

Contributo dei materiali da costruzione all'esposizione esterna indoor: sviluppo di un nuovo strumento di valutazione della dose



A. Martinelli, C. Di Carlo
Istituto Superiore di Sanità, Dipartimento Ambiente e Salute
DOI: 10.1016/j.rineng.2026.110023

1 Introduzione

Contesto: I radionuclidi naturali (^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K) presenti nei materiali da costruzione rappresentano la principale sorgente di esposizione gamma esterna negli ambienti indoor. L'esposizione indoor a radiazioni gamma da materiali da costruzione interessa tutta la popolazione con una dose efficace media mondiale di $\sim 0.4 \text{ mSv a}^{-1}$ (UNSCEAR, 2000).

Quadro Normativo: La normativa europea (Direttiva 2013/59/Euratom) stabilisce un livello di riferimento per la dose efficace da esposizione esterna indoor - aggiuntiva a quella esterna outdoor - di 1 mSv a^{-1} e raccomanda l'Indice di Concentrazione di Attività (RP 112, 1999) come strumento di screening conservativo. Qualora l'Indice risulti >1 , l'impiego dei materiali da costruzione richiede valutazioni di dose più accurate (i.e., sito-specifiche).

Limiti dei metodi attuali:

- L'Indice fa riferimento ad una stanza di dimensioni standard (5x4x2.8 m) con pareti di spessore e composizione definiti (i.e., 20 cm e cemento).
- I metodi di calcolo standardizzati per le valutazioni di dose più accurate (e.g., CEN/TR 17113) adottano varie semplificazioni come energie medie di emissione e discretizzazioni per spessori e densità.
- Alcune assunzioni adottate dai metodi di calcolo si rivelano non conservative: principalmente, la saturazione della dose a 20 cm di spessore e le dimensioni della stanza di riferimento.
- I software professionali (e.g., MicroShield®) richiedono licenze onerose e i codici Monte-Carlo competenze e tempo di calcolo elevati.

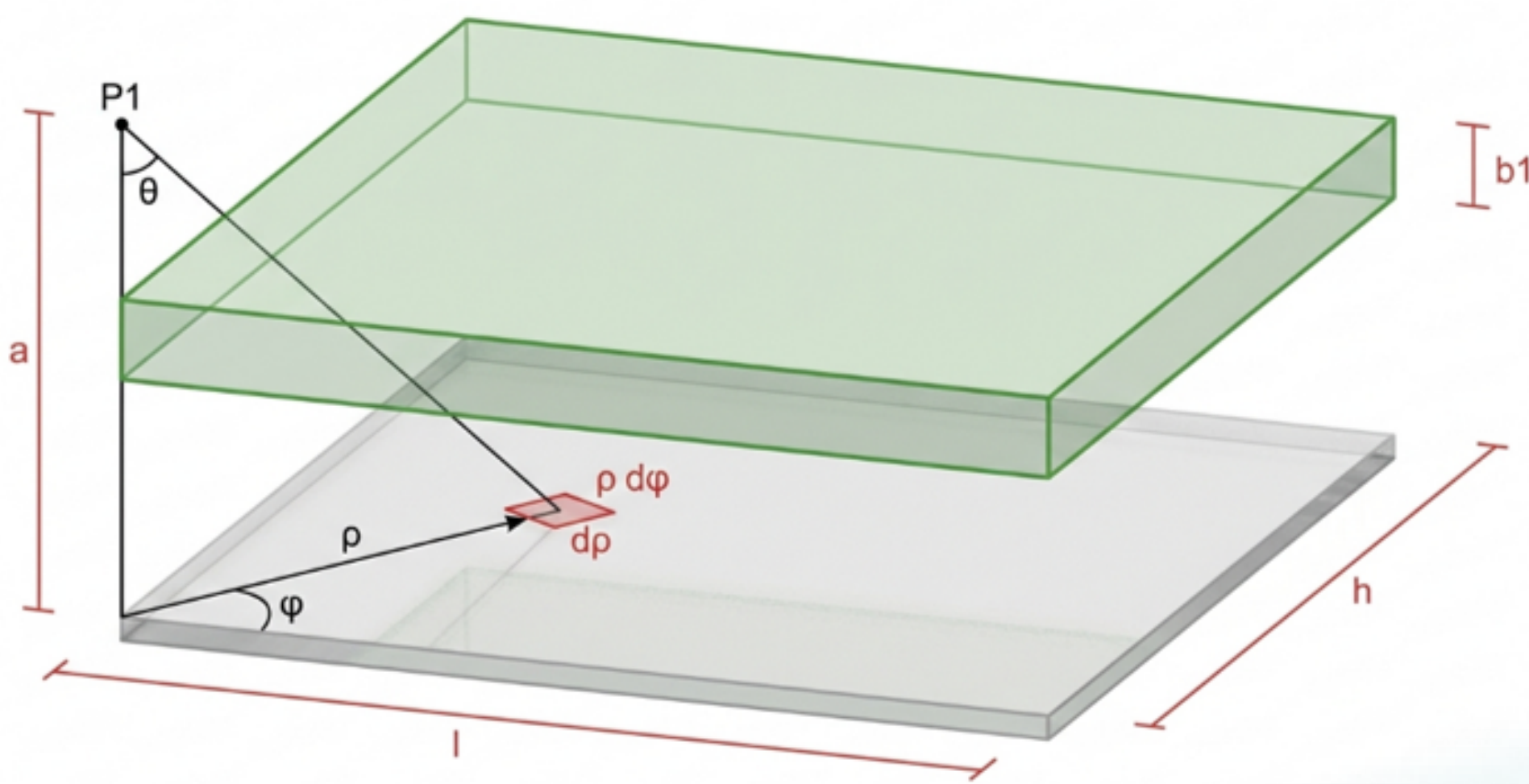
Obiettivo: Sviluppare e presentare un nuovo strumento di calcolo open-access, basato su codice Python e integrato in un foglio di calcolo, capace di valutare in modo istantaneo, accurato e senza semplificazioni la dose efficace da esposizione esterna indoor dai materiali da costruzione.

