



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**

**DIPARTIMENTO DI AREA MEDICA
Corso di laurea in Tecniche della prevenzione
nell'ambiente e nei luoghi di lavoro**

Tesi di laurea

**Inquinamento da Radon negli edifici
Caso applicativo di mitigazione del gas**

**RELATORE:
Dott. Michele Bordignon**

**LAUREANDO:
Marco Scanevino**

ANNO ACCADEMICO 2024/2025

1. INTRODUZIONE	3
1.1 I BENEFICI ECONOMICI E SANITARI DELLA PREVENZIONE	4
2. IL RADON	5
2.1 LA PROPAGAZIONE DEL RADON	7
2.2 DANNI ALLA SALUTE	8
2.3 LA SITUAZIONE IN REGIONE	10
2.4 NORMATIVA DI RIFERIMENTO	13
3. PREVENZIONE NEI NUOVI EDIFICI	16
4. RISANAMENTO EDIFICI ESISTENTI	22
5. OBIETTIVO DELLA TESI	30
6. DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO	32
7. MATERIALI E METODI	36
8. RISULTATI	40
9. DISCUSSIONE	48
10. CONCLUSIONI	51

1. INTRODUZIONE

L'inquinamento indoor degli edifici rappresenta oggi una delle principali minacce per la salute pubblica, con conseguenze sanitarie ed economiche di proporzioni significative che spesso rimangono sottovalutate dalla collettività. La qualità dell'aria indoor è influenzata da numerosi fattori fisici, chimici e biologici che possono accumularsi negli ambienti confinati, creando condizioni potenzialmente nocive per gli occupanti che trascorrono mediamente oltre il 90% del tempo in spazi chiusi.

L'inquinamento dell'aria indoor si riferisce alla contaminazione dell'aria all'interno di edifici residenziali, commerciali e istituzionali da parte di agenti fisici, chimici e biologici che possono compromettere la salute e il benessere degli occupanti. Questo fenomeno è il risultato di un complesso insieme di fattori che includono sorgenti interne di inquinamento, inadeguata progettazione e costruzione degli edifici, utilizzo di materiali inappropriati, ventilazione insufficiente e pratiche di gestione e manutenzione non corrette.

La problematica dell'inquinamento indoor ha acquisito crescente rilevanza negli ultimi decenni a seguito di diversi fattori concomitanti: l'incremento dell'isolamento termico degli edifici per migliorare l'efficienza energetica, l'aumento del tempo trascorso negli ambienti chiusi, la maggiore densità abitativa urbana e l'impiego sempre più diffuso di materiali edili e prodotti di consumo che possono rilasciare sostanze nocive negli ambienti confinati.

Tra i principali inquinanti indoor si annoverano composti organici volatili (VOC), formaldeide, particolato fine, gas di combustione, allergeni biologici, muffe e, significativamente, il gas radon. Quest'ultimo merita particolare attenzione essendo stato classificato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO) e dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) come cancerogeno di Gruppo 1 per l'uomo, rappresentando la seconda causa di morte per tumore polmonare dopo il fumo di tabacco.

1.1 I BENEFICI ECONOMICI E SANITARI DELLA PREVENZIONE

La prevenzione dell'inquinamento indoor, e del radon in particolare, genera benefici economici e sanitari di notevole entità che giustificano ampiamente gli investimenti necessari per l'implementazione di strategie preventive efficaci. Dal punto di vista sanitario, la riduzione dell'esposizione agli inquinanti indoor comporta una diminuzione diretta dell'incidenza di patologie correlate, con particolare riferimento alle malattie respiratorie, cardiovascolari e oncologiche.

I costi sanitari associati all'inquinamento indoor gravano significativamente sui sistemi sanitari nazionali attraverso molteplici meccanismi: costi diretti per trattamenti medici, ospedalizzazioni, farmaci e terapie; costi indiretti legati alla perdita di produttività lavorativa, giorni di malattia, invalidità temporanee e permanenti; costi intangibili relativi alla riduzione della qualità della vita, sofferenza dei pazienti e impatto psicologico sui familiari.

Studi internazionali hanno documentato che l'impatto economico dell'inquinamento atmosferico, comprensivo della componente indoor, può rappresentare una percentuale significativa del Prodotto Interno Lordo nazionale. L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha sviluppato specifici progetti come l'EMAPEC (Estimating the Morbidity from Air Pollution and its Economic Costs) per fornire supporto tecnico nella valutazione degli effetti sanitari avversi dell'inquinamento atmosferico e delle diverse morbidità associate, con particolare attenzione allo sviluppo di valutazioni economiche. La prospettiva economica della prevenzione evidenzia come gli investimenti in strategie preventive presentino generalmente rapporti costo-beneficio favorevoli. Le misure di prevenzione primaria, implementate in fase di progettazione e costruzione degli edifici, risultano significativamente più economiche rispetto agli interventi di risanamento post-costruzione. Inoltre, la prevenzione consente di evitare i costi sociali e sanitari a lungo termine, creando un circolo virtuoso che migliora la salute pubblica e riduce la pressione economica sui sistemi sanitari.

2. IL RADON

Il Radon è un gas radioattivo naturale inodore e incolore appartenente alla famiglia dei gas nobili (gruppo 18 della tavola periodica). Viene prodotto dal decadimento radioattivo dell'uranio-238 attraverso una serie di trasformazioni che coinvolgono il radio-226. Il radon presenta diverse caratteristiche distintive che lo rendono particolarmente rilevante dal punto di vista della salute pubblica e della radioprotezione. Il periodo di dimezzamento, ossia il tempo in cui dimezza la sua concentrazione per decadimento naturale, del radon-222 (l'isotopo più comune e radiologicamente significativo) è di 3,8 giorni. Durante questo processo, il radon decade emettendo particelle alfa e formando una serie di prodotti di decadimento anch'essi radioattivi, noti come "figli del radon" o "progenie del radon", tra cui polonio-218, piombo-214, bismuto-214 e polonio-214. Questi prodotti di decadimento hanno tempi di dimezzamento molto più brevi (da millisecondi a circa 27 minuti) e sono responsabili della maggior parte del danno radiologico ai tessuti polmonari. Un elemento importante ai fini della sicurezza è che il radon è l'unico elemento gassoso della catena di decadimento. Questa caratteristica consente al radon di spostarsi dal suolo ed accumularsi all'interno degli edifici.

L'unità di misura della concentrazione è il Becquerel al metro cubo (Bq/m^3), dove 1 Bq corrisponde a una transizione nucleare al secondo. Per comprendere meglio questa unità, è utile sapere che concentrazioni di radon dell'ordine di 100-200 Bq/m^3 sono considerate tipiche in molte aree geografiche, mentre concentrazioni superiori ai 300 Bq/m^3 richiedono interventi di mitigazione secondo la normativa attuale.

Il radon presenta una densità circa 7,5 volte superiore a quella dell'aria, caratteristica che influenza significativamente il suo comportamento negli ambienti confinati. È relativamente solubile in acqua (coefficiente di solubilità di circa 0,25 a 20°C) e presenta un'elevata mobilità attraverso materiali porosi e fessurati.

L'uranio è uno dei più antichi elementi naturali esistenti sulla Terra, formatosi durante i processi di nucleosintesi stellare miliardi di anni fa. È distribuito ubiquitariamente, ossia ovunque sulla crosta terrestre, benché la sua concentrazione vari significativamente da luogo a luogo in funzione della geologia locale.

La concentrazione media di uranio nella crosta terrestre è di circa 2,8 parti per milione (ppm), ma può variare da meno di 1 ppm fino a diverse centinaia di ppm in formazioni geologiche particolari.

Poiché, come già detto, il radon deriva dall'uranio attraverso la catena di decadimento dell'uranio-238, esso si trova praticamente dappertutto nel suolo. Tuttavia, la sua concentrazione e capacità di emanazione dipendono fortemente dalla composizione mineralogica delle rocce madri.

Le formazioni geologiche con maggiore potenziale di emanazione di radon includono:

- Rocce ignee acide: graniti, rioliti, sieniti, caratterizzate da elevato contenuto di quarzo e feldspati potassici, che spesso contengono concentrazioni significative di uranio;
- Rocce vulcaniche: lave, tufi, pozzolane, ignimbriti, particolarmente quelle di composizione acida o intermedia;
- Rocce metamorfiche: gneiss, micascisti, filladi derivanti da protoliti granitici o sedimentari ricchi in uranio;
- Rocce sedimentarie specifiche: alcuni tipi di calcari, marne, argille nere, flysch, arenarie arcose, e fosfoliti;
- Depositi di alterazione: sabbie granitiche, suoli residuali derivanti dall'alterazione di rocce madri ricche in uranio.

È importante notare che non solo la concentrazione di uranio nelle rocce determina l'emanazione di radon, ma anche la struttura cristallina dei minerali uraniferi e il grado di alterazione delle rocce. Minerali come zircone, monazite, e altri minerali accessori possono trattenere l'uranio in strutture cristalline stabili, riducendo l'emanazione di radon.

Il radon si diffonde nell'aria dal suolo attraverso i pori e le fratture, creando un "reservoir" sotterraneo che è in costante scambio con l'atmosfera. In spazi aperti, il gas è rapidamente diluito dall'aria e raggiunge solo basse concentrazioni (tipicamente 5-15 Bq/m³).

Al contrario, in ambienti chiusi, come gli edifici, esso può accumularsi e raggiungere alte concentrazioni, spesso decine o centinaia di volte superiori a quelle esterne.

2.1 LA PROPAGAZIONE DEL RADON

Il radon è un gas radioattivo naturale appartenente alla serie di decadimento dell'uranio-238. La sua origine è legata alla presenza di uranio e radio nelle rocce e nei terreni: attraverso il processo di decadimento radioattivo, il radon si genera e successivamente si diffonde nel sottosuolo, accumulandosi negli interstizi del terreno e seguendo dinamiche di propagazione verso l'atmosfera.

Il movimento del radon è influenzato da molteplici fattori ambientali e geologici. In particolare, la porosità e la fratturazione del terreno rivestono un ruolo fondamentale: un suolo poroso o caratterizzato da fratture permette una più agevole diffusione del gas, che può così risalire fino alla superficie terrestre e, in alcuni casi, raggiungere distanze significative dal punto in cui è stato originariamente generato. Al contrario, un terreno compatto, come quelli con elevato contenuto di argilla o limo, può costituire una barriera efficace alla migrazione del radon, limitandone fortemente la propagazione.

Ne consegue che la potenziale emanazione di radon dipende strettamente dalla natura litologica e strutturale del terreno.

Tre sono i parametri principali da considerare:

- Tipologia delle rocce che compongono il suolo, con particolare attenzione al loro contenuto di uranio;
- Grado di fratturazione delle formazioni geologiche, che determina la presenza di vie preferenziali di diffusione;
- Permeabilità del terreno, cioè la capacità del suolo di consentire il passaggio dei gas.

È importante notare come questi fattori non agiscano isolatamente, ma in modo sinergico. Un terreno con una concentrazione relativamente bassa di uranio, ma ad elevata permeabilità, può infatti generare concentrazioni di radon indoor più elevate rispetto a un suolo ricco di uranio ma caratterizzato da scarsa permeabilità.

Un esempio concreto di questa condizione si riscontra in alcune aree della regione Friuli-Venezia Giulia, dove l'elevata permeabilità del terreno costituisce il fattore determinante per l'emanazione e il trasporto del radon dal suolo.

Il processo di propagazione non è tuttavia statico, ma risente delle condizioni atmosferiche. Le variazioni di temperatura e di pressione dell'aria influenzano la dinamica di risalita del gas, determinando oscillazioni stagionali e giornaliere nelle concentrazioni misurate. Tali fluttuazioni sono spesso legate ai fenomeni di convezione e di differenza di pressione che si instaurano tra il sottosuolo e l'atmosfera.

