

RISCHIO RADON IN AMBIENTI LAVORATIVI: UN CONTRIBUTO DI METODO E APPLICAZIONE

Leonardo Baldassarre⁽¹⁾, Fabrizio Cammarota⁽²⁾,
Mario De Simone Sorrentino⁽³⁾, Bruno Cammarota⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Libero professionista, Bari

⁽²⁾ ASL Napoli 1, U.O.C. Radioterapia, P.O. “Cardinale Ascalesi” Napoli

⁽³⁾ Seconda Università degli Studi di Napoli, Dipartimento di Scienze Chirurgiche, Anestesiologiche e dell’Emergenza

⁽⁴⁾ Seconda Università degli Studi di Napoli

INTRODUZIONE

I D.Lgs. 241/00 e 257/01 (96/29/Euratom in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti) che integrano il D.Lgs. 230/95 (89/618 - 90/641- 92/3 9 e 96/29/Euratom), considerano il rischio radon in “*particolari luoghi di lavoro quali tunnel, sottovie, catacombe, grotte, comunque, in tutti i luoghi di lavoro sotterranei*” o anche diversi ma situati “*in zone con caratteristiche determinate*”, a partire dai locali seminterrati o al piano terreno. Dunque riteniamo che anche ove in attesa della prevista mappatura regionale di tali zone, *la normativa sia pienamente esigibile* e ove necessario, possa prevedere verifiche anche ai piani fuori terra che non di rado evidenziano concentrazioni di attività del gas radon, non trascurabili. Le scuole materne e dell’obbligo sono oggetto di una particolare cautela. Nell’ambito della *esposizione lavorativa* il superamento dell’80% del *livello di azione (400 Bq/m³)* comporta la ripetizione delle misure effettuate; il suo superamento (*500 Bq/m³*) richiede che il Datore di lavoro, avvalendosi dell’Esperto Qualificato attui azioni di rimedio idonee al controllo entro il valore limite delle grandezze misurate, tenuto conto del principio di ottimizzazione, ne verifica l’efficacia con nuove misure, ne dà idonea comunicazione con relazione dell’ Esperto Qualificato all’Agenzia Regionale, all’ASL, alla Direzione Provinciale del Lavoro territoriali. In relazione alla *esposizione di tipo abitativo*, in Italia, ove il legislatore statale ha mostrato di porsi il problema del Radon nelle abitazioni, si considerano validi i valori indicati dalla raccomandazione europea 143/90/EURATOM del 21/02/90 dove si consiglia, per gli edifici residenziali esistenti, un intervento nel caso venga superata la soglia di **400 Bq/m³** (valore medio annuale) e quella di **200 Bq/m³** per gli edifici di nuova costruzione. Il Piano Sanitario Nazionale per il triennio 1998 - 2000 (D.P.R. 23-07-1998) già inseriva l’obiettivo della riduzione del rischio radon da perseguire anche con la emanazione di norme specifiche.

Considerato come il contributo di dose efficace derivi essenzialmente dalla progenie solida del gas radon, si deduce la importanza di monitorare oltre che la concentrazione di attività del gas radon, anche quella della sua progenie, nelle due frazioni: libera e legata a particelle.

La valutazione del *fattore di equilibrio* inteso come rapporto effettivo fra le suddette concentrazioni di attività può indurre l'esigenza del ricalcolo del *livello di azione effettivo* della concentrazione di attività radon e del *fattore di conversione effettivo* ai fini del calcolo della dose efficace.

1 - IL GAS RADON E LA SUA PROGENIE

Il Radon è un gas radioattivo α -emittente presente, in diverse forme isotopiche (^{222}Rn , ^{220}Rn , ^{219}Rn) nelle catene radioattive dei radionuclidi primordiali ^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U . In Radioprotezione i radioisotopi α -emittenti rappresentano un elemento molto critico per la contaminazione interna, mentre risultano praticamente innocui per irradiazione esterna. Particelle α di qualche MeV, come quelle emesse da radioisotopi α -emittenti, vengono infatti rapidamente degradate in energia (ceduta al tessuto biologico con effetti di eccitazione e ionizzazione degli atomi componenti le bio-molecole) e "bloccate" nello strato superficiale di epidermide, costituito da cellule in continuo fisiologico ricambio, senza costituire rischio di danno per gli organi critici interni.

