

CALCOLI DI DOSE IN AMBIENTI SOTTERRANEI: IL CASO DEL TAV IN VALLE DI SUSÀ

Lucia Bonavigo[°], Massimo Zucchetti^{°°}

[°]Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino
lucia.bonavigo@polito.it

^{°°}Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino
massimo.zucchetti@polito.it

RIASSUNTO

Obiettivo

Obiettivo del presente lavoro è effettuare una stima delle possibili concentrazioni di radon in ambienti chiusi, e delle dosi associate a tale inalazione. Viene investigato a tale scopo l'uso di un codice sviluppato dal DOE, RESRAD-BUILD.^{1; 2; 3} Il fine ultimo è ottenere una ragionevole stima di dose e sostenere la verifica del rispetto dei livelli fissati dai decreti legislativi di riferimento.^{4; 5}

Disegno

Per calcolare la dose ricevuta da un individuo che trascorra un certo tempo all'interno di una costruzione sotterranea, è possibile utilizzare il codice RESRAD-BUILD. Nel presente lavoro si analizza l'uso del codice, se mostrano le principali caratteristiche, e se ne propone un'applicazione pratica: l'esposizione di lavoratori all'interno del TAV in Valle di Susa. Per svolgere il calcolo, si utilizza il valore di concentrazione di Uranio misurato dall'ARPA

Piemonte nel 1997,⁶ valore che supera di poco quello medio mondiale, ma che in costruzioni sotterranee può porre comunque problemi di tipo radioprotezionistico.

Setting

Il problema dell'impatto radiologico dovuto all'esposizione a radiazioni all'interno di luoghi chiusi, in particolare di ambienti sotterranei, è ben noto. In merito ad esso, le normative italiana ed europea raccomandano adeguate campagne di misura e indicano limiti di intervento su dosi e concentrazioni di radionuclidi, al fine di circoscrivere il rischio associato a tali condizioni. L'inalazione di radon e suoi prodotti di decadimento può infatti portare allo sviluppo di danni ritardati: l'insorgenza di neoplasie a carico dell'apparato respiratorio. In merito a tale argomento è disponibile un'abbondante letteratura in campo scientifico.

Partecipanti

Outcome principali

Il codice analizzato, nonostante alcune limitazioni,⁷ appare di semplice utilizzo e adatto ad effettuare le stime desiderate.

Risultati

I risultati, nonostante le semplificazioni adottate, portano ad una stima conservativa dell'ordine di grandezza delle dosi ricevute dagli esposti, e possono essere utilizzati per una prima stima del rischio radiologico. L'ordine di grandezza delle esposizioni calcolate mostra che le dosi ricevute dai lavoratori esposti possono essere mantenute al di sotto dei limiti di radioprotezione.

Conclusione

Va ricordato che vi sono comunque molti mezzi a disposizione per ridurre il rischio da radon negli scenari considerati, nonostante non fosse scopo di questo lavoro esporne le tipologie. Nel caso proposto comunque, si verifica come, partendo da concentrazioni di Uranio lievemente superiori alla media mondiale, le dosi possano essere contenute entro i limiti imposti dalla legge con modesti ricambi d'aria.

Parole Chiave: *radioprotezione, radon, stima di dose, RESRAD.*

DOSE CALCULATION DUE TO UNDERGROUND EXPOSURE: THE TAV TUNNEL IN VALLE DI SUSA

Lucia Bonavigo[°], Massimo Zucchetti^{°°}

[°]Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino
lucia.bonavigo@polito.it

^{°°}Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino
massimo.zucchetti@polito.it

ABSTRACT

Objective

Main objective of the present work is to make an assessment of radon concentration in underground buildings, and an assessment of consequent dose to exposed individuals. For this purpose, a computer code designed by DOE, RESRAD-BUILD^{1; 2; 3} is investigated. The final aim is to perform a robust dose estimate in order to verify compliance with radioprotection law constraints.^{4; 5}

Design

The code RESRAD-BUILD can be used to estimate the dose received by an individual who spends a certain amount of time in an underground building. In the present work, the use of this code is analyzed, its characteristics are shown, and an application is displayed: the exposition of workers inside the TAV (High-speed Rail Tunnel) which will be situated in Valsusa (Piedmont). To perform calculation in this assessment, we are using the value of Uranium concentration measured by ARPA Piemonte in 1997, which exceeds a little worldwide mean value.⁶ In every

underground building there could be radioprotection problems, even when the value of radionuclides concentration is not excessive.

