
Prevenzione e protezione dall'esposizione al radon nei luoghi di lavoro.

Francesca Duchi

*Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica
Università di Roma "Sapienza",*

Rosabianca Trevisi

Dipartimento di Medicina Epidemiologia Igiene del Lavoro e Ambientale INAIL

Federica Leonardi

Dipartimento di Medicina Epidemiologia Igiene del Lavoro e Ambientale INAIL

Annapaola Caricato

*Dipartimento di Matematica & Fisica "Ennio De Giorgi", Università del Salento,
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Lecce, Lecce, Italy*

Il radon è un gas nobile radioattivo che non è avvertito dai sensi. L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha classificato il radon tra le sostanze per le quali vi è evidenza di cancerogenicità sull'uomo. Grazie alle sue proprietà chimico-fisiche questo gas può diffondere liberamente; tipicamente negli ambienti *indoor* la sorgente primaria è il suolo. Per questo motivo gli ambienti sotterranei, quelli situati al seminterrato e/o pianterreno possono essere maggiormente interessati dal problema.

Con l'entrata in vigore della nuova normativa di radioprotezione (D. Lgs.101/2020 s.m.i.) sono state revisionate ed estese le disposizioni sulla protezione dal gas radon nei luoghi di lavoro e sono state date per la prima volta delle indicazioni sulla protezione dal radon nelle abitazioni. In questo articolo si affrontano le principali caratteristiche e gli aspetti normativi relativi al radon.

Premessa

È noto che il radon è la sorgente che fornisce alla popolazione il maggior contributo alla dose da radiazioni ionizzanti [1]. Il radon è un gas radioattivo, che si genera nelle rocce o nei suoli per effetto del decadimento radioattivo degli elementi appartenenti alle serie dell'uranio e del torio. In questo documento si fa riferimento solo all'isotopo 222 del radon (^{222}Rn), appartenente alla serie dell'uranio-238 (^{238}U).

Dalle rocce o dai suoli, il radon può fuoriuscire all'aria aperta, ove solitamente i livelli si mantengono bassi. Diversamente, la penetrazione all'interno degli edifici fa sì che il radon possa accumularsi e raggiungere concentrazioni in aria anche molto elevate. Per tale ragione, il radon è considerato come fattore di rischio presente negli ambienti confinati (*indoor*).

Il radon può essere presente in qualunque ambiente confinato: di vita, di svago o di lavoro. In Italia la concentrazione media di radon *indoor* è di circa 70 Bq/m^3 [2], quasi il doppio del valore

medio mondiale di 40 Bq/m³ [1]¹.

Sulla base dei dati attualmente disponibili [4] si stima che in Italia:

- le abitazioni con concentrazione di radon superiori a 200 Bq/m³ siano circa 800.000;
- i luoghi di lavoro con livelli di radon maggiori di 300 Bq/m³ siano circa 200.000, anche se non si ha un quadro esaustivo dell'intero territorio nazionale. Dal punto di vista degli effetti sanitari, il

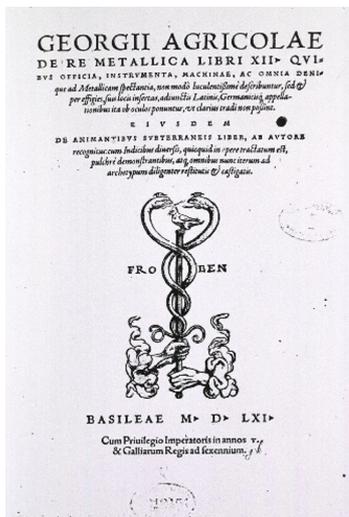


Figura 1: Frontespizio del *De re metallica* di Georg Agricola.

radon rappresenta il secondo agente di rischio di sviluppo di cancro ai polmoni, dopo il fumo di tabacco: gli studi epidemiologici attribuiscono al radon circa il 10% di tutti i casi di cancro polmonare (con un range di 3% - 14%), evidenziando un rischio sanitario molto più alto nei fumatori a causa di un effetto sinergico radon-fumo di tabacco che moltiplica gli effetti di ciascun singolo agente [5, 6]. L'Istituto Superiore di Sanità, ISS, ha valutato che, dei 31 mila casi di cancro ai polmoni che si registrano in Italia ogni anno, tra i 1000 e i 5500 siano attribuibili all'esposizione al radon [7].

