

REPORT IN FORMA DI FAQ PER LA VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE AL GAS RADON IN ARIA, AD USO DEGLI ESPERTI QUALIFICATI

PARTE I FAQ da n.1 a n.7 Notiziario dell'EQ 2.0 - ANPEQ n.1 (2015)
PARTE II FAQ da n.8 a n.15 Notiziario dell'EQ 2.0 - ANPEQ n.2 (2016)
Documento inviato per la pubblicazione a maggio 2015

Coordinatori:

Luisa Biazzì e Gian Marco Contessa

Autori:

L. Biazzì – Università Pavia/ANPEQ; E. Calenda - ANPEQ; F. Cardellini - ENEA; G.M. Contessa - ENEA/ANPEQ; R. Falcone - Sogin/ANPEQ; L. Frittelli - ANPEQ; E. Giroletti - Università Pavia/ANPEQ; G.L. Mignani - ANPEQ; S. Palmeri - ARTA Abruzzo; E. Ragno - CNR/ANPEQ; R. Remetti - Università di Roma “Sapienza”; L. Salvatori – FGM Ambiente/ ANPEQ.

SOMMARIO

Introduzione

Definizioni tecniche

FAQ:

1. Qual è la normativa di riferimento?
2. Esiste un elenco di aree in cui è consigliabile procedere a una misura della concentrazione di radon?
3. Quali sono gli ambienti di lavoro in cui è opportuna o addirittura necessaria una misura dei livelli di radon e una valutazione dell'esposizione?
4. Che cosa si deve fare in caso di superamento dei livelli di azione?
5. Quali qualifiche deve avere il personale che effettua le misurazioni e la valutazione dell'esposizione?
6. Quando e come deve essere effettuata una valutazione della dose ricevuta?
7. Quali sono i criteri secondo cui si imposta una campagna di monitoraggio?
8. Come si effettuano una misura di concentrazione di radon e una valutazione di esposizione al radon?
9. Qual è l'incertezza che deve essere associata alla misura?
10. Come deve essere strutturata e che cosa deve riportare una relazione tecnica?
11. Come si valuta la dose ricevuta dall'inalazione della progenie del radon?
12. In quali casi è necessario far partire la protezione sanitaria dei lavoratori esposti?
13. In quali casi è necessario far partire la informazione / formazione?
14. Quali tecniche di abbattimento della concentrazione del radon sono prevedibili?
15. Quali sono i requisiti che deve possedere un ambiente di lavoro?

Bibliografia

INTRODUZIONE

Disposizioni normative sul radon e azioni conseguenti

Le modifiche al D.Lgs. 17 marzo 1995 n.230 (nel seguito D.Lgs. 230/95), introdotte dal D.Lgs. del 26 maggio 2000 n.241 (nel seguito D.Lgs. 241/00), emanato come recepimento della direttiva 29/96/EURATOM, richiedono la valutazione all'esposizione alla radioattività naturale, in particolari ambienti di lavoro (interrati, miniere, terme, scuole, ecc).

La radioattività naturale può essere considerata la sorgente principale a cui l'uomo è normalmente esposto. Le radiazioni naturali sono da sempre presenti nell'ambiente terrestre, poiché il nostro pianeta è composto da elementi costituiti in parte da nuclei instabili.

Gli elementi radioattivi sono presenti ovunque: nelle rocce, nel terreno e nei materiali edili, nell'aria e nell'acqua che consumiamo. L'Italia è uno dei paesi in cui è più spiccata la variabilità della radioattività naturale a causa delle differenze nella composizione del sottosuolo.

La dose media annuale assorbita dall'uomo nei paesi occidentali a causa della radioattività naturale è più della metà del contributo totale della radioattività dovuta anche ad attività umane.

Dal sottosuolo vengono emessi in particolare due nuclidi radioattivi, emettitori alfa, ^{222}Rn e ^{220}Rn , isotopi dell'elemento chimico radon (gas nobile). Il ^{222}Rn appartiene alla catena di decadimento dell' ^{238}U , mentre il ^{220}Rn , (detto anche "toron" per ragioni eminentemente storiche), appartiene alla catena di decadimento del Torio (^{232}Th). Data la sua vita media molto breve (55 s) il toron può raggiungere gli ambienti di vita solo se generato nei primi millimetri dell'intonaco delle pareti interne di un edificio, e generalmente costituisce un problema di minor rilevanza rispetto al ^{222}Rn . Altri isotopi hanno vita media molto inferiore e non sono considerati un rischio per la salute umana. Convenzionalmente, quando non altrimenti specificato, il termine "radon" identifica proprio l'isotopo 222. Il radon filtra dal sottosuolo verso l'esterno e può accumularsi in ambienti chiusi. Il movimento del gas verso l'alto dipende da una componente diffusiva, proporzionale alla concentrazione di ^{226}Ra nel sottosuolo, e da una componente convettiva, dovuta alla differenza di pressione fra il sottosuolo e l'ambiente esterno. La risalita verso l'alto è fortemente influenzata da fattori peculiari del sito, quali la concentrazione di ^{238}U presente in profondità, la porosità e permeabilità del suolo, la quantità di acqua nel terreno e il grado di fratturazione, il tipo di contatto tra suolo ed edificio, le condizioni meteorologiche (temperatura, pressione, velocità dell'aria, ecc.) e, per i terreni compatti, il coefficiente di diffusione del suolo: basse concentrazioni di radio in un terreno molto permeabile possono determinare inquinamento da radon in misura superiore che elevate concentrazioni di radio in terreno poco permeabile.

Dal terreno, attraverso le fessurazioni delle fondamenta, il gas filtra negli edifici e risale nei locali sovrastanti. Inoltre anche alcuni tipi di materiali possono costituire ulteriori potenziali sorgenti di radon entro gli edifici, quali alcuni rivestimenti in pietra, marmo, piastrelle o cemento, secondo il loro contenuto di radio e delle loro caratteristiche di permeabilità (chiamate proprietà specifiche di emanazione). Soprattutto i tufi contengono un alto contenuto di ^{226}Ra ed essendo molto porosi sono una sorgente non trascurabile di radon e di toron entro gli edifici.

Ai fini dell'ingresso di radon negli edifici la tipologia costruttiva può avere una influenza determinante, ad esempio l'esistenza di un vespaio tra il terreno e la cantina o il piano terreno, la presenza di cavedi per il passaggio di linee elettriche e di tubazioni idriche, ecc.

Il trasporto del radon atmosferico dall'esterno ("radon outdoor" nel suolo, nell'acqua, nell'aria)

all'interno determina livelli di "radon indoor" molto maggiori in quanto la quantità d'aria disponibile per la diluizione in ambiente confinato è minore di quella disponibile all'esterno. In particolare il suolo e le acque sotterranee possono produrre grandi concentrazioni di radon in miniere, cave, stazioni termali, locali sotterranei. Negli edifici il trasporto del radon dipende anche da fattori ambientali quali l'umidità, la temperatura, la pressione, i quali, determinando correnti ascensionali (ad esempio attraverso il vano delle scale o degli ascensori), possono favorire la risalita del gas radon fino ai piani alti. La principale causa di afflusso di radon negli ambienti chiusi è costituita dal gradiente di pressione che si crea tra l'interno e l'esterno di un edificio: di norma l'interno è in leggera depressione rispetto all'esterno a causa principalmente di due fenomeni, l'effetto camino e l'effetto vento.

L'effetto camino dipende dalla differenza di temperatura tra interno ed esterno di un edificio confinato che crea una differenza di pressione responsabile della risalita del gas. Questo fenomeno generalmente aumenta in inverno. L'effetto vento è dovuto alla differenza di velocità dell'aria tra esterno ed interno della casa, che crea una ulteriore depressione interna, aumentando il richiamo di radon.

La concentrazione di radon in ambienti chiusi può anche aumentare per un effetto di risucchio forzato dell'aria, ad esempio per la presenza di impianti di aspirazione, come nei bagni o nelle cucine, o di una stufa. In ogni caso la pressione relativa negli ambienti determina sensibili variazioni della concentrazione del radon, giornaliera o stagionali: nelle prime ore del mattino si riscontrano valori più elevati di radon in quanto l'escursione termica tra l'interno e l'esterno degli edifici è superiore e così in inverno rispetto alle stagioni più calde.

Un altro possibile contributo proviene dall'acqua domestica nel caso di pozzi ad uso familiare e in presenza di acque provenienti da pozzi profondi in terreni ad alto contenuto di ^{226}Ra , perché le acque sotterranee durante il loro percorso si arricchiscono di radon e toron, facilmente solubili in acqua (in misura tanto superiore quanto più bassa è la temperatura della stessa).

Il radon, con i rispettivi prodotti di decadimento che si legano facilmente all'aerosol ambientale, è considerato il maggiore responsabile della dose interna rilasciata ad alcuni tessuti dell'organismo umano (dose equivalente all'epitelio bronchiale), in particolare ai polmoni e al sistema respiratorio in genere; dopo il fumo è ritenuto, infatti, il maggiore responsabile dei tumori indotti ai polmoni.

Da quanto esposto, e come risultato di molte indagini effettuate in molti paesi tra cui l'Italia, si ricava che la concentrazione del radon e dei suoi prodotti di decadimento può presentare una grande variabilità spaziale e temporale da edificio ad edificio, anche in caso di terreni geologicamente simili e di edifici di analoghe caratteristiche costruttive. Di conseguenza sia nella fase di indagine conoscitiva preliminare sia in caso di verifica a posteriori di interventi di bonifica o di ristrutturazione le peculiarità degli ambienti richiedono prioritariamente di individuare un'adeguata strategia di misura per ottenere misure corrette e rappresentative dei livelli di radon indoor presenti e valutazioni di dose appropriate.

Pur con le considerazioni esposte va detto tuttavia immediatamente, allo scopo di prevenire inutili quanto deleteri allarmismi, che in presenza di concentrazioni elevate di radon con rischio non trascurabile per gli individui esposti sono possibili interventi per l'abbassamento della concentrazione del radon: questi vanno valutati e pianificati secondo le situazioni e in funzione della tipologia dell'edificio e del grado di abbattimento richiesto. Spesso per concentrazioni non troppo elevate è sufficiente un aumento della ventilazione nei locali abitativi. Altre volte possono essere necessari interventi più complessi da valutare caso per caso a seconda che si tratti di edificio in costruzione o da risanare: nel primo caso può essere previsto preventivamente ad esempio un sistema di aspirazione dell'aria dal sottosuolo che con un tubo collettore convogli l'aria fuori dalla

casa in modo naturale o, qualora non basti, forzato, oppure un sistema di aerazione che ostacoli la depressione tra piano terra e cantina oppure la creazione di un vespaio di isolamento tra il piano inferiore e il suolo per favorire la ventilazione alla base dell'edificio e ridurre la filtrazione dei gas. In fase di bonifica può essere sufficiente creare una sovrappressione artificiale nella casa ad esempio immettendo aria con un ventilatore posto ad una finestra oppure sigillare le vie d'ingresso del gas chiudendo fessure e crepe o isolando pavimento e pareti, soprattutto nei punti di connessione, con materiali adatti o cementando il pavimento degli scantinati oppure, nei casi più gravi, aspirando l'aria dall'intercapedine sotto il pavimento al piano inferiore o, in mancanza, dal sottosuolo creando buche nel terreno sottostante la casa o stendendo tubi di drenaggio sotto il pavimento.

In tutti i casi si rimarca il fatto che la normativa attuale riguarda solo i luoghi di lavoro. Tuttavia, poiché le abitazioni nella maggior parte dei casi sono il luogo ove gli individui trascorrono la maggior parte del loro tempo, è auspicabile che alcuni tipi di controlli, per lo meno quelli più semplici e meno costosi, vengano estesi anche agli ambienti abitativi per lo meno nelle situazioni stimate potenzialmente gravi. In ogni caso si consideri che i controlli nelle abitazioni sono previsti dalla recente Direttiva 2013/59/EURATOM del Consiglio Europeo, del 5 dicembre 2013, che dovrà essere trasposta come legge nazionale entro il 6 febbraio 2018 dall'Italia e dagli altri Stati Membri UE.

Definizioni tecniche

Attività (art. 4,1° D.Lgs. 230): 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 ; unità di misura: becquerel, 1 Bq, un becquerel equivale ad una transizione per secondo: $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ ($1 \text{ pCi} = 0,037 \text{ Bq}$).

Concentrazione: attività specifica per unità di volume; unità di misura: Bq/m^3 ; $1 \text{ pCi/l} = 37 \text{ Bq/m}^3$.

Concentrazione di energia potenziale alfa in aria, PAEC (p.0.3 All.IV D.Lgs. 230): somma dell'energia potenziale alfa di tutti i prodotti di decadimento a breve tempo di dimezzamento del ^{222}Rn o del ^{220}Rn presenti nell'unità di volume di aria. L'unità di misura è il $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ o MeV/m^3 . Rappresenta l'energia rilasciata in uno specifico volume isolato di aria da una miscela qualsiasi di prodotti a vita breve di decadimento del radon o del toron attraverso il completo decadimento α di ciascuno degli atomi presenti.

Concentrazione equivalente all'equilibrio, EEC (p.0.3 All.IV D.Lgs. 230) (*di una miscela non in equilibrio dei prodotti di decadimento a breve tempo di dimezzamento del ^{222}Rn o del ^{220}Rn*): concentrazione in aria del ^{222}Rn o del ^{220}Rn in equilibrio radioattivo con i relativi prodotti di decadimento a breve tempo di dimezzamento che ha la stessa concentrazione di energia potenziale alfa della miscela non in equilibrio dei prodotti di decadimento del ^{222}Rn o del ^{220}Rn in esame. Rappresenta la concentrazione ipotetica di radon in aria che produrrebbe una PAEC pari a quella realmente esistente (con i figli che non sono in equilibrio con il progenitore). In letteratura si può trovare indicata come EER, EEC, EC(Rn), EEC(Rn), EEDC(Rn). Unità di misura: Bq/m^3 .