Setting

Radiological impact due to indoor exposure, particularly due to permanence underground, is considered by Italian and European laws, which suggest accurate measurements and establish action levels. Risk connected to exposure is circumscribed by setting constraints on concentration of nuclides and on consequent doses. Particularly, inhalation of radon and its progeny can lead to neoplasm damaging the respiratory apparatus. With regard to this topic, there is an abundant specific literature.

Participants

Main outcome measures

The code, notwithstanding some specific limit,⁷ can be considered user-friendly and useful to make the kind of assessment we are interested into.

Results

Results lead to a conservative assessment of the dose the exposed workers receive, notwithstanding the simplifications adopted. They can be useful to make an early estimate of radiological risk. The order of magnitude of assessed doses shows that the exposition of workers can be kept under radioprotection constraints.

Conclusion

We must remember the variety of technical ways to reduce radon concentration and consequent doses, even if they were not included in the aim of this work. Anyway, the practical application proposed shows how compliance with law can be assured in the presence of few upon world average concentrations of radionuclides, by means of modest air exchanges.

Keywords: *radioprotection, radon, dose assessment, RESRAD.*

Box 1

The main source of radiation exposure in most underground operations is radon and radon decay products. Risk connected to exposure and to inhalation of radon and its progeny is the onset of neoplasms damaging the respiratory apparatus. Opportune measurements of concentration are obligatory in workplaces, and, in some cases, adequate countermeasures too. Compliance with dose constraints must be demonstrated by gas measurements and may be verified or predicted with dose assessments.

Box 2

Estimate radon potential concentrations and absorbed doses is useful to verify or predict compliance with radioprotection constraints. In this work, the dose received by an individual within an underground building, the TAV (Traforo Alta Velocità, High-speed Rail Tunnel) which will be situated in Valsusa (Piedmont) is assessed using the code RESRAD-BUILD. The case proposed shows how the average effective dose estimated for the workers can be kept under dose constraints.

INTRODUZIONE

Il problema dell'impatto radiologico dovuto all'esposizione a radiazioni all'interno di luoghi chiusi, in particolare di ambienti sotterranei, è ben noto e portato all'attenzione del pubblico dal D. Lgs. n. 230.⁴ Dal 1990 la Commissione Europea aveva prodotto una raccomandazione sulla tutela della popolazione contro l'esposizione al radon in ambienti chiusi (90/143/Euratom).⁵ La normativa italiana raccomanda rigore e sottolinea come in queste condizioni sia presente un certo rischio legato alla presenza di gas radon. Si rendono obbligatorie opportune misurazioni nei luoghi di lavoro ed, in taluni casi, contromisure adeguate.

A proposito del problema del radon, è opportuno ricordarne brevemente la natura. Si tratta di un gas nobile radioattivo di origine naturale, originato dall'uranio, elemento diffuso in tutta la crosta terrestre. Il radon produce a sua volta isotopi metallici radioattivi, di cui i più importanti sono: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{210}Bi , ^{210}Pb , la cui reattività chimica li porta a legarsi con il pulviscolo atmosferico che, una volta inalato dall'uomo, si fissa alle mucose polmonari. L'inalazione di radon e suoi prodotti di decadimento può portare allo sviluppo di danni ritardati: l'insorgenza di neoplasie a carico dell'apparato respiratorio. Tale inalazione è considerata essere la seconda causa di insorgenza di tumore al polmone nella popolazione mondiale, dopo il fumo che è il primo.

Benché l'emivita del radon sia di poco meno di 4 giorni, la sua continua produzione da parte dell'uranio, la tendenza alla stratificazione e particolari condizioni di accumulo, possono far sì che esso raggiunga, in alcuni luoghi chiusi, concentrazioni potenzialmente dannose per la salute. La normativa italiana in accordo con le raccomandazioni dell'ICRP ha stabilito un livello di riferimento per l'esposizione al radon negli ambienti di lavoro di 500 Bq/m^3 .^{4; 8; 9}

Alla luce di quanto detto, nasce l'interesse ad effettuare una stima della possibile concentrazione di radon in ambienti sotterranei, al fine di verificare che le dosi assorbite dagli individui si mantengano al di sotto dei livelli di azione fissati dai decreti legislativi di riferimento. Prima necessità è allora la conoscenza del dato di concentrazione di precursori nelle rocce o nel suolo adiacenti la costruzione, o quanto meno del suo valore medio. A questa va aggiunta una valutazione dei meccanismi di emanazione e di trasporto del radon (e progenitori) attraverso le rocce e le acque sotterranee.