Gli studi epidemiologici internazionali hanno evidenziato un aumento del rischio relativo di cancro al polmone statisticamente significativo al crescere del valore di esposizione al radon (dove per "esposizione al radon" si intende il prodotto della concentrazione di attività di radon in aria per il tempo di esposizione). È un dato inter-

¹Una breve presentazione delle unità di misura usate per descrivere i fenomeni radioattivi e i loro effetti sui sistemi biologici si trova in Ref. [3].

nazionalmente condiviso che su un periodo di osservazione di 25-35 anni, si abbia un aumento del rischio relativo del 10-16% per ogni incremento di 100 Bq/m³ della concentrazione di attività di radon in aria [8, 9]. Poiché il rischio relativo cresce linearmente al crescere dei livelli di radon, è opportuno che questi ultimi siano i più bassi ragionevolmente ottenibili².

La storia del radon

Il fenomeno della radioattività è stato scoperto nel 1896 da Henri Becquerel, il quale osservò che i sali di uranio avevano la capacità di impressionare una lastra fotografica pur essendo essa ricoperta con uno strato di materiale opaco alla luce.

Due anni dopo, nel 1898, i coniugi Pierre e Marie Curie scoprirono che se l'uranio era puro emetteva radiazioni in misura minore e conclusero che le impurità dovevano contenere elementi ancora più radioattivi: erano stati scoperti e isolati altri due elementi radioattivi, il polonio e il radio. Nel 1900 il fisico Dorn scoprì, infine, che i sali di radio esalavano un gas radioattivo: il radon.

Tuttavia, se risaliamo indietro nel tempo, le prime evidenze di un pericolo connesso ad un gas emesso dalle rocce, che probabilmente è il radon, sono state riscontrate in una particolare categoria di lavoratori: i minatori. Già nel I secolo a.C. Tito Lucrezio Caro scriveva [10]:

"Quidve mali fit ut exalent aurata metallalla!! Quas hominum reddunt facies qualisque colores! Nonne vides audisve perire in tempore parvo quam soleant et quam vitae copia desit, quos opere in tali cohiber vis magna necessis? Hos igitur tellus omnis exaestuat aestus expiratque foras in apertum promptaque caeli."

"E quali miasmi talora esalano le miniere d'oro! Come riducono le facce e gli uomini e pure i colori! Non vedi o non senti dire come sono soliti morire in breve tempo e manchino di forza vitale quelli che la grande forza costringe

²Principio ALARA, acronimo di As Low As Reasonably Achievable

a tale fatica? La terra dunque sprigiona tutte queste esalazioni e le emana fuori all'aperto e nei liberi spazi del cielo."

Nel 1500 Paracelso aveva notato l'alta mortalità dovuta a malattie polmonari tra i lavoratori delle miniere d'argento nella regione di Schneeberg in Sassonia (Germania). L'incidenza di questa malattia, in seguito conosciuta come "malattia di Schneeberg", aumentò nei secoli diciassettesimo e diciottesimo, quando l'attività estrattiva nelle miniere di argento, rame e cobalto si intensificò.

Nello stesso periodo anche Georg Agricola ci lascia nel "De re metallica" (1556) una frase molto significativa:

"the dust has corrosive qualities, it eats away the lungs, and implants consumption in the body; hence in the mines of the Carpathian Mountains women are found who have married seven husbands, all of whom this terrible consumption has carried off to a premature death."

"la polvere ha qualità corrosive, corrode i polmoni e consuma il corpo; per questo nelle miniere dei Carpazi si trovano donne che hanno sposato sette mariti, tutti portati a morte prematura da questa terribile consunzione."

Georg Agricola infatti interrogò le vedove, diventate ormai osservatrici e testimoni delle morti dei precedenti mariti: questo è il primo esempio di epidemiologia applicata al radon. Tale malattia fu riconosciuta come cancro ai polmoni solo nel 1879 da Harting e Hesse [11] e nel 1924 Ludwig e Lorenzer [12] e identificarono l'esposizione al radon tra le sue principali cause.

Caratteristiche chimiche e fisiche

Il radon è un gas nobile radioattivo, di numero atomico Z pari a 86, chimicamente ed elettricamente neutro. Si presenta come un gas incolore, insapore e inodore, non è avvertito dai sensi e, in condizioni atmosferiche standard, pressione di 1 atm e temperatura di 20° C, ha una densità pari a 7.5 volte quella dell'aria atmosferica. Grazie alle sue proprietà chimico-fisiche può diffondere liberamente da un materiale all'altro.