La EEC di radon e toron, in Bq/m^3 , espressa in funzione della concentrazione in aria C (Bq/m^3) dei rispettivi prodotti di decadimento a vita breve è:

$$\text{EEC}(^{222}\text{Rn}) = 0,106 \cdot C(^{218}\text{Po}) + 0,513 \cdot C(^{214}\text{Pb}) + 0,381 \cdot C(^{214}\text{Bi});$$

$$\text{EEC}(^{220}\text{Rn}) = 0,913 \cdot C(^{212}\text{Pb}) + 0,087 \cdot C(^{212}\text{Bi}).$$

Diametro aerodinamico: diametro di una particella a densità unitaria che abbia, in aria, la stessa

velocità della particella in esame; unità di misura: μm .

Dose assorbita (art. 4,1° D.Lgs. 230): energia assorbita per unità di massa e cioè il quoziente di dE diviso per dm, in cui dE è l'energia media ceduta dalle radiazioni ionizzanti alla materia in un elemento volumetrico e dm la massa di materia contenuta in tale elemento volumetrico; poiché gli organi umani non hanno un volume infinitesimale, in radioprotezione si usa la dose media assorbita in un tessuto o in organo. L'unità è il gray, $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.

Dose equivalente, H (art. 4,1° e p.0.1 all.IV D.Lgs. 230): dose assorbita media in un tessuto o organo T, ponderata in base al tipo e alla qualità della radiazione. La dose equivalente $H_{T,R}$ nel tessuto o nell'organo T dovuta alla radiazione R è data da: $H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R}$, dove $D_{T,R}$ è la dose assorbita media nel tessuto o nell'organo T, dovuta alla radiazione R; w_R è il fattore di ponderazione per la radiazione R, che dipende dal tipo e dalla qualità del campo di radiazioni esterno, oppure dal tipo e dalla qualità delle radiazioni emesse da un radionuclide depositato all'interno dell'organismo. Per le particelle beta, raggi gamma ed x w_R è unitario, per le particelle alfa vale 20. Unità di misura: sievert, $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$.

Dose efficace (p.0.2 all.IV D.Lgs. 230): somma delle dosi equivalenti ponderate nei tessuti ed organi del corpo causate da irradiazioni interne ed esterne ed è data dalla relazione:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

dove H_T è la dose equivalente nell'organo o tessuto T; w_T è il fattore di ponderazione per l'organo o il tessuto T; w_R è il fattore di ponderazione per la radiazione R; $D_{T,R}$ è la dose assorbita media, nel tessuto o nell'organo T, dovuta alla radiazione R. Per la regione bronchiale w_T vale 0,06 e per quella alveolare 0,06, per un totale per i polmoni pari a 0,12: l'allegato IV non fa separazione tra bronchi e alveolare, ma da il totale (0,12). Unità di misura: Sievert, $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$. Per la valutazione dell'esposizione dei lavoratori a partire dalla concentrazione di attività di radon si applica il fattore convenzionale di conversione $3 \cdot 10^{-9} \text{ Sv}$ di dose efficace per unità di esposizione espressa in $\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ (all.I-bis del D.Lgs. 230/95).

Energia potenziale alfa dei prodotti di decadimento del ^{222}Rn e del ^{220}Rn (p.0.3 all.IV D.Lgs. 230): l'energia totale alfa emessa durante il decadimento dei discendenti del ^{222}Rn fino al ^{210}Pb escluso e durante il decadimento dei discendenti del ^{220}Rn fino al ^{208}Pb stabile. L'unità di misura dell'energia potenziale alfa è il joule o il MeV (essendo $1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$). L'energia potenziale alfa di un atomo appartenente alla catena di decadimento del radon o del toron è l'energia totale alfa emessa durante il decadimento dell'atomo stesso e dei suoi figli fino al ^{210}Pb o ^{208}Pb , rispettivamente. Per esempio, per il ^{218}Po essa è 13,7 MeV (6,00+7,68).

Epitelio bronchiale: superficie ricoprente i dotti di adduzione di aria ai polmoni – lo spessore diminuisce con le generazioni bronchiali da circa 80 nm nella trachea fino a 15 nm nelle zone finali.

Esposizione (a energia potenziale alfa o attività): integrale nel tempo della concentrazione di PAEC (o attività) a cui un individuo (o un dosimetro) è esposto; se la PAEC è indipendente dal tempo, l'esposizione è il prodotto tra la sua durata e la PAEC stessa. Di solito è riferita ad una miscela in equilibrio. Unità di misura: per EEC è $\text{Bq} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ (o $\text{Bq} \cdot \text{h}/\text{m}^3$) e per PAEC è $\text{J} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ (o $\text{J} \cdot \text{h}/\text{m}^3$) o $\text{MeV} \cdot \text{h}/\text{m}^3$, mentre la misura tradizionale era il WLM.

Fattore di equilibrio, F: rispetto all'energia potenziale alfa rappresenta il rapporto tra la concentrazione equivalente all'equilibrio, EEC, e la concentrazione di radon gas presente in aria, C(Rn): $F = \text{EEC}(\text{Rn})/\text{C}(\text{Rn})$; è adimensionale. Valori tipici sono: negli ambienti ad uso domestico o tipo ufficio $F=0,5$; all'esterno F varia tra 0,2 e 0,8; nelle miniere (ambienti molto polverosi) $F=0,3$. Il fattore di equilibrio rappresenta anche il rapporto tra la PAEC presente in aria e quella che si avrebbe se il radon fosse in equilibrio con i figli.

Frazione libera (in aria), fp: frazione dei prodotti di decadimento a vita breve del radon che non sono legati alle particelle di aerosol presenti in aria. Viene riferito alla energia potenziale alfa della miscela e non alla concentrazione di ogni singolo radionuclide.

Prodotti di decadimento del radon: radionuclidi a vita breve prodotti come risultato del decadimento del ^{222}Rn ; essi sono: ^{218}Po (RaA), ^{214}Pb (RaB), ^{214}Bi (RaC) e il ^{214}Po (RaC').

nuclide	sinonimo	T $\frac{1}{2}$	λ [1/h]	atomi [n/Bq]	energia α [MeV/atomo]	PAE [MeV/atomo]
^{222}Rn		3,82 g	0,01	47600	5,5	
^{218}Po	RaA	3,05 min	13,6	260	6	13,68
^{214}Pb	RaB	26,8 min	1,55	2300	--	7,68
^{214}Bi	RaC	19,7 min	2,11	1700	--	7,68
^{214}Po	RaC'	164 μsec	1,52E+007	2,40E-004	7,68	7,68

Radon (All.I-bis del D.Lgs. 230): per radon e toron si intendono rispettivamente gli isotopi 222 e 220 del Rn.

Due grandezze molto utilizzate nel passato per la misura dell'esposizione sono:

Working Level, WL: la concentrazione di energia potenziale alfa in aria, PAEC, associata ai figli a vita breve del radon (fino al ^{214}Po) o toron (fino al ^{208}Pb) quando questi siano in equilibrio con una concentrazione in aria di 3700 Bq/m^3 (100 pCi/l) di radon o di 275 Bq/m^3 (7,43 pCi/l) di toron. Riferito al radon corrisponde quindi a qualsiasi combinazione dei suoi prodotti di decadimento in 1 l aria che dia una emissione di PAE pari a $1,3 \cdot 10^5 \text{ MeV}$ ($2,08 \cdot 10^{-5} \text{ J/m}^3$). Una EEC(^{222}Rn) di 3700 Bq/m^3 produce dunque 1 WL: la EEC (in Bq/m^3) può essere convertita in PAEC tramite il fattore di conversione $2,7 \cdot 10^{-4} \text{ WL/Bqm}^{-3}$.

Working Level Month, WLM: esposizione cumulativa equivalente a 1 WL per un mese lavorativo (170 ore), dunque $1 \text{ WLM} = 1 \text{ WL} \cdot 170 \text{ h} = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{h/m}^3 = 2, \cdot 10^{10} \text{ MeV} \cdot \text{h/m}^3$.

Altre definizioni:

Datore di lavoro (art.2 lettera b) del D.Lgs. 81/08): il soggetto titolare del rapporto di lavoro con il lavoratore o, comunque, il soggetto che, secondo il tipo e l'assetto dell'organizzazione nel cui ambito il lavoratore presta la propria attività, ha la responsabilità dell'organizzazione della stessa ovvero dell'unità produttiva in quanto esercita i poteri decisionali e di spesa. Nelle pubbliche amministrazioni di cui all'art.1 comma 2 del D.Lgs. 30 marzo 2001 n.165, per datore di lavoro si intende il dirigente al quale spettano i poteri di gestione, ovvero il funzionario non avente qualifica dirigenziale, nei soli casi in cui quest'ultimo sia preposto ad un ufficio avente autonomia gestionale individuato dall'organo vertice delle singole amministrazioni tenendo conto dell'ubicazione e dell'ambito funzionale degli uffici nei quali viene svolta l'attività, e dotato di autonomi poteri gestionali e di spesa. In caso di omessa individuazione o di individuazione non conforme ai criteri sopra indicati, il datore di lavoro coincide con l'organo di vertice medesimo.

Lavoratore (subordinato) (art. 60,1° del D.Lgs. 230): ogni persona che presti il proprio lavoro alle dipendenze di un datore di lavoro, esclusi gli addetti a servizi domestici e familiari. Sono equiparati i soci lavoratori di cooperative o di società, anche di fatto, e gli utenti dei servizi di orientamento o di formazione scolastica, universitaria e professionale avviati presso datori di lavoro per agevolare o

per perfezionare le loro scelte professionali. Sono altresì equiparati gli allievi degli istituti di istruzione e universitari, e i partecipanti ai corsi di formazione professionale, nonché coloro i quali, a qualsiasi titolo, prestino presso terzi la propria opera professionale.

Lavoratore (art. 2 lettera a) del D.Lgs. 81/08): persona che, indipendentemente dalla tipologia contrattuale, svolge un'attività lavorativa nell'ambito dell'organizzazione di un datore di lavoro pubblico o privato, con o senza retribuzione, anche al solo fine di apprendere un mestiere, un'arte o una professione, esclusi gli addetti ai servizi domestici e familiari. Al lavoratore così definito è equiparato: il socio lavoratore di cooperativa o di società, anche di fatto, che presta la sua attività per conto delle società e dell'ente stesso; l'associato in partecipazione di cui all'articolo 2549 e seguenti del Codice civile; il soggetto beneficiario delle iniziative di tirocini formativi e di orientamento di cui all'articolo 18 della Legge 24 giugno 1997, n. 196, e di cui a specifiche disposizioni delle Leggi regionali promosse al fine di realizzare momenti di alternanza tra studio e lavoro o di agevolare le scelte professionali mediante la conoscenza diretta del mondo del lavoro; l'allievo degli istituti di istruzione ed universitari e il partecipante ai corsi di formazione professionale nei quali si faccia uso di laboratori, attrezzature di lavoro in genere, agenti chimici, fisici e biologici, ivi comprese le apparecchiature fornite di videoterminali limitatamente ai periodi in cui l'allievo sia effettivamente applicato alla strumentazioni o ai laboratori in questione; i volontari del Corpo nazionale dei Vigili del Fuoco e della Protezione Civile; il lavoratore di cui al Decreto Legislativo 1° dicembre 1997, n. 468 e successive modificazioni.

Livello di azione (All.I-bis D.Lgs. 230): Livello 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. Per i luoghi di lavoro di cui all'art.10-bis,1° lettere a) e b), il livello di azione è fissato in termini di 500 Bq/m^3 di concentrazione di attività di radon media in un anno solare... Per le terme il livello di azione è riferito alla dose efficace, 1 mSv per anno solare.

Luogo di lavoro (art.62 del D.Lgs. 81/08): i luoghi destinati a ospitare posti di lavoro, ubicati all'interno dell'azienda o dell'unità produttiva, nonché ogni altro luogo di pertinenza dell'azienda o dell'unità produttiva accessibile al lavoratore nell'ambito del proprio lavoro. I requisiti dei luoghi di lavoro sono indicati dall'All. IV al decreto. Nel caso di locali sotterranei o semisotterranei, l'art.65 stabilisce che è vietato destinare al lavoro locali chiusi sotterranei o semisotterranei. In deroga a tale disposizioni possono essere destinati al lavoro locali chiusi sotterranei o semisotterranei, quando ricorrano particolari esigenze tecniche. In tali casi il datore di lavoro provvede ad assicurare idonee condizioni di aerazione, di illuminazione e di microclima. L'organo di vigilanza può consentire l'uso dei locali chiusi sotterranei o semisotterranei anche per altre lavorazioni per le quali non ricorrono le esigenze tecniche, quando dette lavorazioni non diano luogo ad emissioni di agenti nocivi, sempre che siano rispettate le norme del D.Lgs. 81/08 e si sia provveduto ad assicurare le idonee condizioni di aerazione, di illuminazione e di microclima.

Persona del pubblico (art.3,3°,c del D.Lgs. 230): individui della popolazione, esclusi i lavoratori, gli apprendisti e gli studenti esposti in ragione della loro attività e gli individui durante l'esposizione di cui all'art.2,5°, lettere a) e b) del D.Lgs. 230.

Pratica (art.4,2° D.Lgs. 230): attività umana che è suscettibile di aumentare l'esposizione degli individui alle radiazioni provenienti da una sorgente artificiale, o da una sorgente naturale di radiazioni, nel caso in cui radionuclidi naturali siano trattati per le loro proprietà radioattive, fissili o fertili, o da quelle sorgenti naturali di radiazioni che divengono soggette a disposizioni del presente decreto ai sensi del capo III-bis. Sono escluse le esposizioni dovute ad interventi di emergenza;

Seminterrato (Tit. III Regolamento locale di igiene tipo, Regione Lombardia, 1989): locale che per

parte della sua altezza si trova sotto il piano del suolo circostante il fabbricato (marciapiede).

