

Spett.le
Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica
Direzione Generale Valutazioni Ambientali
Divisione V - Procedure di valutazione VIA e VAS

OGGETTO **Presentazione osservazione.**
Progetto: "PIZZONE II" - Impianto di generazione e pompaggio"
Procedura: Valutazione Impatto Ambientale (PNIEC-PNRR)
Codice Procedura: 9903

Il/La Sottoscritto/a **Paola BELLI** presenta, ai sensi del D.Lgs.152/2006, la seguente osservazione per la procedura di **Valutazione Impatto Ambientale (PNIEC-PNRR)** relativa al Progetto in oggetto.

Informazioni generali sui contenuti dell'osservazione

- Aspetti programmatici e pianificatori
- Aspetti ambientali

Aspetti ambientali oggetto delle osservazioni

- Aria
- Clima
- Acqua
- Suolo
- Salute umana
- Rischi naturali e antropici
- Monitoraggio ambientale

Osservazione

Il Radon è un gas che si forma dal decadimento dell'Uranio, elemento radioattivo. Il suo isotopo radioattivo 222 ha un elevato danno biologico , perché se costantemente inalato causa neoplasia polmonare. Il Radon si forma di continuo all'interno della crosta terrestre, ma rimane confinato nelle rocce e nelle acque sotterranee. Opere di disturbo come perforazioni amplificano sia la sua formazione che la possibilità di arrivare a diffondersi all'aperto, con grave pericolo per la salute.

Il Sottoscritto dichiara di essere consapevole che le presenti osservazioni e gli eventuali allegati tecnici saranno pubblicati sul Portale delle valutazioni e autorizzazioni ambientali VAS-VIA-AIA del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica.

Elenco Allegati

Allegato - Dati Personali	OSS_2205_VIA_DATI_PERS_20241010.pdf
Allegato 1 -	OSS_2205_VIA_ALL1_20241010.pdf
Allegato 2 -	OSS_2205_VIA_ALL2_20241010.pdf

Data 10/10/2024

Paola BELLI

PIZZONE 2 e RADON

Il Radon (simbolo chimico Rn) deriva dal decadimento alfa del Radio, che a sua volta deriva dal decadimento dell' Uranio (elemento radioattivo).

È un gas nobile, pesante, pericoloso per la salute perché radioattivo , inodore, insapore e pertanto non percepibile con i nostri sensi.

In particolare è pericoloso per la salute (cioè ha un elevato danno biologico) il suo isotopo 222, poiché ha un tempo di dimezzamento di circa 4gg , tale cioè da permanere attivo e radioattivo per un periodo di tempo significativo per essere inalato e creare importante danno biologico (neoplasia polmonare).

È anche solubile in acqua e quando viene rilasciato in aria vi rimane – fortunatamente- in quantità limitata grazie ad un continuo processo di volatilizzazione.

Per questo la sua concentrazione nell'atmosfera è di norma bassa.

Viceversa, la sua presenza in acque più profonde, come quella delle faglie acquifere e delle sorgenti sotterranee è risaputa essere maggiore .

(Nel suolo il Radon è presente in terreni calcarei, tufacei, sabbiosi e ghiaiosi ed in suoli “ permeabili” ricchi di acque e detriti).

All'interno della crosta terrestre avvengono continuamente processi di trasformazione di materiale radioattivo , così anche il processo di trasformazione del radio in Radon è frequente e libera anche molecole di elio ed una limitata quantità di energia.

È proprio tale energia che permette al Radon, che- ricordiamolo- è un gas e quindi si spande di muoversi nel sottosuolo.

Se tale gas incontra un corpo solido , per esempio una roccia, il suo movimento sarà molto limitato (bassa energia, forte resistenza).

La progressione del gas invece aumenta se l'atomo gassoso viene generato all'interno di acqua ed ancora di più se lo stesso atomo si libera in aria (stessa energia ma minore resistenza).

Quindi, quando una zona di faglia sarà sottoposta costantemente ad una azione di disturbo (quale trivellazione e perforazione, formazione rapida di detriti, vibrazioni, possibile irruzione di acqua durante gli scavi sotterranei), allora verrà liberata una quantità maggiore del Rn

custodito nella roccia, che facilmente risalirà in atmosfera camminando lungo la galleria in costruzione.

Tale breve disamina sul Rn (che ricordiamo essere fattore eziologico sicuramente correlato a neoplasia polmonare quando costantemente inalato) è sufficiente per testimoniare lo sconcerto che si prova leggendo nella revisione del progetto definitivo Pizzone 2 la sezione “Piano preliminare di Utilizzo delle terre e rocce di scavo “ .

In tutto il capitolo l’Enel non solo propone l’approccio ad un enorme lavoro di scavo senza mai menzionare il tema “ Radon” ma anzi appare evidente come non sia stata fatta, neppure teoricamente, una valutazione di tale elemento all’interno delle rocce interessate.

Nel Piano preliminare di utilizzo di terre e rocce di scavo (evidenziate come calcari, calcareniti e Flysch) , si legge a pag 77 e seguenti come le opere di scavo e trivellazione attraverseranno – con certezza, faglie e terreni calcarei che intercettano / attraversano falde e terreni disciolti da detriti di falda.

(senza neppure poi parlare di tutta la ipotetica narrazione dell’andamento della linea della falda che “ si troverebbe” a quota inferiore rispetto alla galleria, appare quantomeno prudente l’uso del verbo al condizionale).

Concludendo, direi che l’Acqua va trattata con grande deferenza, considerando la sua indole imprevedibile (lo sa bene qualunque malcapitato che cerchi di capire l’origine della sua infiltrazione in cantina).

Ma il più grande rispetto si deve alla Natura ed alla sua capacità di mantenersi ancora in equilibrio, nonostante i continui tentativi di volerla addomesticare per appagare le nostre necessità.

