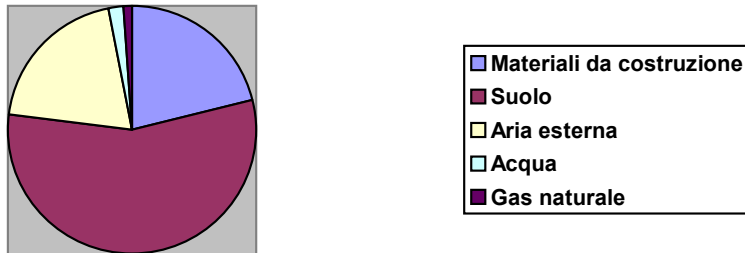
- la concentrazione del  $^{238}\text{U}$  e del  $^{226}\text{Ra}$  nel suolo,
- le caratteristiche geologiche del sito,
- le condizioni climatiche
- l'altitudine.

Il rilascio del radon dal suolo nell'atmosfera è influenzato, in particolare, dalla permeabilità e dalla granularità del suolo e dai gradienti di diffusione derivanti dalle variazioni della pressione atmosferica.

All'interno degli edifici la concentrazione del radon dipende da una serie di fattori:

- la concentrazione del radon presente nel gas che fuoriesce dal suolo,
- la tipologia edilizia,
- il contenuto di radon nelle acque impiegate negli usi domestici
- l'emanazione di radon dai materiali da costruzione.

### Sorgenti a confronto



La maggior parte del radon presente in una casa proviene dal suolo su cui essa è costruita e vi entra per diffusione attraverso le porosità del terreno e, più in larga misura, grazie alla differenza di pressione tra interno ed esterno, prodotta dalla differenza di temperatura tra interno ed esterno o dall'azione del vento sulla casa. Se il basamento ha un pavimento in fango, il radon può penetrare facilmente; se il pavimento invece è di cemento, il radon penetra attraverso le spaccature che si formano con il tempo, lungo le tubature o attraverso le giunture tra i muri.

Il radon può anche provenire, in misura minore, dai muri, se essi sono stati edificati utilizzando materiali radioattivi (per esempio, tufi vulcanici), o dai rubinetti, se l'acqua contiene il gas disciolto. Le acque per uso domestico forniscono un contributo significativo solo quando provengono da pozzi profondi situati in aree a elevato livello di radioattività.

Il contributo dei materiali dipende dal rateo di esalazione del radon emanato dal  $^{226}\text{Ra}$  in essi contenuto. I parametri che influenzano il processo di trasporto del radon attraverso gli strati dei materiali sono il coefficiente di diffusione e la porosità; tale processo dipende anche da fattori ambientali quali l'umidità, la pressione e la temperatura. Una caduta di pressione all'interno di un edificio può dare luogo a un incremento dell'esalazione del radon dai materiali durante il periodo in cui si verifica l'evento.

*Studi a livello internazionale hanno evidenziato che il suolo rappresenta la più importante sorgente di radon all' interno degli edifici. I materiali edilizi costituiscono una sorgente significativa solo nel caso di particolari materiali caratterizzati da un elevato contenuto da  $^{226}\text{Ra}$  e da un' elevata permeabilità (ad esempio i tufi).*

## 5.5 ESPOSIZIONE AL RADON

Il radon prodotto dal decadimento delle famiglie radioattive naturali si diffonde nell'ambiente e, introdotto nell'organismo attraverso la respirazione, è responsabile in Italia di una dose efficace media di circa 2 mSv/anno, con variazioni molto sensibili a seconda delle caratteristiche geologiche della località considerata, della tipologia dei fabbricati e dei materiali impiegati nella costruzione.

Si sono ad esempio valutate dosi di 0,3 mSv/anno nelle abitazioni di Torino, 1 mSv/anno a Milano, 1,5 mSv/anno a Roma e 2,5 mSv/anno a Viterbo.