2 Metodologia

Modellazione geometrica (Point-Kernel):

- La stanza è modellata come un parallelepipedo privo di aperture (approccio conservativo).
- Ciascuna struttura (pareti, soffitto e pavimento) viene discretizzata e rappresentata come una somma di strati bidimensionali di spessore 0.1 cm (fino a un massimo di 50 cm).
- Il flusso e la dose efficace sono valutati al centro della stanza utilizzando il metodo del Point-Kernel con integrazione numerica su strati 2D.

$$d\Phi = B(s, E) \frac{S_A dA}{4\pi r^2} e^{-\mu(E)s \sec \theta}$$



Spettro di emissione e attenuazione:

- A differenza dell'approccio standard basato su energie di emissione medie per ciascuna catena di decadimento, l'algoritmo considera l'intero spettro di emissione di ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K , discretizzato in 41 bin energetici (da 10 a 3200 keV).
- Vengono impiegati i coefficienti di attenuazione NIST (per calcestruzzo ordinario e aria secca) e i fattori di buildup aggiornati specifici per il calcestruzzo (Chilton et al., 1979).
- È inclusa l'attenuazione dell'aria, particolarmente rilevante per i fotoni a bassa energia ($< 100 \text{ keV}$).

Valutazione della dose efficace: Il calcolo della dose efficace è effettuato sia tramite l'approccio UNSCEAR (0.7 Sv per Gy di Kerma in aria) sia, soprattutto, mediante l'approccio ICRP basato sui coefficienti di conversione in geometria isotropica specifici per energia (coefficienti $[\text{Sv cm}^2]$, ICRP 116, 2010).

Validazione del codice: Il modello è stato validato con successo confrontando i flussi calcolati con quelli ottenuti tramite il software professionale MicroShield®, riscontrando uno scarto inferiore al 10% per i fotoni ad alta energia che contribuiscono a oltre il 99,6% della dose totale.

3 Risultati e discussione

Parametro Analizzato	Approccio standard (e.g., CEN/TR 17113)	Risultato dello studio	Impatto sulla valutazione della dose
Spessore della parete che contribuisce alla dose indoor	Saturazione della dose per una parete di 20 cm	La dose continua a crescere per pareti di spessore fino a 50 cm	+13% di dose passando da 20 a 50 cm
Dimensioni della stanza di riferimento	Stanza CEN (4x3x2.5 m)	Stanze più ampie (e.g., 12x7x2.8, Markkanen, 1995) determinano una dose maggiore	Fino a +15% di dose rispetto alla stanza CEN
Spettro energetico di emissione	Energie medie assunte per ciascuna catena di decadimento	Una migliore discretizzazione dello spettro di emissione influenza significativamente la dose valutata, soprattutto per la catena del Ra-226	Fino al -13% di dose per la catena di decadimento del Ra-226 e possibilità di considerare il disequilibrio nelle catene

Non-saturazione della dose a 20 cm: Contrariamente a quanto assunto dagli standard CEN/TR 17113 e dall'Indice, la dose efficace indoor non satura a 20 cm di spessore, ma aumenta del 13% estendendo lo spessore delle pareti fino a 50 cm.

Effetto della dimensione della stanza: Confrontando le tre geometrie standard (CEN, RP 112, Markkanen), la stanza CEN (4x3x2,5 m) non risulta essere la scelta più conservativa. La geometria Markkanen (12x7x2,8 m) stima una dose efficace indoor superiore tra il 4% e il 15%.

Spettro completo vs Energie medie:

- Catena del ^{226}Ra : l'uso dello spettro di emissione causa una differenza fino al 13% nella dose stimata rispetto all'energia media usata dallo standard CEN.
- Approccio ICRP vs UNSCEAR: L'impiego dei fattori di conversione ICRP risulta mediamente più conservativo - fino al 10% in più sulla dose totale - rispetto all'approccio UNSCEAR e alla norma CEN.

4 Conclusioni

Implicazioni Operative e Inquadramento Radioprotezionistico: Il software sviluppato si colloca come uno strumento fondamentale nell'approccio graduato (graded approach) per il licensing dei materiali da costruzione:

- Supporta l'impiego di residui come materiali edili: rimuovendo il conservativismo eccessivo degli indici di screening di base, permette l'impiego sicuro di materiali realizzati a partire da residui industriali (e.g., industrie NORM).
- Accessibilità, semplicità d'uso ed efficienza: offre stime istantanee tramite foglio di calcolo, eliminando la necessità di licenze onerose o complesse simulazioni Monte-Carlo.
- Possibilità di personalizzazione: il software consente di valutare la dose indoor per qualsiasi valore di spessore e densità delle pareti e di considerare l'effettiva concentrazione di attività nel materiale dei radionuclidi gamma emettitori.



[Link per scaricare il tool](#)

UNSCEAR, Sources and Effects of Ionizing Radiation (2000). Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Volume I: Sources: United Nations: New York, NY, USA.

ICRP (2010). The 2010 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 116.

RP 112, Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. European Commission, Radiation Protection 112., (1999).

CEN/TR 17113, CEN TR17113 Construction products. Assessment of release of dangerous substances. Radiation from construction products. Dose assessment of emitted gamma radiation., (2018).

M. Markkanen, Radiation Dose Assessments for Materials with Elevated Natural Radioactivity, (1995).