Sottterraneo (Linee guida per le misure di concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei): locale o ambiente con almeno tre pareti interamente sotto il piano di campagna, indipendentemente dal fatto che queste siano a diretto contatto con il terreno circostante o meno.

Sia i locali seminterrati che sotterranei non possono essere destinati ad abitazione. Le caratteristiche d'uso dei locali seminterrati e sotterranei, destinati ad usi che comportino permanenza di persone quali servizi igienici, magazzini di vendita, uffici, mense, esercizi pubblici, ambulatori, laboratori artigianali (fatte salve le particolari normative vigenti per le specifiche destinazioni) devono rispettare i requisiti indicati dal regolamento stesso e l'uso a scopo lavorativo deve essere autorizzato specificatamente in materia di igiene pubblica, ambientale e tutela della salute nei luoghi di lavoro.

FAQ:

1. Qual è la normativa di riferimento?

La protezione dall'esposizione dei lavoratori e della popolazione alle radiazioni ionizzanti è regolamentata dal **D.Lgs. 230/95** e, per quanto riguarda le modifiche successive rilevanti ai fini del radon, dal D.lgs.241/00, pubblicato in attuazione della Direttiva europea 96/29/EURATOM, che ha apportato alcune modifiche ed integrazioni al D.Lgs. 230/95.

In particolare al capo III-bis e all'Allegato I bis sono regolamentate le attività lavorative che comportano una significativa esposizione dei lavoratori o delle persone del pubblico per la presenza di sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti tra cui appunto il radon, con esclusione delle abitazioni civili. All'articolo 10-septies è prevista l'istituzione di una "Sezione speciale per le esposizioni a sorgenti naturali di radiazioni" della "Commissione tecnica per la sicurezza nucleare e la protezione sanitaria" (ex art. 9), alla quale sono stati assegnati diversi compiti tra i quali l'elaborazione di linee guida sulle metodologie di misura e valutazione dell'esposizione di radon in aria. Di fatto la Commissione non è stata mai istituita e anzi definitivamente soppressa con l'abrogazione dell'articolo 9.

Il 30 aprile 2008 è stato pubblicato il **D.Lgs. 81/08 del 9 aprile 2008** "Testo unico in materia di salute e sicurezza sul lavoro", che nel Titolo VIII sugli Agenti Fisici all'articolo 180 comma 3 rimanda al D. Lgs. 230/95 per la protezione dei lavoratori dalle radiazioni ionizzanti: tutte le procedure del D. Lgs. 230/95 devono essere quindi armonizzate e coordinate con le disposizioni generali del D.Lgs. 81/08.

Il D. Lgs. 230/95 è attualmente in fase di revisione, in quanto il 7 febbraio 2014 è entrata in vigore la nuova Direttiva europea di Radioprotezione, la Direttiva 2013/59/EURATOM (approvata il 5 Dicembre 2013 dal Consiglio dell'Unione Europea e pubblicata il 17 Gennaio 2014 nella Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea), e gli Stati Membri hanno tempo fino al 6 febbraio 2018 per il recepimento nelle legislazioni nazionali.

Nel 2002 è stato predisposto in Italia il Piano Nazionale Radon per la riduzione del rischio radon, e diverse regioni italiane hanno emesso provvedimenti per la prevenzione di questo rischio (a tal proposito consultare il sito ISS: <http://www.iss.it/radon/index.php?lang=1&id=183&tipo=17>): in particolare nella regione Lazio è in vigore dal 31 marzo 2005 la Legge Regionale n. 14 "Prevenzione e salvaguardia dal rischio gas radon", che prevede un Piano regionale di prevenzione e riduzione dei rischi connessi all'esposizione al radon e l'individuazione delle zone e dei luoghi di lavoro ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività del gas.

In attesa delle linee guida previste dal D.Lgs. 241/00, nel febbraio 2003 la Conferenza dei Presidenti delle Regioni e delle Province autonome di Trento e Bolzano ha approvato le “Linee Guida per le misure della concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei”, che a tutt’oggi costituiscono un riferimento per gli esercenti, gli organismi di misura e gli organi di vigilanza

La Regione Lombardia ha emesso nel 2011 le Linee Guida per la prevenzione delle esposizioni al gas radon in ambienti indoor, con indicazioni tecniche su modalità costruttive e di risanamento, che sono state approvate con DDG. n. 12678 del 21/12/2011 e costituiscono direttiva ai sensi dell’art. 124 della legge regionale n. 33/2009; la Regione Lombardia – D.G. Sanità ha inoltre invitato le Amministrazioni Comunali e le ASL ad inserire norme tecniche specifiche per la prevenzione dell’esposizione al radon nei Regolamenti Edilizi Comunali (nota Circolare n. 37800 del 27/12/2011).

2. Esiste un elenco di aree in cui è consigliabile procedere a una misura della concentrazione di radon?

In attesa del recepimento della Direttiva Europea 2013/59/EURATOM (che all’art. 103, par. 3, prevede l’individuazione delle zone in cui si stima che la concentrazione media annua di radon superi il pertinente livello di riferimento nazionale in un numero significativo di edifici), la normativa attualmente vigente (D.Lgs. 241/2000, art. 10 sexies) già prescrive che le Regioni individuino “*zone o luoghi di lavoro con caratteristiche determinate, ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon*”, in cui le misurazioni sono obbligatorie a partire dai locali seminterrati o al piano terreno. Si tratta, in realtà, di una disposizione largamente inapplicata, anche per la mancanza di linee guida che avrebbero dovuto essere emanate dalla “Sezione speciale della Commissione tecnica (ex art. 9) per le esposizioni a sorgenti naturali di radiazioni” di cui all’articolo 10-septies, come già detto mai istituita e definitivamente soppressa con l’abrogazione dell’articolo 9. Informazioni preziose si trovano nel Piano Nazionale Radon e sono deducibili dalla campagna nazionale condotta tra il 1989 ed il 1998 con il coordinamento dell’Istituto Superiore di Sanità e dell’ENEA/DISP (ora ISPRA) e la collaborazione degli Assessorati alla Sanità di tutte le Regioni italiane, e da quelle regionali (per una panoramica vedere il sito ISS: <http://www.iss.it/radon/index.php?lang=1&id=178&tipo=43>). In diverse Regioni italiane sono state inoltre condotte campagne di misura dagli enti istituzionalmente preposti; un elenco dettagliato è riportato al seguente link: <http://www.iss.it/radon/index.php?lang=1&id=234&tipo=15>.

Per esempio, nella *Regione Lazio* ISPRA e ARPA Lazio hanno svolto una serie di campagne di monitoraggio nel periodo 2003-2011, finalizzate alla classificazione delle zone ad elevata probabilità di alte concentrazioni di radon.

(<http://www.arpalazio.gov.it/ambiente/radioattivita/pubblicazioni.htm#>).

La *Regione Veneto*, con DGRV n.72/2002, ha individuato un elenco di Comuni a rischio radon sulla base dei risultati di un’indagine con misure in circa 1200 abitazioni, condotta nel periodo 1996-2000 da ARPAV.

La *Regione Toscana* ha individuato 13 Comuni ad alta probabilità di elevate concentrazioni di radon ai sensi dell’art 10 sexies del D.Lgs. 241/2000 (<http://www.arpato.toscana.it/temi-ambientali/radioattivita/radon/il-radon-in-toscana/aree-a-rischio-in-toscana>), utilizzando i risultati di una campagna di misure effettuate nel 2009-2010 in circa 1300 edifici distribuiti in tutti i 287 comuni in cui è suddiviso il territorio regionale.

In *Lombardia* sono state realizzate due campagne di misura di concentrazione media annua di radon

indoor (http://ita.arpalombardia.it/ita/aree_tematiche/agentifisici/index_radon.asp#01).

Occorre aggiungere che la disponibilità di informazioni sul cosiddetto “potenziale radon” di una certa area geografica, desumibili dai risultati di campagne di misura, è carente in molte zone d’Italia, soprattutto al sud ed in alcune regioni del centro. In questi casi è possibile affidarsi ad indicatori di natura geologica, sia in relazione alla tipologia ed all’origine delle rocce e dei suoli (la cui natura vulcanica, per esempio, è un chiaro indice della presenza di radon) che alle caratteristiche di permeabilità degli stessi (rocce molto fratturate o suoli di natura sedimentaria spesso presentano elevati livelli di permeabilità, facilitando la migrazione del radon verso la superficie e quindi l’ingresso del gas negli edifici).

3. Quali sono gli ambienti di lavoro in cui è opportuna o addirittura necessaria una misura dei livelli di radon e una valutazione dell’esposizione?

I luoghi di lavoro a cui fa riferimento il D.Lgs. 241/00 sulla protezione dalle radiazioni ionizzanti sono quelli in cui vengono svolte attività che implicano l’esposizione dei lavoratori e della popolazione a sorgenti naturali, quali possono essere tunnel, sottovie, catacombe, grotte e in generale luoghi di lavoro sotterranei (all’art. 10-bis comma 1 a)) e stabilimenti termali (all’art. 10-bis comma 1 e)). Nell’Allegato I bis del decreto è riportato l’elenco delle attività lavorative oggetto dell’art. 10-bis comma 1 c) e d).

Per una definizione precisa di luogo di lavoro e di ambiente sotterraneo, e in particolare per l’individuazione degli ambienti sotterranei in cui effettuare misure, si può far riferimento alle “Linee guida per le misure di concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei”, a cura del Coordinamento delle Regioni e delle Province autonome di Trento e Bolzano. In particolare il documento recita “Nell’ambito e per i fini delle presenti linee guida, indipendentemente dalle definizioni di sotterraneo che sono contenute nei regolamenti edilizi comunali, si ritiene di adottare per i locali o ambienti sotterranei la seguente definizione:

- locale o ambiente con almeno tre pareti interamente sotto il piano di campagna, indipendentemente dal fatto che queste siano a diretto contatto con il terreno circostante o meno.

Tale definizione include fra i locali sotterranei nei quali effettuare le misure anche tutti quelli che hanno una apertura verso l’esterno (per esempio i locali pubblici che hanno di norma un ingresso sulla strada) e i locali che sono circondati da una intercapedine aerata”.

Le stesse linee guida indicano anche i criteri per l’individuazione degli ambienti di lavoro nei quali effettuare le misure: *“Per decidere in quali locali o ambienti sotterranei di uno stesso edificio effettuare le misure di concentrazione di radon, bisogna tenere conto del fatto che le misure devono essere pianificate in modo da essere rappresentative dell’esposizione del personale. Perciò in linea di massima le misure non dovranno essere condotte in locali che non siano occupati con continuità dai lavoratori, come per esempio i locali di servizio, gli spogliatoi e gli ambienti di passaggio come i corridoi. Altri ambienti come i magazzini, i bunker delle banche e locali di utilizzo simile, nei quali il personale entra senza occupare una vera e propria postazione di lavoro, ma che rimangono chiusi a lungo, non dovranno essere sottoposti a misura a meno che il personale nel suo complesso non vi trascorra una frazione di tempo significativa, che viene indicativamente fissata in 10 ore al mese”.*

4. Che cosa si deve fare in caso di superamento dei livelli di azione?

Ai fini del confronto dei risultati delle valutazioni con i livelli di azione si fa riferimento agli articoli

10-quater e 10-quinquies del D. Lgs. 241/00, applicati alle attività lavorative ex art. 10-bis.

4.0 Nel caso in cui la concentrazione media annuale di radon gas in aria sia inferiore all'80% del livello di azione (400 Bq/m^3), archiviare i dati con una relazione a testimonianza del lavoro svolto. Da ripetere se nei locali cambiano alcune caratteristiche rilevanti per l'esposizione al radon (occupazione, ventilazione, destinazione d'uso, ecc.). L'esercente non ha altri obblighi.

4.1 Nel caso in cui le grandezze misurate e valutate, relativamente alla specifica attività lavorativa, non superino il livello di azione (500 Bq/m^3) ma siano superiori all'80% dello stesso (400 Bq/m^3), l'esercente assicura nuove misurazioni nel corso dell'anno successivo.

Per le misurazioni descritte nei punti 4.0 e 4.1 l'esercente si avvale di organismi idoneamente attrezzati.

4.2 In caso di superamento dei livelli di azione di cui all'art. 10-quinquies l'esercente invia una comunicazione e una relazione alle Agenzie regionali, al SSN e alla Direzione provinciale del lavoro, e pone in essere le azioni di rimedio avvalendosi dell'Esperto Qualificato. Nella relazione devono essere riportati i risultati delle misurazioni degli organismi riconosciuti e delle valutazioni e prescrizioni dell'Esperto Qualificato, a seconda delle attività lavorative.

4.3 Nel caso in cui dopo tre anni dal rilascio della relazione di cui all'articolo 10-ter, comma 4, nonostante l'adozione di azioni di rimedio, le grandezze misurate risultino ancora superiori al livello prescritto, l'esercente adotta i provvedimenti di protezione sanitaria dei lavoratori previsti dal Capo VIII (e dal Capo IX nel caso delle attività lavorative ex art. 10-bis e)).

4.4 Se però, nel caso delle attività lavorative ex art. 10-bis lettere a) e b), le valutazioni dell'Esperto Qualificato dimostrano che nessun lavoratore è esposto a una dose superiore a 3 mSv/anno , allora l'esercente non è tenuto ad apportare azioni di rimedio, fatta eccezione per gli esercenti di asili-nido, di scuola materna o di scuola dell'obbligo.