I risultati ottenuti nella campagna nazionale di misura della concentrazione di radon *indoor* (*Indagine nazionale sulla radioattività naturale nelle abitazioni*) condotta da ISS e ANPA – 1994) evidenziano una concentrazione media annuale di radon di 77 Bq/m<sup>3</sup>, che può essere assunta come rappresentativa della concentrazione di radon nelle abitazioni e negli altri luoghi chiusi. Per l'aperto si può assumere come indicativo il valore di 6 Bq/m<sup>3</sup> fornito dalla ICRP.

Le valutazioni UNSCEAR quantificano rispettivamente in 1,2 mSv/anno e 0,07 mSv/anno i valori medi mondiali della dose efficace dovuta al radon-222 e al radon-220<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Vista la netta prevalenza del contributo del radon-222, in genere con il termine di radon ci si riferisce abitualmente a questo isotopo, trascurando quelli del radon-220 e del radon-219.

## 6. QUADRO LEGISLATIVO IN MATERIA DI PROTEZIONE DALLE RADIAZIONI IONIZZANTI

In considerazione del fatto che, il contributo di dose alla popolazione derivante da sorgenti radioattive naturali è estremamente variabile da luogo a luogo ed, in particolari luoghi e/o situazioni, può essere anche rilevante, l'evoluzione della normativa in materia di radioprotezione ha fatto sì che assumesse sempre più importanza l'aspetto protezionistico nei confronti di questi agenti naturali.

Con l'emanazione del Decreto Legislativo 230/95 e con le successive modifiche ed integrazioni apportate con i D.Lgs. 241/00 e 257/01, vengono recepite una serie di Direttive EURATOM relative alla tutela dei lavoratori coinvolti in attività con rischio derivante da radiazioni ionizzanti e della popolazione a qualsiasi titolo coinvolta in tali attività.

Il nuovo contesto legislativo, disciplina tutti i settori di attività lavorativa (sanitario, industriale, ricerca, ecc.) ove siano presenti fonti radiogene sia artificiali sia naturali (quest'ultimo aspetto rappresenta una grande novità rispetto a quanto precedentemente attuato).

E' appunto in questo nuovo contesto legislativo che assume particolare importanza la valutazione della concentrazione del radon negli ambienti sotterranei.

Il Capo III bis del decreto 241/00 introduce nel campo di applicazione anche le "ESPOSIZIONI DA ATTIVITA' LAVORATIVE CON PARTICOLARI SORGENTI NATURALI DI RADIAZIONI".

Le norme si applicano alle attività lavorative nelle quali la presenza di sorgenti di radiazioni naturali conduce ad un significativo aumento dell'esposizione dei lavoratori o di persone del pubblico, che non può essere trascurato dal punto di vista della radioprotezione.

In particolare:

### *Articolo 10 bis – Campo di applicazione*

.....

***1) attività lavorative durante le quali i lavoratori e, eventualmente, persone del pubblico sono esposti a prodotti di decadimento del radon o del toron, o a radiazioni gamma o a ogni altra esposizione in particolari luoghi di lavoro quali tunnel, sottovie, catacombe, grotte e, comunque, in tutti i luoghi di lavoro sotterranei;***

***b).....***

*Articolo 10 ter – Obblighi dell’esercente*

- 1) *Nei luoghi di lavoro nei quali si svolgono le attività lavorative di cui all’articolo 10 bis, comma 1, lettera a), l’esercente, entro ventiquattro mesi dall’inizio dell’attività, procede alle misurazioni di cui all’allegato I bis,.....*

.....