La migrazione del radon attraverso i suoli è un fenomeno ancora non del tutto chiaro, a causa della complessa interazione dei parametri caratteristici dei suoli (porosità, permeabilità, temperatura, grado d'umidità), dei fattori atmosferici (quali vento, pioggia...) e geologici. Il gas

nobile può anche passare dalla fase liquida a quella gassosa e muoversi nel suolo per diffusione e moto convettivo, purché il mezzo non sia completamente saturo e i pori contenenti gas siano comunicanti; viene facilmente trasportato dalla circolazione idrica che si sviluppa nel circuito attraverso cavità e fessure anche per lunghe distanze.

IL CODICE RESRAD-BUILD V. 3.3.

Per calcolare la dose ricevuta da un individuo che trascorra un certo tempo all'interno di una costruzione sotterranea, è possibile utilizzare il codice RESRAD-BUILD. Tale strumento è stato sviluppato dal *Department of Energy* statunitense (DOE) per calcolare le dosi da radioattività residua nelle costruzioni (RESidual RADioactivity in BUILDings). Funzione del programma è valutare il rischio radiologico in cui incorre un recettore che vive o lavora in un edificio contaminato con materiale radioattivo.^{1; 2; 3}

L'edificio è schematizzato come un insieme di tre compartimenti al massimo, in cui possono essere presenti sorgenti di quattro diverse geometrie (punto, linea, area e volume), dieci sorgenti distinte e dieci recettori. Può essere presente un materiale schermante, di otto tipi diversi, tra sorgente e recettore, considerato nel calcolo della radiazione esterna. Il trasporto di materiale da un compartimento all'altro è calcolato considerando diversi fattori, tra i quali la presenza di materiale radioattivo in polveri e particolato, il ricambio d'aria dall'esterno ed il ricircolo tra i compartimenti, i fenomeni di deposizione e risospensione, infine l'accumulo e il decadimento radioattivo.

I recettori considerati sono di vari tipi e comprendono molte tipologie di individui che trascorrono un certo periodo all'interno dell'edificio. Per il calcolo dell'irraggiamento interno, si considera l'aria ben miscelata e omogenea, per l'irraggiamento esterno invece, si deve ancora indicare l'eventuale presenza di materiale schermante e il suo spessore e proprietà.

È possibile modellare più scenari d'esposizione, ovvero diverse combinazioni di valori dei parametri che caratterizzano l'occupazione del sito e il tipo di attività che vi viene svolta. La dose collegata all'occupazione di un edificio in qualche misura contaminato è legata alla destinazione d'uso della costruzione, alle sue condizioni, posizione, taglia, estensione e tipo di contaminazione.

Le vie di esposizione considerate sono sette e comprendono:

- esposizione a irraggiamento esterno direttamente dalla sorgente;
- irraggiamento esterno dovuto a materiale depositato sul pavimento;

- irraggiamento esterno dovuto alla presenza di radionuclidi in aria;
- inalazione di particolato radioattivo disperso nell'aria;
- inalazione di progenie di radon gassosa e vapori d'acqua triziata;
- ingestione involontaria di materiale direttamente dalla sorgente;
- ingestione di materiale depositato sulle superfici interne della costruzione.

In RESRAD-BUILD la dose da irraggiamento esterno è valutata tramite la E.D.E., *effective dose equivalent*, e l'irraggiamento interno da C.E.D.E., *committed effective dose equivalent*. La dose totale, somma dei contributi interno ed esterno, è espressa dalla T.E.D.E., *total effective dose equivalent*.

