

## Sensibilità al toron dei dosimetri radon: barriere diffusive, modelli teorici e verifiche sperimentali

Mauro Magnoni<sup>1</sup>, Enrico Chiaberto<sup>1</sup>, Luisella Garlati<sup>2</sup>, Massimo Faure Ragani<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ARPA Piemonte – Dipartimento Rischi Fisici e Tecnologici, Via Jervis, 30 – 10015 Ivrea (TO)

<sup>2</sup>Politecnico di Milano – Dipartimento di Energia, Via La Masa, 34 – 20156 Milano

<sup>3</sup>ARPA Valle d'Aosta, Lo. La Maladière, 48 – 11020 Saint-Christophe (AO)

[m.magnoni@arpa.piemonte.it](mailto:m.magnoni@arpa.piemonte.it)

### Riassunto

*Il problema dell'interferenza del toron durante misure di radon mediante dosimetri passivi può essere in talune circostanze significativo: la presenza di materiali da costruzione contenenti elevate quantità di  $^{232}\text{Th}$  e il contemporaneo posizionamento del dosimetro in vicinanza delle pareti possono infatti esporre i dosimetri a concentrazioni di  $^{220}\text{Rn}$  non trascurabili. E' quindi importante poter verificare la sensibilità al toron dei dosimetri passivi destinati alla misura del  $^{222}\text{Rn}$ . A tale scopo, in questo lavoro, sono stati esposti due diverse tipologie di dosimetri, entrambi equipaggiati con rivelatori passivi CR-39, ma caratterizzati da barriere d'ingresso al rivelatore sensibile aventi concezioni completamente diverse: uno (dosimetro ANPA-ARPA Piemonte) con barriera costituita da busta di polietilene permeabile al radon, l'altra con barriera costituita dalle sottili intercapedini esistenti tra il "tappo" inferiore e la struttura della camera del dosimetro (modello Radout<sup>TM</sup>). I vari dispositivi sono stati esposti in una "camera toron" ad un'esposizione dell'ordine di  $2500 \text{ kBq h/m}^3$ , mentre la concentrazione di radon era trascurabile. I risultati ottenuti sono stati discussi ed interpretati facendo anche uso di modelli teorici e simulazioni Monte Carlo per la descrizione dei meccanismi di ingresso.*

### INTRODUZIONE

L'interferenza del toron durante la misura del radon mediante dosimetri passivi può essere in talune circostanze significativa. E' sicuramente un problema potenzialmente grave in ambienti costruiti con l'impiego di materiali contenenti elevate concentrazioni di torio (tufi, taluni graniti, ecc.), ma può evidenziarsi anche in situazioni apparentemente "tranquille", laddove il dosimetro è posizionato a ridosso del muro o a pochi cm da esso: è infatti ben noto che il flusso di  $^{220}\text{Rn}$  è, a parità di concentrazione dei progenitori nei materiali emittenti, almeno 80 volte superiore a quello del  $^{222}\text{Rn}$ . Ciò compensa il fatto che il suo accumulo è limitato dalla sua breve emivita ( $t_{1/2} = 55,8$  secondi). Ne consegue che la concentrazione di toron, magari trascurabile al centro della stanza, in prossimità delle pareti può essere elevata, anche superiore a quella del radon, e interferire quindi nella misura. E' quindi essenziale poter disporre di dispositivi in grado di misurare selettivamente il  $^{222}\text{Rn}$ . Per raggiungere questo obiettivo i dosimetri sono equipaggiati con barriere fisiche, spesso di concezione completamente assai diverse: si va ad esempio dai sacchetti di polietilene permeabili al radon ma con un tempo medio di transito che dovrebbe assicurare il completo decadimento del toron, oppure a griglie e fessure che, mettendo in comunicazione l'ambiente esterno con la camera del dosimetro attraverso percorsi relativamente lunghi, tali appunto da consentire il decadimento del  $^{220}\text{Rn}$  prima che esso giunga al rivelatore.

Le prestazioni e l'efficacia di queste barriere, tuttavia, non sono chiaramente indicate dai costruttori e, per questo motivo, è di un certo interesse fare alcuni test sperimentali che ne certifichino la reale capacità di impedire l'ingresso del toron. Infatti, l'efficacia di tali barriere deve essere particolarmente elevata: anche efficienze "di filtraggio" del flusso di toron dell'ordine del 95% possono non essere sufficienti, in determinate circostanze particolarmente sfavorevoli, per assicurare una corretta misura delle concentrazioni di radon.

## MATERIALI E METODI

### **Apparato sperimentale**

Per questo studio sono stati presi in considerazione due tipologie di dosimetri: a) il dosimetro ARPA Piemonte, derivato dal dosimetro ANPA sviluppato da Luigi Tommasino negli anni '80 del secolo scorso per l'effettuazione della Campagna Nazionale radon, caratterizzato da un telaio di plastica conduttiva, all'interno del quale possono essere alloggiati fino a 2 rivelatori CR-39, inserito in una busta di polietilene permeabile al radon che funge da barriera per i figli a vita breve; b) il dosimetro Radout™, commercializzato da Miam srl, in grado di ospitare solo un rivelatore CR-39, in cui le funzioni di barriera sono svolte non da un materiale che si interpone tra la camera radon e l'ambiente esterno, bensì dalla sottile intercapedine esistente tra il tappo inferiore di chiusura del dosimetro e la struttura a semisfera del dosimetro stesso (Figura 1). In quest'ultimo caso il radon passa attraverso l'intercapedine per diffusione, mentre i figli sono rimossi per *plateout* durante di passaggio nell'intercapedine stessa.