Un ulteriore aspetto rilevante riguarda l'interazione tra il radon e gli edifici. Le costruzioni possono infatti agire come veri e propri "sistemi di aspirazione": a causa della differenza di pressione tra l'interno degli ambienti e il suolo circostante, si crea un effetto di risucchio che favorisce l'ingresso del radon nelle abitazioni. Questo fenomeno è accentuato in edifici privi di adeguate barriere o sistemi di ventilazione, dove il gas può accumularsi e raggiungere concentrazioni significative, costituendo un rischio per la salute degli occupanti.

La diffusione del radon, quindi, è un processo complesso, controllato da variabili geologiche, fisiche e antropiche. Comprendere i meccanismi di propagazione del gas è fondamentale non solo per valutare il rischio in un determinato territorio, ma anche per definire adeguate strategie di prevenzione e mitigazione negli edifici.

2.2 DANNI ALLA SALUTE

Il radon, essendo un gas nobile radioattivo, non rappresenta di per sé un rischio chimico diretto per l'organismo, in quanto viene espulso facilmente durante la respirazione. Tuttavia, il pericolo principale è legato al processo di decadimento (emissione particella alfa) e ai suoi prodotti di decadimento, anch'essi radioattivi, come il polonio-218 e il polonio-214, che hanno la capacità di aderire alle particelle presenti nell'aria – polvere, fumo di sigaretta, aerosol e vapore acqueo – e di essere quindi inalati. Una volta introdotti nelle vie respiratorie, tali radionuclidi si depositano nei bronchi e negli alveoli polmonari, dove emettono particelle alfa ad alta energia.

Questa radiazione ionizzante provoca danni diretti al DNA delle cellule epiteliali del tratto respiratorio. Le lesioni possono consistere in rotture della doppia elica, mutazioni puntiformi o aberrazioni cromosomiche che, se non correttamente riparate dai meccanismi cellulari, possono innescare processi di trasformazione neoplastica. Con il passare del tempo, l'accumulo di mutazioni aumenta il rischio di insorgenza del tumore polmonare.

Il rischio sanitario correlato al radon dipende da due fattori principali:

- La concentrazione del gas negli ambienti indoor, dove le persone trascorrono gran parte del proprio tempo.
- La durata dell'esposizione, spesso misurata in anni, che determina una dose cumulativa significativa.

In questo senso, il radon si comporta come un tipico fattore di rischio cronico: non produce effetti immediati o acuti, ma il danno si manifesta con latenze di anni o decenni, in modo analogo ad altri agenti cancerogeni ambientali.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) ha evidenziato che il radon rappresenta la seconda causa di tumore polmonare dopo il fumo di tabacco. Si stima che tra il 5% e il 20% di tutti i casi di carcinoma polmonare sia attribuibile all'esposizione a radon. In Italia, dove si registrano circa 30.000 nuovi casi di tumore polmonare all'anno, ciò significa che diverse migliaia di diagnosi con ogni probabilità possono essere correlate a questo agente naturale.

È inoltre da sottolineare la presenza di un effetto sinergico tra radon e fumo di sigaretta: nei fumatori esposti a radon, il rischio di sviluppare un carcinoma polmonare aumenta in maniera moltiplicativa rispetto a chi non fuma. Questo rende particolarmente critico il problema nelle aree ad alta concentrazione di radon, dove la popolazione fumatrice risulta la più vulnerabile.

La consapevolezza del legame tra radon e patologie oncologiche ha spinto molti Stati, compresa l'Italia, ad adottare normative specifiche e linee guida di intervento.

Queste prevedono la misurazione sistematica delle concentrazioni indoor, soprattutto in aree geografiche a rischio e in edifici pubblici come scuole, ospedali e luoghi di lavoro. Quando vengono superati determinati livelli di azione – generalmente fissati in termini di concentrazione media annuale espressa in becquerel per metro cubo (Bq/m^3) – si raccomanda o si impone la realizzazione di interventi di mitigazione. Tali misure possono includere il miglioramento della ventilazione, l'introduzione di aspiratori nel sottosuolo, la sigillatura delle vie di ingresso del gas dal suolo e l'adozione di barriere protettive. In conclusione, il radon rappresenta un rischio sanitario ambientale rilevante il cui impatto può essere significativamente ridotto attraverso strategie di prevenzione, monitoraggio e mitigazione. La comprensione dei meccanismi patogenetici e delle interazioni tra fattori di esposizione ha permesso di quantificare il rischio e di tradurlo in azioni normative a tutela della salute pubblica.

2.3 LA SITUAZIONE IN REGIONE

L'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia (ARPA FVG) ha svolto e consolidato, nel tempo, un ampio programma di misure indoor in abitazioni, da cui sono stati ricavati indicatori regionali e mappe. Dalle analisi condotte su migliaia di misure al pianterreno risulta che la concentrazione media regionale è dell'ordine di grandezza di $\sim 150 \text{ Bq/m}^3$, con distribuzioni spaziali eterogenee e punte locali più elevate. I valori dipendono dal piano, dalla tipologia edilizia e dalla zona geologica. L'ARPA sottolinea che il valore medio territoriale non è predittivo del singolo edificio, per il quale è sempre necessaria una misura dedicata.

Dal 2024–2025 la Regione ha classificato le “aree prioritarie a rischio radon”, cioè i territori in cui si stima che almeno il 15% degli edifici superi 300 Bq/m^3 (media annua, normalizzata al pianterreno). La lista dei Comuni e la mappa interattiva sono pubblicate da ARPA FVG e costituiscono la base per l'attuazione degli obblighi e delle azioni mirate nei luoghi di lavoro e nelle abitazioni.

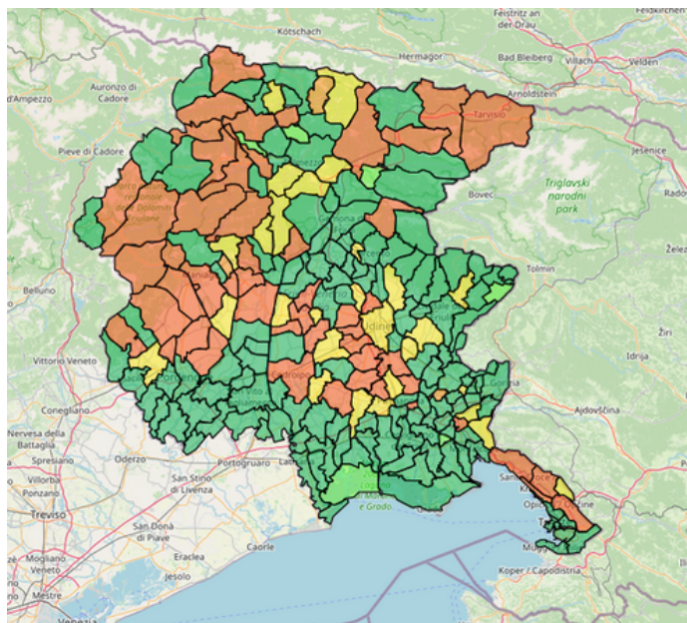


Figura 1: Aree prioritarie a rischio radon in FVG

Le aree prioritarie individuate dalla Regione, come riporta l'immagine sopra, pubblicate da ARPA FVG, comprendono 51 Comuni e due circoscrizioni dell'Altipiano nel Comune di Trieste (Altipiano Ovest ed Est), interessando all'incirca 200–210 mila residenti. La scelta delle circoscrizioni per Trieste rispecchia la netta distinzione geomorfologica fra l'altopiano carsico (permeabile, con fratture e cavità) e il nucleo urbano costiero (a livello del mare), che presentano comportamenti radon molto diversi.

La classificazione si fonda su un database regionale che integra i risultati di tre grandi campagne:

- Radon Prone Areas 2006,
- Radon Prone Areas 2014,
- “Radon – Misure per 1000 famiglie” 2017.

Nel complesso, sono oltre 4.500 misure annuali normalizzate al pianterreno, distribuite capillarmente sul territorio; questi dati alimentano la stima percentuale di superamento del livello di riferimento e le mappe comunali/circoscrizionali.

Oltre alle misure storiche, ARPA FVG continua ad attuare iniziative di informazione e monitoraggio. Nel 2025 è stata promossa una campagna estiva di sensibilizzazione nelle scuole della regione (con focus su “aria indoor” e radon), con materiali divulgativi e

attività dedicate a studenti e docenti, segno della continuità dell'azione educativa e della comunicazione del rischio.

L'ARPA mantiene inoltre un portale informativo aggiornato (che spiega cos'è il radon, la normativa, come misurare in casa, come leggere i risultati e quali contromisure adottare) e mette a disposizione la mappa della classificazione dei Comuni in area prioritaria, oltre alle pagine guida per la misura nelle abitazioni e per i luoghi di lavoro.

L'ARPA, per quanto attiene alla gestione del rischio derivante da gas radon, svolge un ruolo tecnico-scientifico centrale in quanto assicura:

1. Monitoraggio e misure: pianifica e realizza campagne di misura, valida i dati e aggiorna i database regionali.
2. Analisi e mappatura del rischio: elabora la classificazione delle aree prioritarie, pubblica mappe e liste ufficiali e supporta gli enti locali nell'interpretazione.
3. Supporto a scuole, cittadini e imprese: produce linee guida per la misura in casa, organizza campagne di sensibilizzazione, risponde a FAQ e richieste di chiarimento.
4. Assistenza agli adempimenti nei luoghi di lavoro: fornisce indicazioni sugli obblighi nelle aree prioritarie (misura al piano terra, seminterrati e sotterranei; interventi se sopra il livello di riferimento).

Il radon deriva dal decadimento dell'uranio naturalmente presente nelle rocce e nei suoli regionali. In FVG, la permeabilità del terreno (fratture, porosità, vuoti carsici) facilita il trasporto del gas verso la superficie e, attraverso fessure, giunti, passaggi impiantistici e/o vespai, porta al suo ingresso negli edifici. La diversa geomorfologia determina forti gradienti spaziali: l'altopiano carsico triestino mostra potenziali di rilascio e percorsi di migrazione più efficienti rispetto al nucleo urbano costiero, mentre altre aree regionali (pianure ghiaiose, conoidi, depositi permeabili) possono consentire flussi significativi. La presenza di materiali da costruzione (generalmente secondaria rispetto al suolo) può contribuire in misura minore.

Nei Comuni in area prioritaria, per i luoghi di lavoro ubicati al piano terra, seminterrato o sotterraneo vige l'obbligo di misurare la concentrazione media annua di radon e, in caso di superamento del livello di riferimento, di attuare misure correttive (ad es. sigillature, ventilazione del vespaio, depressurizzazione del terreno, miglioramento della ventilazione/tenuta dell'involucro). Le soglie di riferimento sono 300 Bq/m³ per i luoghi di lavoro e per le abitazioni esistenti; 200 Bq/m³ per le nuove abitazioni successive al 31/12/2024.

In conclusione, il FVG dispone oggi di una conoscenza solida della distribuzione del radon indoor grazie al lavoro pluriennale di ARPA e alla recente individuazione delle aree prioritarie. La priorità per i prossimi anni è consolidare la prevenzione nelle nuove costruzioni, accelerare i risanamenti dove necessario e mantenere alta la consapevolezza pubblica con campagne mirate, in particolare nelle aree a maggiore probabilità di superamento.

2.4 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Il quadro normativo italiano in materia di protezione dalle radiazioni ionizzanti e controllo del radon ha subito una significativa evoluzione negli ultimi anni, culminando con il recepimento della Direttiva 2013/59/Euratom attraverso il Decreto Legislativo n. 101 del 31 luglio 2020, entrato in vigore il 27 agosto 2020.