APPLICAZIONE ALLA STIMA DI DOSE ALL'INTERNO DEL TAV

Le stime di dose possono essere prospettive o retrospettive, e possono essere pensate in genere come dei processi iterativi. Le stime prospettive si riferiscono ad esposizioni di individui che non sono ancora avvenute ma possono verificarsi, mentre le retrospettive si riferiscono ad esposizioni note di gruppi di individui, avvenute in passato. La stima viene impostata inizialmente su assunzioni conservative per sorgenti, valori di parametri, dati sulla popolazione. I risultati sono usati per valutare l'eventuale necessità di informazioni più realistiche, in particolare quando il valore della dose calcolata si avvicina al limite di dose. Le incertezze associate alla stima possono essere prese in considerazione sia in modo deterministico, selezionando opportuni valori per i singoli parametri, che probabilistico, incorporando nella stima le distribuzioni dei valori dei parametri. Con entrambe le metodologie, lo scopo è comunque quello di produrre una valutazione sufficientemente robusta da poter sostenere le scelte da fare in ambito radioprotezionistico e da poter costituire una verifica del rispetto dei limiti di legge.¹⁰

Si analizza ora un caso applicativo riguardante una costruzione sotterranea. La stima di dose che viene condotta è di tipo predittivo e deterministico. Si tratta di un caso di riferimento, esemplificativo della condizione di esposizione a radiazioni ionizzanti di origine naturale che si viene a creare all'interno di una galleria costruita in un territorio specifico. Si applica il modello fin qui esposto alla valutazione degli eventuali problemi di radioprotezione relativi alla realizzazione fra Torino e Lione della Linea Ferroviaria ad Alta Velocità, ed in particolare del passaggio del TAV in Valle di Susa; questo avviene in formazioni geologiche con presenza di minerale d'uranio in misura leggermente superiore alla media. In questa zona, infatti, le

misurazioni effettuate hanno riscontrato una concentrazione di attività nelle rocce che, sebbene assai contenuta, può essere comunque rilevante ai fini radioprotezionistici.⁶

La schematizzazione della futura galleria viene fatta considerandone un tratto di profondità 15 m, di sezione 4×4 m, composto da tre spazi*. I tre ambienti sono posti in successione, ed in essi sono presenti nove sorgenti e un recettore. Le sorgenti volumetriche sono tali da coprire l'intera superficie delle pareti dell'ultimo dei tre ambienti, completamente esposto alla roccia, e le facce superiori ed inferiori dei restanti due, esposti parzialmente. Contengono tutte la stessa concentrazione di radionuclidi**. Il recettore è posto al centro del terzo ambiente, come mostrato in Figura 1. Si considera ingresso di aria fresca dall'esterno solo nel primo compartimento. La miscelazione dell'aria dei tre ambienti è assicurata da un flusso d'aria costante tra di essi.

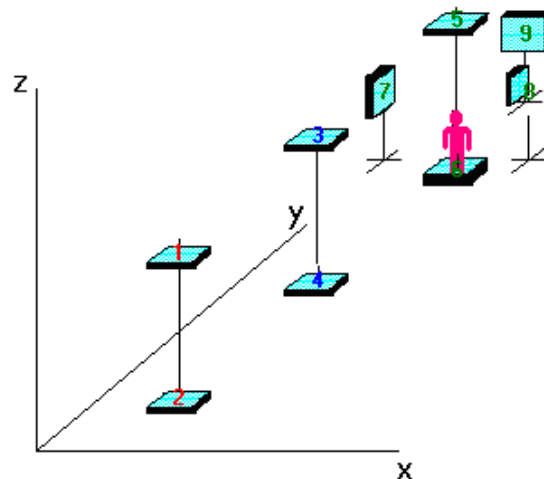


Figura 1 – Schema della posizione reciproca dei baricentri di sorgenti e recettori.

Figure 1 – Sources-Receptor scheme.

I risultati sono espressi in mSv/y , considerando cioè 8760 ore annue di esposizione: va quindi tenuto conto di ciò nel derivare la dose alla singola persona, che deve essere calcolata in base alle ore di occupazione del sito con le caratteristiche di esposizione date.

* Il modello adottato, con profondità 15 m, è stato validato con un caso di riferimento, nel quale la profondità era quella reale di circa 50 km: si è verificato come il modello adottato ed il caso di riferimento ottengano risultati simili; la profondità considerata è quindi sufficiente ed il modello adottato permette – in maniera più agevole – lo svolgimento di casi parametrici.

** Radionuclidi naturali nei valori medi mondiali: ^{232}Th : 0,028 Bq/g; ^{40}K : 0,37 Bq/g; tranne per ^{238}U : 0,0265 Bq/g. La quantità di uranio corrisponde al valore riportato dalle analisi condotte dall'ARPA nel 1997, su campioni di rocce della zona.⁶ Tutte le sorgenti sono spesse 100 cm: da calcoli parametrici effettuati, si è rilevato come, a partire da questo valore, lo spessore della sorgente cessi di influenzare il risultato finale in termini di dose al recettore.