Monitoraggio del gas radon nello scavo meccanizzato di gallerie

Massimo CONCILIA

Mechanised Tunnelling Expert, Rome – Italy

*“Everything should be made as simple as possible, but not simpler.”
Albert Einstein*

Il Radon è un gas naturale che per le sue proprietà radioattive può essere causa per l'uomo di seri problemi alla salute, soprattutto quando si trova in elevate concentrazioni in ambienti chiusi e confinati, come possono essere le condizioni di lavoro in sotterraneo.

Durante lo scavo meccanizzato di una galleria per scopi idrici nel territorio di Hong Kong, è stato implementato un protocollo per la misura di gas Radon al fine di monitorarne con continuità l'eventuale presenza e verificare l'efficacia delle misure poste in essere per mitigare il rischio per gli addetti ai lavori.

Lo scavo della galleria, avente lunghezza pari a circa 7 km e diametro nominale di scavo di 3.56 m, è stato eseguito dalla Società SELI di Roma (www.selitunnel.com), utilizzando una TBM Robbins-Grandori modello 1111-234, del tipo a doppio scudo telescopico.

I lavori sono stati eseguiti in accordo con la normativa anglosassone in materia di sicurezza negli ambienti di lavoro British Standard 6164:1990.

Introduzione

Il Radon, il cui simbolo chimico è R_n , è un gas nobile e radioattivo, quindi chimicamente inerte ed energeticamente instabile, che si presenta inodore e incolore alle condizioni standard ($T=298.15$ K, $P=101$ kPa) e si origina dal decadimento di tre isotopi, il più importante dei quali è l'Uranio ${}_{92}U^{238}$ in quanto è, fra i tre nuclidi capostipiti, quello più abbondante in natura.

La principale fonte di emissione di questo gas sono le rocce metamorfiche, e in particolare quelle di elevato grado di metamorfismo come lo gneiss e gli scisti metamorfici e quelle ignee, quali ad esempio i graniti e i porfidi.

La sua pericolosità per l'uomo è dovuta all'elevata quantità di particelle α e alla notevole densità di radiazioni ionizzanti emesse durante il processo di decadimen-

to; l'inalazione di aria con elevate concentrazioni di R_n per periodi temporali anche relativamente brevi, può dare origine a gravi forme di carcinoma della trachea e dei polmoni.

In Italia, il D.Lgs. No. 241 del 26 maggio 2000, fissa il limite massimo di concentrazione di questo gas negli ambienti di lavoro in 500 Bqm⁻³ che può essere ritenuta equivalente, in termini di danno biologico derivanti dall'inalazione di sostanze radioattive, a circa 25 mSv annui, essendo il Becquerel (Bq) l'unità di misura nel Sistema SI dell'attività di un radionuclide che corrisponde ad una attività di decadimento al secondo (1 Bq = 1 TPS; *Transmutaion Per Second*), mentre il Sievert (Sv) è l'unità di misura della dose equivalente di radiazioni e costituisce pertanto una misura del danno provocato dalle radiazioni sull'organismo umano.

Da studi condotti dall'Agenzia Americana

per l'Ambiente (EPA), che fissa il livello di accettabilità della concentrazione di questo gas in 150 Bqm⁻³, equivalenti a circa 4 pCi⁻¹, risulta che la polverosità dell'ambiente di lavoro, peraltro tipica dello scavo meccanizzato in formazioni rocciose ad elevata resistenza meccanica, aumenta notevolmente il rischio connesso con la presenza di questo gas radioattivo.

Tale soglia di accettabilità, che equivale ad accettare la presenza di $7E^4$ atomi di R_n per litro di aria, implica che per un essere umano adulto, il cui fabbisogno di aria è mediamente pari a circa 20 lmin⁻¹, la quantità di atomi radioattivi per ogni minuto di respirazione in un ambiente con tale concentrazione di R_n è pari a $1E^6$.

Durante i lavori di costruzione di una galleria idraulica sull'isola di Lantau nel territorio di Hong Kong è stato implementato un protocollo per il monitoraggio della presenza di gas Radon durante la fase di scavo meccanizzato.

La galleria, della lunghezza di circa 7 km e area nominale di scavo pari 10 m², è stata perforata in formazioni granitiche, con fresa a piena sezione del tipo a doppio scudo telescopico, senza il ricorso ai conci prefabbricati di rivestimento in considerazione della buona qualità attesa dell'ammasso roccioso da attraversare.

L'attività di scavo è stata condotta facendo riferimento alla normativa anglosassone in materia di sicurezza, codificata nella specifica BS6164:1990, che rimandando alla normativa di prevenzione sul rischio da esposizione a radiazioni ionizzanti, ha raccomandato un'analisi del rischio con un

monitoraggio sistematico durante l'avanzamento e l'adozione di misure di mitigazione del rischio stesso in caso di superamento del livello di accettabilità.

Proprietà fisico-chimiche del gas Radon

Come anticipato nel precedente paragrafo, il Radon è un gas nobile e radioattivo, inodore e incolore, debolmente solubile in acqua (273.15 K, $1.013 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$; $5.1 \times 10^{-1} \text{ g/l}$) avente numero atomico 86, massa atomica relativa pari a 222 e che in condizioni standard ha una massa volumica di 9.73 g/l che lo fa risultare il più pesante gas presente in natura.

La molecola di Radon consiste di un solo atomo con un diametro atomico pari a $3.7 \times 10^{-1} \text{ nm}$, avente configurazione elettronica del tipo $5s^2 5p^6 5d^{10} 6s^2 p^6$ e un'energia potenziale di ionizzazione pari a 10.75 eV che suggerisce, nonostante si tratti di un atomo appartenente all'VIII gruppo del Sistema Periodico degli Elementi, la possibilità d'interazione con altri elementi; a questo proposito sono noti processi di sintetizzazione in laboratorio di fluoruri di R_n e composti artificiali del R_n con fenoli.

Il Radon oltre ad essere un gas nobile è anche un metalloide avente temperatura di fusione pari a circa 202 K e punto di ebollizione pari a circa 211 K, dove l'incertezza delle misure è associabile alla mobilità molecolare.