Le α sono particelle direttamente ionizzanti e ad alto Let (*Linear energy transfer*); pertanto depositano tutta l'energia (cinetica) posseduta in un volume molto limitato con conseguente addensamento, lungo il proprio percorso, del danno biologico arrecato ai tessuti. Tale aspetto riduce notevolmente l'efficienza dei naturali meccanismi di difesa e/o riparazione del danno cellulare. La radiazione α assume, infatti, un "*fattore di peso*" nel calcolo della dose equivalente, secondo la formula:

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (1)$$

circa 20 volte maggiore rispetto a quella di riferimento (X, γ) e dunque un effetto biologico altrettanto maggiore. Nella (1) $D_{T,R}$ è la dose assorbita mediata nel tessuto o organo T, dovuta alla radiazione R. Radon e progenie hanno pari nocività potenziale ma in realtà il danno biologico è indotto soprattutto dalla progenie. Infatti il Radon, gas non reattivo, quando inalato viene rapidamente espulso con la espirazione con conseguente trascurabile contributo di dose ai polmoni. Diversamente i suoi "discendenti" solidi (^{218}Po , ^{214}Po) contestualmente presenti nell'aria liberi o adesi all'aerosol, si depositano nell'epitelio bronchiale rilasciandovi *dosi significative di radiazione α* .

In assenza totale di aerazione, la concentrazione nell'aria dei "discendenti" assume un valore massimo dopo un tempo sufficientemente lungo, allorché vengono a realizzarsi condizioni di "*equilibrio radioattivo*" tra i discendenti suddetti, (che hanno tutti breve tempo di dimezzamento), e il "*genitore*" Radon.

Il definitivo il gas Radon agisce come generatore e trasportatore dei suoi prodotti di decadimento, principale causa, nelle ipotesi di prolungata esposizione umana ad elevate concentrazioni, di *tumore polmonare*.

Per la valutazione del rischio da esposizione al Rn negli ambienti confinati, sono stati utilizzati sia *approcci dosimetrici*, sia *epidemiologici*.

L'approccio epidemiologico analizza direttamente le *frequenze di mortalità* per tumore polmonare ottenute negli studi condotti su gruppi di lavoratori esposti. Sulla

base di tali studi, per la valutazione di dose ai lavoratori la normativa vigente indica un fattore convenzionale di conversione pari a **3 nSv per una esposizione di 1 Bq×h×m⁻³** (concentrazione di attività di gas radon integrata nel tempo).

La valutazione di dose da contaminazione interna da radon basata sul modello dosimetrico viene effettuata utilizzando *la concentrazione dei suoi prodotti di decadimento*, che sono di *natura particolata e possono essere inalati come tali o legati all'aerosol ambientale*. La valutazione delle frazioni dei prodotti di decadimento del Rn legati e non legati all'aerosol atmosferico viene effettuata utilizzando sistemi di campionamento dell'aerosol che sfruttano il comportamento fisico dovuto alla dimensione delle particelle. In particolare per separare la **frazione non legata** (aerosol o particelle di dimensioni comprese fra 0.5-20 nm) da **quella legata** (aerosol o particelle di dimensioni maggiore di 20 nm) si utilizzano le capacità di intercettazione degli schermi a rete metallica. L'interesse della misura delle due frazioni per il calcolo della dose è relativo alla valutazione della stessa nei vari compartimenti del polmone, ma anche come base conoscitiva per le azioni di rimedio in relazione al diverso peso che le granulometrie possono presentare nella specifica situazione studiata.

2 - MATERIALI E METODI

Abbiamo effettuato il *monitoraggio del radon* in cinque diversi ambienti lavorativi con camere a elettretti tipo EIC-SLT per tempi di misura variabili da circa 42 ore a circa 96 ore. In un singolo ambiente le prove sono state ripetute per otto periodi consecutivi pari a una durata complessiva di circa un mese. Abbiamo distintamente misurato in contemporanea la attività del radon, della frazione legata della sua progenie e di quella libera, determinando il **F_{eq}**. Su questa base abbiamo proposto *per detti ambienti* il ricalcolo del *livello di azione effettivo* della concentrazione di attività radon e del *fattore di conversione effettivo* ai fini del calcolo della dose efficace.

A questo scopo, è stato utilizzato l'apparato di misura sistema E-RPISU (*Environmental Radon Progeny Integrating Sampling Unit*) che permette la valutazione contemporanea di concentrazione media di attività di gas radon in aria, concentrazione media di attività della frazione di progenie legata ad aerosol e/o microparticelle e la concentrazione media di attività della frazione di progenie libera. Da queste misure di conseguenza è stato possibile valutare anche il fattore di equilibrio **F_{eq}**.