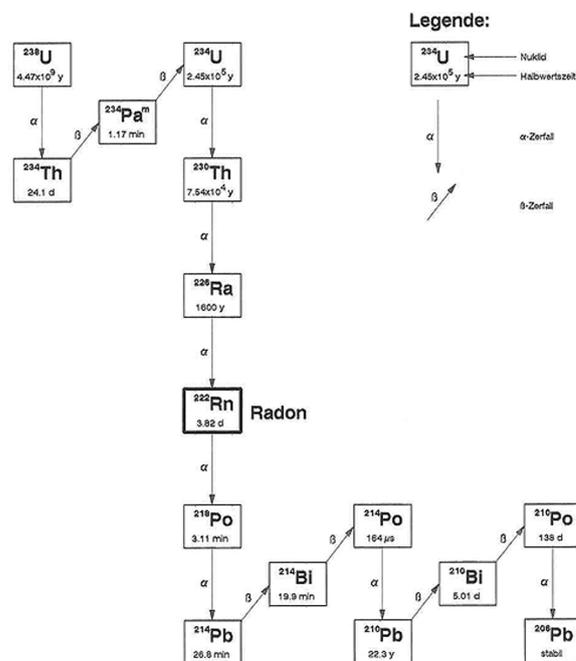


Figura 2: Catena di decadimento dell' ^{238}U .

Si conoscono 26 isotopi del radon ma in natura sono presenti principalmente il ^{219}Rn , il ^{220}Rn ed il ^{222}Rn . Il ^{222}Rn è il più abbondante ed prodotto per decadimento α del ^{226}Ra , elemento appartenente alla catena (o famiglia) dell' ^{238}U (Fig. 2), un elemento definito anche "radionuclide primordiale".

Il punto di fusione del radon è -71°C, motivo per cui in tutte le applicazioni di interesse umano è presente solamente in stato gassoso.

Peso Atomico A	222
Numero atomico Z	86
Temperatura di fusione a 1 atm	-71° C
Temperatura di ebollizione	-62° C
Densità del liquido alla fusione	4.4 g/cm ³
Solubilità in acqua alla pressione di 1 atm	cm ³ /kg H ₂ O
A 0° C	510
A 20° C	230
A 30° C	169
Viscosità alla pressione di 1 atm	g/cm s
A 20° C	229
A 25° C	233

Tabella 1: Proprietà fisiche del radon.

Il radon è moderatamente solubile in acqua e a causa di questa sua caratteristica è possibile che sia presente nelle acque che scorrono tra le rocce

e tra le sabbie. La sua solubilità dipende dalla temperatura dell'acqua e aumenta al diminuire della temperatura stessa. Ciò implica che a temperatura ambiente il radon preferisce distribuirsi in aria piuttosto che in acqua.

Gli effetti sanitari del radon

L'esposizione al radon *indoor*, ossia al gas presente in aria negli ambienti chiusi, rappresenta uno dei principali fattori di rischio di sviluppo di tumore polmonare, dopo il fumo da sigaretta. L'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC), dell'Organizzazione Mondiale della Sanità, già nel 1988, ha classificato il radon tra i cancerogeni accertati del gruppo 1 (gruppo che contiene 126 agenti di cui si hanno evidenze di effetti carcinogeni sugli umani – cancerogeni certi [13]).

Nel 2009, a seguito di studi epidemiologici condotti in 13 paesi europei [5, 6] ed analizzati insieme ai dati di indagini in Cina e in Canada (metanalisi) è risultato che una percentuale che va dal 3 al 14% sul totale di casi di cancro polmonare è attribuibile all'esposizione al radon *indoor*. Una stima più aggiornata (2018) è fornita da Gaskin [14], al riguardo delle sole esposizioni residenziali (no luoghi di lavoro), e ci dà un valore più preciso tra il 13.6% e il 16.5%.

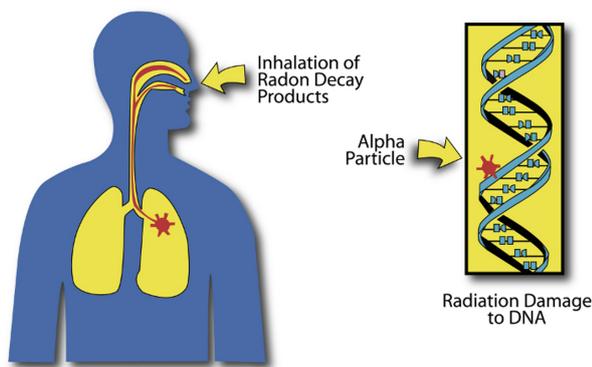


Figura 3: Schema del meccanismo di danneggiamento del DNA provocato dall'inalazione di Rn.