La sua posizione nella tavola periodica degli elementi è, infatti, a cavallo fra quella dei metalli e quella dei non metalli, quindi presenta caratteristiche chimico-fisiche di entrambi i gruppi e si comporta chimicamente in maniera simile a quella del Boro, Germanio, Antimonio e Polonio.

Proprietà radioattive del Radon

Dal processo di decadimento radioattivo degli isotopi dell'Uranio ${}_{92}\text{U}^{238}$, ${}_{92}\text{U}^{235}$ e del Torio ${}_{90}\text{Th}^{232}$, si originano tre diverse famiglie radioattive cui appartengono gli isotopi del radon ${}_{86}\text{Rn}^{222}$, ${}_{86}\text{Rn}^{220}$ e ${}_{86}\text{Rn}^{219}$.

In particolare l'isotopo ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ si genera dal processo di decadimento di tipo α dell'isotopo ${}_{92}\text{U}^{238}$, che è, dei nuclidi capostipiti, il più abbondante in natura, mentre

da quelli del Torio e dell'isotopo ${}_{92}\text{U}^{235}$ si originano rispettivamente gli isotopi ${}_{86}\text{Rn}^{220}$ e ${}_{86}\text{Rn}^{219}$.

Il processo di decadimento dell'isotopo ${}_{92}\text{U}^{238}$ è riportato in forma sintetica in Tabella 1, nella quale sono riportati i nomi storici delle specie radioattive, il simbolo

chimico di ciascun nuclide prodotto dal decadimento, il tipo di decadimento con indicazione del valore delle costanti caratteristiche e quello dell'energia emessa nel processo.

Considerando che il tempo di dimezzamento del nuclide ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ è pari a 3.82 giorni,

Tab. 1 - La serie di decadimento radioattivo dell'isotopo ${}_{92}\text{U}^{238}$.

Specie Radioattiva	Nuclide			Tipo di Decadimento	Tempo di dimezzamento	Costante di decadimento (sec-1)	Energia della particella (MeV)
	Simbolo	Z	A				
Uranium I (UI)	U	92	238	α	4.5E9 anni	4.88E-18	4.2
Uranium X ₁ (UX ₁)	Th	90	234	β	24.1 giorni	3.33E-07	0.19
Uranium X ₂ (UX ₂)	Pa	91	234	β	1.18 min	9.77E-03	2.32
Uranium Z (UZ)	Pa	91	234	β	6.7 ore	2.88E-05	1.13
Uranium II (UII)	U	92	234	α	2.5E5 anni	8.80E-14	4.768
Ionium (Io)	Th	90	230	α	8E4 anni	2.75E-13	4.68 m
Radium (Ra)	Ra	88	226	α	1620 anni	1.36E-11	4.777 m
Radon (Rn)	Rn	86	222	α	3.82 giorni	2.10E-06	5.486
Radium A (RaA)	Po	84	218	α, β	3.05 min	3.78E-03	a: 5.998 β : ?
Radium B (RaB)	Pb	82	214	β	26.8 min	4.31E-04	0.7
Astatine-218 (A ₂₁₈)	At	85	218	α	2 sec	4.00E-01	
Radium C (RaC)	Bi	83	214	α, β	19.7 min	5.86E-04	a: 5.51 m β : 3.17
Radium C' (RaC')	Po	84	214	α	1.64E-4 sec	4.23E+03	7.683
Radium C'' (RaC'')	Tl	81	210	β	1.32 min	8.75E-04	1.9
Radium D (RaD)	Pb	82	210	β	19.4 anni	1.13E-09	1.70E-02
Radium E (RaE)	Bi	83	210	β	5 giorni	1.60E-06	1.155
Radium F (RaF)	Po	84	210	α	138.3 giorni	5.80E-08	5.3
Thallium-206 (Tl ₂₀₆)	Tl	81	206	β	4.2 min	2.75E-03	1.51
Radium G (RaG)	Pb	82	206	stabile			

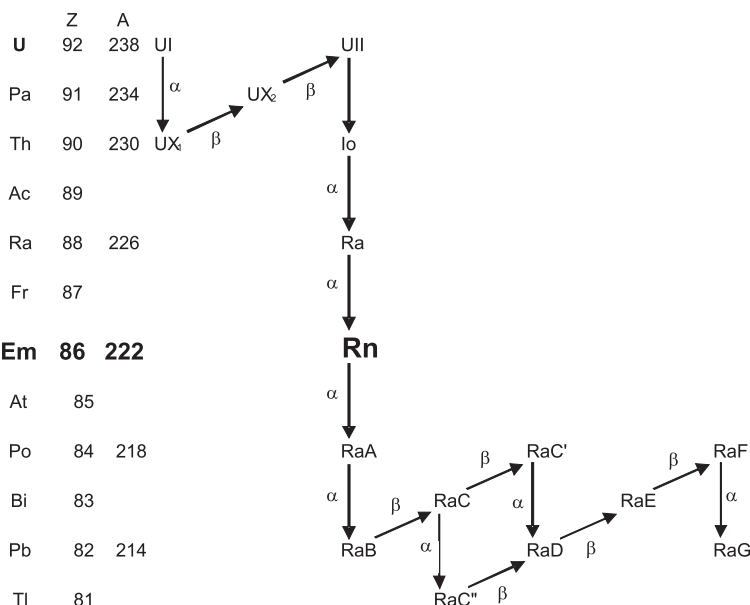


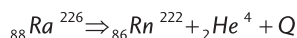
Fig. 1 - Schematizzazione del processo di decadimento radioattivo dell'isotopo ${}_{92}\text{U}^{238}$.

mentre quelli dei nuclidi ${}_{86}\text{Rn}^{220}$ e ${}_{86}\text{Rn}^{219}$ sono rispettivamente pari a 55.6 e 3.92 secondi, si capisce come ai fini del danno biologico solamente il più pesante degli isotopi del Rn costituisca un reale pericolo per l'uomo.