Costituente fondamentale del sistema E-RPISU è un insieme di camere di ionizzazione a elettretti. In particolare ogni unità è dotata di tre camere di grande volume per monitoraggio di breve durata (pochi giorni): una delle tre, quella dedicata al monitoraggio della concentrazione media di attività di gas radon in aria, è utilizzata come una classica camera di ionizzazione a elettretti, dotata di elettretti di opportuna sensibilità in funzione della durata di campionamento prevista.

Le altre due camere (A e B in Figura 1), sempre di grande volume sono state modificate e presentano un foro circolare ricavato sulla parete laterale sul quale è montato un sistema di filtraggio costituito da, partendo dall'interno della camera:

- una finestra sottile di Mylar trasparente alle particelle α che isola la camera di ionizzazione a elettretti dall'ambiente esterno;
- un alloggiamento predisposto per l'inserimento di filtri in microfibra di vetro;
- un sistema di filtraggio a rete metallica per la cattura della progenie del radon;
- un raccordo ad una unità di pompaggio di aria.

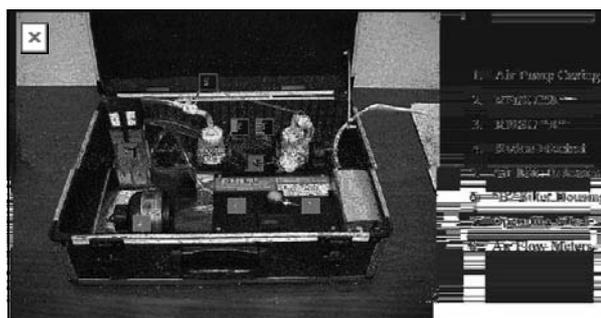


Figura 1: Sistema E-RPISU

Durante il suo funzionamento, il sistema di pompaggio è utilizzato per raccogliere in un intervallo di tempo definito la progenie del radon sui filtri di microfibra di vetro di diametro 25 mm. Il flusso d'aria può essere variato su ogni linea di pompaggio attraverso i due flussometri, ma per facilitare le operazioni di calcolo è necessario calibrare l'apparato in modo che entrambe le camere siano alimentate da un flusso d'aria pari a 0,5 litri/minuto corrispondente ad una velocità dell'aria all'interno del sistema di filtraggio pari a 8,33 cm/sec. I filtri in fibra di vetro sono sistemati in modo tale che la progenie raccolta emetta le particelle α originate dai suoi processi di decadimento all'intero della camera di ionizzazione a elettretti. In tal modo è possibile valutare la attività totale delle particelle α emesse dai figli del radon raccolti sugli stessi. Per la valutazione della attività totale sono stati utilizzati comuni rivelatori ad elettretti del tipo ST o LT, in dipendenza della concentrazione di attività di radon attesa ed in funzione della durata di ogni singolo campionamento. Per la misura della perdita di potenziale degli elettretti installati è stato utilizzato il lettore dedicato prodotto dalla Rad Elec, inc.

3 - ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI

La legislazione italiana prevede per la valutazione di dose ai lavoratori un fattore arrotondato all'intero per il coefficiente convenzionale di conversione, indicato in 3 nSv di dose efficace per unità di esposizione al radon espressa in $\text{Bq} \times \text{h} \times \text{m}^{-3}$. Il livello di azione il cui superamento richiede l'adozione di azioni di rimedio che riducano tale grandezza a livelli più bassi è fissato, in base al D.Lgs. 241/00 e s.m.i., in **500 Bq/m^3** di concentrazione media di attività di radon in ragione di un anno solare. L'esercente non è tenuto alle azioni di rimedio se dimostra, avvalendosi dell'esperto qualificato, che nessun lavoratore è esposto ad una dose superiore a **3 mSv/anno**;

questa disposizione non si applica agli esercenti di asili-nido, di scuola materna o di scuola dell'obbligo. Non è fatto quindi alcun riferimento alla possibile variabilità del fattore di equilibrio sia in ogni singolo locale adibito ad ospitare attività lavorative, che alla variabilità dello stesso in ognuno di essi nel tempo. Come è possibile riscontrare in Tabella 1, nei diversi ambienti oggetto di studio sono stati misurati fattori di equilibrio sensibilmente diversi da quello adottato dalla legislazione italiana; inoltre durante la seconda fase di misura è stata verificata la forte variabilità di esso nel tempo di misura, in totale oltre un mese di campionamento continuo, essendosi comunque mantenuto mediamente fortemente al di sopra del 40% (Tabella 2).