*Art. 10-quater Comunicazioni e relazioni tecniche*

1. *In caso di superamento dei livelli di azione di cui all’articolo 10-quinquies, gli esercenti che esercitano le attività di cui all’articolo 10-bis, comma 1, lettere a), b), c), d) ed e), inviano una comunicazione in cui viene indicato il tipo di attività lavorativa e la relazione di cui all’articolo 10-ter, commi 4 e 5, alle Agenzie regionali e delle province autonome competenti per territorio, agli organi del Servizio sanitario nazionale competenti per territorio e alla Direzione provinciale del lavoro.*
2. *La Direzione provinciale del lavoro trasmette i dati di cui al comma 1 al Ministero del lavoro e della previdenza sociale ai fini del loro inserimento in un archivio nazionale che il Ministero stesso organizza avvalendosi delle strutture esistenti e nei limiti delle ordinarie risorse di bilancio; detto Ministero a richiesta, fornisce tali dati alle autorità di vigilanza e ai ministeri interessati.*
3. *Le comunicazioni e le relazioni di cui al comma 1 sono inviate entro un mese dal rilascio della relazione.*

*Art. 10-quinquies Livelli di azione*

1. *Per i luoghi di lavoro di cui all’articolo 10-bis, comma 1, lettere a) e b), le grandezze misurate non devono superare il livello di azione fissato in allegato I-bis.*
2. *Nel caso in cui le grandezze di cui al comma 1 non superino il livello di azione ma siano superiori all’80 per cento del livello di azione, l’esercente assicura nuove misurazioni nel corso dell’anno successivo.*
3. *Nel caso di superamento del livello di azione di cui all’allegato I-bis, l’esercente, avvalendosi dell’esperto qualificato, pone in essere azioni di rimedio idonee a ridurre le grandezze misurate al di sotto del predetto livello, tenendo conto del principio di ottimizzazione, e procede nuovamente alla misurazione al fine di verificare l’efficacia delle suddette azioni. Le operazioni sono completate entro tre anni dal rilascio della relazione di cui all’articolo 10-ter, comma 4, e sono effettuate con urgenza correlata al superamento del livello di azione. Ove, nonostante l’adozione di azioni di rimedio, le grandezze misurate risultino ancora superiori al livello*

*prescritto, l'esercente adotta i provvedimenti previsti dal capo VIII, ad esclusione dell'articolo 61, commi 2 e 3, lettera g), dell'articolo 69 e dell'articolo 79, commi 2 e 3, fintanto che ulteriori azioni di rimedio non riducano le grandezze misurate al di sotto del predetto livello di azione, tenendo conto del principio di ottimizzazione.*

- 4. Le registrazioni delle esposizioni di cui al comma 3 e le relative valutazioni di dose sono effettuate con le modalità indicate nell'allegato I-bis o nell'allegato IV, ove applicabile. Nel caso in cui il lavoratore sia esposto anche ad altre sorgenti di radiazioni ionizzanti di cui all'articolo 1, comma 1, le dosi dovute ai due diversi tipi di sorgenti sono registrate separatamente, fermi restando gli obblighi di cui agli articoli 72, 73 e 96.*
- 5. L'esercente non è tenuto alle azioni di rimedio di cui al comma 3 se dimostra, avvalendosi dell'esperto qualificato, che nessun lavoratore è esposto ad una dose superiore a quella indicata nell'allegato I-bis; questa disposizione non si applica agli esercenti di asili-nido, di scuola materna o di scuola dell'obbligo.*
- 6. Per i luoghi di lavoro di cui all'articolo 10-bis, comma 1, lettere c), d) ed e), fermo restando l'applicazione dell'articolo 23, se dall'analisi di cui all'articolo 10-ter risulta che la dose ricevuta dai lavoratori o dai gruppi di riferimento della popolazione superai rispettivi livelli di azione di cui all'allegato I-bis, l'esercente adotta, entro tre anni, misure volte a ridurre le dosi al di sotto di detti valori e, qualora, nonostante l'applicazione di tali misure, l'esposizione risulti ancora superiore ai livelli di azione, adotta le misure previste dal capo VIII e dal capo IX, sulla base dei presupposti previsti negli stessi capi.*
- 7. Le registrazioni delle esposizioni di cui al comma 6 e le relative valutazioni di dose sono effettuate con le modalità indicate nell'allegato I-bis e nell'allegato IV, ove applicabile.*
- 8. Nel caso in cui risulta che l'esposizione dei lavoratori o dei gruppi di riferimento della popolazione non supera i livelli di azione di cui all'allegato I-bis, l'esercente esegue un controllo radiometrico, qualora variazioni del processo lavorativo o le condizioni in cui esso si svolge possano far presumere una variazione significativa del quadro radiologico.*

Nell'Allegato I bis sono riportati:

**ALLEGATO I bis**

1. ....