Per i test sperimentali i dosimetri ANPA-ARPA e Radout™ sono stati inseriti in una "camera toron", costituita da un fusto del volume di circa 18 litri, opportunamente sigillato, in cui è stato fatto fluire, mediante una pompa (0,5 litri/minuto), il toron prodotto da una sorgente costituita da reticelle al torio per lampade ad incandescenza, opportunamente sigillate e inserite in un cilindro a tenuta con valvole Swagelock (Figura 2). I livelli di toron all'interno del fusto sono monitorati in continuo da un monitor Radon-Scout inserito nel fusto stesso (Figura 3).

Figura 1 – Dosimetri testati: a sinistra il modello ANPA-ARPA a destra il Radout™



Figura 2 – Sorgente di toron



### **Interpretazione teorica: barriera di polietilene**

La modellizzazione del flusso in ingresso di una miscela  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  attraverso la barriera di diffusione di un dosimetro differisce in modo sostanziale a seconda delle caratteristiche del dosimetro stesso.

Nel caso in cui si utilizzi come barriera un particolare materiale che separa l'ambiente esterno dalla camera di irradiazione del dosimetro, come ad esempio il sacchetto di polietilene del dosimetro ARPA Piemonte, il transito di radon e toron attraverso la barriera può essere descritto mediante la classica equazione di diffusione, imponendo le opportune condizioni al contorno; sono quindi necessarie informazioni, oltre che sullo spessore del materiale, anche sul coefficiente di diffusione. Indicando con  $C_0$  la concentrazione all'interfaccia esterna della membrana che racchiude il dosimetro, la diffusione di radon e toron nel materiale può essere data dalla semplice equazione:

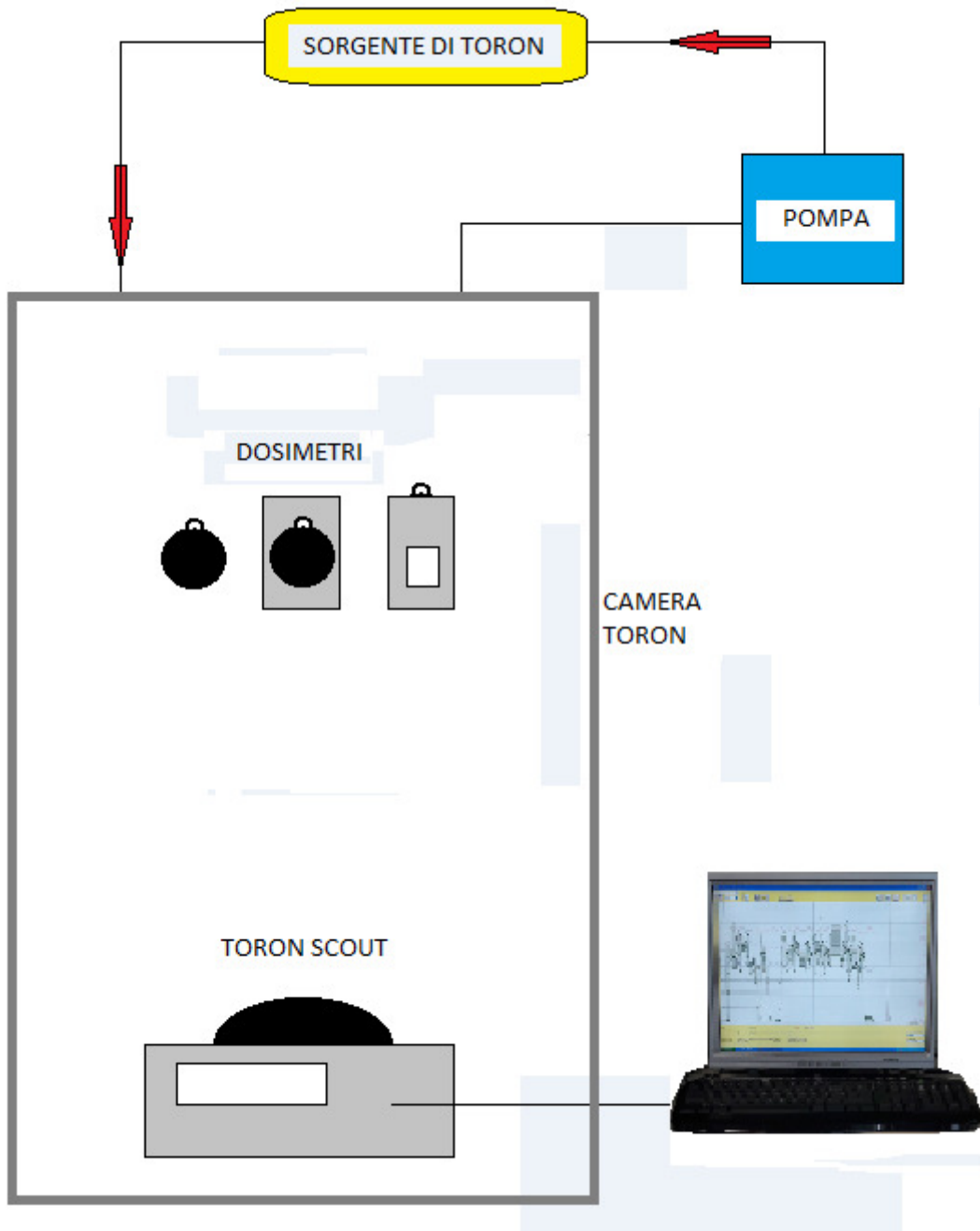
$$\frac{C(d)}{C_0} = e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D_m}} \cdot d} \quad (1)$$

