

Lecce, 16 gennaio 2025

Il Radon: aspetti legislativi, sanitari,
ambientali e costruttivi

Caratteristiche delle barriere anti-radon e loro progettazione: esempio e metodo di calcolo

Claudio Cazzato

Fisico- ex ENEA-DISP Roma

Fisico Sanitario

Esperto di Radioprotezione di III Grado N. 412

(Ministero del Lavoro e della Prev. Sociale)

Membro del GER (Gruppo di Emergenza Radiologica Nazionale)

Mail: c.cazzato@tiscali.it

Tel: 3687857523

Attenzioni



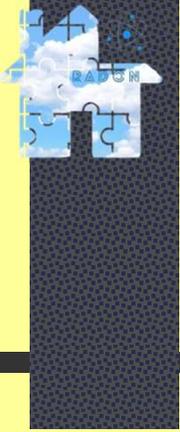
Attenzioni

Sono sollecitate da azioni fisiche di **punzonamento** sia in fase di applicazione, che in fase di interrimento.

In esercizio le membrane sono sollecitate principalmente per punzonamento statico.

Sollecitate per **abrasione** ed anche **per trazione**.

Sono sottoposte **all'aggressione chimica** degli acidi umici, dei microrganismi etc.



Lecce, 16 gennaio 2025

L'efficacia dei materiali barriera nel ridurre il trasporto di radon dal terreno dipende principalmente dalla

- **loro composizione chimica,**
- **dalle proprietà meccaniche,**
- **alla capacità di creare giunti ermetici**
- **Capacità di isolare i tubi degli impianti**
- **loro sufficiente durata nel tempo**
- **Preparazione della superficie del substrato**



Lecce, 16 gennaio 2025

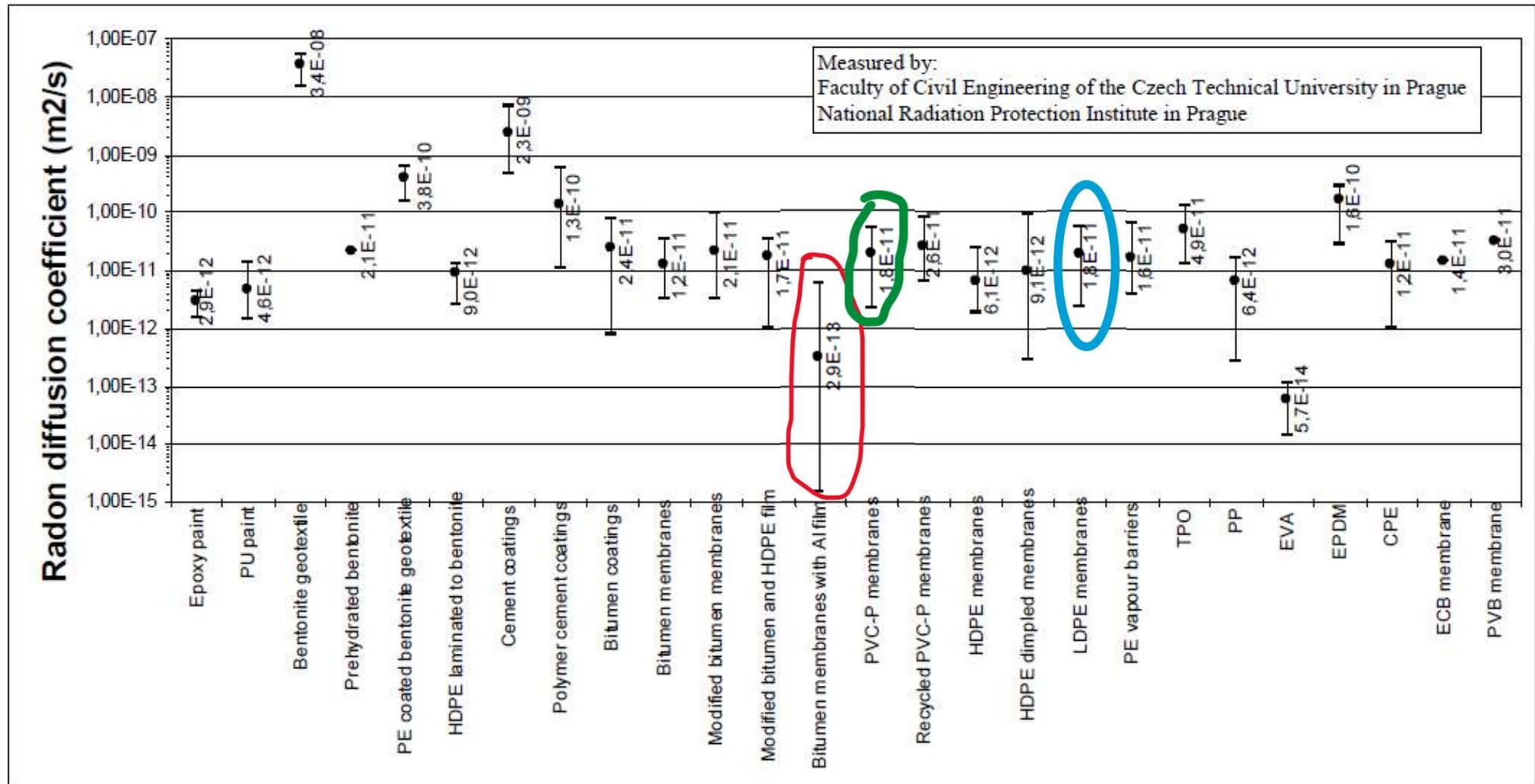
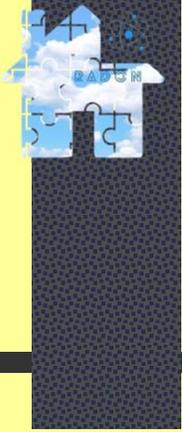