Per comprendere il pericolo legato al radon si deve osservare la sua catena di decadimento (si veda la Fig. 2): il ^{222}Rn decade emettendo una particella α con un tempo di dimezzamento di 3.82 giorni e genera una catena di nuclei instabili in atomi solidi pesanti e chimicamente attivi (pre-

sentì in aria come ioni 2+) fino al nucleo stabile del ^{206}Pb , denominati prodotti di decadimento o progenie.

Il radon è un gas nobile e per questo non è reattivo dal punto di vista chimico, per cui la maggior parte del gas inalato durante la fase di respirazione viene espulsa nella fase di espirazione, al contrario dei suoi prodotti di decadimento che rimangono in aria liberi o attaccati all'aerosol e una volta inalati tendono a depositarsi sulle cellule dell'epitelio bronchiale. Anche alcuni prodotti di decadimento sono α -emettitori (in particolare, il ^{218}Po e il ^{214}Po) e le particelle α emesse hanno un'elevata energia (circa 6-7 MeV/atomo) tale da poter danneggiare le catene di DNA cellulare. La maggior parte dei danni al DNA viene riparata da appositi meccanismi cellulari, ma quando i danni sono numerosi e non sono riparati correttamente, la situazione può evolvere dando origine ad un processo cancerogeno, in questo caso in tumore polmonare.

In generale, si può affermare che maggiore è la quantità di radon e dei suoi prodotti inalata, maggiore è la probabilità che qualche danno non venga riparato, soprattutto se le cellule sono esposte ad altre sostanze cancerogene. È particolarmente significativo è il contributo delle sostanze contenute nel fumo di sigaretta, primo agente di rischio per il tumore al polmone, che con il radon ha effetti sinergici quindi gli effetti dell'uno sono amplificati in presenza dell'altro; ad esempio per i fumatori attivi l'aumento di rischio associato al radon è aumentato di un fattore 25.

Il radon nei luoghi di lavoro: valutazione del rischio

Il radon è potenzialmente presente in concentrazioni variabili in ogni ambiente confinato (casa, lavoro, luogo di svago, ecc.), indipendentemente dal tipo di attività in esso svolta. L'abbondanza di questo gas infatti è legata principalmente alle caratteristiche geo-morfologiche del sito ove l'edificio è collocato e alla tipologia costruttiva dell'edificio stesso: negli ultimi decenni, le politiche sanitarie hanno dovuto lavorare all'identificazione delle situazioni "più a rischio" e per queste richiedere l'adozione di misure di prevenzione e di protezione dei lavoratori (nel caso

degli ambienti di lavoro) e della popolazione (per gli ambienti di vita).

Dal punto di vista regolatorio, l'esposizione dei lavoratori al radon è gestita come una situazione di "esposizione esistente"³ e lo strumento decisionale è il livello di riferimento (LdR). La normativa del settore (D. Lgs. n.101/2020) ha identificato le situazioni ove è più probabile riscontrare un rischio di esposizione al radon, chiedendo per queste la valutazione del rischio come misurazione della concentrazione media annua in aria e prescrivendo l'adozione di misure correttive (interventi di risanamento) laddove i livelli riscontrati siano superiori al LdR.

Nel caso dei luoghi di lavoro, il LdR corrisponde ad una concentrazione media annua di radon in aria pari a 300 Bq/m³. È bene rammentare che il LdR è quel valore di concentrazione oltre il quale "non è appropriato consentire le esposizioni, derivanti dalle suddette situazioni" e che "l'ottimizzazione della protezione continua a essere messa in atto al di sotto di detto livello" (D.lgs. 101/2020, art.6). Ciò vuol dire che in presenza di valori di concentrazione di radon superiori al LdR è obbligo del datore di lavoro/esercente adottare misure correttive per ridurre le concentrazioni al livello più basso ragionevolmente ottenibile, sulla base delle indicazioni tecniche degli esperti in interventi di risanamento. Tuttavia, anche laddove i livelli di radon non superino il LdR, se le condizioni lo consentono, sarebbe opportuno misurare e, se necessario, ridurre la presenza del radon a valori più bassi possibile per tutelare la salute dei lavoratori. La riduzione delle concentrazioni di radon *indoor*, infatti, è una misura di protezione di tutti gli occupanti (lavoratori e membri del pubblico).

Poiché tipicamente il suolo è la sorgente di radon che fornisce il contributo maggiore ai livelli di radon *indoor*, le attività lavorative svolte in luoghi sotterranei (miniere, gallerie, tunnel, ecc.) e quelle al seminterrato e/o pianoterra possono essere maggiormente interessate dal problema, così come le attività lavorative in cui è prevista la movimentazione di grandi volumi di acqua.