5. Quali qualifiche deve avere il personale che effettua le misurazioni e la valutazione dell'esposizione?

In base alla legislazione vigente, l'esercente si avvale di organismi riconosciuti idonei ai sensi dell'art. 107 comma 3 o, nelle more dei riconoscimenti, di organismi idoneamente attrezzati per le misurazioni dei valori di concentrazione di attività di radon nei luoghi di lavoro in cui si svolgono le attività lavorative di cui all'articolo 10-bis comma 1 lettere a) e b) del D. Lgs. 241/2000. L'esercente si avvale dell'Esperto Qualificato per gli adempimenti relativi alle altre attività lavorative nel succitato articolo e in ogni caso per le valutazioni di esposizione dei lavoratori e la messa in opera delle azioni di rimedio idonee a ridurre le grandezze misurate al di sotto dei livelli di azione previsti dalla legge.

Ad oggi non ci sono in Italia organismi riconosciuti idonei per le misurazioni, quindi, per assicurarsi che un "organismo idoneamente attrezzato" possieda le adeguate competenze, si può fare riferimento ai requisiti raccomandati dalle "Linee guida per le misure di concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei".

Comunque l'ANPEQ Lazio e l'ANPEQ Lombardia raccomandano che nel caso che rilievi e misure siano state effettuate da altro ente, laboratorio o professionista, la valutazione da parte dell'EQ non dovrebbe prescindere dalla verifica delle condizioni rilevamento e misurazione, nonché sulla affidabilità e qualità delle misure effettuate in laboratorio. Infatti da un punto di vista etico professionale è dovere del professionista verificare la correttezza dei dati su cui si basa la valutazione o, diversamente, dichiarare esplicitamente che la validità della valutazione si basa sulla attendibilità di dati prodotti da altri.

6. Quando e come deve essere effettuata una valutazione della dose ricevuta?

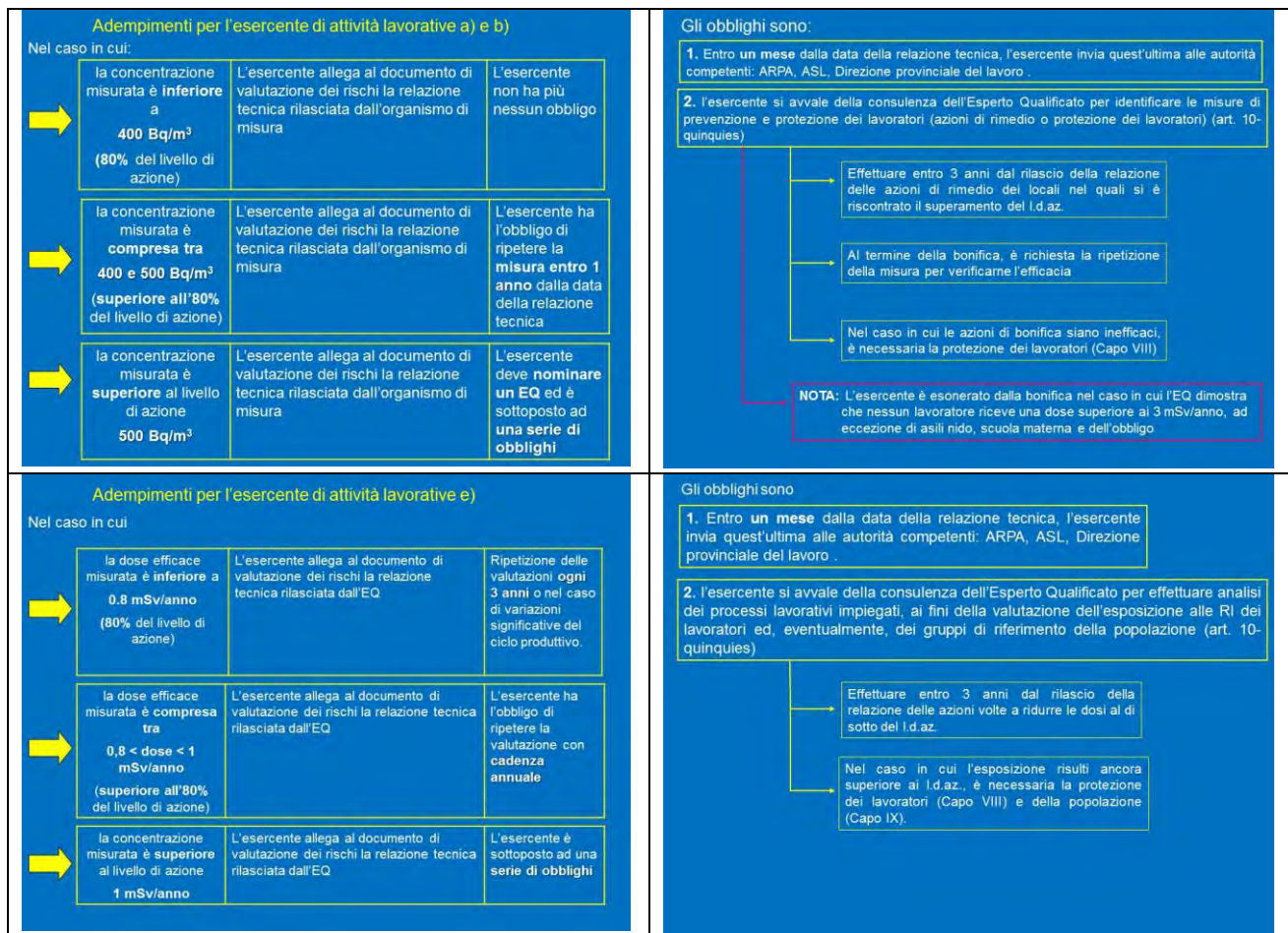
Nel caso di attività che comportano esposizione di lavoratori a radon indoor indicate nelle lett. a) e b) dell'art. 10-bis, se il livello di concentrazione ambientale medio annuale di radon è superiore al livello di azione di **500 Bq/m³**, l'esercente dell'attività deve progettare interventi migliorativi per mantenersi al di sotto del valore di azione, avvalendosi dell'Esperto Qualificato, a meno che non dimostri che la dose efficace conferita al lavoratore è inferiore a **3 mSv/anno**. Se nonostante le azioni di rimedio si riscontri ancora una violazione del livello prescritto, l'esercente adotta i provvedimenti del capo VIII e le dosi ricevute devono essere registrate separatamente da quelle dovute ad altri tipi di sorgenti di radiazioni ionizzanti.

Nel caso di attività che espongono i lavoratori e le persone del pubblico a sorgenti naturali specificate nella lettera e) dell'art. 10-bis, il livello di azione è riferito alla dose efficace ed è pari a **1 mSv/anno** per i lavoratori e a **0,3 mSv/anno** per la popolazione, per cui la valutazione del rischio, obbligatoria entro ventiquattro mesi dall'inizio delle attività, deve essere effettuata sin dall'inizio con il supporto dell'Esperto Qualificato.

Per valutare il rischio connesso all'esposizione al radon è necessario conoscere i tempi di permanenza all'interno degli ambienti: moltiplicando la concentrazione di radon per il tempo trascorso nell'ambiente in esame dalle varie categorie di lavoratori o popolazione è possibile risalire, con l'utilizzo di opportuni fattori correttivi, alla dose efficace (Sv), ovvero alla grandezza utilizzabile per quantificare il rischio di danni alla salute provocati dalle radiazioni ionizzanti. Il fattore di conversione per calcolare la dose efficace ricevuta a partire dall'esposizione a una data concentrazione di radon è pari a **3·10⁻⁹ Sv** per unità di esposizione in Bq·h·m⁻³: questo comporta per esempio che un lavoratore esposto per 8 ore al giorno (2000 ore/anno) a una concentrazione di radon pari al valore di azione di 500 Bq/m³ riceve una dose annua di 3 mSv.

Parimenti l'esposizione di un'ora a una concentrazione di attività unitaria (1 Bq/m⁻³) comporta una dose efficace pari a 3·10⁻⁶ mSv.

Indispensabile però per una corretta valutazione della dose da radon è la stima del **fattore di equilibrio**: il fattore di conversione 3·10⁻⁹ Sv è infatti valido per un fattore di equilibrio $F = 0,4$ (la valutazione di dose è determinata da: concentrazione di attività di radon · ore di esposizione · fattore di conversione). Si ricorda che il fattore di equilibrio è il rapporto tra la concentrazione equivalente all'equilibrio e l'effettiva concentrazione di attività di radon nell'atmosfera in esame (vedere definizioni). Appare evidente che il fattore di equilibrio sarà tanto più prossimo all'unità quanto più l'aria sarà povera di ricambi, perché in questo modo, non verificandosi processi di rimozione, il radon avrà la possibilità di andare in equilibrio con i suoi prodotti di decadimento: i meccanismi che alterano l'equilibrio sono infatti la ventilazione e la deposizione sulle superfici. Il fattore di equilibrio ha notevoli variazioni comprese tra 0,2 – 0,8 all'esterno e 0,4 - 0,8 negli ambienti confinati. Nel caso in cui si stia valutando l'esposizione al radon in luoghi chiusi con pochi ricambi d'aria (aria "vecchia") il fattore di equilibrio 0,4 darà una sottostima dei reali termini di rischio. Quindi per una valutazione di rischio corretta non è sufficiente effettuare la misura della concentrazione di attività di radon, ma è necessario ricavare il fattore di equilibrio: qualora si stimasse un fattore di equilibrio $F' \neq 0,4$ bisognerebbe moltiplicare il coefficiente di conversione per ($F'/0,4$). In attesa di una pubblicazione specifica sull'argomento dell'International Commission on Radiological Protection (ICRP), in letteratura si possono trovare diverse fonti che ne parlano a cura per esempio di UNSCEAR e NCRP.



7. Quali sono i criteri secondo cui si imposta una campagna di monitoraggio?

Nell'impostazione di una campagna di monitoraggio del radon in un ambiente di lavoro bisogna prima di tutto tener presente che, come già detto, la concentrazione del radon e dei suoi prodotti di decadimento può presentare una grande variabilità spaziale e temporale anche all'interno dello stesso edificio. L'ubicazione dei locali sotto indagine è sicuramente il parametro principale da considerare (i locali a contatto diretto con il suolo sono quelli più a rischio di alte concentrazioni del gas), ma anche fattori ambientali quali l'umidità, la temperatura, la pressione, il grado di ventilazione oppure la presenza di crepe o fessurazioni possono determinare forti variazioni di concentrazione e portare il radon ad accumularsi principalmente in determinati locali. Inoltre anche l'utilizzo di determinati materiali da costruzione o per i rivestimenti interni (lave, tufi, pozzolane, alcuni graniti) può aumentare la concentrazione di radon indoor, anche negli ambienti ai piani superiori degli edifici. A queste variazioni locali vanno aggiunte le variazioni diurne e stagionali. Quando possibile, sarebbe quindi utile effettuare inizialmente uno screening dei locali da ispezionare per una durata di qualche giorno con strumentazione portatile attiva (vedi paragrafo successivo), in modo da conoscere la variabilità della concentrazione di radon e ottenere una prima mappatura indicativa, fondamentale per scegliere i locali in cui procedere a misure più accurate. In linea generale lo screening iniziale dovrebbe confermare, come già detto, che i locali sotterranei sono a maggior rischio rispetto a quelli dei piani alti, ma il monitoraggio deve essere pianificato in base al fattore d'occupazione di ogni locale, ossia tenendo conto dell'esposizione del personale eventualmente presente.

A tal fine, le misure con strumentazione attiva permettono anche di programmare un

avvicendamento dei lavoratori in caso di verificato superamento dei limiti in determinati ambienti. A valle dello screening iniziale si effettuano le misure con strumentazione passiva per i periodi previsti dalla legge (nell'arco di un anno), sistemando un numero di dosimetri adeguati ai risultati della survey precedente in ogni locale fisicamente separato, secondo le indicazioni delle "Linee guida per le misure di concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei" (dosimetri ad una altezza di 1-3 metri, lontani da fonti di calore e ricambio d'aria, collocati in modo da essere rappresentativi dell'esposizione del personale).

La durata del periodo di esposizione del singolo dosimetro passivo (all'interno dell'arco del tempo di misura previsto dalla legge) può essere valutato in base alla survey iniziale, in modo che, a seconda dei valori di concentrazioni misurati inizialmente, si eviti che i dosimetri vadano in saturazione, altrimenti ci si può basare sulle caratteristiche tecniche fornite dalla casa produttrice.

Se più dosimetri sono situati nello stesso locale, la lettura media fra tutti è il valore che deve essere preso come rappresentativo della concentrazione di radon in quell'ambiente (secondo il principio di ottimizzazione della radioprotezione, che prevede un'analisi costo/beneficio delle azioni da intraprendere).

Al termine del periodo di campionamento i dosimetri vengono restituiti al laboratorio per essere analizzati.

I risultati del monitoraggio possono essere utilizzati anche ai fini della mappatura delle vie di ingresso, in modo da predisporre alcune delle azioni di bonifica (vedi sezione specifica).

PARTE II FAQ da n.8 a n.15 NOTIZIARIO ANPEQ n.2 (2016)

8. Come si effettuano una misura di concentrazione di radon e una valutazione di esposizione al radon?

Nel procedere ad una misura di concentrazione o di esposizione al radon bisogna prima di tutto tenere presente che la concentrazione del radon, e quindi anche della sua progenie, varia sia nel tempo sia nello spazio: a causa delle variazioni di pressione atmosferica e della ventilazione degli ambienti la concentrazione di radon varia sia su scala giornaliera che stagionale (generalmente più alta di notte che di giorno e in inverno piuttosto che in estate), così come varia in differenti punti dello stesso edificio a seconda della distanza dalla sorgente (pareti e suolo) e della ventilazione dei locali.

Tenuto conto degli scopi (che possono essere per esempio un semplice "sniffing" oppure una più complessa valutazione dell'esposizione) e delle diverse possibilità di esecuzione del monitoraggio, è opportuno distinguere e scegliere tra le seguenti tipologie di misura, che si differenziano tra di loro principalmente per la durata del periodo di osservazione e per le informazioni che si possono trarre dai dati misurati.