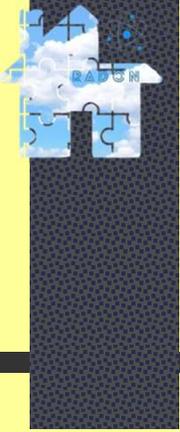
Fig. 1. Summary of radon diffusion coefficients measured in 360 waterproof materials of different chemical composition

Legend. Bentonite - a dry form of sodium bentonite placed between two geotextiles or kraft boards; modified bitumen membranes - SBS modification (a blend of asphalt and styrene-butadiene-styrene) or APP modification (a blend of asphalt and atactic polypropylene); modified bitumen and HDPE film - membranes combining SBS modified bitumen and HDPE carrier film; HDPE - high-density polyethylene; PE - polyethylene; recycled PVC - membranes made of recycled PVC; PP - polypropylene; TPO - thermoplastic polyolefin; PU - polyurethane; ECB - ethylene copolymer bitumen; PVB - polyvinyl butyral; CPE - chlorinated polyethylene; EVA - ethylene vinyl acetate.



Il trasporto del gas radon

- Per AVVEZIONE
 - Per DIFFUSIONE
 - Trasporto da gas «carrier»
(CO₂)
-



Lecce, 16 gennaio 2025

Prima Legge di Fick

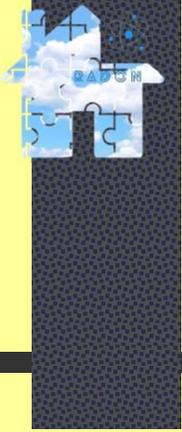
J: Intensità del flusso diffusivo

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

Equazione del trasporto del radon in una membrana

Ipotesi: Solo diffusione, una dimensione

$$\frac{\partial C_{(x,t)}}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C_{(x,t)}}{\partial x^2} - \lambda \cdot C_{(x,t)}$$



Lecce, 16 gennaio 2025

Il Radon: aspetti legislativi, sanitari,
ambientali e costruttivi

Diffusione del radon

stato stazionario

1)

$$D \cdot \frac{\partial^2 C_{(x)}}{\partial x^2} - \lambda \cdot C_{(x)} = 0$$

λ = Costante di decadimento del radon = $2,1 \cdot 10^{-6}$ 1/sec

D = Coefficiente di diffusione del radon (m^2/s)

Soluzione dell'equazione (1)

$$C_{(x)} = C_s \cdot \frac{\sinh(d - x)/l}{\sinh d/l}$$

(4)

C_s= Concentrazione di radon nel terreno

d= spessore della membrana

l= lunghezza di diffusione del radon nella membrana

Tasso di esalazione

(Bq/(m²sec))

$$E_{(x)} = -D \frac{dC_{(x)}}{dx} = C_s \cdot \lambda \cdot l \cdot \frac{\cosh(d - x)/l}{\sinh d/l}$$

Tasso di esalazione dalla membrana

$$E = C_s \cdot \frac{\lambda \cdot l}{\sinh d/l} = C_s \cdot T_{Rn} = \frac{C_s}{R_{Rn}}$$