Si osserva anche, nell'utilizzo del codice, che i valori di dose e concentrazione riportati non sono sensibili alla variazione del valore della porosità della sorgente.

L'abbattimento della dose sotto 1 mSv/y - limite di dose per la popolazione^{4: 11} - si ottiene con un ricambio d'aria pari a solo $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$, all'incirca, per qualsiasi valore del fattore d'emanazione, come indicato nel grafico in Figura 2. Si tratta di un ricambio d'aria di modesta entità, pari al rinnovo totale dell'aria presente nel volume sotterraneo considerato ogni 2400 ore, ricambio sicuramente ottenibile con facilità sia in fase di costruzione della galleria che di suo utilizzo. Si ricorda infine come i valori ottenuti riguardino una esposizione pari al 100% del tempo trascorso in galleria, assunzione sicuramente conservativa: i dati reali possono essere tuttavia ottenuti scalando in proporzione lineare quelli calcolati, in funzione del numero di ore effettivamente trascorse nel sotterraneo.

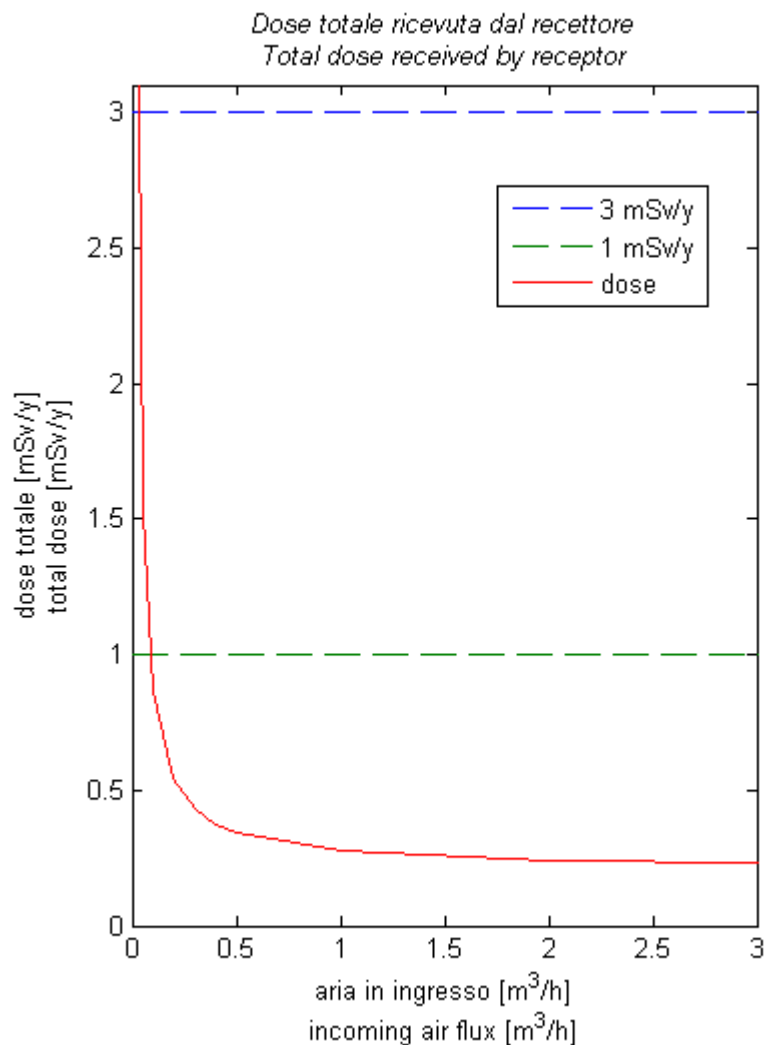


Figura 2 – Andamento della dose ricevuta in funzione del ricambio d'aria
Figure 2 – Total dose received by receptor as a function of incoming air flux