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

- istantaneo: il campionamento è effettuato con un unico prelievo di durata inferiore ad un'ora. Questo tipo di campionamento permette di eseguire una misurazione estremamente definita nel tempo ed è utile, per esempio, al fine di caratterizzare puntualmente vie di accesso o di reflusso dell'aria;
- continuo: il campionamento è effettuato mediante una serie di prelievi contigui tra loro. Le misurazioni eseguite permettono di rilevare le variazioni temporali delle grandezze in

osservazione;

- ad integrazione: il campionamento è effettuato senza soluzione di continuità temporale per periodi compresi, generalmente, tra qualche giorno e diversi mesi, fino ad un anno. La misurazione fornisce il valore dell'esposizione al radon e quindi della concentrazione media nel periodo monitorato.

Nel caso in cui si effettui una misura di breve durata è bene considerare che circa un terzo dei conteggi sono dovuti al decadimento del ^{214}Po , che avviene successivamente a quelli del ^{214}Pb e ^{214}Bi : per una corretta valutazione bisogna dunque attendere che sia decaduto tutto prima di procedere ad un'altra misura altrove, per cui sarebbe corretto ad esempio lasciare il rivelatore nel locale per circa una giornata.

A seconda della tipologia di monitoraggio varia anche il metodo di campionamento che può essere attivo, ossia campionamento forzato di aria attraverso un mezzo filtrante mediante pompa di aspirazione (e quindi alimentazione elettrica), oppure passivo, mediante diffusione naturale attraverso un mezzo filtrante.

Nella tabella che segue sono riportati i principali strumenti di misura del radon in aria in relazione al tipo di campionamento scelto.

Tipologia di monitoraggio	Tipologia di campionamento	Sistema di misurazione	Informazione	Scopo
istantaneo / continuo	attiva	cella a scintillazione / rivelatore a stato solido	Conteggio impulsi	sniffing o caratterizzazione della sorgente
	attiva / passiva	camera a ionizzazione	Conteggio impulsi, corrente, ampiezza impulsi	
a integrazione	passiva	rivelatore a carbone attivo	Conteggio impulsi	
		rivelatore a elettretti	Voltaggio	
		rivelatore a tracce nucleari	Numero tracce	

• Strumenti per la misurazione istantanea ed in continuo

I rivelatori di tipo attivo più diffusi sono la cella a scintillazione e la camera a ionizzazione, che possono eseguire sia misure istantanee sia in continuo, per identificare e caratterizzare una sorgente o determinare una concentrazione media di radon su tempi mediamente lunghi (dell'ordine delle settimane), e sono caratterizzate ambedue da una risposta veloce ed una alta efficienza.

Le **celle a scintillazione** (o celle di Lucas) sono dispositivi di misurazione costituiti da camere di volume compreso tra 100 e 1500 cm³ circa, con pareti interne rivestite da uno spessore di 20 mg cm⁻² di ZnS(Ag), scintillatore solido particolarmente sensibile alle radiazioni alfa. Il principio di funzionamento consiste nel conteggio dei fotoni che provengono dall'interazione delle particelle alfa del radon e progenie con lo strato di ZnS(Ag). La cella, una volta riempita con il campione d'aria contenente radon, viene accoppiata con un fotomoltiplicatore per il conteggio degli impulsi luminosi provenienti dai fosfori.

Nella **camera a ionizzazione** invece la corrente dovuta agli ioni prodotti dalla ionizzazione dell'aria introdotta è proporzionale alla concentrazione di radon. In entrambi i casi la diffusione del radon avviene attraverso una membrana permeabile (sia per pompaggio sia per diffusione passiva) che impedisce l'ingresso nel volume sensibile ai prodotti di decadimento del radon. Un altro rivelatore molto usato soprattutto in campo ambientale è quello a raccolta elettrostatica, che però risente dell'umidità dell'aria e quindi richiede un dispositivo deumidificante.

Nel **metodo dei due filtri** l'aria è campionata in modo attivo attraverso due filtri in serie separati da una camera di decadimento. Nel passaggio attraverso il primo filtro vengono rimossi tutti i prodotti di decadimento associati ad aerosol del volume campionato in modo che nella camera di decadimento entri solo il radon. Durante il tempo di transito all'interno della camera, dato dal rapporto tra il volume della camera e la portata di campionamento, una frazione costante di ^{222}Rn decade nei suoi prodotti di decadimento che sono raccolti sul secondo filtro, dove sono misurati da un opportuno sistema di misurazione dell'attività alfa accoppiato al secondo filtro. In particolare viene misurata l'attività del ^{218}Po .

- **Strumenti passivi ad integrazione**

Per effettuare invece misure integrate su scale temporali lunghe (anche un anno), finalizzate alla valutazione dell'esposizione, si usano tecniche di misura passive quali i dosimetri a tracce, a carbone attivo e a elettrete. In tutti i casi il campionamento si basa sulla diffusione naturale del radon nel volume sensibile del rivelatore (tecnica passiva), alloggiato all'interno di un dispositivo di campionamento (camera di diffusione).

Nel **dosimetro a tracce nucleari** (CR39, LR-115) il rivelatore è un polimero su cui le particelle α producono dei danni, appunto le tracce nucleari, che vengono poi amplificate mediante sviluppo chimico e contate con dispositivi manuali o elettronici (accoppiamento telecamera e microscopio): il numero di tracce è proporzionale al numero di particelle α che hanno colpito la superficie del materiale durante l'esposizione.

Nel **dosimetro a carbone attivo**, molto usato per archi temporali inferiori ad una settimana, il radon è parzialmente adsorbito sulla superficie del carbone e vi rimane attaccato fino a che non subisca un riscaldamento: è quindi possibile determinare il livello di concentrazione presente nell'ambiente in base alla quantità di gas adsorbito, mediante lettura in uno spettrometro gamma o in un liquido scintillante. Non è indicato per ambienti umidi.

Il **dosimetro a elettrete** invece è una camera a ionizzazione in cui il rivelatore è un disco di materiale dielettrico (teflon) caricato elettrostaticamente (elettrete) che produce nella camera un intenso campo elettrico in grado di attrarre gli ioni prodotti dal decadimento del radon: il calo di tensione, letto con un elettrometro, è proporzionale all'esposizione ricevuta, anche se a volte i rivelatori a elettrete sono soggetti a falsi positivi, ossia si scaricano anche senza essere stati soggetti ad alcuna esposizione, ed inoltre sono sensibili alla radiazione gamma, per cui richiedono una determinazione separata del rateo di dose gamma ambientale.

Da quanto detto è chiaro che una corretta valutazione di esposizione al radon parte da un'attenta riflessione sulle problematiche descritte e sulle tecniche di misura a disposizione. È possibile per esempio effettuare una survey preventiva (mediante l'utilizzo di dosimetri spia esposti per un breve periodo o mediante strumentazione per il campionamento istantaneo) per la determinazione dell'ordine di grandezza dell'esposizione, in modo da scegliere correttamente il metodo ed il tempo di misura e tracciare una mappatura dell'area in studio, evitando così anche la potenziale saturazione dei rivelatori in presenza di elevate concentrazioni di radon.

Le misure di esposizione (ossia l'integrale della concentrazione nel tempo di esposizione) devono essere effettuate su periodi di lunghezza adeguata a causa delle fluttuazioni: poiché tipicamente le concentrazioni mostrano variabilità su scala sia giornaliera che stagionale il rilievo ai sensi dell'Allegato I bis del D.lgs. 230/95 e s.m.i., ad esempio, deve essere effettuato nell'arco di un anno.

La media annuale su un periodo di 12 mesi consecutivi è considerata la miglior stima della concentrazione di radon mediata nel tempo, ma spesso vengono usati periodi più corti –

generalmente 3 mesi - in associazione a fattori di correzioni stagionali. Rilievi di durata inferiore ad un anno dovrebbero comunque essere giustificati da valutazioni relative ad esempio all'entità della variabilità nel sito o in siti analoghi o alla possibilità di superamento dei valori di riferimento, a sua volta basata sulle misure della survey preventiva.

Per quanto riguarda la strumentazione di misura si raccomanda l'utilizzo di quella più diffusa, come il dosimetro a tracce nucleari o l'elettrete, onde facilitare il confronto professionale e tecnico-legale. Il metodo a tracce presenta il vantaggio, rispetto all'elettrete, di non essere sensibile alla radiazione gamma e di mantenere memoria della misura, in quanto il rivelatore contenuto, dopo lo sviluppo, può essere conservato mantenendo l'informazione. D'altro canto la lettura degli elettreti è più semplice e non distruttiva: per esempio questo tipo di dosimetri è consigliato nel caso in cui si debba effettuare un campionamento a tappeto di più ambienti e non si disponga di sufficienti camere a ionizzazione.

Nel caso che la lettura del dosimetro, sia esso a tracce o a elettrete, venga effettuata da terzi, è opportuno che l'Esperto Qualificato verifichi le metodologie utilizzate da questi o eventuali certificazioni, esiti di prove, confronti o intercalibrazioni.

Per quanto concerne invece la mappatura spaziale, si consiglia di attenersi alle indicazioni delle "Linee guida per le misure di concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei", seguendo la prescrizione di massima che i rivelatori vanno collocati negli ambienti devo è presente personale.

Un minor numero di punti di campionamento va giustificato con valutazioni relative alla loro rappresentatività, alla omogeneità tra diversi locali o al fattore di occupazione.

Poiché il radon si distribuisce in maniera omogenea negli ambienti, la posizione dei rivelatori può essere scelta a seconda della comodità, come sopra un guardaroba o una libreria, tendendoli comunque non troppo vicini alle pareti per ridurre il possibile impatto della presenza di toron.

Il ricambio dei dosimetri deve essere effettuato con frequenza sufficiente da evitare la saturazione degli stessi. A tal scopo l'Esperto Qualificato tiene conto delle caratteristiche del dosimetro e dei valori di concentrazione attesi in base ai risultati della survey preventiva.

A seguire un elenco delle norme sui metodi di misurazione del radon in aria:

ENTE	ANNO	NUMERO	TITOLO
UNI	2008	11290	Classificazione dei metodi di misurazione del ^{222}Rn e dei suoi prodotti di decadimento
ISO	2014	16641	Measurement of radioactivity in the environment -- Air -- Radon-220: Integrated measurement methods for the determination of the average activity concentration using passive solid-state nuclear track detectors
ISO	2012	11665-1	Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 Origins of radon and its short-lived decay products and associated measurement methods
ISO	2012	11665-2	Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 Integrated measurement method for determining average potential alpha energy concentration of its short-lived decay products
ISO	2012	11665-3	Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 Spot measurement method of the potential alpha energy concentration of its short-lived decay products
ISO	2012	11665-4	Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 Integrated measurement method for determining average activity concentration using passive sampling and delayed analysis
ISO	2012	11665-5	Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222

			Continuous measurement method of the activity concentration
ISO	2012	11665-6	Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 Spot measurement method of the activity concentration
ISO	2012	11665-7	Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 Accumulation method for estimating surface exhalation rate
ISO	2012	11665-8	Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 Methodologies for initial and additional investigations in buildings
IEC	2006	61577-1 ed.2	Radiation protection instrumentation - Radon and radon decay product measuring instruments - Part 1: General principles
IEC	2014	61577-2 ed.2	Radiation protection instrumentation - Radon and radon decay product measuring instruments - Part 2: Specific requirements for 222Rn and 220Rn measuring instruments
IEC	2011	61577-3 ed.2	Radiation protection instrumentation - Radon and radon decay product measuring instruments - Part 3: Specific requirements for radon decay product measuring instruments
IEC	2009	61577-4 ed. 1	Radiation protection instrumentation - Radon and radon decay product measuring instruments - Part 4: Equipment for the production of reference atmospheres containing radon isotopes and their decay products (STAR)
IEC	1997	61578 ed. 1	Radiation protection instrumentation - Calibration and verification of the effectiveness of radon compensation for alpha and/or beta aerosol measuring instruments - Test methods

9. Qual è l'incertezza che deve essere associata alla misura?

Esistono fenomeni quali "ageing", "fading" e sovrapposizione di tracce, che possono conferire un certo grado di incertezza anche a misure concettualmente semplici come quelle condotte con dosimetri a tracce.

L'incertezza di una misura è un parametro, associato al risultato della misura, che caratterizza la dispersione dei valori attribuibili alla grandezza da misurare.

Le componenti dell'incertezza di misura che sono stimate tramite metodi di analisi statistica di una serie di risultati sperimentali costituiscono le incertezze di tipo A. Le componenti, dette incertezze di tipo B, derivanti da osservazioni ripetute, sono valutate mediante distribuzioni di probabilità basate su assunzioni dettate dall'esperienza o su altre informazioni disponibili (quali per esempio il certificato di taratura o le specifiche della ditta produttrice).

L'incertezza del risultato di una misura è quindi valutabile utilizzando un modello matematico della misura e la legge di propagazione dell'incertezza: si esprime matematicamente la relazione tra la grandezza da misurare e le grandezze dalle quali essa dipende (identificando tutte le sorgenti di incertezza), si valuta l'incertezza standard di ciascuna di queste grandezze (componenti di tipo A e di tipo B) ed infine si determina l'incertezza composta u_c come radice quadrata della somma delle varianze di queste grandezze, ciascuna pesata secondo quanto il risultato della misura varia al variare della grandezza in considerazione – combinando in questo modo gli effetti di tutti i fattori che influenzano la misura.

In molti casi, come nel campo della sicurezza dalle radiazioni ionizzanti, è necessario dare un valore dell'incertezza che definisca un intervallo all'interno del quale ci si aspetta che cada una larga parte della distribuzione di valori attribuibili alla grandezza Y da misurare. Si calcola allora la cosiddetta incertezza estesa $U = k \cdot u_c$, pari all'incertezza composta u_c moltiplicata per un fattore di copertura k , compreso tra 2 e 3. Il risultato della misura viene dunque espresso come $Y = y \pm U$, dove y è la miglior stima della grandezza Y e l'intervallo compreso tra $(y-U)$ e $(y+U)$ è l'intervallo di fiducia, centrato intorno al risultato y , all'interno del quale si può ritenere di trovare il valore vero di

Y con un certo livello di fiducia.