Il Decreto Legislativo n. 101/2020 ha abrogato la precedente normativa (D.lgs. 230/1995 e sue successive modifiche) introducendo importanti novità per il controllo del radon. I nuovi livelli di riferimento, espressi come concentrazione media annua di attività di radon in aria, sono stati significativamente ridotti. Infatti, si è passati dal limite di 500 Bq/m³ ad un livello soglia di 300 Bq/m³ per abitazioni esistenti e luoghi di lavoro e 200 Bq/m³ per abitazioni nuove.

Le principali innovazioni normative possono essere riassunte come segue:

- Unificazione dei livelli di riferimento: per la prima volta viene fissato lo stesso livello di riferimento (300 Bq/m^3) sia per gli ambienti di vita che per i luoghi di lavoro, facilitando l'attuazione della norma
- Riduzione del limite per i luoghi di lavoro: il precedente livello di azione per le attività lavorative era 500 Bq/m^3 , mentre il nuovo livello di riferimento è stato abbassato a 300 Bq/m^3
- Introduzione di limiti per le nuove costruzioni: per le abitazioni costruite a partire dal 2025 è previsto un livello di riferimento più stringente di 200 Bq/m^3
- Limite di dose efficace: è stabilito in 6 mSv/anno per i lavoratori esposti.

Il decreto prevede che le Regioni individuino le "aree prioritarie": aree in cui al piano terra la concentrazione di radon sia superiore a 300 Bq/m^3 in un numero di edifici maggiore o uguale al 15%. Questa disposizione sostituisce il precedente concetto di "aree a elevata probabilità di alte concentrazioni di radon" e fornisce criteri più specifici per l'identificazione.

Le Regioni erano chiamate a identificare queste aree sulla base di:

- Dati disponibili da precedenti campagne di misura.
- Valutazioni tecnico-scientifiche basate su parametri geologici e ambientali.
- Campagne di indagini specifiche, ove necessario.

Un altro importante sviluppo è rappresentato dall'adozione del Piano Nazionale d'Azione per il Radon 2023-2032 attraverso il D.P.R. 11 gennaio 2024, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 43 del 21 febbraio 2024. Il Piano ha l'obiettivo di aiutare le Regioni e le Province autonome a procedere con le campagne di misurazione della concentrazione di radon indoor per individuare le aree prioritarie e per avviare gli interventi di riduzione.

Gli obiettivi strategici individuati dal Piano sono:

- Completamento della mappatura nazionale del radon.
- Identificazione sistematica delle aree prioritarie.
- Sviluppo di programmi di formazione per tecnici e professionisti.
- Promozione di misure preventive nelle nuove costruzioni.
- Sensibilizzazione della popolazione sui rischi del radon.

Il Decreto Legislativo n. 203 del 25 novembre 2022 contiene disposizioni integrative e correttive al Decreto Legislativo n. 101/2020, fornendo ulteriori specificazioni tecniche e procedurali.

Per quanto riguarda invece la normativa per i luoghi di lavoro il D.lgs. 101/2020 stabilisce:

- un ambito di applicazione per i luoghi di lavoro:

- Luoghi di lavoro sotterranei.
- Luoghi di lavoro al piano terra situati nelle aree prioritarie identificate dalle Regioni.
- Stabilimenti termali.
- Luoghi di lavoro dove si svolgono attività con materiali contenenti radionuclidi naturali.

- Obblighi per il datore di lavoro:

- Esecuzione di misure entro 18 mesi dall'identificazione delle aree prioritarie.
- Adozione di misure di riduzione quando la concentrazione supera 300 Bq/m³.
- Valutazione dell'esposizione dei lavoratori.
- Sorveglianza sanitaria quando la dose efficace supera 6 mSv/anno.

- Una normativa per abitazioni esistenti:

- Livello di riferimento: 300 Bq/m³ (concentrazione media annua)
- Raccomandazione, anche in assenza di un obbligo legale, di adottare misure di riduzione oltre tale soglia

Una normativa per le nuove abitazioni (costruite dopo il 31 dicembre 2024):

- Livello di riferimento: 200 Bq/m³
- Obbligo di adozione di misure preventive in fase di progettazione nelle aree prioritarie.

In conclusione, la normativa italiana è in continua evoluzione per allinearsi agli sviluppi scientifici internazionali. Particolare attenzione è stata rivolta a:

1. Aggiornamento delle linee guida tecniche relative alle metodologie di misura, sistemi di mitigazione e criteri di valutazione dell'efficacia degli interventi.
2. Integrazione con la normativa edilizia: sviluppo di protocolli costruttivi "radon-resistant" per le nuove costruzioni.
3. Armonizzazione interregionale: per garantire uniformità nell'applicazione delle disposizioni su tutto il territorio nazionale.
4. Formazione professionale: sviluppo di percorsi formativi per tecnici competenti nella valutazione e mitigazione del rischio radon.

La nuova normativa rappresenta un significativo passo avanti nella protezione della popolazione dai rischi derivanti dall'esposizione al radon, introducendo un approccio più sistematico e preventivo rispetto al passato, con particolare enfasi sull'identificazione delle aree a rischio e sull'adozione di misure preventive nelle nuove costruzioni.

3. PREVENZIONE NEI NUOVI EDIFICI

Il controllo del gas radon nelle nuove costruzioni rappresenta un passaggio fondamentale per la tutela della salute pubblica, in quanto consente di integrare già in fase progettuale e costruttiva misure efficaci e durature nel tempo. Le tecniche di prevenzione mirano a impedire l'ingresso del radon indoor o a favorirne la rapida diluizione e dispersione.

Le strategie si basano su principi fisici consolidati: barriere fisiche, depressurizzazione del suolo, ventilazione e drenaggio.

1. Impermeabilizzazione e barriere anti-radon

La barriera anti-radon rappresenta una delle prime linee difensive contro l'ingresso del gas. Questa strategia può essere ottenuta tramite membrane continue impermeabili ai

gas, solitamente in polietilene ad alta densità, bitume modificato, o materiali multistrato rinforzati.

Le barriere devono essere:

- continue e senza interruzioni su tutta la superficie in contatto con il suolo;
- sigillate accuratamente nei punti di discontinuità (giunti di dilatazione, passaggi impiantistici, fondazioni);
- protette meccanicamente durante le fasi di cantiere per evitare perforazioni.

Secondo la norma UNI EN ISO 11665-8:2019 e le linee guida dell'ISS (Istituto Superiore di Sanità, 2021), le barriere anti-radon dovrebbero essere previste a livello di platea o solaio controterra, in combinazione con uno strato drenante sottostante.

2. Drenaggio e strato ventilato

L'inserimento di uno strato drenante sotto la platea di fondazione consente di ridurre la pressione del gas radon e convogliarlo verso sistemi di espulsione o dispersione. Lo strato è costituito da materiali ad elevata permeabilità all'aria come:

- ghiaia lavata (granulometria 16–32 mm).
- casseri plastici (igloo) per vespai aerati.
- geocompositi drenanti.

Questi elementi devono essere collegati a tubazioni di estrazione (orizzontali e verticali) che possono essere attivate passivamente (con tiraggio naturale) o attivamente (mediante ventilatori).



Figura 2: Sistema drenante sottosuolo

3. Sistemi di depressurizzazione del suolo

La depressurizzazione del suolo è una delle tecniche più efficaci per il controllo del radon. Si realizza tramite la posa di una rete di tubazioni sotto la platea, collegata a un ventilatore che crea una depressione sotto l'edificio, impedendo al radon di risalire verso gli ambienti interni.

La tecnica si distingue in depressurizzazione passiva e attiva.

La prima tecnica è sufficiente a limitare l'ingresso del radon (ha un costo limitato, è indicata per zone a basse concentrazioni di radon); qualora si rilevassero livelli più alti di Radon, (concentrazione $>300 \text{ Bq/m}^3$ secondo D.Lgs. 101/2020), è possibile installare un aspiratore per rendere attiva la depressurizzazione dell'ambiente.

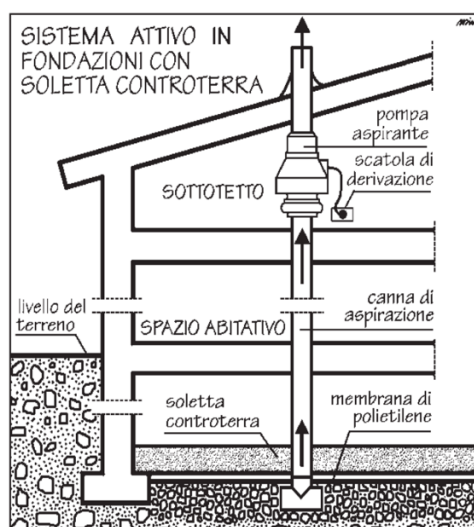


Figura 3: Sistema con soletta controterra

Le componenti principali di questa tecnica sono:

- Tubazioni in PVC (diametro 100-125 mm).
- Pozzetti o collettori di raccolta sotto la platea.
- Camino di estrazione con ventilatore (collocato esternamente o in copertura).
- Eventuali sonde di monitoraggio.

4. Ventilazione degli ambienti

Anche se non sostitutiva delle misure al livello del suolo, la ventilazione naturale o meccanica controllata (VMC) degli ambienti abitativi contribuisce a mantenere bassa la concentrazione di radon indoor, soprattutto nei locali seminterrati.

Nei nuovi edifici, è raccomandata:

- Predisposizione di impianti VMC a doppio flusso con recuperatore di calore;
- Progettazione di sfiati di compensazione e camini tecnici;
- Zonizzazione per aree funzionali (es. seminterrato, piano terra, piani superiori).

5. Predisposizioni impiantistiche:

È opportuno, inoltre, in fase di realizzazione dell'edificio considerare l'adozione delle seguenti scelte progettuali a livello di predisposizioni impiantistiche:

- Evitare interramenti diretti dei locali abitabili (favorire soluzioni tipo vespai aerati);
- Minimizzare i contatti diretti con il suolo;
- Ottimizzare la tenuta all'aria dell'involucro edilizio;
- Integrare nei computi metrici estimativi le misure di prevenzione come parte delle opere principali, non accessorie.

5. Condotte di aspirazione

Tutti i sistemi di mitigazione devono essere dotati di almeno una canna di aspirazione con il compito di convogliare all'esterno il gas proveniente dal sottosuolo.

Considerando che ogni curvatura o tratto non verticale della tubazione influisce negativamente sull'efficienza (riduzione del flusso d'aria) nella progettazione della

canna di aspirazione deve adottato un percorso più rettilineo possibile (senza inclinazioni e gomiti) al fine di ridurre l'obbligo di installazione di un aspiratore. Nel caso in cui la deviazione non fosse evitabile, per ridurre l'attrito, dovranno essere utilizzati giunti a 45°. La zona più calda della casa sarà quella più adatta al posizionamento della tubazione sporgente oltre il tetto.

Nella colonna delle tubature idro-termo sanitarie potrà essere inserita la canna di aspirazione del radon.

L'effetto di aspirazione passiva è in relazione alla ventosità, alla temperatura del sottotetto, al riscaldamento solare della tubazione ed all'eventuale presenza di impianto di condizionamento dell'aria.

Per prevenire il rientro del radon nell'edificio o abitazioni adiacenti, è necessario che la canna:

- Sporga di almeno 30 cm oltre il livello del tetto;
- Disti almeno 2 metri dalle finestre o altre aperture (compreso il comignolo dell'edificio interessato o dei fabbricati adiacenti).