Posizione	Durata (hh.mm.)	A (WL)	B (WL)	Radon (Bqm ⁻³)	ΔRn (%)	F _{eq} (%)	ΔF _{eq}
POS. 1	70.00.	0,008	0,000	48	20,0	62	11,5
POS. 2	49.00.	0,005	0,000	55	23,0	32	10,0
POS. 3	42.18.	0,032	0,008	215	8,0	55	2,6
POS. 4	96.42.	0,075	0,001	426	5,0	65	1,3
POS. 5	56.56.	0,007	0,000	57	22,0	60	10,0

Tabella 1: Risultati delle valutazioni della concentrazione media di attività di gas radon in aria, della concentrazione media di attività della progenie di gas radon in aria, della concentrazione media di attività della frazione non attaccata della progenie di gas radon in aria in diversi luoghi di lavoro.

N. Sessione	Durata (hh.mm.)	A (WL)	B (WL)	Radon (Bqm ⁻³)	ΔRn (%)	F _{eq} (%)	ΔF _{eq}
1	96.42.	0,075	0,001	426	5,0	65	1,3
2	72.54.	0,057	0,001	366	5,8	57	1,5
3	70.30.	0,066	0,003	329	5,8	75	1,7
4	73.30.	0,078	0,000	596	5,4	49	0,9
5	96.30.	0,064	0,000	451	5,3	52	1,2
6	70.54.	0,065	0,001	307	6,1	79	1,8
7	95.24.	0,057	0,001	259	5,9	82	2,1
8	95.48.	0,047	0,002	207	6,3	83	2,7
Media pesata	-----	0,063	0,001	364	-----	68	

Tabella 2: Risultati della valutazione della concentrazione media di attività di gas radon in aria, della concentrazione media di attività della progenie di gas radon in aria, della concentrazione media di attività della frazione non attaccata della progenie di gas radon in aria nel luogo identificato come **Pos.4**

In Tabella 3 è indicata la variazione del coefficiente convenzionale di conversione, indicato in nSv di dose efficace per unità di esposizione al radon espressa in Bq×h×m⁻³ che dovrebbe essere adottato in ogni singolo ambiente, tenuto conto del fattore di equilibrio misurato in ognuno di essi: nel caso specifico si è assunto il valore misurato in pochi giorni come rappresentativo del valore medio annuo per pura utilità rappresentativa.

Posizione	Coefficiente convenzionale [nSv(Bq×h×m ⁻³) ⁻¹]	Coefficiente corretto [nSv(Bq×h×m ⁻³) ⁻¹]
Pos. 1	3	5
Pos. 2	3	3
Pos. 3	3	4
Pos. 4	3	5
Pos. 5	3	5

Tabella 3: Confronto fra il Coefficiente convenzionale di conversione calcolato considerando un fattore di equilibrio pari al 40% ed il Coefficiente di conversione calcolato tenendo conto della variabilità del fattore di equilibrio, indicato in nSv di dose efficace per unità di esposizione al radon espressa in Bq×h×m⁻³.

Posizione	Livello di azione fissato dal D.Lgs. 241/00 e s.m.i. (Bq×m ⁻³)	Livello di azione corretto (Bq×m ⁻³)
Pos. 1	500	300
Pos. 2	500	500
Pos. 3	500	375
Pos. 4	500	300
Pos. 5	500	300

Tabella 4: Confronto fra il Livello di azione fissato dal D.Lgs.241/00 e s.m.i. calcolato considerando un fattore di equilibrio pari al 40% ed il Livello di azione calcolato tenendo conto della variabilità del fattore di equilibrio, indicato in Bq×m⁻³.

4 - CONCLUSIONI

L'analisi dei dati raccolti in Tabella 3 e Tabella 4 evidenzia come la mera valutazione della concentrazione media di attività di gas radon in aria non sia sufficiente ad assicurare adeguati standard di protezione per il personale esposto a gas radon e suoi prodotti di decadimento in ambienti di lavoro sotterranei. La mancata valutazione del fattore di equilibrio può determinare come mostrato una sottostima sostanziale della dose ricevuta da ogni lavoratore nel caso in cui il fattore di equilibrio sia maggiore di quello adottato dalla legislazione italiana in completo disaccordo con il principio di "**limitazione delle dosi**", ma al contrario può anche obbligare datori di lavoro a mettere in atto azioni correttive per la riduzione della concentrazione media di attività di gas radon in aria anche quando la dose di esposizione di ogni singolo lavoratore sia nettamente inferiore a 3 mSv/anno, in totale disaccordo con il principio di "**ottimizzazione**".