³Definizione 134) "situazione di esposizione esistente": una situazione di esposizione che è già presente quando deve essere adottata una decisione sul controllo della stessa e per la quale non è necessaria o non è più necessaria l'adozione di misure urgenti [15].

Specifiche tipologie di luoghi di lavoro

Ai sensi dell'articolo 16, c.1, lettera c queste sono identificate come:

- locali con impianti di trattamento per la potabilizzazione dell'acqua in vasca aperta
- impianti di imbottigliamento delle acque minerali (naturali e di sorgente)
- centrali idroelettriche

La normativa vigente [15] identifica le situazioni lavorative ove questo rischio non può essere ignorato dal punto di vista della radioprotezione e rispetto ad esse definisce degli obblighi per il datore di lavoro (Fig. 4). I luoghi di lavoro identificati dalla norma sono:

- luoghi di lavoro interrati⁴;
- luoghi di lavoro situati al piano terra e al seminterrato, localizzati nelle aree prioritarie identificate dalle Regioni e dalle Provincie Autonome di Trento e Bolzano (ex art.11 D.Lgs. 101/2020 e s.m.i.);
- speciali attività lavorative identificate nell'ambito delle azioni previste dal Piano Nazionale d'Azione per il Radon (PNAR): vedi tabella 2; ;
- stabilimenti termali.

Oltre alle situazioni sopra descritte, è bene tener presente che esistono categorie di lavoratori che lavorano per un tempo limitato in una moltitudine di luoghi (*temporary workers*) come, ad esempio, gli addetti ad attività di ispezione/manutenzione di impianti posti in locali sotterranei, i lavoratori impegnati in attività di restauro o di manutenzione di siti archeologici ipogei, le guide turistiche, ecc. Per queste categorie di lavoratori è più opportuno adottare un approccio radioprotezionistico basato sulla stima individuale dell'esposizione cumulativa al radon

⁴Definizione 86-bis "luogo di lavoro sotterraneo": ai fini dell'applicazione del Capo I del Titolo IV, locale o ambiente con almeno tre pareti sotto il piano di campagna, indipendentemente dal fatto che queste siano a diretto contatto con il terreno circostante o meno (D. Lgs. 203/2022)

(o della dose efficace) che deve tener conto dei livelli di radon e del tempo trascorso nei diversi ambienti in cui hanno lavorato. Nella realizzazione delle azioni previste dal PNAR saranno pubblicate linee guida con indicazioni tecniche per la stima dell'esposizione cumulativa al radon e della relativa dose efficace. A tal proposito, si rammenta che un'esposizione cumulativa (2000 ore/anno) ad una concentrazione media annua di radon di 300 Bq/m^3 corrisponde ad una esposizione integrata al radon pari a 600 kBq h/m^3 e alla stima della dose da radon si applica un fattore convenzionale di conversione di $6,7 \times 10^{-9} \text{ Sv m}^3/\text{Bq h}$ [16].

La misurazione della concentrazione media annua di radon in aria

Secondo la normativa vigente, per valutare il rischio connesso al radon occorre che un servizio di dosimetria riconosciuto o da un organismo in possesso dei requisiti previsti dalla legge determini la concentrazione media annua di radon in aria, con le modalità riportate nell'Allegato II del D.Lgs 101/2020, il quale fornisce inoltre indicazioni circa il contenuto della relazione tecnica con la quale sono rilasciati i risultati della misurazione.

Ulteriori criteri per l'individuazione dei punti di misura sono contenuti nel PNAR [4], in particolare per quanto concerne i luoghi che possono essere esentati dalla misurazione (vedi Tab. 2)

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">- locali di servizio- spogliatoi- bagni- vani tecnici- sottoscala- corridoi- locali a basso fattore di occupazione (minore di 100 ore/anno) |
|---|

Tabella 2: Luoghi di lavoro esentati dalla misurazione di radioattività.

Misure di protezione dal radon

Laddove i livelli di radon indoor superano il LdR, quale misura di protezione collettiva, è necessario introdurre accorgimenti tecnici volti ad ostacolare l'ingresso del radon nell'edificio e quindi a ridurre i valori di concentrazione negli ambienti interni. Questi accorgimenti tecnici, denominati "misure correttive", "interventi di risanamento" o "azioni di rimedio", possono basarsi su diversi approcci, la cui efficacia è documentata in letteratura. La scelta dell'intervento più idoneo per la situazione specifica è compito di una figura professionale introdotta dalla normativa vigente: **l'Esperto In Interventi di Risanamento (EIIR)**, ex art.15 del D.Lgs. 101/2020. L'EIIR deve essere un professionista, con abilitazione professionale per lo svolgimento di attività di progettazione di opere edili, iscritto all'albo professionale e che abbia frequentato un corso di formazione della durata di 60 ore con verifica finale dell'apprendimento, su progettazione, attuazione, gestione e controllo degli interventi correttivi per la riduzione della concentrazione di attività di radon negli edifici.