in cui  $d$  è lo spessore del materiale costituente la barriera,  $C(d)$  è la concentrazione di radon o toron nel materiale a una profondità  $d$ ,  $\lambda$  la costante di decadimento mentre  $D_m$  è il coefficiente di diffusione del materiale.

Grazie alla (1) si può calcolare il valore della concentrazione di radon alla profondità  $d$ , cioè sul lato interno della membrana. Si ottiene in tal caso per il radon un valore pari a  $0,975 \cdot C_0$  mentre per il toron un valore di  $0,145 \cdot C_0$ : è questo un risultato teorico interessante perché dimostra che la barriera, completamente efficace nell'escludere i figli del radon non lo è però del tutto per il toron. Una frazione piccola ma non trascurabile di esso può quindi diffondere nella camera interna del dosimetro. È importante ricordare che  $C_0$  in questo caso non è la concentrazione esterna di radon in aria bensì

un valore di equilibrio che dipende dalla solubilità del radon nel materiale (in questo caso il polietilene) rispetto all'aria.

Figura 3 – Schema apparato sperimentale



Quindi la concentrazione  $C$  che va a stabilirsi all'interno del dosimetro non può essere calcolata semplicemente tramite la (1) ma può essere dedotta, con calcoli più complessi, a partire dal valore di concentrazione  $C(d)$  all'interfaccia interna del sacchetto, tenendo conto della diffusione verso l'interno, della superficie interna del sacchetto  $S$  e del volume  $V$  del dosimetro. Lo sviluppo di calcoli di questo genere esula dagli obiettivi di questo lavoro: basti qui ricordare che diventa essenziale a questo riguardo la conoscenza del valore del coefficiente di solubilità del radon nel polietilene utilizzato per la busta.

Può essere interessante anche calcolare il tempo necessario affinché si stabilisca la condizione stazionaria tra il radon in aria e quello "disciolto" nella barriera, il cosiddetto tempo di permeazione

della membrana  $\tau$ , dato da  $\tau = \frac{d^2}{6D_m}$ . Per un dosimetro radon, tale tempo deve essere tale da consentire il passaggio del radon all'interno del dosimetro, impedendo nel contempo quello del toron. Nel caso della barriera di polietilene del dosimetro ARPA ( $D_m=1.3 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$  a  $20^\circ\text{C}$ ;  $d=60 \text{ }\mu\text{m}$ ) tale tempo risulta essere di circa 50 s, con valori che possono aumentare al diminuire della temperatura, anche di un fattore 10 avvicinandosi agli  $0^\circ\text{C}$ .

### **Interpretazione teorica: barriera a fessura sottile**

Nel caso invece di quei dosimetri che non prevedono l'esistenza di una barriera fisica costituita da un altro materiale, come ad esempio il dosimetro Radout™ e tanti altri che si basano sul medesimo principio, per i quali la separazione tra ambiente esterno e interno dosimetro è costituita da fessure e intercapedini di dimensioni varie, ad andamento più o meno tortuoso, una modellizzazione analitica tramite l'equazione di diffusione sarebbe assai complessa. In questi casi si possono allora seguire approcci diversi: l'impiego di metodi Monte Carlo che descrivano l'ingresso degli atomi di radon e toron in geometrie complesse oppure una modellizzazione approssimata che semplifica drasticamente il problema linearizzando l'equazione di diffusione e consentendo così il calcolo di espressioni analitiche che possano essere poi utili per l'interpretazione dei dati sperimentali.

### Linearizzazione dell'equazione di diffusione

In questo caso, indicando con  $C(t)$  la concentrazione di radon o toron all'interno del dosimetro e con  $C_0$  la concentrazione esterna, si può scrivere la seguente equazione:

$$\frac{dC}{dt} + \lambda C = - \frac{D \cdot (C - C_0)}{\Delta x} \cdot \frac{S}{V}$$

dove  $D$  è il coefficiente di diffusione in aria per radon e toron (assunto identico, con ottima approssimazione),  $\lambda$  la rispettiva costante di decadimento,  $S$  la superficie complessiva delle fessure,  $V$  il volume interno della camera del dosimetro mentre  $\Delta x$  è lo spessore medio dell'intercapedine del dosimetro, corrispondente cioè al percorso che radon e toron devono fare prima di raggiungere la camera del dosimetro. La soluzione analitica di questa equazione, con condizione iniziale  $C(0)=0$  è la seguente:

$$C = \frac{\frac{DSC_0}{\Delta x V}}{\lambda + \frac{DS}{\Delta x V}} \cdot (1 - e^{-(\lambda + \frac{DS}{\Delta x V}) \cdot t})$$

di cui però a noi interessa il comportamento asintotico. Si può quindi scrivere la seguente espressione, considerando in particolare il rapporto tra la concentrazione interna al dosimetro rispetto a quella esterna,  $C/C_0$ :