Come esempio si può prendere in considerazione una misura effettuata mediante un rivelatore a tracce: in questo caso l'esposizione al radon in kBq/m³ misurata è correlata al numero di tracce per cm² (vedi tabella).

L'incertezza di misura di tipo A, valutata dai Servizi di dosimetria, ha due origini: la variabilità tra rivelatori, dovuta al fatto che i rivelatori non sono tutti uguali, per cui a parità di esposizione presentano un numero diverso di tracce, e l'incertezza di lettura su un singolo dosimetro, che dipende dal metodo di lettura.

Il primo tipo di incertezza si stima esponendo un congruo numero di rivelatori della stessa partita (almeno 10) tutti allo stesso valore e si vede la variabilità del numero di tracce tra i singoli rivelatori (operazione che si effettua ad esempio durante la taratura presso l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti).

La seconda fonte di incertezza di tipo A viene valutata in base al metodo di lettura: per esempio si può dividere il rivelatore in campi e leggere il numero di tracce per campo, calcolando poi il numero medio per unità di area e per campo su un singolo dosimetro e determinando la media delle medie su un intero lotto, affinando così la statistica e migliorando l'incertezza.

È importante dunque che venga applicato il miglior metodo per minimizzare l'incertezza di misura e quindi che l'EQ chieda al Servizio di dosimetria quale è stato il metodo utilizzato.

L'incertezza così calcolata va poi sommata in quadratura alle incertezze dovute alle altre fonti: ad esempio la misura dello strumento dipende anche dal coefficiente di taratura, pari all'inverso della sensibilità (vedi tabella), ossia $[n \cdot E / \sum_i (Tn_i)]$, dove n è il numero di rivelatori, E il valore dell'esposizione e Tn_i il numero di tracce nette per cm² del rivelatore i-esimo.

Il coefficiente di taratura si può ottenere, unitamente all'incertezza associata, mediante il metodo dei minimi quadrati ricavando la miglior retta passante per più punti sperimentali ottenuti a diversi valori di esposizione.

Rivelatore	Tracce per campo										media sulla riga	Dev. st.	Dev. st. %	tracce/cm ² lorde	tracce/cm ² nette (Tn)	sensibilità
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°						
R 1	276	222	247	269	253	244	265	231	239	256	250	17	7	4561	4422	2,8
R 2	243	240	246	248	262	262	204	221	254	272	245	20	8	4470	4331	2,7
R 3	288	257	223	225	223	246	236	232	275	273	248	24	10	4517	4378	2,8
R 4	236	252	247	235	245	263	231	231	235	241	242	10	4	4404	4265	2,7
R 5	229	245	242	255	216	219	200	224	243	257	233	18	8	4247	4108	2,6
R 6	242	259	245	226	238	243	229	233	232	231	238	10	4	4335	4196	2,7
R 7	221	208	198	204	197	229	223	242	215	211	215	14	7	3915	3776	2,4
R 8	263	258	251	272	216	225	235	254	257	234	247	18	7	4493	4354	2,8
R 9	230	225	226	233	219	203	210	194	231	213	218	13	6	3981	3842	2,4
R 10	238	275	240	232	229	230	262	236	255	273	247	18	7	4502	4363	2,8
R 11	249	232	262	231	233	234	214	238	229	234	236	13	5	4295	4156	2,6
R 12	224	240	255	219	237	227	199	243	298	249	239	26	11	4358	4219	2,7
R 13	217	272	240	252	252	232	244	261	284	222	248	21	9	4513	4374	2,8
R 14	262	284	271	251	275	257	236	259	265	255	262	13	5	4767	4628	2,9
R 15	244	263	254	257	251	254	249	245	251	272	254	8	3	4630	4491	2,8
R 16	239	250	229	218	223	205	262	263	273	233	240	22	9	4366	4227	2,7
R 17	220	221	216	221	227	213	200	254	218	233	222	14	6	4052	3913	2,5

R 18	246	235	264	273	261	253	242	222	222	235	245	17	7	4471	4332	2,7
R 19	251	231	224	220	237	252	214	244	205	225	230	16	7	4198	4059	2,6
R 20	254	257	251	236	251	241	244	250	293	251	253	16	6	4608	4469	2,8
MEDIE											241		7	4384	4245	2,7
dev.st.														220	220	

Esempio di valutazione dell'incertezza di misura su una partita di 20 rivelatori a tracce nucleari tipo CR39 sottoposti a un'esposizione di 1579 kBq/m³ (area campo: 5,5 mm²). Come descritto nel testo, la riga finale riporta la media sull'intero lotto delle grandezze medie per singolo rivelatore.

Similmente, nel caso di una cella a scintillazione (cella di Lucas) o di una camera a ionizzazione (AlphaGuard) si può calcolare l'incertezza di tipo A in laboratorio effettuando una misura di esposizione per un certo numero di ore ad una concentrazione costante di radon: se la lettura dello strumento è in conteggi, l'incertezza sarà proporzionale alla radice quadrata del numero di conteggi, se invece la lettura è in Bq/m³ si può calcolare la deviazione standard della serie di valori osservati e da questa l'incertezza di tipo A da utilizzare per le misurazioni in campo. Questa incertezza va poi sommata in quadratura all'incertezza legata al fattore di taratura e a quella di tipo B dovuta alla dipendenza della misura dai parametri ambientali.

Il legislatore non si è pronunciato sul caso in cui il valor medio di una serie di misure sia inferiore al livello di azione ma lo superi se si somma l'incertezza di misura. In questa evenienza la scelta migliore, prima di procedere con azioni di risanamento, potrebbe essere quella di consigliare al Datore di Lavoro di ripetere la campagna di misure. A meno che non si voglia adottare un approccio di "rischio condiviso", confrontando il valore misurato direttamente con i Livelli di Azione, fintanto che non sia superato un determinato livello massimo di incertezza, pari di solito allo stesso ordine di grandezza dei valori di accuratezza e precisione ottenibili con la strumentazione utilizzata.

10. Come deve essere strutturata e che cosa deve riportare una relazione tecnica?

L'Esperto Qualificato incaricato stenderà preliminarmente un "**Progetto di Radioprotezione**" che conterrà in maniera programmatica la descrizione delle attività da svolgere in riferimento ai luoghi di lavoro considerati. Il documento dovrebbe contenere i seguenti punti:

Premessa

Obiettivo della valutazione. Informazioni generali su date, luoghi; caratterizzazione degli ambienti sotto ispezione, eventuali attività lavorative e personale esposto con indicazioni delle condizioni espositive (attività lavorativa svolta e relativi tempi di esposizione); riferimenti legislativi.

Eventuali variazioni del quadro radiologico rispetto a una situazione relazionata precedentemente.

Nominativo e qualifica del personale incaricato delle valutazioni.

Valutazioni preventive

Descrizione locali, ventilazione, attività umane negli stessi, dati relativi a siti simili se esistenti; in generale tutto quanto possa dare indicazioni sull'ordine di grandezza delle concentrazioni, sulla loro variabilità e sulle esposizioni delle persone.

Punti di campionamento e durata

Grandezze fisiche oggetto della misura e/o della valutazione.

Rapporto su eventuali misure di survey preventiva.

Scelta o variazioni in itinere degli ambienti in cui effettuare le misure, del numero di punti di campionamento e delle durate, seguendo le indicazioni delle "Linee guida per le misure di

concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei”, con le relative valutazioni motivanti.

Tipologia di misura

Metodo di campionamento e strumentazione di misura utilizzata; motivazioni della scelta.

Al termine delle verifiche strumentali e delle campagne di misura l'EQ redigerà un **“Documento Conclusivo di Valutazione del Rischio Specifico”**. Tale relazione, ai sensi dell'articolo 61 del Dlgs. 230/95, costituisce il documento di cui all'articolo 17, comma 1, del Dlgs. 81/08, con le seguenti indicazioni.

Esito delle misure e valutazioni

Grandezze fisiche oggetto della misura e/o della valutazione.

Data/e e luogo delle campagne di misura.

Esito delle misure, confronto con i livelli di azione, relativa valutazione di esposizione/dose nel caso di attività ex art. 10-bis lettera e) e qualora si superi il livello di azione nel caso di attività ex art. 10-bis lettere a) e b), con indicazione degli elementi utilizzati per le valutazioni.

Elenco degli esposti in base ai livelli di esposizione.

Eventuali livelli di esposizione dei gruppi di riferimento della popolazione dovuti all'attività svolta.

Valutazione della presenza di rischi potenzianti (fumo, prodotti di combustione, concentrazione del particolato nell'aria, ecc.).

Per ogni campagna di misura riportare i riferimenti all'operatore e ai dati ambientali di temperatura, pressione atmosferica e umidità, quando si ritiene che il risultato della misura ne possa essere influenzato.

Per ogni misura dare la stima y della grandezza Y da misurare e la sua incertezza composta u_c , citando sempre le unità di misura di entrambe. Quando si riporta l'incertezza estesa U , indicare il fattore di copertura di k utilizzato per ottenere U o il corrispondente livello di probabilità.

Per le valutazioni di dose indicare e giustificare il valore del fattore di equilibrio e il fattore convenzionale di conversione scelti e la fonte di riferimento.

Nel caso in cui non vengano effettuate misurazioni

Esito delle valutazioni di esposizioni/dose con indicazione degli elementi utilizzati per le valutazioni, comparazione con i valori di riferimento. Eventuali riferimenti documentali utilizzati nella valutazione del rischio.

Elenco degli esposti in base ai livelli di esposizione, comprendente l'eventuale presenza di categorie di lavoratori particolarmente sensibili per età e condizioni di salute. Eventuali livelli di esposizione dei gruppi di riferimento della popolazione dovuti all'attività svolta.

Valutazione della presenza di rischi potenzianti (fumo, prodotti di combustione, concentrazione del particolato nell'aria, ecc.).

Conclusioni: misure da adottare ai fini della sorveglianza fisica della radioprotezione e azioni correttive previste

Nel caso di attività ex art. 10-bis lettere e):

ripetizione delle valutazioni con cadenza triennale.

In caso di superamento dell'80% del valore di azione:

ripetizione di misure e/o valutazioni nel corso dell'anno successivo.

In caso di superamento del valore di azione di cui all'art. 10-quinquies del D.lgs. 241/00:

riferimenti della comunicazione alle Agenzie regionali e delle province autonome competenti per

territorio, agli organi del Servizio sanitario nazionale competenti per territorio e alla Direzione territoriale del lavoro;

indicazioni relative a interventi, provvedimenti, misure di prevenzione e protezione: illustrare le misure di prevenzione e protezione già in essere (se necessario effettuare un'analisi dei processi lavorativi) e indicare il programma di modifica proposto, specificando i compiti di eventuali soggetti coinvolti in possesso di adeguate competenze e poteri; soluzioni tecniche, organizzative/procedurali e strutturali previste per eliminare o ridurre il rischio. Indicare anche la tempistica e le figure preposte all'attuazione delle stesse.

Sopralluogo a tre anni di distanza.

Nel caso in cui dopo tre anni dal rilascio della relazione di cui all'articolo 10-ter, comma 4, nonostante l'adozione di azioni di rimedio, le grandezze misurate risultino ancora superiori al livello prescritto:

indicazioni sull'adozione dei provvedimenti di protezione sanitaria dei lavoratori previsti dal Capo VIII del D.lgs. 230/95, tra cui per esempio classificazione del personale e dosimetria, eventuale formazione/informazione prevista; indicazioni sull'adozione dei provvedimenti di protezione sanitaria della popolazione previsti dal Capo IX nel caso delle attività lavorative ex art. 10-bis lettere c), d), e).

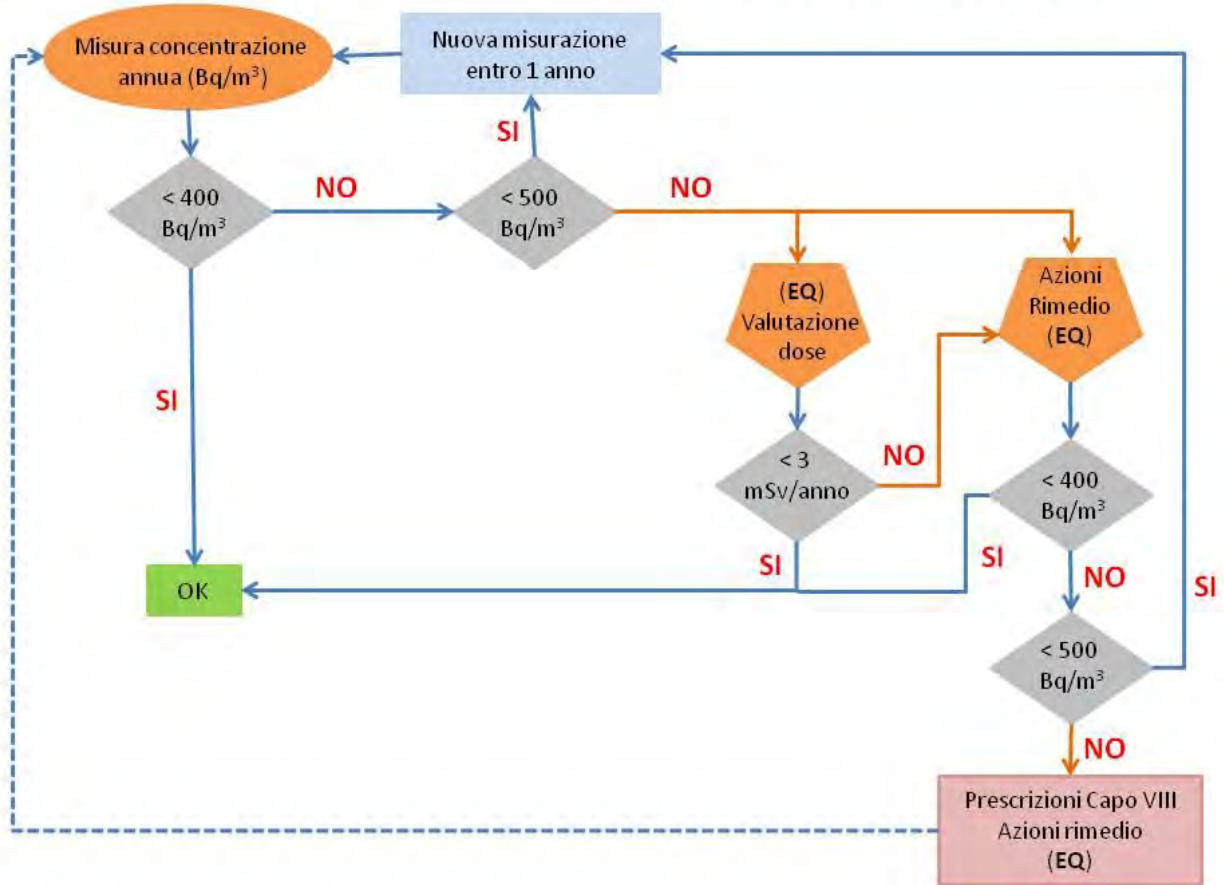
Indicare infine il caso in cui nessun lavoratore è esposto ad una dose superiore a quella indicata nell'allegato I-bis del D.lgs. 241/00.