Qualora non sia possibile adottare interventi di risanamento o quelli adottati non siano stati abbastanza efficaci da ridurre i livelli di radon al di sotto del LdR, è necessario mettere in atto misure di protezione individuale, a partire dalla valutazione della dose ricevuta da ciascun lavoratore da parte dell'**esperto di radioprotezione (EdR)**. In questi casi, le stime di dose vanno confrontate con un livello di dose efficace pari a 6 mSv/anno : laddove un lavoratore è suscettibile di ricevere una dose superiore si devono adottare i provvedimenti tipici delle situazioni pianificate di cui al Titolo XI del D.Lgs. 101/2020. Qualora le dosi stimate siano inferiori a 6 mSv/anno , è previsto che l' esercente/datore di lavoro tenga sotto controllo le dosi efficaci o le esposizioni dei lavoratori, fino a che ulteriori misure correttive non riducono la concentrazione media annua di attività di radon in aria al di sotto del LdR.

Misure di prevenzione dal radon

Data l'ampia diffusione di radon, anche abitazioni e i luoghi di lavoro al di fuori del campo di applicazione della legge possono avere elevati li-

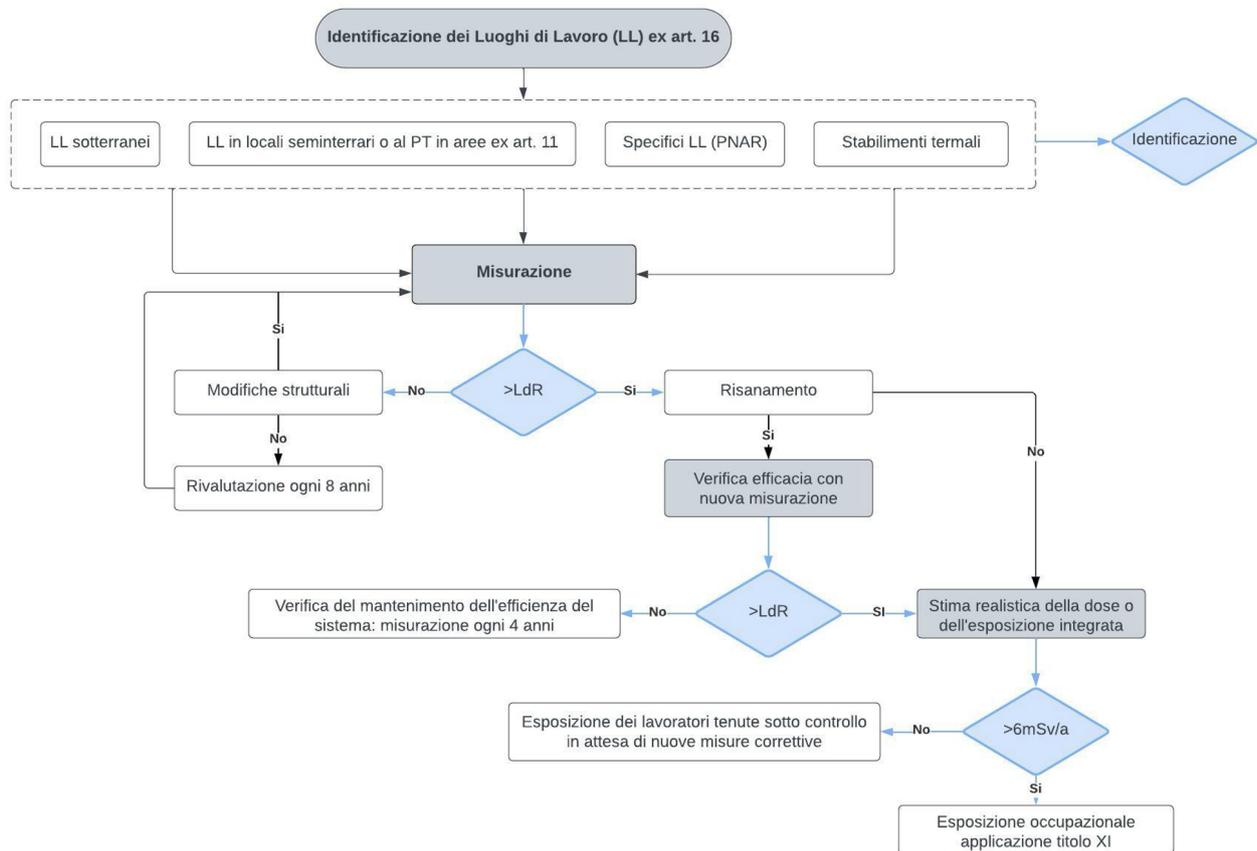


Figura 4: Schema degli adempimenti previsti dal D.Lgs. 101/2020 e smi per la protezione dall'esposizione al radon nei luoghi di lavoro.