Emanazione e mobilità del Rn negli ammassi rocciosi

Il processo di formazione del gas Radon dal decadimento del Radio (${}_{88}\text{Ra}^{226}$) fu osservato per la prima volta dai coniugi Pierre e Marie Curie nel 1898.

Il processo di decadimento del Radio oltre la liberazione di energia comporta l'espulsione di un atomo di Radon e uno di Elio, o di una particella α , ovvero:



Essendo Q l'energia che si libera nel processo di fissione; la particella α , energeticamente, possiede il 98.1% dell'energia totale Q, mentre l'energia rimanente consente all'atomo di Rn di muoversi all'interno dei minerali costituenti una roccia, lungo traiettorie di lunghezza pari a circa 40 nm che diventano 0.1 microns se l'atomo si genera in acqua o infine $6E^{-2}$ mm se si libera in aria.

Il processo di decadimento dei nuclidi ${}_{92}\text{U}^{238}$ e ${}_{90}\text{Th}^{232}$ è analogo a quello appena descritto per il Radio e se durante tale processo l'atomo di Rn ricade all'interno di un corpo solido, come ad esempio all'interno di un costituente mineralogico di una roccia, la possibilità di sfuggire in atmosfera, considerando la scarsa energia posseduta dall'atomo di Rn, dipende esclusivamente dalla presenza di fratture o altrimenti dall'attività di disturbo creata, ad esempio, dallo scavo della galleria. L'uranio e il torio sono largamente distribuiti nella crosta terrestre che mediamente

contiene 3 ppm di Uranio corrispondente a circa 36 Bqkg⁻¹ e fino a 11 ppm di Torio cui corrispondono circa 44 Bqkg⁻¹.

Le rocce mineralogicamente costituite da fosfati contengono Uranio in quantità variabile da 8 a 400 ppm, mentre le sabbie monzonitiche possono arrivare a contenere fino al 10% di Torio.

Nella tabella che segue, sono riportate le misure delle concentrazioni di ${}_{92}\text{U}^{238}$ e ${}_{90}\text{Th}^{232}$ nelle rocce e nelle terre.

È interessante osservare che l'emissione di Radon e Torio non è esclusiva delle rocce ignee e metamorfiche, anzi si può notare che le terre, e in particolare alcune sabbie, hanno concentrazioni del 65% superiori a quelle osservate per gli ammassi rocciosi.

Protocollo di misura e dati osservazionali

Il protocollo adottato per il monitoraggio della presenza di gas radioattivi in galleria durante la fase di scavo, certamente la più critica, considerando gli elevati valori di temperatura e umidità relativa dell'aria e l'inevitabile presenza di polvere, è stato basato sulla necessità di misurare la concentrazione di gas Radon e Thoron, con continuità su intervalli discreti.

Il Thoron è l'isotopo del Radon con massa atomica relativa pari a 220, appartenente alla famiglia radioattiva del Torio, che pur avendo un'emivita molto breve ($t_{1/2} = 55.6$ s) possiede una notevole tossicità, anche superiore a quella del Rn²²².

Allo scopo di valutare la distribuzione statistica della concentrazione di gas radioattivi nell'intervallo di tempo corrispondente a quello totale giornaliero a disposizione per le attività di scavo, il monitoraggio è stato implementato per intervalli di tempo pari a ventiquattro ore ed in alcuni casi per 48 ore.

Per le misure, in accordo con il protocollo stabilito, è stato utilizzato lo strumento "RAD7" prodotto dalla Niton Corporation, che consente di misurare con continuità le concentrazioni di gas Radon e Thoron, ricavandole dalla misura dell'energia delle particelle che si producono nel processo di decadimento.

Lo strumento, per mezzo di una pompa aspirante, preleva campioni di aria che giungono nella camera di misura, previo il passaggio attraverso un condotto di essiccazione e un filtro che impedisce ai radionuclidi prodotti dal decadimento di interferire con la misura.

Nella camera di misura, per mezzo di un campo elettrico, gli isotopi del Polonio, prodotti dal decadimento del Radon e del Thoron, sono spinti verso la superficie di un rivelatore dove, per mezzo di uno spettroscopio, è possibile misurare le energie delle particelle che si producono nel processo di decadimento; questo principio di funzionamento consente di misurare separatamente le concentrazioni dei due gas radioattivi oggetto del protocollo di monitoraggio.

Il campionamento è stato eseguito con il rivelatore di particelle installato in idonea posizione lungo il back-up della TBM, dove l'idoneità è stata verificata sia in termini di sicurezza per lo strumento che in considerazione della maggior presenza di addetti al lavoro e alla criticità del flusso della ventilazione.

I risultati del monitoraggio sono illustrati nella tabella che segue, dalla quale si osserva chiaramente il brusco aumento della concentrazione di Radon in concomitanza con l'incontro di venute d'acqua durante lo scavo o nelle zone intensamente fratturate, come nel caso dei contatti o nelle zone di faglia.

Al fine di valutare quantitativamente l'influenza delle diverse fonti di variazione delle misure, si procede con l'Analisi della Varianza e con la determinazione dei limiti di attendibilità delle misure stesse.

Poiché la varianza statistica non gode della proprietà additiva, la variabilità dei dati osservati può essere misurata mediante gli scostamenti dei dati dalla media generale, ovvero ricorrendo all'analisi della devianza. Così facendo si può scomporre la devianza totale in devianza tra i gruppi, che misura la quota di variabilità attribuibile alle differenze fra le concentrazioni di gas Radon

Tab. 2 - Concentrazioni di Uranio e Torio nelle rocce e nelle terre.

Tipo di Roccia o Terra	${}_{92}\text{U}^{238}$		${}_{90}\text{Th}^{232}$	
	ppm	Bq/kg	ppm	Bq/kg
Rocce Ignee				
Basalto	0.5 - 1	7 - 10	3 - 4	10 - 15
Granito	3	40	17	70
Rocce Sedimentarie				
Arenarie	3.7	40	12	50
Calcarei e Dolomie	2	25	2	8
Crosta terrestre continentale	2.8	36	10.7	44
Terre	1.8	66	9	37

Tab. 3 – Risultati del monitoraggio – Concentrazione di Rn²²² durante lo scavo.