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda \Delta x V}{DS}} \quad (2)$$

Si può immediatamente verificare che, nel caso del radon, si ha praticamente sempre per il rapporto  $C/C_0 \approx 1$ . Il valore molto piccolo della costante di decadimento  $\lambda$  del  $^{222}\text{Rn}$  assicura infatti che il valore della quantità  $\frac{\lambda \Delta x V}{DS}$  sia prossimo allo zero, come ci si può immediatamente rendere conto inserendo per i parametri  $\Delta x$ ,  $S$  e  $V$ , i valori caratteristici per le varie tipologie di dosimetri. Ciò non vale invece in generale per il toron a causa del valore molto più elevato della costante di decadimento  $\lambda$ . Nel caso del modello Radout™ la superficie  $S$  è data dalla sottile corona circolare con raggio  $R=2,31 \text{ cm}$  e spessore  $\Delta R=0,045 \text{ cm}$ , mentre  $\Delta x \approx 0,5 \text{ cm}$ .

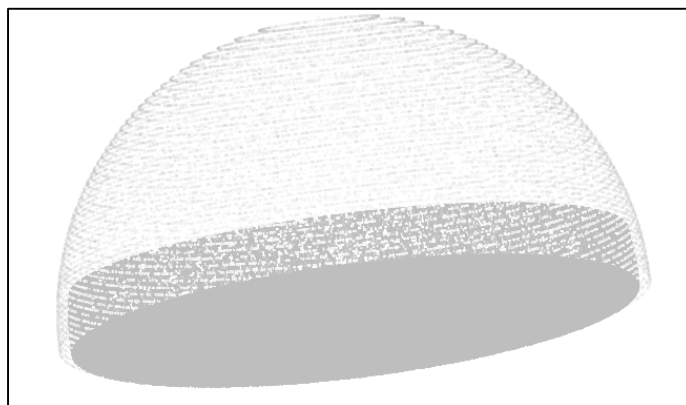
### Metodo Monte Carlo

Per studiare la diffusione del toron in un dispositivo tipo Radout™ si è utilizzata anche una simulazione con metodo Monte Carlo effettuata con il software open source R. Il dosimetro è stato

modellizzato come semisfera di raggio  $R$  con una fessura circolare sul fondo di larghezza  $\Delta R=0.045$  cm e profondità  $\Delta x=0.5$  cm (Figura 4). Successivamente si è creata una concentrazione costante  $C_0$  di Toron all'interno di un certo volume contenente il dosimetro e se ne è studiata la diffusione all'interno del dosimetro stesso. La simulazione è stata ottenuta:

- considerando una distribuzione uniforme di particelle all'interno del volume e calcolando quindi  $C_0$ ;
- seguendo nel tempo la traiettoria, determinata dal moto browniano, di ogni singola particella;
- contando quante particelle sono presenti all'equilibrio nella camera di rivelazione del dosimetro e calcolando quindi  $C$ , per poi valutare il rapporto  $\frac{C}{C_0}$

Figura 4 - Modellizzazione del dosimetro tipo Radout™ tramite una semisfera con una fessura sul fondo

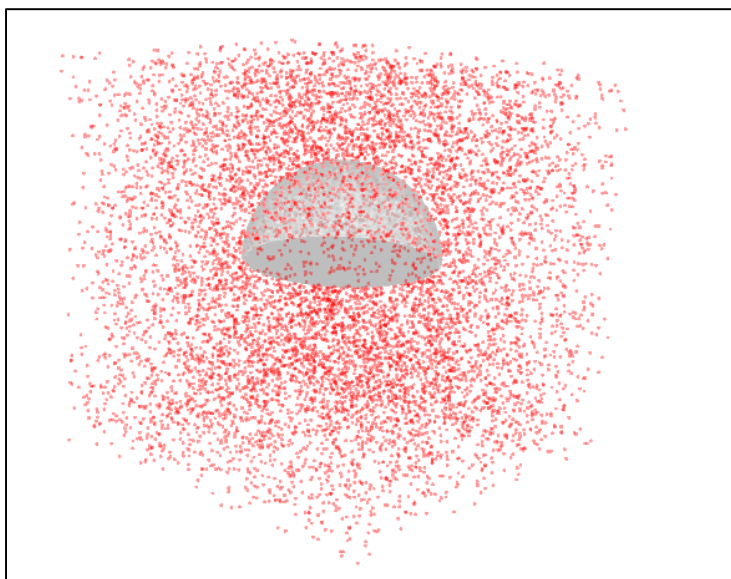


*Passo 1.* Si crea una distribuzione uniforme di particelle all'esterno del dosimetro e all'interno di un volume fissato per avere la concentrazione  $C_0$ . Nel tempo questa concentrazione è mantenuta costante ricreando le particelle che decadono o che fuoriescono dal volume. Il decadimento è simulato tramite il campionamento casuale della vita del  $^{222}\text{Rn}$  o del  $^{220}\text{Rn}$  secondo l'equazione:

$$T = -\tau \cdot \ln(1 - \gamma)$$

dove  $\tau$  è la vita media e  $\gamma$  è un numero casuale tra 0 e 1 estratto da una distribuzione uniforme.