**2. Definizioni**

**Livello di azione**

*Valore di concentrazione di attività di radon in aria o di dose efficace, il cui superamento richiede l'adozione di azioni di rimedio che riducano tale grandezza a livelli più bassi del valore fissato.*

**Radon**

*Deve intendersi l'isotopo 222 del radon.*

**Toron**

*Deve intendersi l'isotopo 220 del radon.*

**3. Misurazioni**

*Le misurazioni di cui all'articolo 10 ter, commi 1 e 2, sono fissate in concentrazioni di attività di radon medie in un anno.*

**4. Livelli di azione**

*a) Per i luoghi di lavoro di cui all'articolo 10.bis, comma 1, lettere a) e b), il livello di azione è fissato in termini di  $500 \text{ Bq/m}^3$  di concentrazione di attività di radon media in un anno.*

*b) .....*

*c) .....*

*d) .....*

**5. Registrazioni**

*Le registrazioni di cui all'art.10.quinquies comma 4 sono eseguite in termini di esposizione individuale: in  $\text{Bq m}^{-3}$  e ore di esposizione oppure in  $\text{Bq h m}^{-3}$  e ore di esposizione.*

**6. Fattore convenzionale di conversione**

*Per la valutazione dell'esposizione dei lavoratori a concentrazione di attività di radon si applica il fattore convenzionale di conversione  $3 \cdot 10^{-9}$  Sv di dose efficace per unità di esposizione espressa in  $\text{Bq h m}^{-3}$  di dose efficace.*

## 7. MODALITA' E STRUMENTAZIONE PER LA RILEVAZIONE E MISURA DEL RADON GAS

### 7.1 - ELEMENTI DI DOSIMETRIA DEL RADON

L'unità di misura della concentrazione di radon è il Bq/m<sup>3</sup> ossia il numero di disintegrazioni nucleari per secondo per ogni metro cubo d'aria.

Infatti è in tale unità di misura che sono espressi i livelli di azione riportati nell'allegato I bis al D.Lgs.230/95 precedentemente illustrato.

Per la valutazione dell'esposizione dei lavoratori a concentrazione di attività di Radon si applica il fattore convenzionale di conversione  $3 \cdot 10^{-9} \text{ Sv} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^3$ .

La dose efficace assorbita dai lavoratori sarà pertanto direttamente proporzionale al tempo di permanenza nei locali indagati e alla concentrazione di Radon nei locali stessi.

Si riporta di seguito la definizione delle suddette unità di misura (tratte dal D.Lgs. 230/95):

**d) attività (A):** *quoziente di dN diviso per dt, in cui dN è il numero atteso di transizioni nucleari spontanee di una determinata quantità di un radionuclide da uno stato particolare di energia in un momento determinato, nell'intervallo di tempo dt;*

**f) becquerel (Bq):** *nome speciale dell'unità di attività (A); un becquerel equivale ad una transizione per secondo.*

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$$

*I fattori di conversione da utilizzare quando l'attività è espressa in curie (Ci) sono i seguenti:*

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq (esattamente)}$$

$$1 \text{ Bq} = 2,7027 \times 10^{-11} \text{ Ci};$$

.....

**m) dose:** *grandezza radioprotezionistica ottenuta moltiplicando la dose assorbita (D) per fattori di modifica determinati a norma dell'articolo 96, al fine di qualificare il significato della dose assorbita stessa per gli scopi della radioprotezione;*

.....