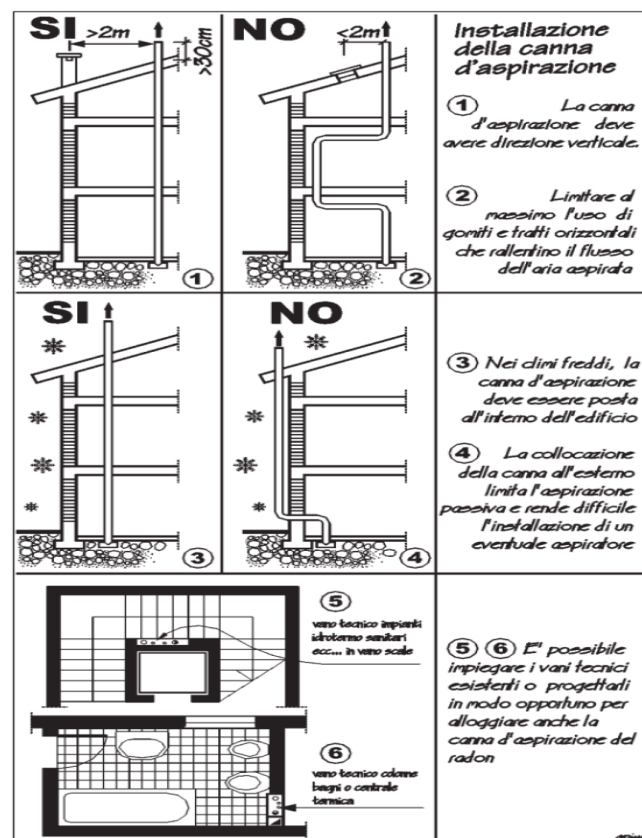


Figura 4: collocazione canna d'aspirazione

Per la realizzazione delle canne di aspirazioni è preferibile impiegare tubi in PVC del diametro di almeno 10 cm, in quanto questi migliorano la resa dei sistemi passivi e riducono la rumorosità di quelli attivi, assicurando una corretta continuità della tubazione con particolare riferimento ai giunti.

Inoltre, è opportuno ridurre al minimo la lunghezza della canna di aspirazione, dei raccordi e non creare sifoni che blocchino il flusso dei gas. Va inoltre considerata l'opportunità di isolare termicamente i tratti della canna di aspirazione passanti per i locali non riscaldati al fine di evitare fenomeni di condensa.

6. Gestione dei pozzetti.

Deve essere assicurata un'adeguata gestione dei pozzetti in quanto possono permettere il passaggio del radon proveniente dal terreno sotto la fondazione. Questi dispositivi dovranno essere dotati di coperchi sigillati ai bordi della soletta o sul bordo superiore del pozzetto. Se la manutenzione è frequente i coperchi possono essere rimovibili quindi dotati di guarnizione a tenuta stagna.

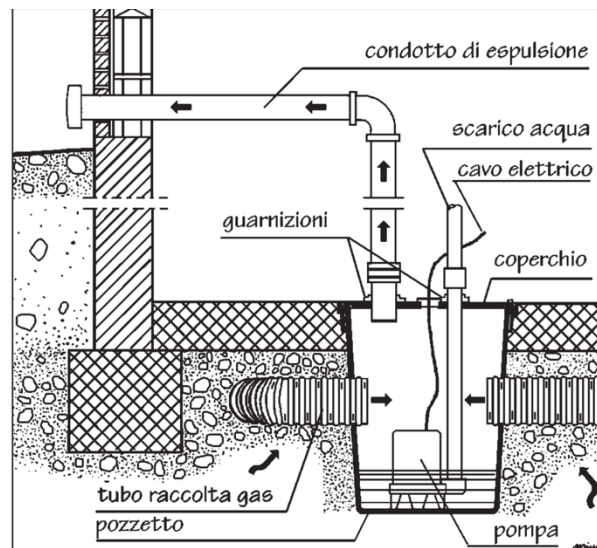


Figura 5: pozzetto per drenaggio acqua e raccolta radon

4. RISANAMENTO EDIFICI ESISTENTI

L'opera di risanamento di edifici esistenti con elevate concentrazioni di radon, può essere estremamente difficile, incerta e più costosa della prevenzione effettuata correttamente nelle nuove costruzioni. Nel caso possano essere intraprese azioni nell'ambito di interventi ristrutturazione o manutenzione straordinaria degli edifici le misure di mitigazione potranno essere simili a quelle già illustrate per la protezione preventiva dei nuovi edifici.

In caso ciò non sia possibile, può essere opportuno procedere gradualmente, attuando per primi quegli interventi che sono meno costosi ed invasivi e che, a volte, potrebbero da soli risolvere il problema.

Le azioni di risanamento, analogamente alle azioni che possono essere intraprese per la protezione preventiva dei nuovi edifici, devono essere concepite in maniera da eliminare o almeno ridurre in modo significativo la risalita di radon negli edifici dovuta alla depressione dei locali abitativi rispetto al suolo e/o all'infiltrazione.

Gli interventi attuabili, che verranno di seguito descritti, si possono generalmente suddividere in:

- eliminazione dei fattori che generano depressione nei locali abitativi;
- depressurizzazione dell'area sottostante l'edificio;
- ventilazione degli scantinati;
- ventilazione dei locali abitativi e filtrazione dell'aria;
- isolamenti e sigillatura.

Di seguito si effettua una breve descrizione dei singoli punti.

1. Eliminazione della depressione nei locali abitativi

La differenza di pressione tra l'aria del sottosuolo e quella dei locali a contatto con il suolo è la causa dell'infiltrazione del radon. È necessario, quindi, identificare i fattori responsabili di questa depressione ed eliminarli per quanto possibile. Nello specifico queste misure possono andare da semplici accorgimenti a interventi ad impatto maggiore.

Ad esempio:

- Creazione di aperture per l'apporto d'aria

Negli edifici dotati di impianti di aspirazione (es. servizi igienici) privi di aperture permanenti verso l'esterno si può creare una depressione maggiore a 20 Pa. Essa si può trasmettere alle parti della costruzione a contatto col suolo con l'effetto di aspirare il radon dal sottosuolo. In tali condizioni occorre creare aperture di dimensioni sufficienti necessarie a bilanciare l'effetto degli aspiratori con un'attenzione particolare al trattamento termico dell'aria in ingresso.

- isolamento di pozzi e camini negli scantinati

Per ridurre l'effetto del gradiente termico di eventuali pozzi e camini che attraversano diversi piani e finiscono in cantina, bastano due interventi, attuabili singolarmente o congiuntamente; I pozzi e i camini che si trovano in cantina vanno il più possibile isolati e occorre dotare i pozzi e camini di una presa d'aria esterna (con sifone).

Se ciò non sarà possibile si praticheranno in cantina aperture verso l'esterno sufficienti a controbilanciare la depressione rispetto al suolo. Anche queste prese d'aria verranno dotate di sifone per evitare un'eccessiva dispersione di calore.

- con aspirazione dell'aria:

Quando il soffitto delle cantine è realizzato con materiali o elementi molto porosi, l'aria di questi ambienti è aspirata verso i piani superiori. La depressione può essere equilibrata con un ventilatore che aspiri l'aria della cantina.

Le cantine devono essere il più possibile impermeabili per usare un ventilatore piccolo e diminuire le perdite termiche. In presenza di generatori di calore nella cantina, tale sistema può essere usato solamente se i generatori sono dotati di camere stagne di combustione. Questo tipo di intervento, infatti, può indurre una depressione che può provocare un ritorno di fumo con rischi di intossicazione (CO). Per lo stesso motivo non è da usarsi in presenza di caminetti o apparati simili a fiamma libera.

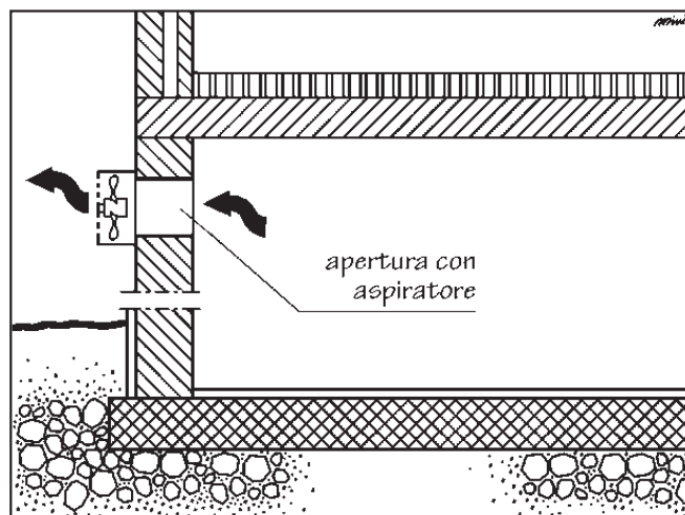


Figura 6: aspirazione aria in cantina

2 Depressurizzazione dell'area sottostante l'edificio:

La depressurizzazione del terreno situato sotto l'edificio consente l'asportazione passiva o attiva (con ventilatore) del radon.

Si possono impiegare due tecniche molto diverse l'una dall'altra:

- aspirazione dell'aria dalle intercapedini o dai vespai. L'aria fresca che rimpiazza l'aria estratta diluisce sufficientemente le piccole quantità di radon provenienti dal sottosuolo. È necessario che le aperture per la ventilazione siano di dimensioni sufficienti.
- nelle intercapedini o negli strati di terra sotto l'edificio viene generata una depressione (rispetto alla pressione atmosferica del locale immediatamente superiore all'intercapedine). In questo caso il sottosuolo deve essere compatto ed impermeabile in modo da impiegare flussi d'aria ridotti e potenze minime per ottenere una depressione sufficiente ad ostacolare l'infiltrazione del radon.

- In caso di intercapedini:

In genere gli edifici privi di cantine sono dotati di una intercapedine più o meno ampia per la protezione dall'umidità, normalmente provvista di aperture di aerazione.

L'allargamento e la disposizione ottimale (per esempio nord-sud o facendo attenzione alla direzione prevalente del vento dominante) di queste aperture possono essere sufficienti per l'espulsione del radon. In alternativa, si può installare un piccolo ventilatore rinunciando all'apertura di ulteriori prese d'aria.

- In caso di vuoto sanitario:

Il radon che penetra attraverso il suolo si accumula nel vuoto sanitario e, per espellerlo, basterà provvedere al solo inserimento di una canna d'aspirazione e di un ventilatore. Ove si debbano pavimentare locali di soggiorno con soletta di pavimentazione a contatto col terreno può risultare conveniente risolvere il problema del radon costruendo un pavimento con vuoto sanitario sottostante. In tal caso, è opportuno disporre, subito sopra gli elementi che sorreggono la pavimentazione, una membrana di polietilene per impedire l'aspirazione dell'aria dall'ambiente sovrastante.

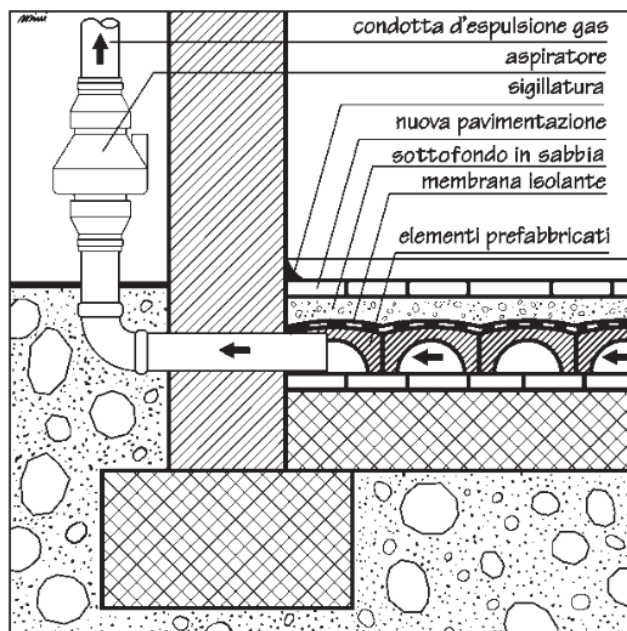


Figura 7: aspirazione radon da vuoto sanitario

- In caso di pozzo di raccolta centrale

L'aria del sottosuolo viene raccolta in un semplice pozzo sotto il pavimento esistente e dispersa mediante aspirazione. (il procedimento è più efficace se il suolo è molto permeabile).