Allegati

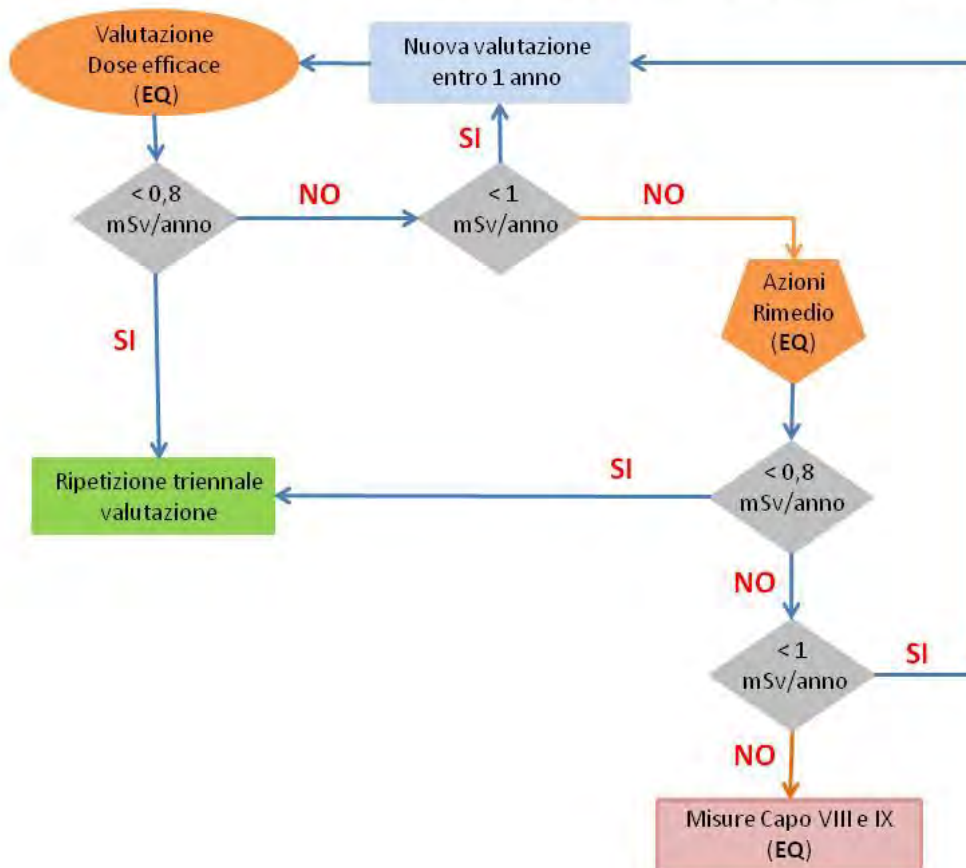
Planimetrie con indicazioni delle aree a rischio; rapporti di misura; certificazioni di taratura, interconfronto o intercalibrazione. Conservazione della documentazione e dei dosimetri (ove possibile) per la tracciabilità dei risultati.

Schema del processo di valutazione ai sensi del D.Lgs. 241/00.

Luoghi di lavoro ex art. 10-bis, comma 1, lettere a) e b)



Luoghi di lavoro ex art. 10-bis, comma 1, lettera e)



11. Come si valuta la dose ricevuta dall'inalazione della progenie del radon?

Il radon non si trova quasi mai in equilibrio con i suoi discendenti, quindi la sola conoscenza della concentrazione del radon non permette, in linea di principio, di valutare la dose all'apparato respiratorio, che dipende soprattutto dalla concentrazione dei suoi prodotti di decadimento (in particolare dalla frazione libera di essi). Poiché le misure dirette dei prodotti di decadimento sono difficili e limitate si procede per ipotesi sul fattore di equilibrio e sulla frazione libera. In particolare il fattore di equilibrio permette di stimare l'esposizione in termini di PAEC dalle misure della concentrazione del radon: conoscendo infatti $F = EEC(Rn)/C(Rn)$ una concentrazione misurata di radon può essere convertita in concentrazione equivalente all'equilibrio EEC, direttamente proporzionale alla PAEC (vedere sezione definizioni).

Il fattore di conversione discusso in precedenza, così come quello per i prodotti di decadimento del radon riportato nell'Allegato IV del D.lgs. 203/95, è stato ricavato dall'ICRP tramite il cosiddetto "approccio epidemiologico" (ICRP 65), dividendo il detrimento associato all'unità di esposizione al radon per il detrimento per unità di dose efficace, il primo ricavato dall'epidemiologia sui minatori e il secondo principalmente dagli studi epidemiologici sui sopravvissuti alle bombe atomiche. Quindi questo tipo di conversione da esposizione al radon a dose efficace non si basa su parametri dosimetrici, né utilizza fattori di peso per la radiazione o per il tipo di tessuto. Inoltre nel calcolo si presuppone un valore di 0,4 per il fattore di equilibrio F, che è una misura del grado di disequilibrio tra il gas radon e la sua progenie: se si dovesse stimare un fattore di equilibrio $F \neq 0,4$ bisognerebbe moltiplicare il coefficiente di conversione per $(F/0,4)$. È importante ricordare che la scelta del

valore di F è strettamente legata alla concentrazione stimata di radon.

Nel 2009 l'ICRP ha annunciato che tornerà all'approccio dosimetrico, che comporta l'utilizzo di modelli biocinetici e dosimetrici, trattando così il radon e la sua progenie come tutti gli altri radionuclidi. Questo approccio consiste in tre passaggi fondamentali: la valutazione della dose assorbita, il calcolo della dose equivalente e infine il calcolo della dose efficace.

La stima della dose assorbita dovuta all'inalazione dei prodotti di decadimento del radon a vita breve, che sono appunto i principali responsabili della dose ai polmoni, dipende da tutta una serie di valutazioni: la distribuzione dell'aerosol in funzione della dimensione, la frazione non legata dei prodotti di decadimento, la velocità di respirazione, la frazione di deposizione nelle vie aeree, il modello biocinetico di trasferimento della progenie del radon nei vari organi e tessuti e infine il modello dosimetrico per la valutazione della dose assorbita negli organi.

La dose equivalente viene quindi calcolata pesando la dose assorbita in base al tipo di radiazione, per ottenere alla fine la dose efficace applicando il fattore di peso per i tessuti.

La formula corretta per la valutazione della dose efficace a partire dall'esposizione potrebbe quindi essere:

$$E (Sv) = \sum_i \sum_j I_{ij} \cdot f_{pj} \cdot e_{ij}$$

dove l'indice j corrisponde al tipo di aerosol, l'indice i al prodotto di decadimento inalato, I_{ij} è l'introduzione per inalazione del prodotto i di decadimento, f_{pj} è la frazione associata al tipo di aerosol j e e_{ij} è il coefficiente di dose efficace (Sv per Bq), che si ricava dai calcoli dosimetrici.

I fattori possono sia essere ottenuti mediante misure sia essere dedotti dalla letteratura in condizioni standard: l'ICRP ha proposto di fornire i coefficienti per unità di esposizione in condizioni di riferimento abitative e lavorative. In questo modo sarà possibile una valutazione più adattabile alle caratteristiche dell'ambiente in esame, al posto di utilizzare un fattore univoco di conversione per ogni tipo di situazione.

12. In quali casi è necessario far partire la protezione sanitaria dei lavoratori esposti?

Nei luoghi di lavoro ex art. 10-bis, comma 1, lettere a) e b) qualora sia stato verificato il superamento del livello di azione, e, nonostante l'adozione di azioni di rimedio, dopo tre anni dal rilascio della relazione (con le misurazioni delle concentrazioni di attività di radon) le grandezze misurate risultano ancora superiori al livello prescritto [**3 mSv/anno di dose efficace**], l' esercente adotta i provvedimenti previsti dal capo VIII che prevedono tra l'altro la sorveglianza sanitaria dei lavoratori. Nel caso in cui un lavoratore sia esposto a più di una delle sorgenti indicate le dosi dovute ai diversi tipi di sorgenti sono registrate separatamente.

Per i luoghi di lavoro ex art. 10-bis, comma 1, lettera e) qualora dopo tre anni dall'adozione delle misure in seguito al superamento dei livelli di azione [**1 mSv/anno di dose efficace per i lavoratori e 0,3 mSv/anno per la popolazione**] l'esposizione risulti ancora superiore ai suddetti livelli, l' esercente adotta i provvedimenti previsti dal capo VIII che prevedono tra l'altro la sorveglianza sanitaria dei lavoratori.

13. In quali casi è necessario far partire la informazione / formazione?

Secondo l'articolo 10-quinquies Dlgs. 241/00, nel caso in cui dopo tre anni dal rilascio della relazione di cui all'articolo 10-ter, comma 4, nonostante l'adozione di azioni di rimedio, le

grandezze misurate risultino ancora superiori al livello di azione, l'esercente deve adottare i provvedimenti previsti dal capo VIII, tra cui l'obbligo di informazione/formazione ex art. 61, a meno che non si verifichino le condizioni ex art. 10-quinquies comma 5.

L'obbligo è particolarmente rilevante nel caso di lavoratori particolarmente sensibili al rischio - per esempio lavoratori che hanno avuto una situazione clinica pregressa di malattia polmonare o anche più semplicemente forti fumatori, ovvero che presentano condizioni fisiopatologiche che possono essere considerate dal Medico Competente ai fini dell'espressione del giudizio di idoneità; una corretta informazione può condurre tali lavoratori a formulare richiesta di sorveglianza sanitaria ex art. 41 Dlgs. 81/08 (ove la stessa sia ritenuta dal Medico Competente correlata ai rischi).

La formazione deve essere tenuta da personale qualificato nel campo (un EQ secondo l'art. 61 Dlgs. 230/95 nel caso di superamento del Livello di Azione, ma si ritiene preferibile che sia un EQ in ogni caso date le sue competenze in materia di rischi da radiazioni ionizzanti) e riguardare in particolare i rischi per la salute derivanti dall'esposizione al radon, il significato e il risultato dei valori delle grandezze fisiche misurate, il significato dei limiti di azione e delle misure previste per l'eliminazione o riduzione dei rischi.

14. Quali tecniche di abbattimento della concentrazione del radon sono prevedibili?

La prima soluzione per ridurre la concentrazione di radon in un ambiente è impedire o limitare l'ingresso del gas, anche se si tratta di un intervento quasi sempre non risolutivo, da abbinare ad altre tecniche di bonifica. Prima di ogni intervento l'Esperto Qualificato può effettuare una misura con sistemi attivi che permettano di registrare in continuo l'andamento della concentrazione di radon, in modo da delimitare, se possibile, i punti di ingresso e procedere alla sigillatura degli stessi. Le infiltrazioni di radon possono verificarsi in corrispondenza di:

- crepe e giunti in pavimenti e pareti;
- fori di passaggio cavi (soprattutto in tubi vuoti), tubazioni e fognature;
- pozzetti ed aperture di controllo;
- prese di luce e altre aperture nelle pareti della cantina;
- camini e montacarichi;
- pavimenti naturali in terra battuta, in ghiaia, in lastre di pietra o ciottoli;
- componenti permeabili (solai in legno, laterizi forati, muri in pietra e simili)

La sigillatura dei punti di infiltrazione è efficace solo qualora il punto sia circoscritto e ben definito, perché altrimenti la chiusura di una via non fa altro che spostare il punto di ingresso.

In questo caso per abbassare la concentrazione di radon si possono adottare Tecniche di risanamento, tra cui si citano:

- ventilazione forzata con recupero di calore
- ventilazione meccanica controllata a semplice flusso
- ventilazione meccanica controllata a doppio flusso
- pressurizzazione dei locali
- installazione di pozzetti nel suolo sottostante l'edificio
- Posizionamento di membrane isolanti

Ventilazione forzata con recupero di calore:

è indicata per concentrazioni di Radon che non superano i 1000 Bq/m³. L'unità fondamentale è un ventilatore a doppio flusso che immette nell'ambiente aria pulita estraendo quella contaminata. Tra i vantaggi di questo sistema si annoverano la bassissima perdita di energia, un recupero del calore dal

50 all'80% e una ventilazione continuata indipendentemente dalle abitudini degli abitanti.