CONCLUSIONI

È bene ricordare che utilizzare un codice come quello qui proposto impone l'accettazione di determinate ipotesi, di incertezze dovute al modello usato per descrivere il fenomeno fisico di trasporto e assunzione di radionuclidi e d'esposizione, di limiti intrinseci ai dati misurati, come concentrazioni o parametri ambientali. Inoltre, la variabilità nel senso dell'eterogeneità in natura, è inevitabile e crea un elemento di imprecisione nel processo di definizione dei parametri fisici, ambientali, o relativi al recettore, ed in definitiva in tutto il processo di stima di dose. In questo caso particolare, va ricordato al lettore che RESRAD-BUILD assume alcune ipotesi di calcolo: le sorgenti sono considerate omogenee; i parametri che influenzano l'emissione di gas sono considerati essere delle costanti, così come le velocità di erosione, deposizione e risospensione di polveri, parametri cui è assegnato tra l'altro un unico valore per tutti i radionuclidi. Si considera che, in aria, il materiale inquinante sia ben miscelato; non si considera la maggiore densità del gas radon rispetto all'aria; l'aria in ingresso è considerata priva di ogni inquinante. Infine, non è possibile modellare gradienti di pressione tra interno ed esterno dell'edificio stesso, né correlarne l'ingresso alle condizioni ambientali esterne (temperatura, pressione).

In questo modo non si considera, ad esempio, la presenza in loco di crepe o pori, grazie ai quali il trasporto di gas verso l'esterno della sorgente sia facilitato; questa può essere modellata utilizzando RESRAD-BUILD tramite l'inserimento di sorgenti localizzate, caratterizzate da un alto fattore d'emanazione, e considerando conservativamente che tutto il radon prodotto fuoriesca dalla roccia.

In generale, nell'utilizzo di RESRAD, i fenomeni che influiscono sull'ingresso di radon nelle costruzioni possono essere considerati agendo sul valore numerico dei fattori di emanazione e diffusione del gas.

RESRAD-BUILD fornisce quindi risultati che, nonostante le semplificazioni adottate, mostrano l'ordine di grandezza delle dosi ricevute dai recettori, che possono essere utilizzati per una prima stima del rischio radiologico, e che vanno comunque verificati alla luce di adeguate campagne di misura.

Per quanto riguarda l'esempio applicativo considerato in questo articolo, cioè il Traforo per l'Alta Velocità in Valle di Susa, si è potuto verificare come, partendo da concentrazioni di Uranio lievemente superiori alla media mondiale, le dosi possano essere contenute entro i limiti imposti dalla legge con modesti ricambi d'aria.

BIBLIOGRAFIA

1. Yu, C., LePoire D.J., Cheng J.J. et al., *User's Manual for RESRAD-BUILD Version 3*, ANL/EAD-03-1, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., USA, July 2003.
2. Yu, C., Zielen A.J., Cheng J.J. et al., *User's Manual for RESRAD Version 6*, ANL/EAD-4, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., USA, July 2001.
3. Yu, C., Loureiro, C., Cheng, J.J., et al., *Data collection handbook to support modelling impacts of radioactive material in soil*, ANL/EAIS-8. Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., USA, 1993.
4. Decreto Legislativo del Governo n° 230 del 17/03/1995 modificato dai: D.Lgs. n°241 del 26/05/2000, D.Lgs. n°187 del 26/05/2000, D.Lgs. n°257 09/05/2001, D.Lgs. n°151 del 26/03/2001, e dalla Legge n°39 del 01/03/2002.
5. Euratom, Recommendation 90/143/Euratom, *Commission Recommendation on the protection of the public against indoor exposure to radon*, 21 February 1990.
6. ARPA Piemonte, Dipartimento Subprovinciale di Ivrea, lettera a Legambiente, su “Risultati analisi campione di roccia”, a firma Mauro Magnoni e Giampaolo Ribaldi, Ivrea, rif. 1372/IR 93, prot. n.3065, 09/10/1997.
7. L. Bonavigo, relatori: M. De Salve, M. Zucchetti, Tesi di Laurea Spec.: *Esposizione a radiazioni in ambienti confinati. Il codice RESRAD-BUILD*, I Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Torino, 2006.
8. ICRP *Protection against radon-222 at home and at work*, ICRP Publication 65, Annals of the ICRP Volume 23, 1993, (Paras 72, 86).
9. ICRP *General principles for the radiation protection of workers*, ICRP Publication 75, Annals of the ICRP Volume 27, 1997, (Para 156).
10. ICRP *Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public and the optimisation of radiological protection: broadening the process*, Publication 101, Annals of the ICRP Volume 36, 2006.
11. ICRP *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP Volume 21, 1991 (Paras 190-193).