Figura 5. Distribuzione uniforme di particelle in un volume contenente il dosimetro



**Passo 2.** Per ogni secondo e per ogni particella si considera una nuova posizione secondo l'equazione:

$$f(x, y, z, t) = \frac{1}{(4\pi Dt)^{3/2}} e^{-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}{4Dt}}$$

dove  $(x_0, y_0, z_0)$  è il punto della particella all'inizio di ogni secondo e  $D$  è il coefficiente di diffusione. A questo punto si calcola la traiettoria rettilinea tra i due punti  $(x_0, y_0, z_0)$  e  $(x, y, z)$ . La particella raggiunge la nuova posizione solo nel caso in cui:

- non interseca il dosimetro;
- non esce nel volume  $V$  iniziale;
- non decade.

La nuova posizione può essere dentro il dosimetro (camera di rilevazione o fessura), oppure all'esterno. L'ingresso e l'uscita dal dosimetro avvengono solo tramite la fessura.

**Passo 3.** Si calcola la concentrazione nel dosimetro nel caso di  $^{222}\text{Rn}$  o del  $^{220}\text{Rn}$  (Figura 6).

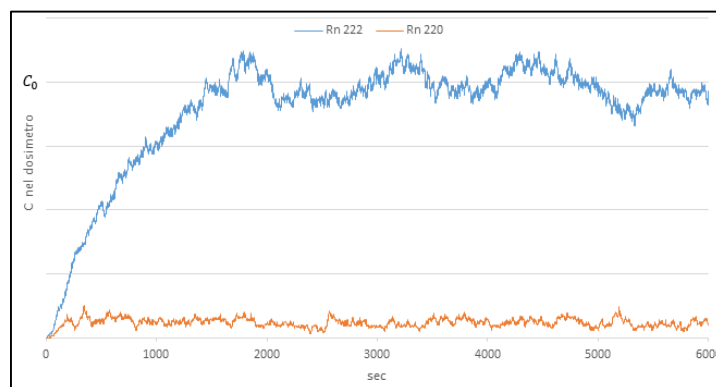
Si osserva che il  $^{220}\text{Rn}$  arriva abbastanza velocemente all'equilibrio, mentre il  $^{222}\text{Rn}$  impiega più tempo. Questo tempo e la concentrazione di  $^{220}\text{Rn}$  all'interno del dosimetro dipendono dalle misure dello stesso e dalle dimensioni della fessura.

Nel caso del dosimetro Radout<sup>TM</sup> per quanto riguarda il toron si è ottenuto un valore del rapporto  $C/C_0$  pari a:

$$\frac{C}{C_0} \sim 4,5\%$$

Un problema riscontrato è la pesantezza dei calcoli per un normale computer, per cui le simulazioni si sono limitate a qualche migliaio di particelle, aumentando così l'incertezza del risultato.

Figura 6 – Simulazione della crescita di radon e toron nel dosimetro Radout<sup>TM</sup>



## RISULTATI E DISCUSSIONI

Durante l'esperimento 5 dosimetri ARPA Piemonte, 5 dosimetri Radout<sup>TM</sup> nella configurazione standard più altri 5 dosimetri Radout<sup>TM</sup> inseriti in un sacchetto sigillato di polietilene identico a quello impiegato come barriera nel dosimetro ARPA Piemonte, sono stati introdotti nel fusto contenente la sorgente di toron e il monitor in continuo Radon-Scout.

L'esposizione al toron è durata complessivamente circa 121 ore, per un valore di esposizione pari a  $2467,9 \pm 7,4 \text{ kBq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ , corrispondente a una concentrazione media di toron di  $20396 \pm 61 \text{ Bq/m}^3$ .

I livelli di radon presenti nella camera di esposizione sono risultati trascurabili. Il cilindro a tenuta contenente la sorgente di toron era stato infatti preventivamente sottoposto a flusso di azoto per eliminare qualunque presenza residua di radon generato assieme al toron: durante l'esperimento è stata stimata dal Radon-Scout un'esposizione al  $^{222}\text{Rn}$  di circa  $4 \text{ kBq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ , pari allo 0,16% della corrispondente esposizione al  $^{220}\text{Rn}$ . Si tratta di un livello trascurabile: se si considera infatti che i

coefficienti di taratura per il  $^{222}\text{Rn}$  dei dosimetri ARPA e Radout<sup>TM</sup> valgono rispettivamente  $CT_{Rn}(\text{ARPA})=0,51\pm 0,05$  e  $CT_{Rn}(\text{Radout})=0,43\pm 0,05$  kBq·h·m<sup>-3</sup>/tracce·cm<sup>-2</sup>, si ottiene che i conteggi attribuibili al radon in questo esperimento sono di circa 8 tracce/cm<sup>2</sup> per il dosimetro ARPA e di 9 tracce/cm<sup>2</sup> per il Radout<sup>TM</sup>.