Il considerare i fattori di equilibrio valutati a seguito dell'esposizione del dispositivo di misura per un periodo variabile da 2 a 4 giorni come rappresentativi dei luoghi di indagine costituisce una assunzione assolutamente non supportata dall'evidenza scientifica ed è stata considerata nel lavoro di tesi con il solo fine di rappresentare

come la variabilità del fattore di equilibrio produca un determinante cambiamento del livello di azione che dovrebbe essere adottato nella valutazione del rischio correlato all'esposizione a gas radon in ambienti di lavoro sotterranei.

D'altra parte la valutazione condotta durante la seconda fase di campionamento in un unico ambiente di lavoro per oltre 30 giorni consecutivi mostra comunque che il fattore di equilibrio medio rilevato durante l'intero periodo è sensibilmente differente da quello adottato dalla legislazione italiana.

In sintesi il *livello di azione* della concentrazione di attività del radon è posto dal D.lgs 241/2000 e s.m.i., in 500 Bq/m^3 che corrisponde alla dose efficace limite di esposizione lavorativa individuale di 3 mSv / anno , con F.eq. del 40%, f. di conversione di $3 \cdot 10^{-9} \text{ Sv / 1Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$, per 8 ore di lavoro g. per 5 g. settimanali per 50 settimane/anno. Ciò non vale per asili nido e scuole dell'obbligo. La misura del fattore di equilibrio e dunque dell'attività della progenie non legata può determinare in base all'incremento del rischio reale, il ricorso ad un diverso *fattore di conversione* ai fini della dose efficace e ad un diverso *livello di azione* ai fini del *monitoraggio del gas radon*.

5 – BIBLIOGRAFIA

- Haerting, F.H., Hesse, W. „Der lungenkrebs, die bergkrankheit in den Schneeberger gruben“, V.Gerisht. Med. Off.Gesund Wes.1989, 30:296-309, 31:102-132, 31:313-337.
- UNSCEAR 2000. “United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations, Sources and effect of ionizing radiation, Report to the General Assembly”, New York: United Nations.
- FEDERAL RADIATION COUNCIL (FRC).”Guidance for the control of radiation hazard in uranium mining”, Staff report No.8 (revised), Washington, D.C., 1967.
- Percy, C., Sobin, L. (1983). “Surveillance, epidemiology and end result lung cancer data applied to the World Health Organisation’s classifications of lung tumors”, J.Natl.Cancer Inst., 70,663
- ICRP Publication 66, “Human Respiratory Tract Model. for Radiological Protection” (1993).
- William W.Nazaroff, Anthony v.nero, JR. “Radon and its decay products in indoor”.
- Ramamurthi, M. e Hopke, P. K. “On Improving the Validity of Wire Screen Unattached Fraction Rn Daughter Measurements”, Health Phys. 56:189-194; 1989.
- Reineking A. e Porstendorfer J. (1985) “High-Volume Screen Diffusion Batteries and Alfa Spettroscopy for Mesasurements of the Radon Daughter Activity Size Distributions in the Environment”
- C. ZocK, J. Porstendorfer, A. Reineking, “The Influence of Biological and Aerosol Parameters of Inhaled Short-Lived Radon Deacay Products on Human Lung Dose”, Rad. Prot. Dosim., Vol.63, N.° 3, pp. 197-206 (1996).
- F.Bochicchio, F. Forastiere, S. Mallone, C. Nuccetelli e F. Sera, “Case-Control Study on Radon Exposure and Lung Cancer in an Italian Region: Preliminary

Results”, IRPA-10, 10th International Congress of The International Radiation Protection Association, May 14-19, 2000.

- International Commission on Radiological Protection, “Protection against radon-222 at home and at work” ICRP Publication 65, Ann.ICRP, 23, N.°2 (1993) .
- Knut Magnus, Anders Engeland et al .”Residential radon exposure and lung cancer. An epidemiological study of Norwegian municipalities” 117
- Christine A. Stidley and Jonathan M. Samet “A review of ecologic studies of lung cancer and indoor radon” Health Phys.: 65(3), 234-251(1993)
- UNSCEAR 2000 “United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, New York: United Nations”, VOLUME I: SOURCES.
- J. Porstendorfer e A. Reineking, “ Radon: characteristics in air and dose conversion factors”,1999 Health Physics Society.- M. Raghavayya e J. H. Jones “A wire screen – filter paper combination for the measurement of fractions of unattached radon daughters in uranium mines”, 1974 Health Physics
- Coordinamento delle Regioni e delle Province autonome di Trento e Bolzano “Linee guida per le misure di concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei”. Versione definitiva approvata il 6 febbraio 2003.