Nonostante ciò, a volte, può risultare più semplice aspirare l'aria del sottosuolo per mezzo di più tubi che vengono fatti passare nel pavimento della cantina.

Il radon che si trova nel suolo è aspirato da sotto il pavimento; In relazione alle caratteristiche del terreno ed alle dimensioni dell'edificio, saranno necessari uno o più punti di raccolta.

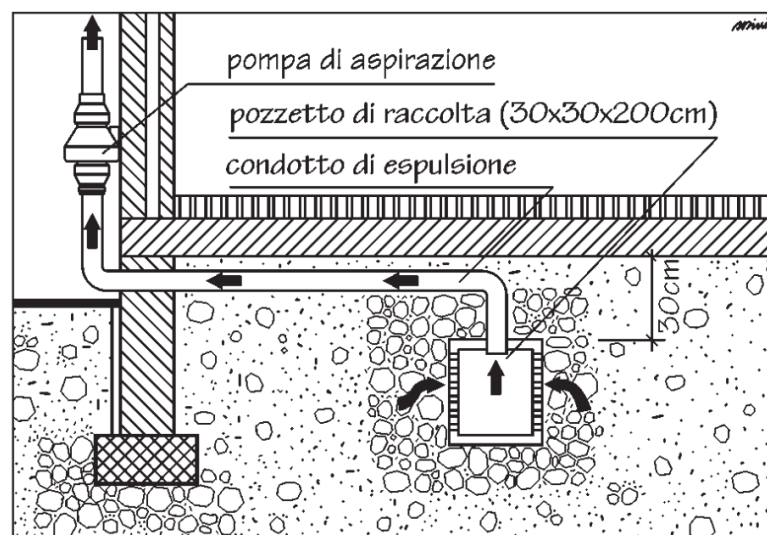


Figura 8: pozzo di raccolta centrale sotto la soletta

- con impianti di drenaggio esistenti:

Per mezzo di un ventilatore, si è aspirata l'aria del sottosuolo dalle condutture di drenaggio

esistenti, riuscendo ad abbassare notevolmente la concentrazione del radon. Tuttavia, il comportamento dell'aria nelle condutture di drenaggio è variabile da caso a caso. Inoltre, occorre montare sifoni per impedire il risucchio d'aria dalla rete di canalizzazione pubblica e dal condotto dell'acqua piovana. In funzione della permeabilità del terreno, questo metodo permette di incanalare e raccogliere il radon attorno e sotto l'edificio.

É opportuno installare una valvola a tenuta ad ogni uscita del sistema di drenaggio. Questa soluzione è consigliabile poiché nel complesso, risulta piuttosto economica.

- con pozzo esterno all'edificio:

In funzione delle caratteristiche del terreno e soprattutto in presenza di un ampio vespaio, la costruzione di pozzi di raccolta del radon esterni all' edificio offre buoni risultati e rappresenta una soluzione molto economica e poco disagiata per gli occupanti, poiché si evitano interventi sull'edificio.

- con fori passanti:

nell'ipotesi della presenza di un vespaio o comunque di uno strato poroso di materiale di riporto sotto la soletta controterra, si può ottenere una riduzione del radon mettendo in comunicazione con l'esterno detto strato attraverso l'esecuzione di alcuni fori (10-12 cm) sui muri esterni. Si avrà un deciso miglioramento collegando, ove possibile, i fori sui lati opposti con tubo forato passante di largo diametro.

- con un canale di raccolta:

Lungo le pareti interne dell'edificio, si dispone un canale che raccoglie l'aria contenente radon proveniente da fessure lineari come i giunti. Un ventilatore canale di aspirazione genera nel canale una leggera depressione e spinge all'aperto l'aria aspirata tramite un tubo di scarico. Questa tecnica è applicabile per punti d'infiltrazione ben localizzati, in particolare, per i giunti tra le pareti e la soletta di fondazione.

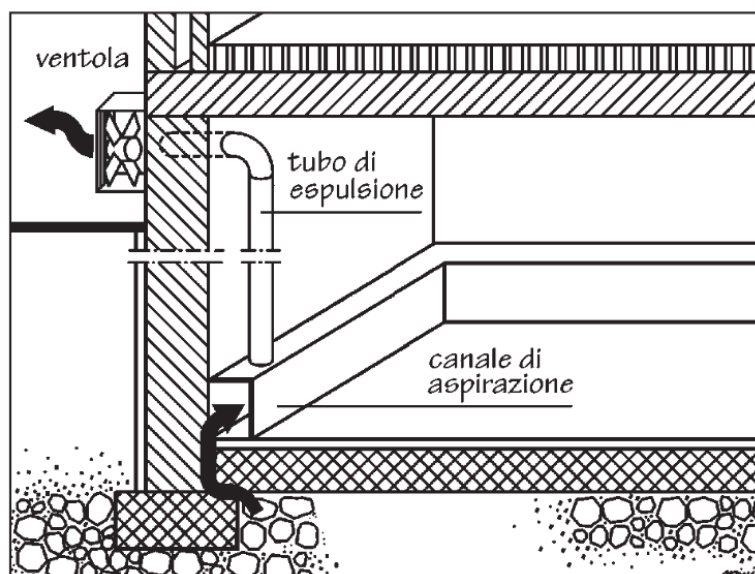


Figura 9: canale di raccolta lungo parete

3 Ventilazione degli scantinati:

Poiché il radon si infiltra dagli scantinati, operare un loro abbondante ricambio di aria può diminuirne la concentrazione al punto da rendere innocua l'aria della cantina e non avere più un trasporto rilevante di radon da questa ai locali "di soggiorno".

Se si usa un ventilatore di aspirazione in cantina, si genera una depressione che fa aumentare l'aspirazione d'aria dal sottosuolo, ma agendo questo anche nei confronti dei locali di soggiorno, impedisce al radon di penetrarvi e lo espelle all'aperto. L'intensa ventilazione della cantina in inverno ne abbassa però la temperatura; perciò, occorre isolare bene le parti della costruzione a contatto coi locali di soggiorno riscaldati (soffitto della cantina, pareti del vano scala, lato inferiore delle scale ecc.) e le condutture dell'impianto di riscaldamento. Tuttavia, in genere, nei periodi invernali la ventilazione delle cantine viene comunque ridotta. Questo tipo di intervento diventa quindi spesso poco efficace proprio nei periodi in cui l'emanazione di radon è maggiore. E evidente, quindi, il motivo per cui questa metodologia venga in genere considerata provvisoria in attesa della realizzazione di altre opere di risanamento.

4 Ventilazione dei locali abitativi e filtrazione dell'aria:

In presenza di infiltrazione di radon dalla cantina, è possibile diminuirne la concentrazione nella zona abitata intensificando il ricambio d'aria. Si produce così una riduzione temporanea della concentrazione di radon. Nei periodi freddi questa strategia presenta evidenti controindicazioni: se si aprono spesso le finestre per garantire un forte ricambio d'aria diminuisce la temperatura degli ambienti e di conseguenza anche il comfort abitativo. Una soluzione migliore è costituita dall'installazione di un impianto di ventilazione con recupero del calore. Prima dell'espulsione, tramite uno scambiatore o una pompa di calore, si estraggono il calore e l'umidità dall'aria raccolta e si trasmette il calore all'aria fresca.

Gli impianti di ventilazione con recupero del calore consentono un intenso ricambio d'aria (necessario per ridurre la concentrazione di radon) anche durante l'inverno, senza eccessive perdite energetiche.

Inoltre, il ricambio d'aria è garantito ininterrottamente e non dipende dalle abitudini degli abitanti. In alternativa esistono impianti di filtrazione dell'aria muniti di filtri a carboni attivi in grado di catturare il radon presente in un ambiente.

5 Isolamenti e sigillatura:

Per il risanamento dal radon di edifici esistenti, l'isolamento delle superfici a contatto col terreno, nella maggioranza dei casi, può essere attuato solo dalla parte interna dell'edificio.

Questo tipo d'intervento è eseguito con membrane e materiali sigillanti liquidi o spatolabili, comporta però un numero molto alto di raccordi e connessioni con il rischio di tenuta non perfetta. In questo caso, senza dover necessariamente ispirarvi, vale il principio per cui le tecniche impiegate contro l'umidità sono efficaci anche contro il radon.

Ad esempio, contro l'infiltrazione di umidità si utilizzano rivestimenti come malte o pitture liquidi o spatolabili; questi rivestimenti costituiscono un buon isolamento da radon

Inoltre, le finestre e le porte ad alto isolamento acustico sono anche ben adatte ad arginare l'infiltrazione di aria e radon.

In conclusione, la bonifica e prevenzione del radon negli edifici esistenti non si riduce a un insieme di tecniche isolate, ma si configura come un processo integrato che combina indagine, progettazione, esecuzione e controllo, alla luce delle norme vigenti e delle migliori pratiche odierne.

5. OBIETTIVO DELLA TESI

La tesi si prefigge come obiettivo principale la verifica sperimentale dell'efficacia dei metodi di mitigazione del rischio derivante dal gas radon in un edificio, realizzato negli anni 60, ed utilizzato come uffici.

Nell'edificio era stato eseguito un primo intervento di risanamento ma, in seguito ai monitoraggi periodici effettuati, è emersa la necessità di integrare le misure di mitigazione esistenti. Questa necessità si è resa utile al fine di adottare un principio di precauzione verso gli occupanti (circa 80) che utilizzano i locali in modo sistematico e continuativo.

L'azienda ha deciso, in un'ottica di miglioramento continuo della valutazione dei rischi, di cui agli articoli 17 e 28 del decreto legislativo 81/2008, di valutare approfonditamente tale rischio al fine di individuare possibili misure di mitigazione aggiuntive.

Da una lettura del campo di applicazione del D. Lgs.101/20 si evince che gli adempimenti previsti dal decreto stesso sono obbligatori nelle seguenti condizioni:

- Locali interrati – adempimento obbligatorio in presenza di lavoratori;
- Locali semi sotterranei - obbligatoria l'effettuazione delle misurazioni solo nel caso siano inseriti nelle aree prioritarie (che devono ancora essere definite dalle Regioni e alle Province autonome come previsto dalla normativa tecnica PNAR);
- Locali al piano terra - obbligatoria l'effettuazione delle misurazioni solo nel caso siano inseriti nelle aree prioritarie (che devono ancora essere definite dalle Regioni e alle Province autonome come previsto dalla normativa tecnica PNAR).

Nell'edificio in esame le misurazioni sono state effettuate nei locali al piano terra destinati ad ufficio.

Nella strategia di mitigazione originale dell'Azienda prevedeva:

- l'installazione di tre aspiratori collocati nei locali tecnici interrati al fine di assicurare una captazione ed eliminazione del gas radon e l'installazione di un estrattore esterno in corrispondenza della facciata frontale per la captazione del radon dal sottosuolo
- l'installazione di un impianto di ventilazione per assicurare una lieve sovrappressione dei locali al piano terra atta a limitare l'accesso di radon.

Queste due misure hanno sempre assicurato il rispetto dei limiti precedenti alla nuova normativa. Tuttavia, a seguito della riduzione significativa degli stessi da 500 Bq/m³ a 300 Bq/m³, si rende necessaria una valutazione più specifica con particolare riferimento ad alcuni specifici periodi annuali.