**o) dose efficace (E):** *somma delle dosi equivalenti nei diversi organi o tessuti, ponderate nel modo indicato nei provvedimenti di applicazione, l'unità di dose efficace è il sievert;*

.....

**m) sievert (Sv):** *nome speciale dell'unità di dose equivalente o di dose efficace. Le dimensioni del sievert sono  $\text{J kg}^{-1}$ .*



## **7.2- METODI DI MISURA DELLA CONCENTRAZIONE DEL RADON**

In relazione alle modalità di campionamento i metodi possono essere classificati in:

- istantanei,
- continui
- integratori.

Nei metodi istantanei il campione d'aria viene raccolto in un determinato punto di misura durante intervalli di tempo molto brevi.

I metodi continui consentono di determinare le variazioni temporali delle concentrazioni del radon. Tali metodi si usano nei casi in cui quelli istantanei possono risultare non adeguati ed in alcune applicazioni di ricerca (per esempio, lo studio dell'effetto della ventilazione).

Un'altra categoria di strumenti è quella dei monitori che integrano la misura su intervalli di tempo: con essi è possibile determinare il valore della concentrazione media, e quindi l'esposizione, nell'intervallo di tempo considerato. Il rilevatore viene posizionato nell'ambiente di misura per un tempo dipendente dalla sua sensibilità e successivamente con un opportuno trattamento viene misurato.

Tali monitori possono essere sia di tipo attivo sia di tipo passivo: questi ultimi, per le loro caratteristiche, sono prevalentemente usati per la stima dell'esposizione in campagne di vaste proporzioni.

<b>Metodo di Campionamento</b>	<b>Tipo di strumento</b>	<b>Metodo di misura</b>	<b>Limite di Rivelazione *</b>
Istantaneo	Cella a Scintillazione	Conteggio alfa con scintillatori	3,7 Bq m <sup>-3</sup>
	Camera a Ionizzazione	Conteggio impulsi di Corrente	3,7 Bq m <sup>-3</sup>
Istantaneo e Continuo	Metodo dei due Filtri	Decadimento radon e raccolta figli su secondo filtro	1 Bq m <sup>-3</sup>
Continuo	Monitore attivo	Conteggio alfa con Rivelatori a stato Solido	3,7 Bq m <sup>-3</sup>
	Monitore attivo a Diffusione/Aspirazione	Conteggio alfa con scintillatori	3,7 Bq m <sup>-3</sup> (per 60 minuti di esposizione)
A integrazione	Monitore passivo A tracce nucleari	Conteggio delle Tracce alfa in Sostanze plastiche	18,5 Bq m <sup>-3</sup> (per 30 giorni di esposizione)
	Monitore passivo A carbone attivo	Adsorbimento del Radon sul carbone e conteggio gamma	10 Bq m <sup>-3</sup>
	Monitore passivo a Termoluminescenza	Diffusione del radon in volume sensibile con campo e.s.	1 Bq m <sup>-3</sup>

\* Il limite varia notevolmente in funzione delle caratteristiche costruttive dello strumento.

## 8- SISTEMA DI MISURA DELLA CONCENTRAZIONE DEL GAS RADON ATTRAVERSO IL CONTEGGIO DELLE TRACCE NUCLEARI PRODOTTE DAI PRODOTTI DI DECADIMENTO DEL RADON SU MATRICI POLIMERICHE (PADC)

La tecnologia adottata per la misura della concentrazione del gas radon a lettura automatica utilizza i rivelatori a traccia di particelle alfa, denominati CR39. Tali dosimetri sono sensibili unicamente alle radiazioni alfa e sfruttano il danno ai legami chimici (traccia latente) causato dalle particelle alfa che colpiscono il materiale; in seguito, le tracce alfa prodotte possono essere evidenziate sottoponendo i rivelatori ad un trattamento chimico o elettrochimico che, amplificando le tracce, le rendono misurabili con diverse tecniche ottiche o opto-elettroniche.