Riferimenti normativi

- Decreto legislativo 31 luglio 2020, n. 101
- Decreto legislativo 25 novembre 2022, n. 203
- Decreto del Presidente del Consiglio dei ministri 11 gennaio 2024. Adozione del piano nazionale d'azione per il radon 2023-2032. (G.U. Serie generale n. 43 del 21/02/2024)

Il rischio di esposizione al radon nel quadro della valutazione dei rischi (D.Lgs. 81/08 e s.m.i.)

L'art. 244 del D.Lgs. 101/2020 modifica il comma 3 dell'art. 180 del D.Lgs. 81/08 rendendo più chiara ed evidente la relazione tra la normativa di radioprotezione e quella più generale di salute e sicurezza sul lavoro, richiedendo esplicitamente che i documenti inerenti la valutazione del rischio di esposizione al radon siano parte integrante del documento di valutazione del rischio (DVR), ex art.17 D.Lgs. 81/08. In particolare, il DVR dovrà includere:

- la relazione tecnica delle misurazioni di radon (a cura del servizio di dosimetria);
- il documento contenente l'esito delle misurazioni (a cura dell' esercente), che laddove i livelli medi annui di radon non superano i 300 Bq/m^3 include anche la valutazione delle misure correttive attuabili;

velli di radon: ad esempio ambienti posti ai piani superiori al piano terra, così come edifici situati in aree non classificate come prioritarie. Eseguire la misurazione della concentrazione di radon, e, se necessario, adottare interventi di risanamento è una misura di prevenzione raccomandata per ogni edificio. [4]

- laddove i livelli medi annui di radon superano i 300 Bq/m³
 - la descrizione delle misure correttive attuate, sulla base delle indicazioni dell’EIRR (a cura dell’ esercente)
 - la relazione tecnica delle misurazioni di radon post-risanamento (a cura del servizio di dosimetria)
- la relazione con la stima delle dosi individuali, laddove i livelli medi annui di radon post risanamento sono ancora superiori a 300 Bq/m³ (a cura dell’EdR).

Dalla lettura delle due norme si evince che il datore di lavoro di lavoratori esterni deve poter valutare i possibili rischi ossia il fatto che in alcuni locali era stato verificato il superamento del LdR, che delle misure correttive sono state adottate e se queste ultime hanno avuto sufficiente efficacia (art.18 c. 4 del D.Lgs. 101/2020 e art. 26 del D.Lgs. 81/08). Specie se i livelli di radon post-risanamento fossero ancora superiori ai 300 Bq/m³, il datore di lavoro di lavoratori esterni deve, avvalendosi dell’ EdR, effettuare per detti lavoratori la valutazione delle dosi efficaci annue, tenendo conto degli eventuali contributi dovuti all’esposizione in altri luoghi di lavoro.

Infine, si rammenta che, nel caso di superamento del LdR per il radon in alcuni luoghi di lavoro, l’ esercente ha l’obbligo di informare gli organi di vigilanza territoriali (ASL, ARPA/APPA e INL) e il Ministero del lavoro e delle Politiche Sociali mediante l’invio di una comunicazione recante anche la relazione tecnica inerente i risultati della misurazione. Analoga comunicazione va inviata al termine della verifica di efficacia dell’intervento di risanamento (art.18 D.Lgs. 101/2020).



- [1] UNSCEAR 2008 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly. United Nations 2010, New York. ISBN 978-92-1-142274-0
- [2] Iss 2010. *Rischio di tumore polmonare attribuibile all’esposizione al radon nelle abitazioni delle Regioni italiane* Primo rapporto sintetico (2010).
- [3] G. Co’: *Effetti biologici delle radiazioni*, Ithaca, XVIII - B (2021) 5.