Set (i)	Progressiva (m)	Concentrazione Radon (Bq/m ³)			Roccia	Note
		\bar{X}_{Rn}	σ_j	σ_j^2		
1	4688	322	368.25	135608	Granito	
2	4572	331	111.26	12379	Granito	Zona di contatto
3	4362	88.5	31.31	980	Granito	
4	4075	214	418.00	174724	Granito	
5	3864	2330	1466.82	2151561	Granito	Zona di faglia
6	3571	1935	1439.50	2072160	Granito	Zona di faglia
7	3657	664	189.48	35903	Granito	
8	3430	2583	759.01	576096	Granito	Faglia con venute d'acqua
9	3088	313	230.28	53029	Porfido	
10	2617	214	40.58	1647	Porfido	
11	2185	84	32.98	1088	Granito	Zona di faglia
12	1971	293	283.21	80208	Granito	
13	930	130	63.78	4068	Granito	
14	380	1562	673.48	453575	Granito	

rilevate, e devianza entro i gruppi, che misura la quota di variabilità attribuibile a tutte le cause non controllate nell'esperimento, compreso l'errore di campionamento.

$$SS_{TOT} = SS_{BETW} + SS_{WITH} = \sum_{i=1}^{k=14} n_i \times (\bar{X}_{Rn} - \bar{X}_{Rn})^2 + \sum_{i=1}^{k=14} \sum_{j=1}^{48} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 = (4.99E^8 + 4.10E^5) Bqm^{-3}$$

$$\bar{X}_{Rn} = \frac{\sum_{i=1}^{k=14} n_i \times \bar{X}_{Rn}}{\sum_{i=1}^{k=14} n_i} = 782.13 Bqm^{-3}$$

Dividendo i valori delle devianze, tra ed entro i gruppi, per i rispettivi gradi di libertà si ottengono le varianze.

$$MS_{BETW} + MS_{WITH} = \frac{SS_{BETW}}{651} + \frac{SS_{WITH}}{665} = (7.67E^5 + 6.17E^2) Bqm^{-3}$$

A completamento dell'analisi della varianza viene condotto il test F per un livello di probabilità di soglia del 5%, considerando l'ipotesi nulla formulata come appresso:

$$H_0: \bar{X}_{Rn1} = \bar{X}_{Rn2} = \dots = \bar{X}_{Rn}$$

$$\frac{MS_{BETW}}{MS_{WITH}} = 1.87 > F_{(5\%, 651, 665)}$$

Poiché nel caso in esame il valore della distribuzione di Fisher per 651 gradi di libertà fra i gruppi e 665 gradi di libertà entro i

gruppi, con un livello di probabilità del 5%, fornisce il valore 1.137, si rifiuta l'ipotesi nulla e conseguentemente si può affermare che i dati osservati non differiscono fra loro per il solo effetto della casualità.

Relativamente all'intervallo di confidenza delle misure, poiché tanto la media delle concentrazioni di gas Rn²²² e di Rn²²⁰, quanto le deviazioni standard delle misure sono variabili, indicando con t la variabile di Student i limiti fiduciali sono determinabili come appresso:

$$\bar{X}_{Rn} \pm t_{\frac{\alpha}{2}} \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Considerando un livello di confidenza pari al 95%, la variabile t di Student per 48 gradi di libertà risulta pari a 1.68 quindi, relativamente alle concentrazioni di Rn²²², si ottengono i limiti fiduciali riportati nella Tabella 5.

Calcolo dell'esposizione

Il fattore di equilibrio F è il rapporto fra la concentrazione di Rn in equilibrio, indicata con EEC₂₂₂, e quella misurata nell'ambiente, indicata con I₂₂₂:

$$F = \frac{EEC_{222}}{I_{222}}$$

Il valore di tale rapporto è influenzato da diversi fattori, fra i quali la temperatura,

l'umidità relativa, la pressione atmosferica, la concentrazione di polvere di origine minerale e, negli ambienti confinati come quelli in sotterraneo, dall'efficienza del sistema di ventilazione.

La concentrazione dei gas radioattivi in ambienti di lavoro, come ad esempio nelle miniere o nei cantieri di opere in sotterraneo in fase di costruzione, è solitamente espressa in termini di esposizione alle radiazioni attraverso le unità di misura WL e WLM (*Working Level* e *Working Level Month*), dove la WLM è il livello di esposizione corrispondente a 170 ore di permanenza all'esposizione radioattiva.

Definendo esposizione unitaria in condizioni di equilibrio quella corrispondente ad una concentrazione pari a 3.7E³ Bqm⁻³ di gas Radon e di 275 Bqm⁻³ di Thoron e considerando che i prodotti del decadimento radioattivo non sono in perfetto equilibrio con i loro capostipiti, si può assumere F pari a 0.5 e, quindi, per la determinazione dell'esposizione espressa in livelli di esposizione al processo di decadimento si può scrivere:

$$WL_{222} = F \times \frac{I_{222}}{3,7E^3} = 1.35E^{-4} \cdot I_{222}$$

$$WL_{220} = F \times \frac{I_{220}}{275} = 1.82E^{-3} \cdot I_{220}$$

Indicando con h il numero delle ore giornaliere di presenza nell'ambiente di lavoro,

Tab. 4 – Misura delle concentrazioni e livelli di esposizione.