Pertanto, anche qualora dovessero essere rispettati i limiti annuali si è deciso di avviare l'istruttoria per individuare possibili soluzioni integrative che, con costi limitati, potrebbero portare ad un miglioramento significativo dei livelli di gas radon in tutti i periodi dell'anno. La medesima azienda ha svolto interventi di bonifica similari in altri edifici amministrativi del comprensorio che hanno portato ad una riduzione significativa (circa 76%) a fronte di un investimento economico relativamente ridotto. Per completezza si segnala che l'edificio è collocato in un comune non rientrante tra quelli inseriti nelle aree prioritarie e, pertanto, questi interventi non rientrano nel campo di applicazione della legislazione vigente poiché i locali utilizzati non sono collocati in aree interrate/seminterrate. Questi interventi possono essere inseriti, a pieno titolo, negli interventi di miglioramento continuo adottati dal Datore di Lavoro per la riduzione dei livelli di rischio esistenti.

6. DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO

L'edificio oggetto del presente lavoro di tesi è ubicato nella provincia di Udine ed è stato costruito intorno agli anni 60. Il fabbricato è costituito da tre piani fuori terra (piano terra, primo e secondo piano) destinati ad uso amministrativo e 2 locali tecnici interrati posti in corrispondenza delle scale di accesso ai piani superiori.

Tutti i locali del piano terra collocati in aree non corrispondenti a quelli dei locali interrati ragionevolmente poggiano su un'intercapedine riempita da materiale di risulta. Questa pratica era usuale nel periodo di costruzione dell'edificio. Si suppone che il solaio non poggi direttamente sul suolo in quanto sul perimetro esterno, intorno all'edificio, sono presenti delle bocchette di aerazione.

Di seguito di riporta una planimetria del piano terra:

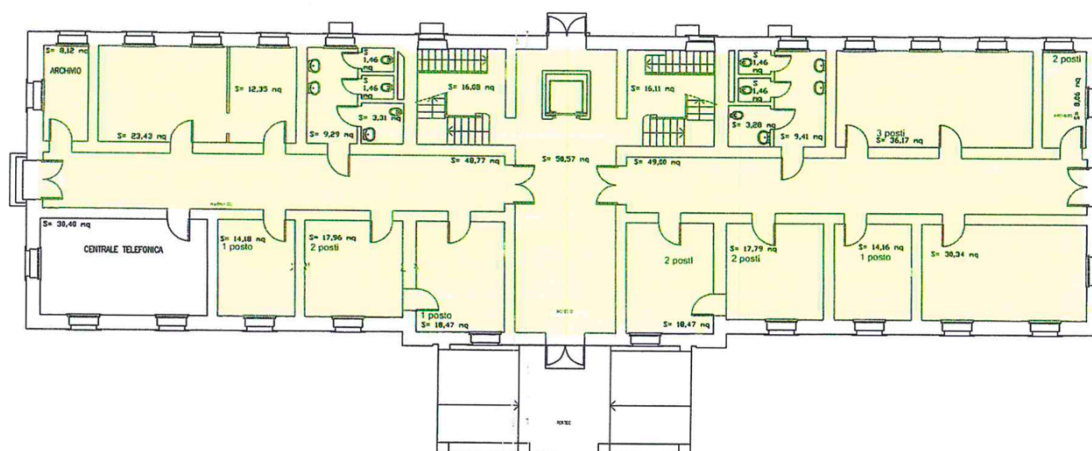


Figura 10: piantina piano terra edificio



Figura 11: accesso principale edificio



Figura 12: facciata posteriore edificio

Come anticipato, nell'edificio in esame la strategia di mitigazione del rischio radon prevede:

- l'installazione di tre aspiratori collocati nei locali tecnici interrati al fine di assicurare una captazione ed eliminazione del gas radon.

- l'installazione di un estrattore esterno in corrispondenza della facciata frontale per la captazione del radon dal sottosuolo

Figura 13-14: Estrattore numero 1 con doppia entrata



Figura 15: Bocchetta di areazione esterna



Figura 16: Estrattore numero 2



figura 17: Bocchetta di areazione estrattore numero 2



- l'installazione di un impianto di ventilazione per assicurare una lieve sovrappressione dei locali al piano terra atta a limitare l'accesso di radon.

7. MATERIALI E METODI

Nel presente elaborato di tesi vengono riportati i risultati dei campionamenti periodici eseguiti dopo gli interventi di bonifica, con lo scopo di valutare l'efficacia nel tempo delle azioni intraprese in termini di riduzione delle concentrazioni di radon all'interno dell'edificio.

Per la fase di campionamento sono state adottate metodologie validate, specifiche per la determinazione delle concentrazioni annuali.

I punti di campionamento sono stati collocati in corrispondenza delle medesime postazioni utilizzate nei monitoraggi precedenti, così da garantire la comparabilità dei dati.

Per le misure periodiche annuali, oggetto del presente studio, sono stati utilizzati campionatori passivi di tipo long-term, posizionati per un periodo di circa 4 mesi, così da consentire il calcolo della concentrazione media annuale.

Al termine del periodo di esposizione, i dispositivi sono stati raccolti e inviati ad un laboratorio accreditato per le relative analisi.

Il materiale impiegato per il campionamento comprende:

- planimetria dell'edificio;
- schede per la registrazione dei dati (numero identificativo del campionatore, denominazione del locale di posizionamento, data e ora di installazione e ritiro, ecc.);
- campionatori passivi modello Tecnorad CR39;
- materiale adesivo per il fissaggio dei dispositivi alle pareti.

Procedura operativa:

Per effettuare le misurazioni di verifica della concentrazione di attività radon in aria i campionatori sono stati posizionati all'interno dei locali come indicato nella seguente figura:

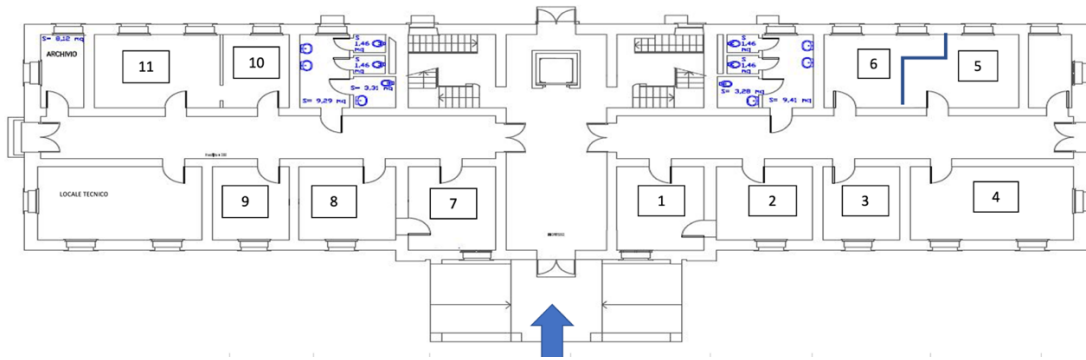


figura 18: pianta piano terra con posizione campionatori

Per le misurazioni di lungo periodo sono stati utilizzati campionatori di tipo passivo, modello Tecnorad CR39, costituiti da membrane che vengono forate dal passaggio delle particelle alfa.

I campionatori sono stati posizionati a circa 1,5 m da terra all'interno dei locali oggetto di misura utilizzando un materiale adesivo plastico rimovibile.



Figura 19 misuratore Tecnorad CR39 installato sulla parete

Trascorso il tempo previsto per l'esposizione (quattro mesi) si è provveduto alla raccolta e sostituzione dei misuratori. Nella scheda di registrazione dei dati in dotazione in corrispondenza del numero identificativo del dosimetro sostituito sono state riportate la data e l'ora di prelevamento. Successivamente, è stato installato il nuovo dosimetro che risulterà esposto per i successivi 4 mesi avendo cura di abbinare il codice univoco al codice del punto di campionamento.

I campionatori prelevati sono stati:

- inseriti nelle buste che contenevano i campionatori nuovi;
- le buste sono state chiuse con del nastro adesivo per evitare che la misurazione continuasse oltre il tempo indicato;
- sulle buste è stato riportato il codice identificativo del campionatore già esposto.

Di seguito si riportano le schede di rilevazione dei tre campionamenti effettuati:

n. punto campionamento	Data posizionamento	Ora posizionamento	Data raccolta	Ora raccolta	Codice raccolto	Codice sostituito
1	23/09/24	9:00	20/01/25	9:00	ED278009	FS5244
2	23/09/24	9:00	20/01/25	9:00	TG090987	FS5270
3	23/09/24	9:00	20/01/25	9:00	GY56123	FS5292
4	23/09/24	9:00	20/01/25	9:00	GH78654	FS3888
5	23/09/24	9:00	20/01/25	9:00	RY56780	FS5228
6	23/09/24	9:00	20/01/25	9:00	TY23568	FS4364
7	23/09/24	9:00	20/01/25	9:00	FT09652	FS5204
8	23/09/24	9:00	20/01/25	9:00	HG67854	FS3875
9	23/09/24	9:00	20/01/25	9:00	FT67809	FS3873
10	23/09/24	9:00	20/01/25	9:00	TG67547	FS5252
11	23/09/24	9:00	20/01/25	9:00	RY76598	FS5213

Tabella 1: analisi primo quadrimestre esaminato

n. punto campionamento	Data posizionamento	Ora posizionamento	Data raccolta	Ora raccolta	Codice raccolto	Codice sostituito
1	20/01/25	9:30	30/05/25	8:30	FS5244	FS6630
2	20/01/25	9:30	30/05/25	8:30	FS5270	FS6683
3	20/01/25	9:30	30/05/25	8:30	FS5292	FS6714
4	20/01/25	9:30	30/05/25	8:30	FS3888	FS5343
5	20/01/25	9:30	30/05/25	8:30	FS5228	FS5372
6	20/01/25	9:30	30/05/25	8:30	FS4364	FS5982
7	20/01/25	9:30	30/05/25	8:30	FS5204	FS5562
8	20/01/25	9:30	30/05/25	8:30	FS3875	FS6699
9	20/01/25	9:30	30/05/25	8:30	FS3873	FS6756
10	20/01/25	9:30	30/05/25	8:30	FS5252	FS6689
11	20/01/25	9:30	30/05/25	8:30	FS5213	FS6682

Tabella 2: secondo quadrimestre analizzato

n. punto campionamento	Data posizionamento	Ora posizionamento	Data raccolta	Ora raccolta	Codice raccolto	Codice sostituito
1	30/05/25	8:30	01/10/25	10:00	FS6630	FS5537
2	30/05/25	8:30	01/10/25	10:10	FS6683	FS5984
3	30/05/25	8:30	01/10/25	10:12	FS6714	FS5464
4	30/05/25	8:30	01/10/25	10:14	FS5343	FS6690
5	30/05/25	8:30	01/10/25	10:15	FS5372	FS6073
6	30/05/25	8:30	01/10/25	10:15	FS5982	FS6077
7	30/05/25	8:30	01/10/25	10:16	FS5562	FS6640
8	30/05/25	8:30	01/10/25	10:18	FS6699	FS5368
9	30/05/25	8:30	01/10/25	10:19	FS6756	FS5988
10	30/05/25	8:30	01/10/25	10:20	FS6689	FS5607
11	30/05/25	8:30	01/10/25	10:20	FS6682	FS5387

Tabella 3: terzo quadrimestre analizzato

8. RISULTATI

Nell'immagine seguente vengono riportati gli esiti delle misurazioni dei primi tre quadrimestri in corrispondenza dei punti di misura e di fianco sarà riportata la media annuale relativa all'anno di misurazione effettuato.

In particolare, nei rettangoli più piccoli partendo dal superiore, che equivale al primo quadrimestre, sono riportati in colonna i valori dei tre quadrimestri, mentre in quello affianco il valore medio corrispondente alla misura effettiva annuale.

Nel caso in cui i valori parziali risultino inferiori a 300 Bq/m³ la casella è stata colorata di verde mentre per i valori superiori alla soglia la cella è stata colorata di rosso.