Questa tecnologia implementa l'opportunità di condurre misure simultanee in diversi siti allo scopo di ottenere la concentrazione di attività del radon (RAC) e fornisce anche un valore di RAC integrato nel tempo, rendendo quindi ininfluenti gli effetti dovuti alle variazioni tipiche del radon in brevi intervalli di tempo (variazione giorno-notte, cambiamenti di parametri atmosferici).

Il sistema misura l'attività integrata e per unità di volume; la concentrazione media è calcolata su un intervallo di tempo da 2 a 4 mesi.

Il CR39 viene posizionato all'interno di un contenitore plastico di forma cilindrica di dimensioni 4.5 cm x 2.5 cm, a struttura chiusa tale da permettere la diffusione all'interno del solo radon (l'intercapedine tra scatolino e tappo di chiusura, 20-30 micrometri, consente il passaggio delle molecole del gas in oggetto, mentre vengono bloccate le particelle più pesanti).

All'interno del dispositivo, il radon ed i suoi discendenti emettono particelle alfa che lasciano delle tracce sui rivelatori, la cui densità è proporzionale alla concentrazione di radon. I rivelatori vengono in seguito sviluppati con un bagno chimico termostato (circa 4ore a 90°C). I componenti del bagno di sviluppo sono acqua distillata e idrossido di sodio, in percentuale del 25%.

La temperatura di sviluppo è mantenuta costante a 90°C, per un tempo di 4 ore. La reazione di sviluppo è esotermica e genera vapori nocivi, ma la struttura compatta del sistema di sviluppo è tale da poter effettuare il procedimento in assoluta sicurezza.

I rivelatori sono posizionati in una rastrelliera (slide) a 12 posizioni, posta in un recipiente che a sua volta può contenere 12 slide; con un solo bagno termostato è possibile sviluppare 432 rivelatori. Lo sviluppo determina le dimensioni delle tracce. Per il conteggio di queste è utilizzato un microscopio a luce trasmessa. Il PADC è inserito in opportuni porta-rivelatori per ottenere la riproducibilità della posizione rispetto al piano del microscopio.

**Comment [CF2]:** In alcuni esempi riportati i periodi sono di 6 mesi. Quindi suggerisco di mettere da 2 a 6 mesi

**Comment [CF3]:** ? 12x12=144

L'identificazione delle tracce avviene attraverso un processo di analisi e riconoscimento dell'immagine nel campo visivo. La successiva classificazione della traccia avviene con criteri selettivi; i parametri determinanti sono la forma, la grandezza e il contrasto ottico che indicano se la traccia è da associare sicuramente a una interazione provocata da una particella alfa. Una volta sviluppati, i rivelatori sono lavati con acqua e successivamente vengono posizionati in un microscopio automatico che conteggia il numero di tracce per  $\text{cm}^2$ . Questo valore viene moltiplicato per il valore della concentrazione di attività del radon.

Il calcolo effettuato è il seguente:

$$\text{RAC} [\text{Bq/h}\cdot\text{m}^3] = D * Fc, \text{ dove:}$$

- RAC = concentrazione di attività del gas radon
- D = densità della traccia per  $\text{cm}^2$
- Fc = fattore di calibrazione, espresso in  $[\text{Bq/h}\cdot\text{m}^3]$

L'integrale di questa formula fornisce il RAC per il periodo di esposizione. Nella valutazione della concentrazione in un determinato sito, il valore dell'integrale di RAC diventa fondamentale, poiché fornisce precise informazioni sull'esposizione cui sono sottoposte persone che vivono o lavorano nel luogo sotto esame.