Nella seguente Tabella 1 sono riportati i valori dei conteggi (tracce/cm<sup>2</sup>) registrate dai rivelatori CR-39 inseriti nei sopra citati dosimetri. Per comparazione sono anche riportati i valori del bianco, sempre in tracce/cm<sup>2</sup>, misurati per la medesima partita dei rivelatori CR-39 impiegati in questo esperimento. Si osserva che, in tutti i casi, i conteggi osservati sono ampiamente superiori ai valori del bianco indicando quindi, per tutti i dispositivi, una certa sensibilità al toron. I dosimetri più sensibili sono risultati essere di gran lunga quelli del modello Radout<sup>TM</sup> i cui dati presentano oltretutto una dispersione molto ampia. Si può osservare a questo proposito che lo stesso dosimetro, inserito nella busta di polietilene radon permeabile analoga a quella del dosimetro ARPA mostra, non solo un'ovvia diminuzione del segnale, ma anche un deciso miglioramento della dispersione dei dati.

Dalle considerazioni sopra svolte e dai dati di Tabella 1 si possono in definitiva calcolare i conteggi netti in termini di tracce/cm<sup>2</sup> attribuibili al toron e quindi ricavare un coefficiente di taratura per il toron semplicemente dividendo il valore dell'esposizione misurato col Radon-Scout, cioè 2467,9 kBq·h·m<sup>-3</sup> per i conteggi medi netti  $T$  registrati, espressi in tracce/cm<sup>2</sup>. Il coefficiente di taratura  $CT_{Tn}$  è quindi definito sperimentalmente come:

$$CT_{Tn} = \frac{C_0 \cdot t}{T} \quad (3)$$

in cui  $t$  è il tempo di esposizione. Si misura in kBq·h·m<sup>-3</sup>/tracce·cm<sup>-2</sup> ed è di fatto l'inverso di una efficienza; il suo calcolo consente di valutare quantitativamente l'influenza del toron durante le misure di radon. Tuttavia, per meglio mettere in evidenza la capacità del toron di entrare nel dispositivo e soprattutto per testare l'affidabilità dei modelli proposti, è più interessante valutare il rapporto  $C/C_0$  tra le concentrazioni  $C$  interne al dosimetro e quelle esterne  $C_0$ .

Il calcolo del valore sperimentale del rapporto  $C/C_0$  non può però essere fatto direttamente: mentre  $C_0$  è noto, essendo dato dal valore misurato direttamente nella camera toron dal monitore in continuo Radon-Scout,  $C$ , cioè la concentrazione di toron effettivamente presente all'interno del dosimetro è incognita. Quello che si misura sperimentalmente è infatti solo di numero di tracce al cm<sup>2</sup>  $T$  corrispondente a  $C$ . Conviene quindi cambiare strategia e ragionare in termini di tracce. Quello che si può fare allora è cercare di calcolare il valore  $T_0$  delle tracce corrispondenti a  $C_0$ , cioè le tracce che si registrerebbero se tutto il toron presente all'esterno riuscisse ad entrare all'interno del dosimetro. Per far ciò si può scrivere un'espressione del tipo:

$$T = \alpha \cdot \varepsilon_{int} \cdot C \cdot t \quad (4)$$

in cui si mettono in relazione le tracce  $T$  con la corrispondente concentrazione  $C$ . In essa  $t$  è il tempo di esposizione,  $\alpha$  è un parametro adimensionale che descrive l'ingresso del toron nel dispositivo di misura, mentre  $\varepsilon_{int}$  è l'efficienza intrinseca del dosimetro alle particelle  $\alpha$  del toron. Quest'ultimo parametro in particolare dipende dall'energia delle particelle  $\alpha$  oltre che dal numero e dalla distribuzione degli  $\alpha$  emettitori nel volume interno del dosimetro; per questo motivo esso assume valori diversi per il  $^{222}\text{Rn}$  e il  $^{220}\text{Rn}$ . Per provare a stimare  $T_0$  si può partire dal coefficiente di taratura  $CT_{Rn}$  del radon, noto per tutti i dosimetri. Infatti, dal momento che vale la relazione:  $CT = \frac{1}{\alpha \cdot \varepsilon_{int}}$ , il valore di  $T_0$  si ricava direttamente dalla (4) inserendo l'appropriato valore di  $C_0$  e prendendo per  $CT$  i valori ottenuti per a partire dal radon facendo in prima battuta l'assunzione, un po' grossolana, che valga  $\varepsilon_{intTn} \approx (2/3) \cdot \varepsilon_{intRn}$ : si tiene cioè conto del fatto che le particelle  $\alpha$  del toron che irradiano il CR-39 all'interno del dosimetro sono 2 ( $^{220}\text{Rn}$  e  $^{216}\text{Po}$ ) contro le 3 del radon ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$  e  $^{214}\text{Po}$ ), assumendo nel contempo che non vi siano significative differenze dovute alle diverse energia delle particelle  $\alpha$  e alla diversa distribuzione dei radionuclidi all'interno del volume del dosimetro. Ciò ovviamente non è vero in senso stretto: considerazioni euristiche portano anzi a ritenere che in realtà l'efficienza intrinseca per il toron  $\varepsilon_{intTn}$  sia ancora più bassa di 2/3 di  $\varepsilon_{intRn}$  ma, in questa sede, non si è ancora in grado di quantificare tale effetto.

Accontentandosi quindi per ora di questa approssimazione, si può finalmente calcolare il rapporto  $T/T_0$  che, per la (4), coincide per definizione con il rapporto  $C/C_0$ .