- [4] Piano Nazionale d’Azione per il Radon 2023-2032. https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/normativa/PNAR_2023_2032.pdf
- [5] S. Darby, D. Hill, A. Auvinen, J. M. Barros-Dios, H. Baysson, F. Bochicchio, et al.: *Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies*. *BMJ* 2005;330:223. <https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63>.
- [6] S. Darby, D. Hill, H. Deo, A. Auvinen, J. M. Barros-Dios, H. Baysson, et al.: *Residential radon and lung cancer—detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe*. *Scand. J. Work Environ.*
- [7] <https://www.epicentro.iss.it/radon/epidemiologia>
- [8] *Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies* *BMJ* 2005;330:223 doi:<https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63>
- [9] World Health Organization: *WHO Handbook on Indoor Radon a Public Health Perspective*. *Int. J. Environ. Stud.* (2009) <https://doi.org/10.1080/00207230903556771>
- [10] Tito Lucrezio Caro, *De Rerum Natura*, Libro VI.
- [11] F. H. Hearting, W. Hesse: *Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den*, (1879) .
- [12] P. Ludewig, E. Lorensen: *Untersuchung der Grubenluft in den Schneeberger Gruben auf den Gehalt an Radiumemanation*, *Zeitschrift für Physik*, 22 (1924) 178.
- [13] IARC: *Man-Made Mineral Fibres and Radon; IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks to Humans* (1988) Vol. 43. 978-92-832-1243-0.
- [14] J. Gaskin, D. Coyle, J. Whyte, D. Krewski: *Global Estimate of Lung Cancer Mortality Attributable to Residential Radon*, *Environmental Health Perspectives*126(2018)
- [15] D.Lgs. 101/2020
- [16] ICRP 2017: *Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3.*, ICRP Publication Ann. ICRP, 137 (2017) 46.



Francesca Duchi: si è laureata in Ingegneria Energetica e Nucleare all’Università “La Sapienza” di Roma con una tesi sugli effetti dell’autoassorbimento dei fotoni nelle misure di spettrometria gamma, dopo aver svolto un tirocinio presso l’Ispettorato per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione. Attualmente sta svolgendo un dottorato di ricerca presso il Dipartimento di Medicina, Epidemiologia, Igiene del Lavoro e Ambientale (DiMEILA) di INAIL Settore Ricerca e certificazione, lavorando prettamente sulla radioattività ambientale. In particolare,

fa parte del gruppo di lavoro per lo sviluppo di protocolli operativi per supportare gli esercenti del settore Oil&Gas nell'applicazione delle disposizioni previste della normativa nazionale (D.lgs. 101/2020 s.m.i.). In quest'ottica sta lavorando all'ottimizzazione del nuovo laboratorio di spettrometria gamma del Laboratorio Rischi Agenti Cancerogeni e Mutageni del "DiMEILA" (INAIL).

Rosabianca Trevisi: è Primo ricercatore presso il Dipartimento di Medicina, Epidemiologia, Igiene del Lavoro e Ambientale di INAIL Settore Ricerca e certificazione. Si occupa di sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti sia dal punto di vista della misurazione che dal punto di vista radioprotezionistico. Membro dell'Executive Board della European NORM Association (ENA) e di Technical Group "NORM" della International Radiological Protection Association (IRPA). Autrice di oltre 150 pubblicazioni su riviste nazionali ed internazionali.

Federica Leonardi: è ricercatore presso il Dipartimento di Medicina, Epidemiologia, Igiene del Lavoro e Ambientale di INAIL Settore Ricerca e certificazione. Laureata in chimica, ha un dottorato di ricerca in ingegneria dei materiali ma ormai da tempo ormai si occupa di radioprotezione nell'ambito della radiazioni ionizzati di origine naturale. È docente del master di II livello in "Protezione dalle radiazioni ionizzanti" organizzato dall'Università di Roma "la Sapienza" in collaborazione con INAIL. È membro della European NORM Association (ENA) e di Technical Group "NORM" e autrice di diverse pubblicazioni scientifiche e su riviste nazionali ed internazionali.

Annapaola Caricato: è professore associato presso il Dipartimento di Matematica e Fisica "E. De Giorgi" dell'Università del Salento. Si occupa dello studio dell'interazione laser-materia per la deposizione di film sottili (organici e inorganici) e nanostrutture mediante ablazione laser per applicazioni in sensori, dispositivi optoelettronici e rivelatori nucleari. È autrice di oltre 160 pubblicazioni su riviste internazionali peer-reviewed, 6 capitoli di libri e 2 brevetti. È stata coordinatrice locale di Gruppo 5° dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). È membro di comitati di

conferenze internazionali che si occupano di processi di interazione laser-materia oltre che Editor di riviste scientifiche. È esperto di radioprotezione di 3° grado. È responsabile del "laboratorio di ricerca, consulenza e servizi per radiazioni ionizzanti e non ionizzanti" del Dipartimento di Matematica e Fisica "E. De Giorgi".