Figura 20: misure rilevate

Nelle tabelle che seguono troviamo la concentrazione radon espressa per i primi due quadrimestri dell'anno corrente nella prima tabella, mentre nella seconda sono stati riportati i valori dell'ultimo quadrimestre con il calcolo medio annuo delle misurazioni effettuate e i valori di incertezza di calcolo.

Di seguito si riportano i valori in forma tabellata:

Codice di riferimento	Inizio esposizione	Fine esposizione	Concentrazione radon (Bq/m ³)	Codice di riferimento	Inizio esposizione	Fine esposizione	Concentrazione radon (Bq/m ³)
FS5244	23/09/24	20/01/25	95	FS6630	20/01/25	30/05/25	179
FS5270	23/09/24	20/01/25	78	FS6683	20/01/25	30/05/25	189
FS5292	23/09/24	20/01/25	125	FS6714	20/01/25	30/05/25	214
FS3888	23/09/24	20/01/25	104	FS5343	20/01/25	30/05/25	215
FS5228	23/09/24	20/01/25	105	FS5372	20/01/25	30/05/25	205
FS4364	23/09/24	20/01/25	114	FS5982	20/01/25	30/05/25	234
FS5204	23/09/24	20/01/25	49	FS5562	20/01/25	30/05/25	245
FS3875	23/09/24	20/01/25	88	FS6699	20/01/25	30/05/25	330
FS3873	23/09/24	20/01/25	102	FS6756	20/01/25	30/05/25	453
FS5252	23/09/24	20/01/25	80	FS6689	20/01/25	30/05/25	330
FS5213	23/09/24	20/01/25	114	FS6682	20/01/25	30/05/25	291

Tabella 4: concentrazione radon primi due quadrimestri

Codice di riferimento	Inizio esposizione	Fine esposizione	Concentrazione radon (Bq/m ³)	Media pesata (Bq/m ³)	Errore (Bq/m ³)
FS5537	30/05/25	01/10/25	85	120,9	10,7
FS5984	30/05/25	01/10/25	88	120,0	11,5
FS5464	30/05/25	01/10/25	162	168,3	13,4
FS6690	30/05/25	01/10/25	122	148,7	12,3
FS6073	30/05/25	01/10/25	113	142,5	12,0
FS6077	30/05/25	01/10/25	112	155,1	12,8
FS6640	30/05/25	01/10/25	105	135,9	12,2
FS5368	30/05/25	01/10/25	213	213,9	17,0
FS5988	30/05/25	01/10/25	256	275,5	21,6
FS5607	30/05/25	01/10/25	223	214,7	17,1
FS5387	30/05/25	01/10/25	259	223,9	17,1

Tabella 5: concentrazione radon terzo quadrimestre e media annuale

Analizzando i dati delle tabelle sopra riportate, si è deciso a fronte della presenza di valori che superano la soglia dei 300 Bq/m³ di adottare ulteriori accorgimenti che verranno di seguito descritti. In particolare, nel secondo quadrimestre analizzato, i valori sono quasi tutti almeno raddoppiati rispetto al periodo precedente. Questo valore non è giustificabile con considerazioni legate al clima esterno (es. apertura finestre) in quanto entrambi i periodi erano composti, almeno in parte, da mesi caratterizzati da temperature autunnali/invernali. Pertanto, si è deciso di procedere ad una verifica straordinaria del funzionamento dell'impianto di ventilazione e di estrazione. Un'interruzione del funzionamento, anche parziale, dell'impianto di ventilazione (sovrapressione dei locali) o di aspirazione dai locali interrati (motori non allarmabili) resta una causa plausibile per spiegare questa differenza di valori. Nonostante ciò, analizzando i valori medi annui, nessun valore supera la soglia massima di 300 Bq/m³, ma il trend rimane comunque elevato ed è opportuno provvedere gli interventi correttivi da attuare e continuare a monitorare il comportamento del gas radon consapevoli del fatto che i livelli potrebbero aumentare superando i limiti di legge e comportando un serio rischio per la salute dei lavoratori.

Interventi correttivi da attuare:

- dovranno essere sigillate tutte le crepe con materiali sigillanti elastici siliconici, per le crepe di piccole dimensioni;
- per le crepe di grandi dimensioni verrà usata malta e cemento
- verranno effettuati una serie di fori (indicativamente 3) obliqui con una perforatrice; nei fori verrà inserito un tubo di pvc forato del diametro di circa 12 cm con fori di diametro di 5 mm. Successivamente e prima dell'inserimento, il tubo sarà tappato e avvolto in uno strato di tessuto non tessuto e lo spazio intorno al tubo, una volta inserito, sarà riempito con ghiaia di pezzatura grossa. Infine, i tubi verranno collegati a degli estrattori centrifughi dalla potenza di circa 70/80 W. Di seguito si riporta uno schema indicativo:

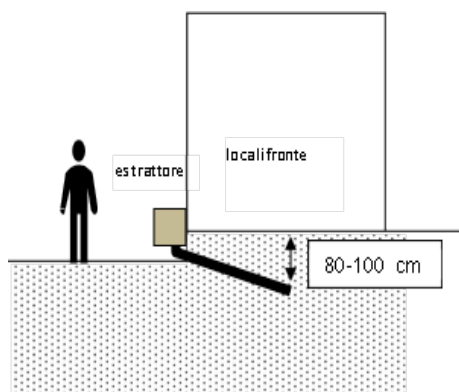


Figura 21: Schema esplicativo estrattore

Si precisa che i carotaggi verranno effettuati in corrispondenza delle bocchette di areazione esistenti che sono collocate in corrispondenza dei punti della planimetria seguente:

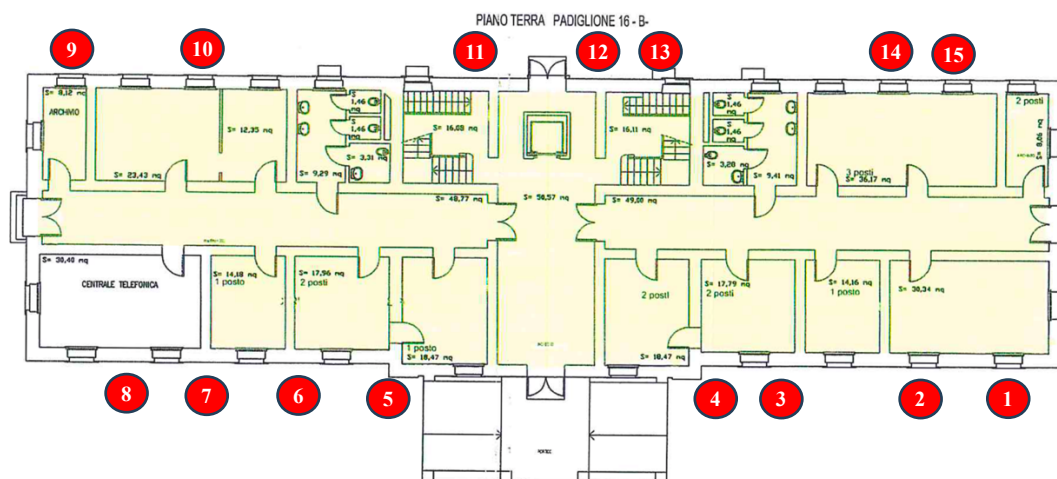


Figura 21: posizione bocchette di areazione esistenti

Punto numero 1



Punto numero 2



Punto numero 3



Punto numero 4



Punto numero 5



Punto numero 6



Punto numero 7



Punto numero 8



Punto numero 9



Punto numero 10



Punto numero 11



Punto numero 12



Punto numero 13



Punto numero 14



Punto numero 15



9. DISCUSSIONE

I dati raccolti durante il periodo di monitoraggio hanno evidenziato una significativa variabilità temporale nelle concentrazioni di radon all'interno dell'edificio oggetto di studio. Tale variabilità rappresenta un aspetto caratteristico del comportamento del radon negli ambienti confinati e risulta influenzata da molteplici fattori interconnessi. Nel caso in esame è possibile ipotizzare che un'interruzione del funzionamento/riduzione dell'efficienza dell'impianto di ventilazione e di aspirazione dei locali interrati abbia portato alle oscillazioni osservate nelle concentrazioni. In particolare, durante i mesi invernali sono stati registrati livelli più elevati, conseguenza della ridotta ventilazione naturale e del maggiore confinamento degli ambienti dovuto alle esigenze di riscaldamento. Al contrario, nei periodi più caldi, l'incremento della ventilazione naturale e le modifiche nei gradienti termici tra interno ed esterno ha portato ad una riduzione delle concentrazioni. Questa variabilità temporale sottolinea la necessità di non affidarsi a misurazioni puntuali o di breve durata per la valutazione dell'esposizione al radon, in quanto tali

rilevazioni potrebbero fornire un quadro parziale e potenzialmente fuorviante della reale situazione di rischio. L'approccio metodologico adottato in questo studio, basato su campionamenti prolungati e distribuiti nell'arco dell'anno, ha permesso di cogliere l'effettiva dinamica del fenomeno e di identificare con maggiore accuratezza i periodi di criticità.

Con i dati raccolti nei quadrimestri è stata calcolata la media annuale che, per tutti i locali, non presenta concentrazioni superiori ai 300 Bq/m³ previsti dalla normativa vigente.

Analizzando i valori medi annui si può evidenziare che sono presenti dei valori che si avvicinano sensibilmente alla soglia limite. Per tale motivo sarà opportuno, nel breve periodo, attuare gli interventi di mitigazione e continuare a monitorare l'edificio al fine di assicurare il rispetto dei valori di riferimento.

Il proseguimento del monitoraggio consentirà inoltre di verificare la stabilità nel tempo dell'efficacia degli interventi di risanamento realizzati, aspetto cruciale per garantire una protezione duratura degli occupanti. È infatti noto che l'efficacia di alcuni sistemi di mitigazione può modificarsi nel tempo a causa dell'usura dei componenti.

L'approccio basato su un campionamento quadrimestrale si è rivelato particolarmente efficace e tempestivo per rilevare le criticità legate alle concentrazioni di radon nell'edificio. Questa metodologia presenta numerosi vantaggi rispetto ad altri protocolli di misura, configurandosi come una strategia ottimale nel contesto della valutazione e gestione del rischio radon.

La suddivisione dell'anno solare in tre periodi quadrimestrali di monitoraggio ha permesso di ottenere un compromesso ideale tra accuratezza della misura, rappresentatività stagionale e tempestività nella rilevazione delle criticità.

I risultati ottenuti nel presente studio, inoltre, sottolineano con forza l'importanza della manutenzione preventiva e del monitoraggio periodico nella gestione a lungo termine del rischio radon. L'efficacia di un intervento di mitigazione non può essere considerata definitiva nel momento della sua realizzazione, ma richiede un impegno costante nel tempo per garantire la persistenza delle condizioni di sicurezza.

Un programma strutturato di manutenzione preventiva, con verifiche periodiche dello stato di funzionamento di ventilatori permette di identificare precocemente eventuali anomalie prima che queste si traducano in un decadimento delle performance del sistema e in un conseguente aumento delle concentrazioni di radon.

Particolare attenzione deve essere prestata in occasione di modifiche strutturali dell'edificio, interventi di ristrutturazione o cambiamenti significativi nelle modalità di utilizzo degli spazi che possono alterare l'equilibrio raggiunto con le misure di mitigazione implementate.

L'integrazione tra manutenzione preventiva e monitoraggio periodico configura un approccio di gestione dinamica e proattiva, che si contrappone a logiche puramente reattive di intervento solo in caso di emergenza. Tale strategia risulta economicamente vantaggiosa nel lungo periodo, in quanto i costi relativamente contenuti associati a verifiche e manutenzioni ordinarie sono ampiamente compensati dalla riduzione del rischio di dover affrontare interventi correttivi maggiori, oltre che dalla protezione continua della salute degli occupanti.