Nella seguente Tabella 2 sono riportati i risultati dei valori medi dei conteggi netti in termini di tracce/cm<sup>2</sup> per le diverse configurazioni dei dosimetri, i corrispondenti coefficienti di taratura  $CT$ , i rapporti sperimentali  $C/C_0$ , nonché le relative valutazioni teoriche.

Tabella 1 – Esposizione al toron, conteggi lordi (tracce/cm<sup>2</sup>). Come incertezza si riporta la deviazione standard dei 5 dati

|              | <b>Fondo CR39</b> | <b>Dosimetro ARPA</b> | <b>Radout</b>  | <b>Radout + polietilene</b> |
|--------------|-------------------|-----------------------|----------------|-----------------------------|
| 1            | 23                | 175                   | 1230           | 117                         |
| 2            | 11                | 146                   | 821            | 83                          |
| 3            | 18                | 173                   | 323            | 144                         |
| 4            | 13                | 157                   | 526            | 114                         |
| 5            | 15                | 278                   | 1564           | 85                          |
| <b>Media</b> | <b>16±5</b>       | <b>186±53</b>         | <b>893±507</b> | <b>109±25</b>               |

Tabella 2 – Sensibilità al toron dei diversi dosimetri

|  | <b>Dosimetro ARPA</b> | <b>Radout</b> | <b>Radout + polietilene</b> |
|--|-----------------------|---------------|-----------------------------|
| <b>Tracce nette<sup>1</sup><br/>Tracce/cm<sup>2</sup> toron</b>                  | 162±53                | 868±507       | 84±25                       |
| <b>Coefficiente<br/>Taratura<br/>kBq·h·m<sup>-3</sup>/tracce·cm<sup>-2</sup></b> | 15,23                 | 2,84          | 29,52                       |
| <b>C/C<sub>0</sub> sperimentale %</b>  | 2,2±0,7               | 10,1±5,9      | 1,0±0,3                     |
| <b>C/C<sub>0</sub> teorico analitico %</b>                                       | -                     | 4,3           | -                           |
| <b>C/C<sub>0</sub> teorico Monte Carlo %</b>                                     | -                     | 4,5           | -                           |

Come si vede i dati sperimentali indicano una certa permeabilità al toron per tutti i dosimetri. In particolare nel caso del Radout™ all'interno del dosimetro riuscirebbe ad entrare circa il 10% del toron presente in ambiente. Si tratta di un valore abbastanza elevato anche se è giusto osservare che i dati sperimentali a disposizione sono affetti da una grande incertezza, dovuta probabilmente a differenze morfologiche tra i vari dosimetri. Le simulazioni teoriche effettuate con metodi analitici e Monte Carlo sono in ottimo accordo tra loro e forniscono per il rapporto  $C/C_0$  valori decisamente più bassi (4,3-4,5 %) che però, considerando il margine di incertezza sono comunque compatibili col dato sperimentale. E' probabile inoltre che un miglioramento dell'accordo tra teoria ed esperienza

<sup>1</sup> Le tracce nette sono ottenute dai singoli dati sperimentali sottraendo il valore medio del fondo del Cr-39 (Tabella 1) e il numero di tracce attribuibili alla residua presenza del radon (8 e 9 Tracce/cm<sup>2</sup> a seconda della tipologia di dosimetro)

possa essere raggiunto quando si potrà disporre di una stima più realistica dell'efficienza intrinseca del toron  $\epsilon_{intTn}$ .

## CONCLUSIONI

I risultati dell'esperimento hanno mostrato una certa permeabilità al toron di tutti i dosimetri analizzati. E' stato inoltre possibile ricavare per tutti i dosimetri un coefficiente di taratura per il toron, che può quindi consentire di sottrarre il contributo del segnale del toron in quegli ambienti dove la concentrazione di questo radioisotopo non è trascurabile.

Il dosimetro Radout™ in configurazione standard ha mostrato una permeabilità piuttosto elevata, valutabile almeno attorno ai 4-5 punti percentuali, mentre valori decisamente più bassi valgono per il dosimetro ARPA Piemonte e per il Radout™ equipaggiato con busta di polietilene (1-2 punti percentuali).

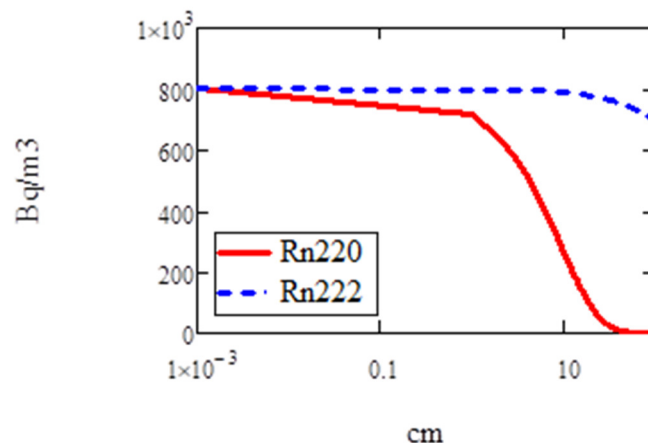
Si tratta apparentemente di valori piccoli, non in grado di perturbare in modo significativo una misura di radon se non nei rarissimi casi in cui le concentrazioni di toron sono molto elevate, dell'ordine delle centinaia o migliaia di Bq/m<sup>3</sup>. In realtà ciò non è esattamente vero. Bisogna infatti tenere presente che il toron, quasi sempre trascurabile come fonte di esposizione, ha la caratteristica di non essere distribuito uniformemente negli ambienti interni: mentre la sua concentrazione al centro di una stanza, rappresentativa della reale esposizione delle persone è generalmente molto bassa, in vicinanza delle pareti, dove molto spesso vengono posizionati i dosimetri per la misura del radon, la situazione può essere ben diversa. Ne consegue che la concentrazione di toron in prossimità delle pareti, pur non essendo significativa per l'esposizione degli individui, può tuttavia esporre i dosimetri radon a concentrazioni di toron superiori anche di un fattore 100 rispetto a quelle effettivamente presenti nell'abitazione. Vale infatti formalmente, sia per il radon che per il toron, la solita equazione che descrive l'andamento delle concentrazioni in funzione della distanza dalla superficie emittente:

$$C(x) = C_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D_p}} \cdot x}$$

dove però stavolta il coefficiente  $D_p$  che compare nell'esponente non è il coefficiente di diffusione in aria bensì un coefficiente di dispersione, di solito più grande di circa un ordine di grandezza.

La situazione è allora quella illustrata dalla seguente Figura 7 che descrive una situazione ipotetica dove la concentrazione di radon e toron è dovuta esclusivamente all'esalazione puramente diffusiva dei materiali da costruzione in cui vi è la medesima concentrazione di <sup>224</sup>Ra e <sup>226</sup>Ra, in grado di generare al centro della stanza una concentrazione di <sup>222</sup>Rn di circa 800 Bq/m<sup>3</sup>. Quello che si vede è che, mentre al centro della stanza il <sup>220</sup>Rn è pressoché assente, a ridosso delle pareti le concentrazioni si equivalgono: i dosimetri radon sono quindi esposti a concentrazioni rilevanti di toron che devono quindi essere tenuti in conto.

Figura 7 – Concentrazioni di radon e toron in funzione della distanza dalla superficie emittente



## Bibliografia

1. Antonopoulos-Domis et al., Diffusion model of radon exhalation rates, *Health Physics*, 75 (5) : 574 – 580.
2. Bigu J., A method for measuring thoron and radon gas concentrations using solid-state alpha-particle detectors, *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 37, Issue 7, 1986, pp. 567-573.
3. Carrera G., Garavaglia M., Magnoni S., Valli G., Vecchi R., Natural Radioactivity and Radon Exhalation in Stony Materials, *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 34, N°2, pp. 149-159, 1997.
4. Cosma C., Cozar O., Jurcut T., Baciuc C., Pop I., *Proceedings of the Conference: The Natural Radiation Environment VII: Seventh International Symposium on the Natural radiation Environment*, Rhodes, Greece, 22-24 May 2002, (2005).
5. Cothorn C. R. and Smith J. E. edited by, *Environmental Radon*, Plenum Press, New York and London, 1987.
6. ISTISAN Rapporto 17/36, Natural radioactivity in building materials in the European Union: a database of activity concentrations, radon emanations and radon exhalation rates, ISS-Ambiente e Salute, 2014.
7. Jonassen N., The determination of radon exhalation rates, *Health Physics*, Vol. 45, N°2, pp. 369-376, 1986.
8. Magnoni M., Chiaberto E., Prandstatter A., Serena E e Tripodi R, Thoron exhalation rate in stony materials: a simplified approach, *Construction and Building Materials*, 173, (2018), 520-524.
9. D. Nikezić, N. Stevanović, *Radon progeny behavior in diffusion chamber*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B 239 (2005) 399-406
10. Nuccetelli C., Bochicchio F., The Thoron Issue: Monitoring Activities, Measuring Techniques and Dose Conversion Factors, *Radiat Prot Dosimetry* (1998) 78 (1): pp. 59-64.
11. Pressyanov D, Georgiev S., Dimitrova I., Mitev K., Boshkova T., *Determination of the diffusion coefficient and solubility of radon in plastics*, Radiation Protection Dosimetry, Volume 145, Issue 2-3, May 2011, pp.123-126.
12. Sarad® GmbH, Thoron Scout Radon & Thoron measurements, [https://www.sarad.de/product-detail.php?lang=en\\_US&catID=&p\\_ID=61](https://www.sarad.de/product-detail.php?lang=en_US&catID=&p_ID=61).
13. Silverman, M.P. and Mudvari, A. *Brownian Motion of Radioactive Particles: Derivation and Monte Carlo Test of Spatial and Temporal Distributions*, World Journal of Nuclear Science and Technology, 2018, 8, 86-119.
14. L. Tommasino, J. Chen, R. Falcomer, M. Janik, R. Kanda, F. DeFelice, F. Cardellini, R. Trevisi, F. Leonardi, M. Magnoni, E. Chiaberto, G. Agnesod, M. Faure Ragani, G. Espinosa, J. Golzarri, K. Kozak and J. Mazur, An international cooperation by using an all-encompassing passive radon monitor, *Radiation Protection Dosimetry*, Volume 177, Issue 1-2, November 2017, pp. 12-15.