T_{Rn} = Trasmittanza del radon (m/s)

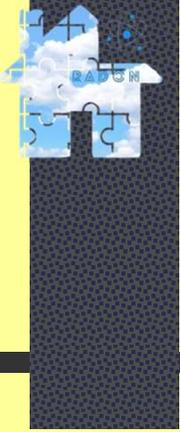
$\frac{1}{T_{Rn}}$ = resistenza al radon (Ms/m)

$$T_{Rn} = \frac{\lambda \cdot l}{\sinh d/l}$$

Trasmittanza del
radon (m/s)

Resistenza
al radon
(Ms/m)

$$R_{Rn} = \frac{1}{T_{Rn}} = \frac{\sinh d/l}{\lambda \cdot l} \quad (6)$$



Lecce, 16 gennaio 2025

Resistenza al radon per membrane da 2 mm

Calculation of radon resistance values for 2-mm thickness membranes (d).

Typology	No. of tested materials	avg. D [m^2/s]	λ [s^{-1}]	avg. l [m]	avg. R_{Rn} [Ms/m]
MAP	98	1.71×10^{-11}	2.1×10^{-6}	2.85×10^{-3}	127
SMA	52	2.67×10^{-11}	2.1×10^{-6}	3.57×10^{-3}	79
SPC	36	1.96×10^{-10}	2.1×10^{-6}	9.65×10^{-3}	10
PVC	72	1.72×10^{-11}	2.1×10^{-6}	2.86×10^{-3}	126
MA-PE	19	1.54×10^{-11}	2.1×10^{-6}	2.71×10^{-3}	142

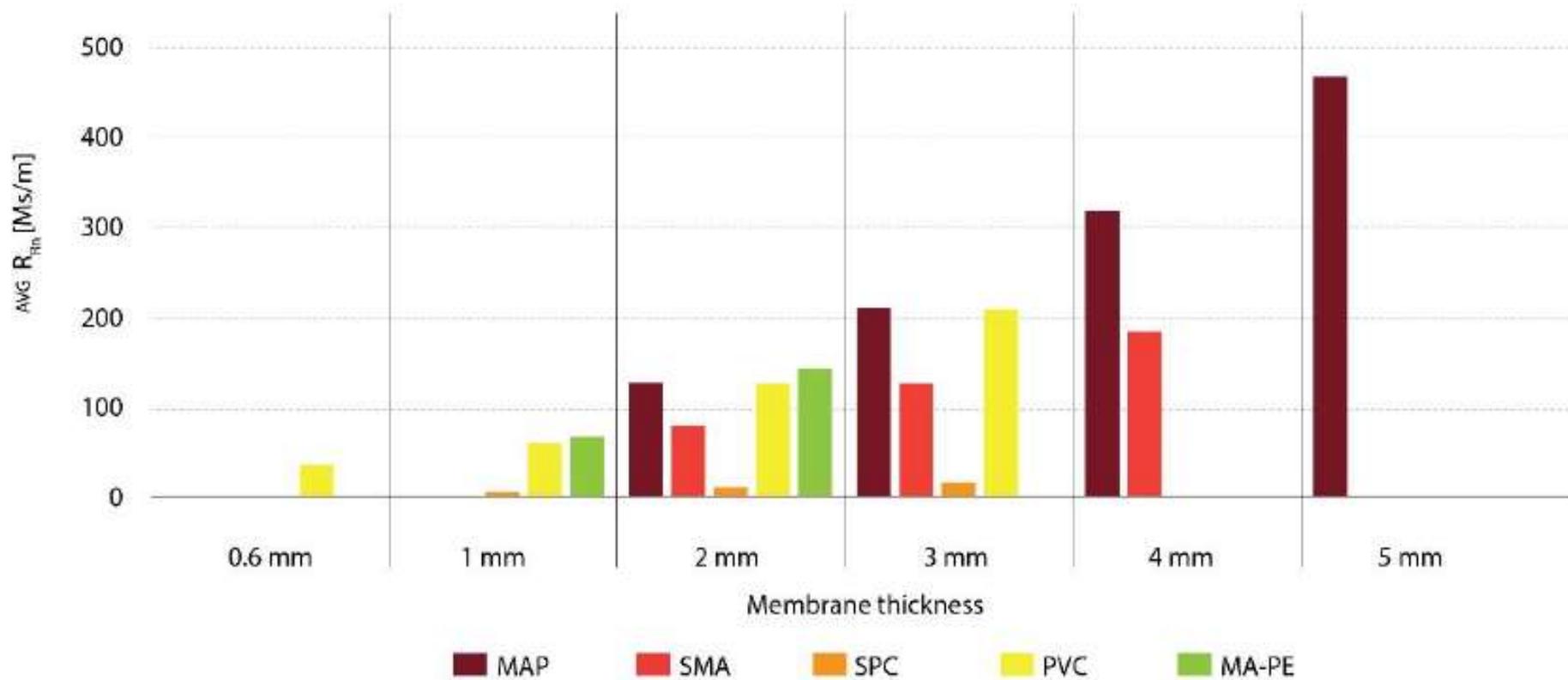
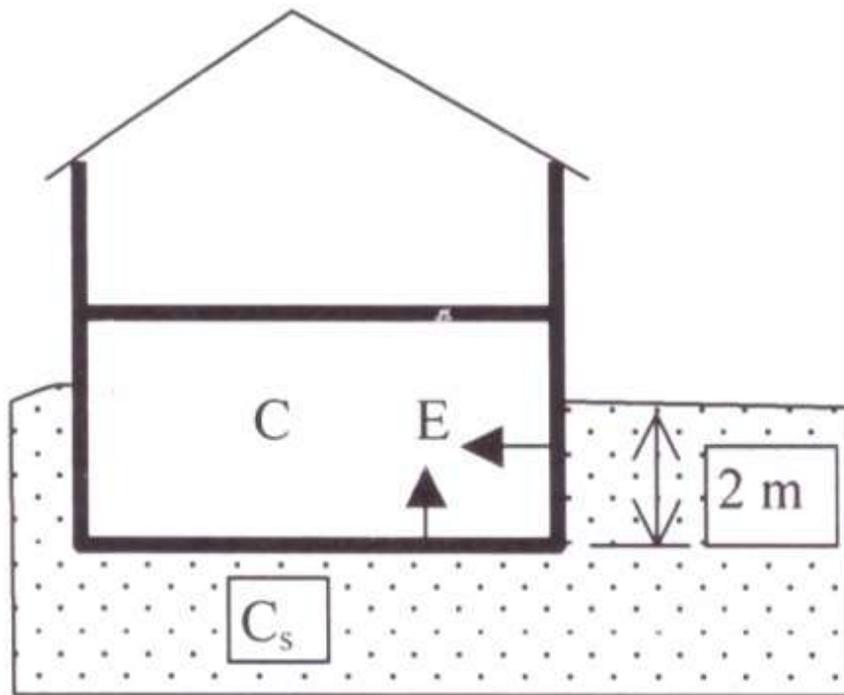