Set (i)	Concentrazione media Rn ²²² (Bq/m ³)	Concentrazione media Rn ²²⁰ (Bq/m ³)	Concentrazioni in WL			Esposizione giornaliera in WLME-3			Esposizione annua Totale WLM	Note
			Rn ²²²	Rn ²²⁰	Totale	Rn ²²²	Rn ²²⁰	Totale		
1	322	345	0.0435	0.6276	0.6711	2.047	29.534	31.581	7.83	
2	331	152	0.0447	0.276	0.3207	2.104	12.988	15.092	3.74	Zona di contatto
3	88.5	55.2	0.0119	0.1004	0.1123	0.560	4.725	5.285	1.31	
4	214	251	0.0289	0.456	0.4849	1.360	21.459	22.819	5.66	
5	2330	886	0.315	1.611	1.926	14.824	75.812	90.636	22.48	Zona di faglia
6	1935	759	0.261	1.379	1.640	12.282	64.894	77.176	19.14	Zona di faglia
7	664	312	0.089	0.568	0.657	4.188	26.729	30.917	7.67	
8	2583	1002	0.349	1.822	2.171	16.424	85.741	102.165	25.34	Faglia con venute d'acqua
9	313	144	0.042	0.262	0.304	1.976	12.329	14.305	3.55	
10	214	101	0.028	0.184	0.212	1.318	8.659	9.977	2.47	
11	84	138	0.114	0.251	0.365	5.365	11.712	17.077	4.26	Zona di faglia
12	293	220	0.0395	0.401	0.4405	1.859	18.871	20.730	5.14	
13	130	147.5	0.035	0.268	0.303	1.647	12.612	14.259	3.54	
14	1562	133	0.211	0.242	0.453	9.929	11.388	21.317	5.29	

i livelli di esposizione in termini di WLM per il Radon e il Toron sono pari a:

$$WLM_{222} = \frac{WL_{222}}{170} \times h$$

$$WLM_{220} = \frac{WL_{220}}{170} \times h$$

Assumendo che tutte le radiazioni provenienti dagli altri radionuclidi naturali siano irrilevanti, l'esposizione giornaliera totale risulta pari a:

$$WLM_{Total} = (WL_{222} + WL_{220}) \times \frac{h}{170}$$

L'esposizione totale nel periodo di esecuzione dei lavori o quella totale annuale si ot-

tengono moltiplicando l'esposizione totale giornaliera, rispettivamente, per il numero delle giornate del periodo o il numero delle giornate lavorative in un anno.

Risultati del monitoraggio

Il monitoraggio ha permesso di rilevare un costante e continuo ingresso in galleria dei gas Radon e Thoron e dei loro prodotti del decadimento, che la ventilazione forzata ha consentito di diluire e allontanare dagli ambienti di lavoro, generando un equilibrio con valori di concentrazione variabili fra i 200 e i 300 Bqm⁻³.

Nella Tabella 4 sono indicate le concentra-

zioni medie per ciascun gruppo di osservazioni, così come sono riportati i dati relativi all'esposizione nel periodo di lavoro.

Il primo campione di osservazioni, costituito da 48 misure, come tutti gli altri ad eccezione del campione No.14 costituito da 41 misurazioni, è caratterizzato da valori medi delle concentrazioni di gas Radon e Thoron rispettivamente pari a 322 Bqm⁻³ e 345 Bqm⁻³.

Il livello totale di esposizione giornaliera e l'esposizione annua, presentati in Tabella 4, si ottengono facilmente come appresso:

$$WL_{222} = 1.35 \times 10^{-4} \times 322 = 0.00435 WL \Rightarrow$$

$$\Rightarrow WLM_{222} = 0.00435 \times \frac{8}{170} = 2.047 \times 10^{-3} WLM$$

Tab. 5 – Statistica osservata e Limiti Fiduciali.

Set	n	\bar{X}_{Rn}	σ_j	σ_j^2	Limiti Fiduciali al 95%	
					MIN	MAX
1	48	322	368.25	135,608	266.15	377.84
2	48	331	111.27	12,381	304.02	357.98
3	48	88.5	31.31	981	80.90	96.09
4	48	214	418.02	174,741	43.71	384.29
5	48	2330	1466.82	2,151,561	1974.32	2685.68
6	48	1935	1439.50	2,072,160	158.94	2284.06
7	48	664	189.48	35,903	618.05	709.95
8	48	2583	759.02	576,111	2398.95	2767.05
9	48	313	230.29	53,033	257.16	368.84
10	48	214	40.58	1,647	204.16	223.84
11	48	84	32.98	1,088	76.00	99.19
12	48	293	283.21	80,208	224.32	361.67
13	48	130	63.78	4,068	114.39	145.32
14	41	1562	673.48	453,575	1398.92	1725.50

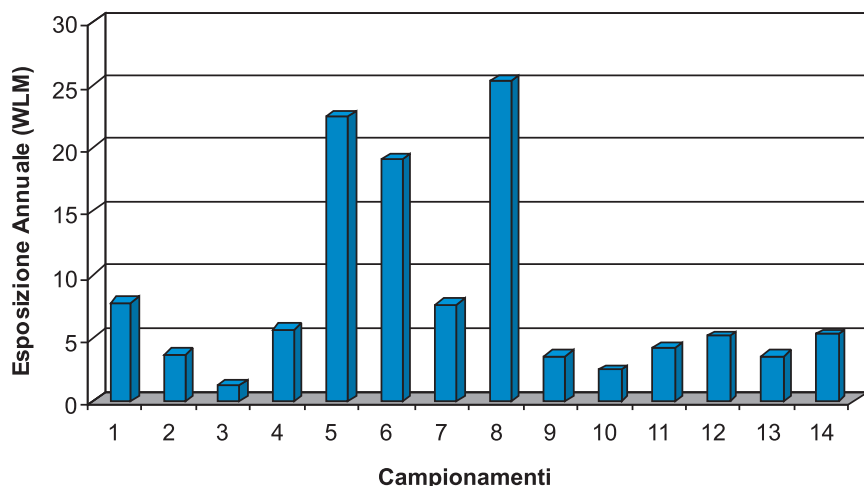


Fig. 2 - Esposizione annua Totale (WLM).