Nel contesto della gestione del rischio radon, infine, emerge con particolare evidenza l'importanza di poter fare riferimento a figure professionali specializzate, quali l'esperto in interventi di risanamento radon. Tale figura, introdotta e regolamentata dalla normativa nazionale, rappresenta un elemento chiave per garantire l'efficacia, la sicurezza e la conformità normativa degli interventi di mitigazione.

L'esperto in interventi di risanamento radon è un professionista che ha acquisito competenze specifiche attraverso percorsi formativi qualificati e che possiede le conoscenze multidisciplinari necessarie per affrontare in modo integrato le problematiche connesse alla presenza di radon negli edifici. L'esperto è in grado di interpretare correttamente i risultati delle misurazioni, di contestualizzarli rispetto alle caratteristiche specifiche dell'edificio e del sito, e di identificare le vie di ingresso del radon e i meccanismi che ne determinano l'accumulo negli ambienti confinati. Sulla base di questa analisi preliminare, può progettare soluzioni di mitigazione personalizzate, che tengano conto non solo dell'obiettivo di riduzione delle concentrazioni, ma anche delle caratteristiche strutturali dell'edificio, delle esigenze

funzionali degli occupanti, dei vincoli economici e delle possibili interferenze con altri sistemi impiantistici.

Dal punto di vista normativo, la figura dell'esperto in interventi di risanamento radon assume un ruolo formale e riconosciuto. Il D.lgs. 101/2020 prevede specifici requisiti per l'abilitazione all'esercizio di tale professione e ne disciplina le competenze e le responsabilità.

10. CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha affrontato una problematica di grande rilevanza per la salute pubblica e la sicurezza nei luoghi di lavoro, analizzando un intervento concreto di mitigazione del radon in un edificio storicamente caratterizzato da livelli di concentrazione superiori ai valori di riferimento normativi.

Il radon rappresenta un rischio spesso poco valutato, caratterizzato dall'assenza di percezione sensoriale immediata e da effetti sulla salute che si manifestano dopo anni di esposizione cronica.

La figura del tecnico della prevenzione assume un ruolo centrale nell'identificazione precoce delle situazioni di rischio attraverso attività di campionamento e monitoraggio ambientale finalizzato alla gestione dei processi di valutazione del rischio.

Il caso studio analizzato in questa tesi ha dimostrato come un intervento di mitigazione tempestivo e tecnicamente appropriato possa ridurre significativamente l'esposizione al radon, confermando che la prevenzione non solo è possibile, ma è anche efficace ed economicamente sostenibile.

Nello specifico il Documento di Valutazione dei Rischi (DVR) rappresenta lo strumento fondamentale attraverso cui si realizza concretamente l'obbligo di tutela della salute e sicurezza dei lavoratori sancito dal D.lgs. 81/2008. Con l'introduzione del D.lgs. 101/2020, il radon entra definitivamente e organicamente nel quadro dei rischi da valutare obbligatoriamente nei luoghi di lavoro, con particolare riferimento ai settori e alle situazioni a maggiore rischio di esposizione.

La valutazione del rischio radon deve essere integrata nel documento di valutazione del rischio secondo un approccio sistematico e metodologicamente rigoroso. Tale valutazione non può limitarsi a un mero adempimento formale, ma deve costituire un processo dinamico che parta dall'identificazione delle aree e delle attività potenzialmente a rischio, proceda con la misurazione delle concentrazioni di radon secondo protocolli standardizzati e si concluda con la stima dell'esposizione dei lavoratori e l'individuazione delle eventuali misure di prevenzione e protezione necessarie.

Particolare importanza riveste la capacità di individuare le misure di mitigazione più appropriate al contesto specifico, valutandone la fattibilità tecnica, l'efficacia attesa, i costi di implementazione e le possibili interferenze con altri aspetti della sicurezza e della salute nei luoghi di lavoro. Il documento di valutazione del rischio deve quindi contenere non solo la caratterizzazione del rischio ma anche una programmazione dettagliata degli interventi di bonifica, con la definizione di responsabilità, tempi di attuazione e risorse necessarie.

L'aggiornamento periodico del documento di valutazione del rischio costituisce un ulteriore elemento essenziale. Come emerso dal presente studio, le concentrazioni di radon possono variare nel tempo in funzione di molteplici fattori e l'efficacia degli interventi di mitigazione deve essere verificata attraverso monitoraggi post-intervento e controlli periodici.

La protezione della salute dei lavoratori esposti al radon rappresenta un obiettivo prioritario delle politiche di prevenzione e sicurezza sul lavoro. Il radon, classificato dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) come cancerogeno di gruppo 1, è riconosciuto come la seconda causa di tumore polmonare dopo il fumo di tabacco e la prima causa tra i non fumatori.

L'intervento di mitigazione analizzato in questa tesi ha dimostrato concretamente come sia possibile ridurre significativamente l'esposizione dei lavoratori attraverso soluzioni tecniche appropriate. La riduzione delle concentrazioni di radon non si traduce solo in un beneficio immediato in termini di conformità normativa, ma genera

un impatto positivo di lungo periodo sulla salute dei lavoratori, contribuendo alla diminuzione del rischio di sviluppare patologie correlate.

È importante sottolineare che la tutela della salute dei lavoratori non si esaurisce con l'implementazione di interventi tecnici di mitigazione. Un programma completo di protezione deve includere anche attività di informazione e formazione, affinché i lavoratori siano consapevoli dei rischi a cui sono esposti, comprendano l'importanza delle misure di protezione adottate e collaborino attivamente al mantenimento di condizioni di sicurezza.

Il Piano Nazionale Radon (PNR) rappresenta lo strumento strategico attraverso cui l'Italia intende affrontare in modo organico e coordinato la problematica del radon, sia negli ambienti di vita che nei luoghi di lavoro. Questo provvedimento legislativo si propone di stabilire una strategia nazionale di lungo periodo per la riduzione del rischio radon, integrando azioni di prevenzione, monitoraggio, bonifica, formazione e comunicazione del rischio.

Tra gli obiettivi principali del Piano Nazionale Radon figura l'identificazione delle aree del territorio nazionale caratterizzate da maggiore probabilità di elevate concentrazioni di radon, le cosiddette "aree prioritarie". La mappatura del rischio radon rappresenta uno strumento conoscitivo fondamentale per orientare le politiche di prevenzione e per indirizzare le risorse verso le situazioni di maggiore criticità.

Il PNR prevede inoltre azioni specifiche per la promozione della consapevolezza del rischio radon nella popolazione e tra gli operatori professionali. Campagne di informazione e sensibilizzazione, attività formative rivolte ai professionisti del settore edilizio, impiantistico e della prevenzione, e iniziative di comunicazione istituzionale sono strumenti indispensabili per costruire una cultura della prevenzione che vada oltre gli obblighi normativi e diventi patrimonio condiviso della società.

L'adozione di tecniche costruttive e di soluzioni architettoniche che limitino l'ingresso del radon dal suolo rappresenta l'approccio più efficace ed economico per prevenire il problema alla fonte, evitando la necessità di costosi interventi di bonifica successivi. In questo ambito, l'aggiornamento delle normative tecniche edilizie e la formazione dei progettisti e delle maestranze costituiscono priorità strategiche.

Analizzando il lavoro svolto in questa tesi un primo ambito di evoluzione potrebbe essere quello connesso con le tecnologie di monitoraggio del radon. L'avvento di dispositivi di misura in continuo sempre più affidabili, economicamente accessibili e dotati di connettività, introdurrà progressivamente la prospettiva di implementare sistemi di monitoraggio in tempo reale che permettano di rilevare immediatamente variazioni significative nelle concentrazioni di radon. Questi sistemi potrebbero essere integrati con piattaforme digitali di gestione dei dati che consentano la visualizzazione remota delle misurazioni, l'invio automatico di alert in caso di superamento di soglie predefinite e l'analisi statistica avanzata delle tendenze temporali.

Tale evoluzione tecnologica potrebbe trasformare radicalmente l'approccio al monitoraggio, passando da monitoraggio passivo quadrimestrale a un controllo continuo.

Una seconda prospettiva di particolare interesse riguarda l'integrazione dei sistemi di mitigazione del radon con i più ampi sistemi di gestione e automazione degli edifici; i nuovi edifici cosiddetti "intelligenti" possono incorporare logiche di controllo che ottimizzino automaticamente la ventilazione e la depressurizzazione del suolo in funzione dei livelli di radon rilevati in tempo reale, bilanciando le esigenze di protezione dalla radioattività con quelle di efficienza energetica e comfort ambientale. Questa integrazione richiederà lo sviluppo di algoritmi di controllo avanzati e di interfacce di comunicazione tra i diversi sistemi impiantistici.

Sul versante degli interventi di mitigazione, invece, la ricerca potrebbe concentrarsi sullo sviluppo di soluzioni innovative più efficaci, economiche e facilmente implementabili.

Particolare attenzione merita l'esplorazione di materiali da costruzione a ridotta permeabilità al radon, di rivestimenti superficiali con proprietà barriera, di sistemi di ventilazione a recupero di calore ottimizzati per la riduzione del radon, e di tecniche di depressurizzazione del suolo a basso consumo energetico. L'innovazione in questo campo dovrebbe essere guidata da una logica di sostenibilità complessiva, valutando non solo l'efficacia nella riduzione del radon, ma anche l'impatto ambientale, il consumo energetico e il ciclo di vita delle soluzioni proposte.

Dal punto di vista normativo, le prospettive future includono l'ulteriore rafforzamento e armonizzazione del quadro regolatorio, sia a livello nazionale che europeo. In particolare, potrebbe essere opportuno estendere gli obblighi di valutazione del rischio radon anche ad ambiti attualmente non esplicitamente contemplati, definire criteri più stringenti per le nuove costruzioni nelle aree ad alto rischio, e stabilire meccanismi di incentivazione economica per gli interventi di bonifica nelle abitazioni private.

Infine, una prospettiva di grande rilevanza riguarda lo sviluppo di strategie innovative di comunicazione del rischio e di coinvolgimento attivo dei cittadini. L'utilizzo di piattaforme digitali partecipative, di applicazioni mobili per la segnalazione e la condivisione di dati sul radon, di campagne che coinvolgano i cittadini nel monitoraggio territoriale, potrebbero contribuire a innalzare significativamente il livello di consapevolezza collettiva e a promuovere comportamenti preventivi. La trasparenza nella condivisione dei dati di monitoraggio e la possibilità per i cittadini di accedere facilmente alle informazioni sul rischio radon nel proprio territorio rappresentano elementi fondamentali per costruire fiducia nelle istituzioni e adesione alle politiche di prevenzione.

Il presente lavoro di tesi ha confermato che il rischio radon può essere efficacemente affrontato attraverso un approccio integrato che coniughi competenze tecniche specialistiche, impegno istituzionale, coinvolgimento dei datori di lavoro e dei lavoratori e consapevolezza collettiva. L'esperienza concreta dell'intervento di mitigazione analizzato ha dimostrato che soluzioni tecnicamente appropriate, accompagnate da un monitoraggio rigoroso e da una gestione attenta nel tempo, possono ridurre significativamente l'esposizione al radon proteggendo efficacemente la salute degli occupanti.

Sitografia:

- ARPA FVG: Radon in Friuli-Venezia Giulia;
- Ministero della Salute: Radon e Salute;
- Istituto Superiore di Sanità (ISS): Radon
- WHO – Economic Cost of Air pollution
- ARPA FVG: Radon e Aree prioritarie FVG
- ARPA FVG : indicazioni e proposte per la protezione degli edifici dal radon

Bibliografia:

- WHO (World Health Organization): Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2010.
- WHO (World Health Organization). Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. Geneva: WHO; 2009.
- IARC (International Agency for Research on Cancer). Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Volume 100D: Radiation. Lyon: IARC; 2012.