Figure 1. Overview of average R_{Rn} for different membrane thicknesses. A few values of radon resistance cannot be reached since it is not realistic to have those specific thicknesses for certain types of waterproof membranes.

ESEMPIO per il calcolo della barriera anti Radon Standard CSN 730601 Repubblica Ceca.

DATI: Abitazione familiare singola; Superficie pavimento 100 mq e 80 mq muri
seminterrato a contatto con il terreno; Volume: 260 m³; Rate Ventilazione: n: 0,3/h



$$C = \frac{E \cdot (A_f + A_w)}{n \cdot V} \quad (\text{Bq/m}^3) \quad 1)$$

$$E = \frac{l \cdot \lambda \cdot C_s}{\sinh(d/l)} \quad (\text{Bq/m}^2 \cdot \text{h}) \quad 2)$$

PROCEDURA DI CALCOLO

- 1) Stabilire la Concentrazione di progetto all'interno della casa, supp. 200 **Bq/m³**
- 2) Si calcola, dall'equazione 1), l'esalazione attraverso la guaina che permette di avere all'interno il 10% del valore di progetto: 20 (**Bq/m³**)
- 3) Il valore di E così calcolato si sostituisce nell'equazione 2).
- 4) Si sceglie il tipo di guaina e si sostituiscono i valori nell'equazione 2).

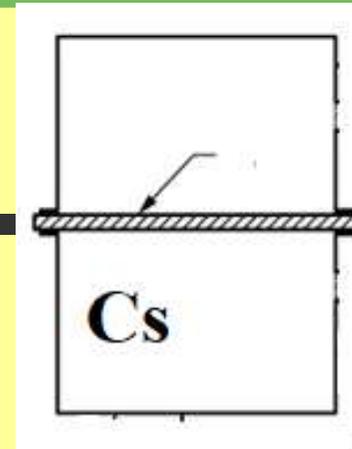
L'unica incognita nell'equazione 2) è d, cioè il valore dello spessore della guaina anti radon.