$$WL_{220} = 1.82 \times 10^{-3} \times 345 = 0.6276 WL \Rightarrow$$

$$WLM_{220} = 0.6276 \times \frac{8}{170} = 29.534 \times 10^{-3} WLM$$

L'esposizione giornaliera totale, determinata per il primo campionamento, risulta quindi:

$$WLM_{Totale} = WLM_{222} + WLM_{220} = 31.581 \times 10^{-3} WLM$$

L'esposizione annua si ottiene moltiplicando il valore WLM_{Totale} per il numero delle giornate lavorative per anno che nel caso in esame è pari a 248, quindi:

$$WLM_{Annuale} = WLM_{Totale} \times 248 = 7.83 WLM$$

L'esposizione cumulativa del personale impiegato nelle operazioni in sotterraneo si ottiene attraverso la media dei valori medi delle concentrazioni di Radon e Thoron determinati per ciascun campionamento, assumendo l'omogeneità della varianza e assumendo irrilevante l'esposizione alle radiazioni naturali oltre a quelle determinate per i gas radioattivi in questione:

$$\overline{X_{Rn^{222}}} = \frac{48 \times 322 + \dots + 41 \times 1562}{48 + \dots + 41} = 782.13 Bqm^{-3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \overline{WL}_{222} = 1.35 \times 10^{-4} \times 782.13 = 0.1056 WL$$

$$\overline{X_{Rn^{220}}} = \frac{48 \times 345 + \dots + 41 \times 133}{48 + \dots + 41} = 333.93 Bqm^{-3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \overline{WL}_{220} = 1.82 \times 10^{-3} \times 333.93 = 0.6078 WL$$

L'esposizione cumulativa media è pertanto pari a:

$$\overline{WLM}_{Annuale} = (\overline{WL}_{222} + \overline{WL}_{220}) \times \frac{8}{170} \times 248 = 8.32 WLM$$

Conclusioni e raccomandazioni per la mitigazione del rischio Radon

L'esposizione cumulativa media per i minatori impegnati nelle operazioni di scavo meccanizzato della galleria, che hanno avuto una durata di 248 giornate lavorative, è stata calcolata pari a 8.32 WLM, di cui il contributo dovuto al Radon è stato stimato in 1.23 WLM, mentre quello dovuto al Thoron è stato stimato pari a 7.09 WLM.

In questa analisi il livello di esposizione è stato calcolato assumendo che tutte le altre sorgenti naturali di particelle diano un contributo trascurabile; ciò è ragionevole se si considera la brevità dei tempi di emivita dei radioisotopi che si generano nei processi di decadimento dei radionuclidi capostipiti.

Il contributo maggiore al livello di esposizione è dunque attribuibile alla concentrazione di gas Thoron, circa sette volte superiore a quella misurata per il Radon, che, in conseguenza dell'inevitabile presenza di polveri sottili di origine minerale, prodotte durante il processo di abbattimento della roccia dagli utensili di taglio a disco, e della radio tossicità dell'isotopo Rn^{220} , generano un rischio per la salute dei minatori superiore a quello associabile alla presenza di gas Radon.

Dal monitoraggio è emerso con chiarezza che la concentrazione di gas Radon aumenta sensibilmente in corrispondenza delle zone di faglia o dove s'incontrano importanti venute d'acqua in galleria; misure non sistematiche eseguite in prossimità dell'imbocco dalla galleria, hanno inoltre messo in evidenza un incremento della concentrazione nella direzione di uscita della galleria in accordo con l'ipotesi di accumulazione del gas nel verso concorde con il flusso della ventilazione.

La ventilazione forzata rappresenta la misura primaria per ridurre, mediante la diluizione, la concentrazione di gas radioattivi in sotterraneo durante la fase di scavo.

Per tale ragione, il corretto dimensionamento dell'impianto di ventilazione, sia in termini di portate di aria sana da fornire al fronte, che di regolarità ed omogeneità direzionale del flusso lungo i carri del back-up della TBM, è determinante per la mitigazione del rischio al di sotto di una soglia di accettabilità.

In questo contesto, il secondo schema proposto nella Figura 3, ha indubbiamente dimostrato la sua efficacia; per i piccoli e medi diametri, la ventilazione aspirante garantisce una migliore regolarità dei flussi d'aria e una riduzione degli interventi di riparazione e/o manutenzione dei condotti di ventilazione.

Parte integrante dell'impianto di ventilazione, e non meno importante per la mitigazione del rischio associato con la presenza di sostanze radioattive in sotterraneo, è il sistema di abbattimento delle polveri prodotte durante lo scavo.

Tale sistema è costituito da uno o più ventilatori in aspirazione con i relativi condotti, generalmente provvisti di aperture per la pulizia in zone opportune, che aspirano le polveri prodotte durante lo scavo direttamente dalla testa fresante, come illustrato nella fotografia che segue, per convogliarle nell'impianto di abbattimento che può essere del tipo a nebulizzazione d'acqua o equipaggiato con filtri intercambiabili a secco.

Unitamente al sistema di abbattimento delle polveri si suggerisce di dotare la TBM di un sistema di soppressione polveri per mezzo di schiume polimeriche da utilizzarsi attraverso gli ugelli di spruzzaggio verso il fronte e gli utensili di abbatti-

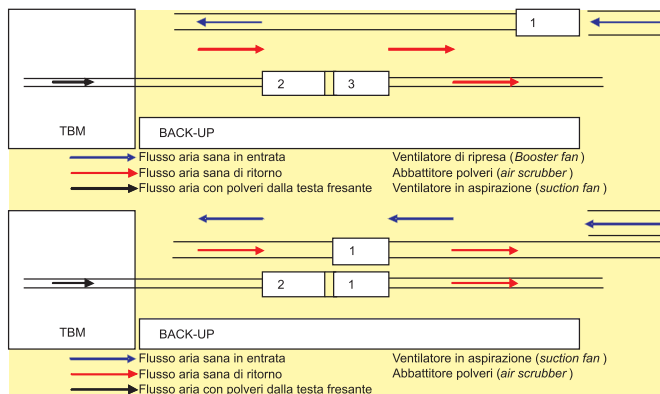


Fig. 3 – Schemi di ventilazione.