**IN QUESTO PARAGRAFO DEVO RICORDARMI DI INERISIRE QUALCHE FOTO:**

- DOSIMETRO CHIUSO
- DOSIMETRO APERTO CON INDICAZIONE RIVELATORE
- PENTOLA
- RASTERELLIERA
- SISTEMA DI LETTURA CON PC
- 

## 9. DESCRIZIONE DEI VANTAGGI DEL SISTEMA DI MISURA BASATO SULL'USO DI PADC

Diversi vantaggi possono essere evidenziati utilizzando la tecnologia dei CR39.

- Le dimensioni dei rivelatori sono un importante parametro da prendere in considerazione in qualsiasi misura con sistemi passivi. Tanto più piccole sono le dimensioni dei rivelatori e dei loro contenitori, tanto più grandi sono i vantaggi. I CR-39 offrono il vantaggio di poter essere utilizzati in grandi quantità con piccole dimensioni. Da ciò scaturisce una notevole praticità

**Comment [CF4]:** ... moltiplicato per un fattore... così da ottenere la concentrazione di attività integrata nel tempo.

**Comment [CF5]:** Se RAC è la concentrazione di attività, allora le dimensioni sono sbagliate. In ogni caso penso debbano essere  $\text{Bq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  e non  $\text{Bq}/\text{h}\cdot\text{m}^3$

nell'uso e nella catalogazione evitando l'inconveniente di smarrimenti oppure di errata individuazione qualora si usino sistemi con geometrie di dimensioni maggiori.

**Comment [CF6]:** Non è chiaro

- Rispetto ad altri sistemi passivi si ha la possibilità di archiviare i rivelatori già sviluppati nei loro contenitori in ambienti chiusi in modo da poter effettuare nuovamente la misura dopo un intervallo di tempo dallo sviluppo piuttosto lungo
- Indipendenza dalle condizioni ambientali: non vi è alcuna influenza nei CR39 per temperature fino a 110°C e per intervalli di umidità compresi tra il 5% ed il 95%. Ne consegue una grande affidabilità del metodo.
- Intervallo di rivelazione del RAC: questo dato dipende soprattutto del volume interno della camera di esposizione. Tanto più piccolo è tale volume tanto più ampio è l'intervallo (in termini di Bq/m<sup>3</sup>) che viene raggiunto. La struttura della camera d'esposizione è riferita al tipo di applicazione e di ambiente di misura d'interesse. In linea di principio la tecnologia dei CR-39 copre tutti i range di RAC, ciò che deve essere variato è proprio il volume interno della camera d'esposizione.
- Misure retrospettive. Questo è un campo di applicazione tipico della tecnologia basata sui CR-39 nel quale si sono fatti notevoli passi avanti negli ultimi anni. Se le tracce dovute alle particelle alfa sono valutate in termini di forma (sferica o ellittica) e di orientamento, la statistica di questi parametri geometrici è in grado di fornire informazioni utili sulla distribuzione in energia della particella alfa catturata; quindi si possono ottenere informazioni sullo spettro alfa. Questo tipo di applicazione richiede uno sviluppo ulteriore del software di valutazione delle tracce. Molte aziende che impiegano i CR-39 stanno mettendo a punto software che permettono un'analisi dell'immagine ottenuta dalla traccia di una particella alfa catturata da questo tipo di materiale.

**Comment [CF7]:** sono scettico sul fatto che non ci sia alcuna influenza

**Comment [CF8]:** Il tempo di esposizione gioca un ruolo fondamentale per adeguare il metodo a diverse concentrazioni

**Comment [CF9]:** al lettore viene spontaneo chiedere quale interesse può esserci verso eventuali capacità spettrometriche

## 10. RISULTATI DI CAMPAGNE DI RILEVAZIONE CONCENTRAZIONE RADON GAS EFFETTUATE IN DIVERSE REALTA':

- ABITAZIONI ????
- TERME
- INSEDIAMENTI PRODUTTIVI VARI

**VEDERE SCHEDE RELATIVE ALLA DIVERSE REALTA'**

## 11. CONCLUSIONI