Ventilazione meccanica controllata a semplice flusso:

il ventilatore, posto in posizione remota rispetto all'ambiente, garantisce l'immissione di aria pulita negli ambienti secchi dell'edificio prelevando, invece, dagli ambienti umidi. A dispetto dei vantaggi questo sistema presenta notevoli svantaggi come l'immissione di aria piuttosto calda durante l'estate, la perdita di energia durante la stagione fredda e, non ultimo, l'elevato costo dell'impianto.

Ventilazione meccanica controllata a doppio flusso:

questo metodo costituisce un notevole passo avanti aggiungendo, rispetto al precedente, la possibilità di controllo della velocità e delle qualità dell'aria immessa nonché il recupero dell'energia dell'aria espulsa. La condotta di immissione e quella di prelievo dell'aria sono separate. Anche questa soluzione è molto costosa, sia nell'installazione sia nella manutenzione.

Pressurizzazione dei locali:

è un provvedimento indicato per abitazioni/edifici isolati e in ambienti privi di aperture permanenti come cappe e camini. Utilizzando semplici ventilatori si può immettere aria dall'esterno allo scopo di creare una piccola sovrappressione nei locali sottostanti l'edificio, se esistenti, impedendo, così, al Radon di entrare.

Istallazione di pozzetti nel suolo sottostante l'edificio:

qualora l'edificio non poggiasse direttamente sul terreno senza avere locali sottostanti si può provvedere all'istallazione di pozzetti interrati ai quali sono collegati i sistemi di ventilazione. È estremamente importante che questi pozzetti siano a nido d'ape in modo da far estendere la depressione che si instaura nel pozzetto anche ai pori e ai granuli del terreno sottostante l'edificio. I pozzetti sono installati fino a due metri di profondità se necessario.

Posizionamento di membrane isolanti:

è una tecnica valida per edifici di nuova costruzione. Attualmente, a livello internazionale, sono allo studio circa una decina di differenti membrane. L'efficacia dell'isolamento non dipende soltanto dal coefficiente di diffusione del radon attraverso la membrana, ma anche dalla capacità di quest'ultima di resistere alle sollecitazioni ambientali (es. corrosione) per tutta la durata della vita dell'edificio.

Dove esistano i vespai nelle fondamenta dell'edificio la metodica più efficace e meno gravosa è sicuramente la ventilazione, attiva o anche passiva, dei vespai, pratica molto valida come sistema preventivo nella costruzione di nuovi edifici.

15. Quali requisiti deve possedere un ambiente di lavoro?

I requisiti generici di salubrità dei luoghi di lavoro, per la cui definizione si rimanda alle precedenti premesse e definizioni, sono stabiliti dal Titolo II del Dlgs.81/08 e dall'All.IV mentre le specifiche norme vengono poi disciplinate da Regolamenti tecnici quali, ad esempio, i regolamenti locali di Igiene. Quando un ambiente non possiede i previsti requisiti non può essere adibito ad attività lavorativa così come avviene per i luoghi interrati e/o seminterrati (cfr. art. 65 e 66 del Dlgs.81/08), fatta salva la possibilità di rilascio di adeguate deroghe al divieto di utilizzo.

A tal fine si ritiene opportuno specificare che tutti gli ambienti in cui viene svolta, anche occasionalmente attività lavorativa, devono essere autorizzati a tale scopo.

Le disposizioni dell'art. 10 bis del Dlgs. 230/95 e successive modifiche e/o integrazioni (nel seguito Dlgs. 230/95) si applicano ad attività lavorative esercitate in particolari luoghi di lavoro nel seguito elencati:

- Ambienti confinati in edilizia, quali interrati, seminterrati ed ambienti a partire dal piano terreno
- Terme
- Caverne e sottovie
- Depositi e locali tecnici
- Asili, scuole e luoghi lavoro diversi da quelli indicati in zone ben individuate o con caratteristiche determinate (Regioni e Province)

Prima di intraprendere una campagna di misura in uno dei luoghi di lavoro identificati dall'art. 10 bis del D. Lgs. 230/95 è necessario acquisire preliminarmente una serie di informazioni ambientali e tecniche degli ambienti da sottoporre ad indagine, per poter effettuare un'analisi accurata delle potenziali vie di ingresso e di diffusione del radon, e quindi una più approfondita valutazione del rischio per i lavoratori, e successivamente realizzare in maniera efficace le citate misure di bonifica. Tenuto conto che i luoghi in cui si dovrà effettuare la campagna di misure sono, a tutti gli effetti, luoghi di lavoro si ritiene opportuno ricavare tutte le indicazioni necessarie dal documento di valutazione dei rischi redatto dal datore di lavoro.

Aerazione

In ambienti in cui non sussistono o sono parzialmente rispettati i rapporti aeroilluminanti previsti dalle disposizioni in materia di igiene industriale e del lavoro (rapporti che possono variare da attività ad attività), è necessario compensare la carenza di ricambi d'aria tramite un impianto di aerazione forzata.

In alcuni casi, come ad esempio nei locali interrati, l'unica possibilità di avere ricambi d'aria è quella di installare un impianto di aerazione forzata.

L'aria immessa nell'ambiente confinato dall'esterno viene tecnicamente definita come aria primaria e l'impianto deve provvedere ad immettere ed estrarre i volumi d'aria tecnicamente necessari.

Ovviamente è necessario "trattare" adeguatamente l'aria immessa per garantire il rispetto dei requisiti sui parametri del microclima (valori di temperatura ed umidità ambientali idonei) e l'impianto deve essere adeguatamente dimensionato per garantire una portata adeguata con velocità di immissione non fastidiose per il lavoratore (velocità inferiore a $0,2 \text{ ms}^{-1}$).

L'aria immessa deve essere adeguatamente filtrata (generalmente sono impiegati semplici filtri meccanici) per ridurre la presenza di polveri e il punto di prelievo deve essere ad almeno 3 m dal piano stradale (se prelevata da cortili interni) o ad altezza superiore se fronte strada. Alcuni impianti di vecchia costruzione prelevano l'aria da immettere in cavedi o ambienti posti al di sotto del piano stradale e quindi da ambienti non proprio ottimali dal punto di vista di apporto di inquinanti quali gas radon.

I parametri tecnici di particolare interesse, soprattutto in caso di bonifica, sono:

- Tempo di funzionamento
- Volumi immessi per unità di tempo ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$)
- Volumi estratti per unità di tempo ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$)
- Velocità di immissione (ms^{-1})
- Percentuale di aria riciclata

E' inoltre fondamentale verificare da dove sia prelevata l'aria esterna da immettere nei luoghi di lavoro: se prelevata da ambienti seminterrati o interrati si dovrà considerare che una tale situazione potrà influenzare in maniera non trascurabile la presenza di radon.

I volumi di aria trattati da un impianto di aerazione primaria dipendono dal tipo di attività svolta e delle caratteristiche fisiche degli ambienti e, in generale, i volumi immessi per persona possono variare dai $30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ai $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Attività svolte

A parità di concentrazione di radon si dovrà considerare attentamente la tipologia dell'attività svolta che può influenzare in maniera non trascurabile il fattore di equilibrio considerato che il principale meccanismo di introduzione di radon è quello dell'inalazione durante l'atto respiratorio (ventilazione polmonare).

La ventilazione è il processo che determina l'ingresso dell'aria nelle vie aeree e nel compartimento aereo degli alveoli, ove avvengono gli scambi gassosi con il sangue.

Mediamente un individuo inspira circa 20 l di aria al minuto (anche se la frazione che raggiunge gli alveoli polmonari è minore); in caso di attività fisica i volumi inspirati possono essere sino a 10 volte superiori.

E' pertanto indispensabile conoscere perfettamente la tipologia dell'attività svolta ed i dati occupazionali (devono essere ricavati da indicazioni ufficiali quali, ad esempio, il documento di valutazione dei rischi).

Caratteristiche ambientali

Come già accennato le caratteristiche dei luoghi di lavoro (ambienti confinati) sono ben determinate da precise disposizioni normative che forniscono una serie di parametri il cui rispetto è fondamentale per il rilascio dell'agibilità degli ambienti in oggetto.

Non è possibile in questa sede esaminare in maniera dettagliata le specifiche norme tecniche e/o i regolamenti vigenti cui si rimanda per un'analisi approfondita.

In generale devono essere rispettati i seguenti valori

- Superficie minima di un singolo ambiente non inferiore a 9 m²
- Altezza minima non inferiore a 3 m
- Superficie minima per addetto non inferiore a 2 m² al lordo delle attrezzature
- Volume minimo per addetto non inferiore a 10 m³ al lordo delle attrezzature
- Rapporti aeroilluminanti pari ad 1/12 – 1/10 della superficie lorda

Esistono poi specifiche disposizioni dipendenti dal tipo di lavorazioni e di attività svolta.

Nel caso di particolari luoghi di lavoro quali caverne, sottovie, gallerie, tunnel non sono applicabili valori di riferimento standard e può essere difficile ricavare parametri di interesse quali volumi di aria immessa ed estratta, frazioni di ricircolo, omogeneità di funzionamento di impianti di aerazione (si pensi a tunnel o a grotte).

La concentrazione di radon in un ambiente dipende da vari fattori quali la ventilazione, la tipologia costruttiva, i materiali impiegati, la tipologia del sito su cui è stato edificato la struttura e la facilità con la quale il radon può penetrare negli ambienti.

Si può pertanto ipotizzare che in ambienti, a partire dai piani interrati, con pavimentazione particolarmente porose (es. gettata di calcestruzzo) e scarsa sigillatura delle solette, luoghi con ridotta ventilazione, strutture edificate sopra corsi d'acqua sotterranei o con apporto di acqua (es. particolari lavorazioni e/o consumi), edifici con elevate differenze di pressione e/o temperatura tra i vari piani le concentrazioni di radon risultino maggiori rispetto a siti differenti da quelli citati.

Gli autori ringraziano la Dott.ssa R. Trevisi dell'INAIL, il Dott. G. De Luca dell'ISPRA, la Dott.ssa M. Guardati e il Dott. S. Sandri dell'ENEA per le utili discussioni sugli argomenti trattati nel presente Report.

BIBLIOGRAFIA

- Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR) VI Report (Committee on health risks of exposure to radon – National Research Council). *Health effects of exposure to Radon*. National Academy Press, Washington DC; 1999.
- Bochicchio F. The newest international trend about regulation of indoor radon. *Radiat Prot Dosim* 2011;1–4.
- Bochicchio F. Protection from radon exposure at home and at work in the Directive 2013/59/EURATOM. *Radiat Prot Dosim* 2014;1–6.
- Decreto Legislativo 17 marzo 1995, n. 230 "Attuazione delle direttive Euratom 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti". *Gazzetta Ufficiale n. 136 - Suppl. Ordinario*, 13 giugno 1995.
- Decreto Legislativo 26 maggio 2000, n. 241 "Attuazione della direttiva 96/29/Euratom in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti". *Gazzetta Ufficiale n. 203 - Suppl. Ordinario*, 31 agosto 2000.
- Decreto Legislativo n. 81 del 9 aprile 2008 "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro". *Gazzetta Ufficiale n. 101 – Suppl. Ordinario n. 108*, 30 aprile 2008.
- Direttiva 2013/59/Euratom del Consiglio, del 5 dicembre 2013, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom. *G.U.C.E. L 13*, 17 gennaio 2014.
- Cothorn C.R. & Smith J.E.Jr. Environmental radon. New York: Plenum Press (1987).
- International Commission on Radiological Protection. *Protection Against Radon-222 at home and at work*. ICRP Publication 65, Ann. ICRP 23 (2); 1993.
- International Commission on Radiological Protection. *Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon*. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40 (1); 2010.
- ISO 11665-1:2012. *Measurement of radioactivity in the environment — Air: radon-222 - Part 1: Origins of radon and its short-lived decay products and associated measurement methods*; 2012.
- Legge Regionale 31 marzo 2005, n.14. "Prevenzione e salvaguardia dal rischio gas radon". *Bollettino ufficiale della Regione Lazio n. 10*, del 9 aprile 2005.
- Linee Guida per la prevenzione delle esposizioni al gas radon in ambienti indoor, Gruppo di Lavoro Regionale Lombardia. *Approvate con DGR n. 12668*, 21/12/2011.
- Linee guida per le misure di concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei, Conferenza dei Presidenti delle Regioni e delle Province autonome di Trento e Bolzano, Roma 6 febbraio 2003.
- Marsh J.W., Harrison J.D., Laurier D., Blanchardon E., Paquet F., Tirmarche M. Dose conversion factors for radon: recent developments. *Health Phys* 2010;99(4):511–516.
- Milocco A. *Misure di concentrazione di attività di radon in aria con rivelatore passivi di tracce nucleari*. Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici (APAT). I Sessione di Stage 2005/2006.
- National Council on Radiation Protection and Measurements, Report No. 97 - *Measurement of radon and radon daughters in air*. ed. NCRP, Bethesda MD; 1988.
- National Council on Radiation Protection and Measurements, Report No. 103 - *Control of Radon in Houses*. ed. NCRP, Washington DC; 1989.
- Nazaroff W.W, Nero A.V. *Radon and its decay products in indoor air*. Wiley J. and sons, New York; 1988.
- Piano Nazionale Radon (*Ministero della Salute*; 2002).
<http://www.iss.it/binary/radon/cont/PNRtesto.pdf>
- Sandri S. Il rischio da radon. *Igiene e Sicurezza del lavoro*. 2002;Anno IV(10).
- Trevisi R., Orlando C., Orlando P., Amici M., Simeoni C. Radon levels in underground workplaces - results of a nationwide survey in Italy. *Radiat Meas* 2012;47:178-181.
- Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995), ISO/IEC Guide 98-3:2008
www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf
- UNI/TR 11290, *Classificazione dei metodi di misurazione del ²²²Rn e dei suoi prodotti di decadimento*; 17/07/2008.
- World Health Organization, *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*. Geneva: WHO; 2009