Foto 1 – Ventilatori in aspirazione.



Foto 2 – Condotto di aspirazione polveri.



Foto 3 – Impianto abbattimento polveri dalla testa fresante del tipo a secco.

mento, installati in idonee posizioni sulla testa fresante.

Tali schiume hanno inoltre la funzione di condizionare il materiale di smarino, facilitandone l'evacuazione dalle pale di raccolta, e di favorire la pulizia degli utensili garantendo il miglior livello di rotolamento anche in presenza di grandi quantità di materiale fino (anche maggiore del 15% di passante al setaccio con fori di forma quadrata ed apertura di 2.36 mm).

In conclusione è opportuno osservare che le misurazioni della concentrazione di gas radioattivi presentate in Tabella 4, sono state eseguite in presenza della ventilazione forzata che è stata dimensionata, in termini di portata d'aria, in ottemperanza alla locale normativa di sicurezza che non considera l'effetto della presenza di tali gas.

Il dimensionamento della ventilazione è stato infatti eseguito considerando una

portata d'aria per la diluizione dei gas prodotti dai motori diesel simultaneamente presenti in galleria pari a $2.5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ HP}^{-1}$ una quantità di aria minima in funzione del numero delle persone presenti al fronte pari a $0.3 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ e una quantità di aria necessaria per il buon funzionamento delle attrezzature elettroidrauliche pari a $2.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ogni 1000 kVA di potenza elettrica installata.

Sulla base dei requisiti minimi sopra esposti l'impianto adottato, composto di un ventilatore a doppio stadio $2 \times 30 \text{ kW}$ ed un ventilatore di ripresa posizionato alla progressiva +3.000 m, ha garantito un flusso di circa $5.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ sulla TBM che è risultato comunque sufficiente a mantenere la concentrazione di gas Radon al di sotto della soglia di rischio ad eccezione delle occasioni in cui si sono incontrate zone di faglia e venute d'acqua in galleria.

Bibliografia

- WILKENING M., "Radon in the environment", Studies in Environmental Science 40, Elsevier Science Publisher B.V., 1990.
- SCHMIDT A., "EPA's Approach to Radon Risk Assessment", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol.161, No.1 pag.283-291, 1992.
- NAZAROFF W.W., NERO A.V., "Radon & Its Decay Products in Indoor Air", John Wiley & Sons Inc., 1988.
- GATES A.E., GUNDERSEN L.C.S., "Geologic controls on Radon" Geological Society of America, 1992.
- CHOPPING G., Nuclear Chemistry, Pergamon Press, 1980.
- MOOD A.M., GRAYBILL F.A., BOES D.C., Introduction to the theory of statistics, McGraw-Hill, 3rd Ed. 1979.
- MCFEAT-SMITH I., GRANDORI R., CONCILIA M., "Construction of Governments first two land based TBM Projects". Proceedings of the 3rd Asia Tunneling Summit, Hong Kong, November 1999.

Summary of:

Radon monitoring during mechanised tunnelling

M. CONCILIA

Mechanised Tunnelling Expert, Rome – Italy

Radon is a radioactive, colorless, odorless, tasteless noble gas, occurring naturally as part of the radioactive decay chain of Uranium.

Radon and its isotopes have a potential alpha energy ranging from 19 to 21 MeV per atom and consequently classified as carcinogenic for humans.

The decay products and the aerosols carrying the decay products can be inhaled by miners during tunnelling works; these very fine radioactively airborne particles would deposit close to radio sensitive tissues of the lung and may result in lung cancer.

To supply potable water to the new Hong Kong airport, an aqueduct tunnel of 7 km length and 3.56 m diameter, was constructed by the Italian specialist Contractor SELI utilising a double shielded TBM Robbins-Grandori 1111-234.

The tunnel was bored through a series of igneous, volcanic and pyroclastic rocks of Mesozoic age.

The main plutonic rocks encountered were medium grained and fine grained granites, while the main volcanic body comprised medium to coarse grained feldsparphyric rhyolite; the pyroclastic rock was a fine grained tuff.

The tunneling activity was requested to

follow BS6164:1990, a code of practice for Safety in tunneling which specified that "exposure of radon comes within the scope of the Ionizing Radiation Regulations, 1985 and associated Approved Code of Practice, the Protection of Persons against Ionizing Radiation arising from any Work Activity, and particularly Part 3, Exposure to Radon".

The standard further specified that representative measurements on radon concentration should be taken during tunnelling works.

Radon monitoring was therefore performed and measurements at the work face and along the excavated tunnel were taken using 24 and 48 hours sampling protocols.

The monitoring revealed significant impacts; it was observed that radon concentration climbs rapidly when ventilation was being turned off as well as was noted significant elevation on radon level when the tunnel excavation went through fault zones and/or sections where water ingress was experienced.

Radon accumulation, as the air travels towards the tunnel entrance, was also observed.

Thoron, an isotope of Radon, was also observed at significant level and the analysis

presented in this paper clearly shows that the impact of thoron and its daughters can be higher than that of radon.

The cumulative exposure for the tunnel excavation crews for 248 days of excavation activities, eight hour per day, was estimated as 8.82 WLM, with 1.23 WLM from radon and 7.09 WLM from thoron, assuming all other natural radiations are comparatively neglectable; the major contribution derived therefore from exposure to thoron $^{86}\text{Rn}^{220}$.

The confidence limit calculation revealed that the expected radon concentration measured in the period would lie between the range from 43.71 Bqm^{-3} to $2,767 \text{ Bqm}^{-3}$ with an average of 782.13 Bqm^{-3} .

The corresponding exposure is expected to be an average of 1.23 WLM within a range from 0.07 to 4.36 WLM; the expected exposure practically exceeded the investigation level.

Forced ventilation is the major measure to control radon concentration in the tunnel while as a secondary measure to minimize the risk of radon could be the use of water and/or polymer based foams to suppress dust and very fine particulate during the excavation; this measure is also purposed to minimize the risk for pneumoconiosis.