Lecce, 16 gennaio 2025

$$C = \frac{E \cdot (A_f + A_w)}{n \cdot V} \quad (\text{Bq/m}^3)$$

$$E = \frac{l \cdot \lambda \cdot C_s}{\sinh(d/l)} \quad (\text{Bq/m}^2 \cdot \text{h})$$



$$d \geq l \cdot \operatorname{arcsinh} \frac{\alpha_1 \cdot l \cdot \lambda \cdot C_s \cdot (A_f + A_w)}{C_{dif} \cdot n \cdot V}$$

• Rimane da valutare la permeabilità del suolo, cioè il valore

α_1 = (7 suolo con alta permeabilità), (3 suolo permeabilità media), (2,1 suolo con permeabilità bassa).

$$C = \frac{E \cdot (A_f + A_w)}{n \cdot V} \quad (\text{Bq/m}^3)$$

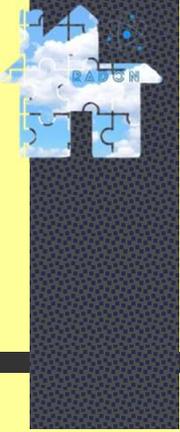
$$E = \frac{l \cdot \lambda \cdot C_s}{\sinh(d/l)} \quad (\text{Bq/m}^2 \cdot \text{h})$$

**d=spessore della guaina
calcolata**

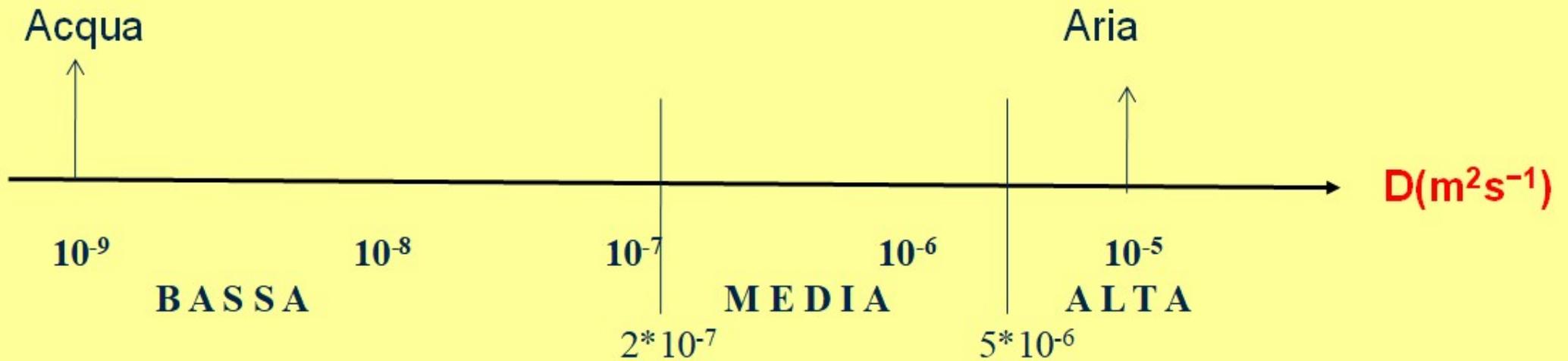
$$E = C_s \cdot \frac{\lambda \cdot l}{\sinh d/l} = C_s \cdot T_{Rn} = \frac{C_s}{R_{Rn}}$$

• Rimane da valutare la permeabilità del suolo, cioè il valore

α_1 = (7 suolo con alta permeabilità), (3 suolo permeabilità media), (2,1 suolo con permeabilità bassa).



Coefficienti di Diffusione ($D(\text{m}^2\text{s}^{-1})$)





Lecce, 16 gennaio 2025

Il Radon: aspetti legislativi, sanitari, ambientali e costruttivi

Af (Pavimento)=

Aw (Pareti interrato)=

Altezza (m)=

N =

Concentrazione di radon di progetto =

Fattore di cautela (1/10) =

Concentrazione di radon nel terreno =

Permeabilità del terreno

Bassa

Media

Alta

Coefficiente di diffusione membrana scelta=

RISULTATO:

Spessore (mm)=

IPOTESI		
Af (Pavimento)	100	m2
Aw (Pareti interrato)	80	m2
Totale superficie a contatto con terreno	180	m2
Altezza (m)	2,6	m
V	260	m3
n	0,3	1/h
Concentrazione di radon di progetto		
	200	
Fattore di cautela (1/10)		
	20	
Concentrazione di radon nel terreno		
	60000	Bq/m3
Permeabilità del terreno		
Bassa	2,1	
Media	3	
Alta	7	
Valore scelto	7	
Coefficiente di diffusione membrana scelta		
	1,00E-11	D(m2/s)
Costante decadimento radon		
	0,00756	h-1
	2,10E-06	sec-1
Ld		
	0,002182179	metri
Esalazione consentita		
	8,666666667	
argomento arcsinh($\alpha * Ld * \lambda * Cs / E$)		
	0,80	0,7994832
spessore membrana		
	1,60E-03	metri
	1,60E+00	mm

Foglio Excell per calcolo

[Spessore membrane.xlsx](#)

GRAFICO PER VERIFICA

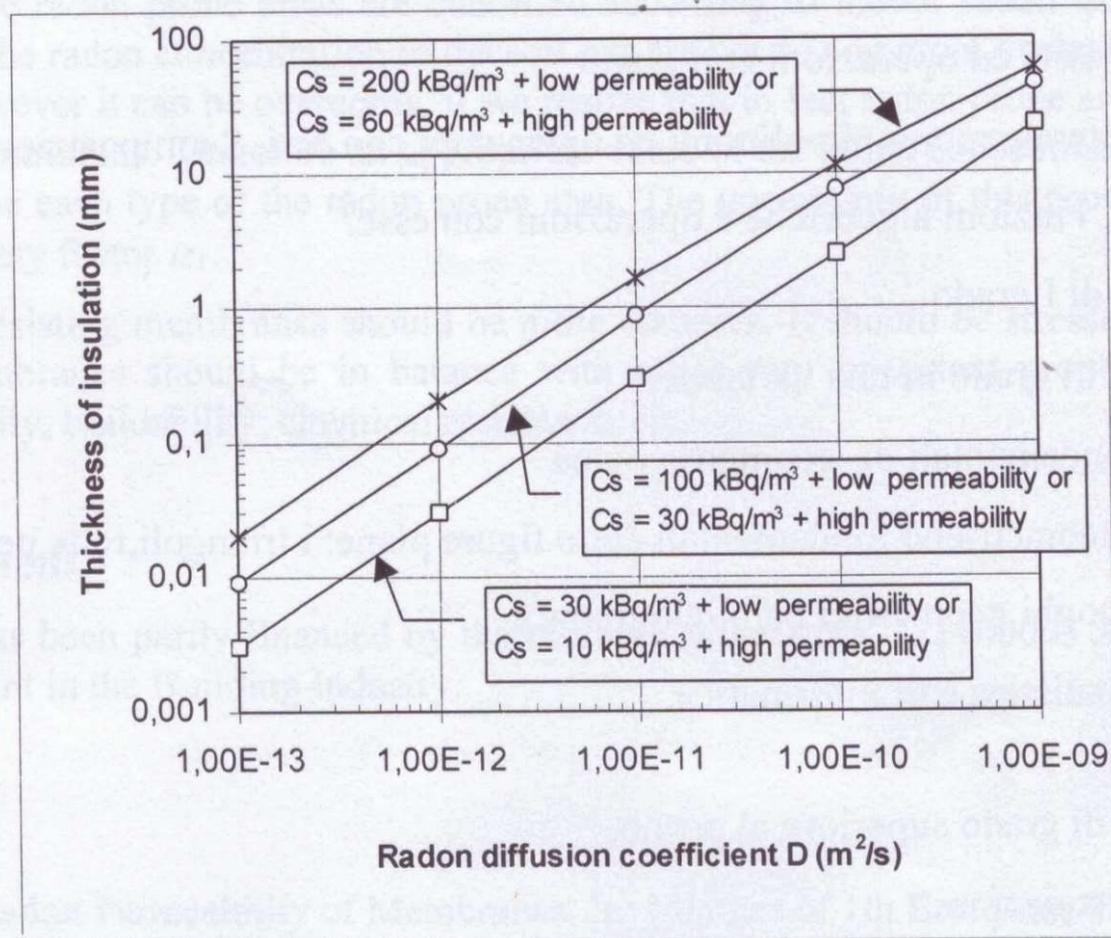


Fig. 6. Thickness of the insulation calculated according to the equation (6) for different values of D and various combinations of soil gas radon concentration and soil permeability. The influence of the soil permeability is introduced by the safety factor α_1 that increases proportionally with the permeability. Chart is valid for the house with habitable rooms in the basement according to the previously described example.



Lecce, 16 gennaio 2025

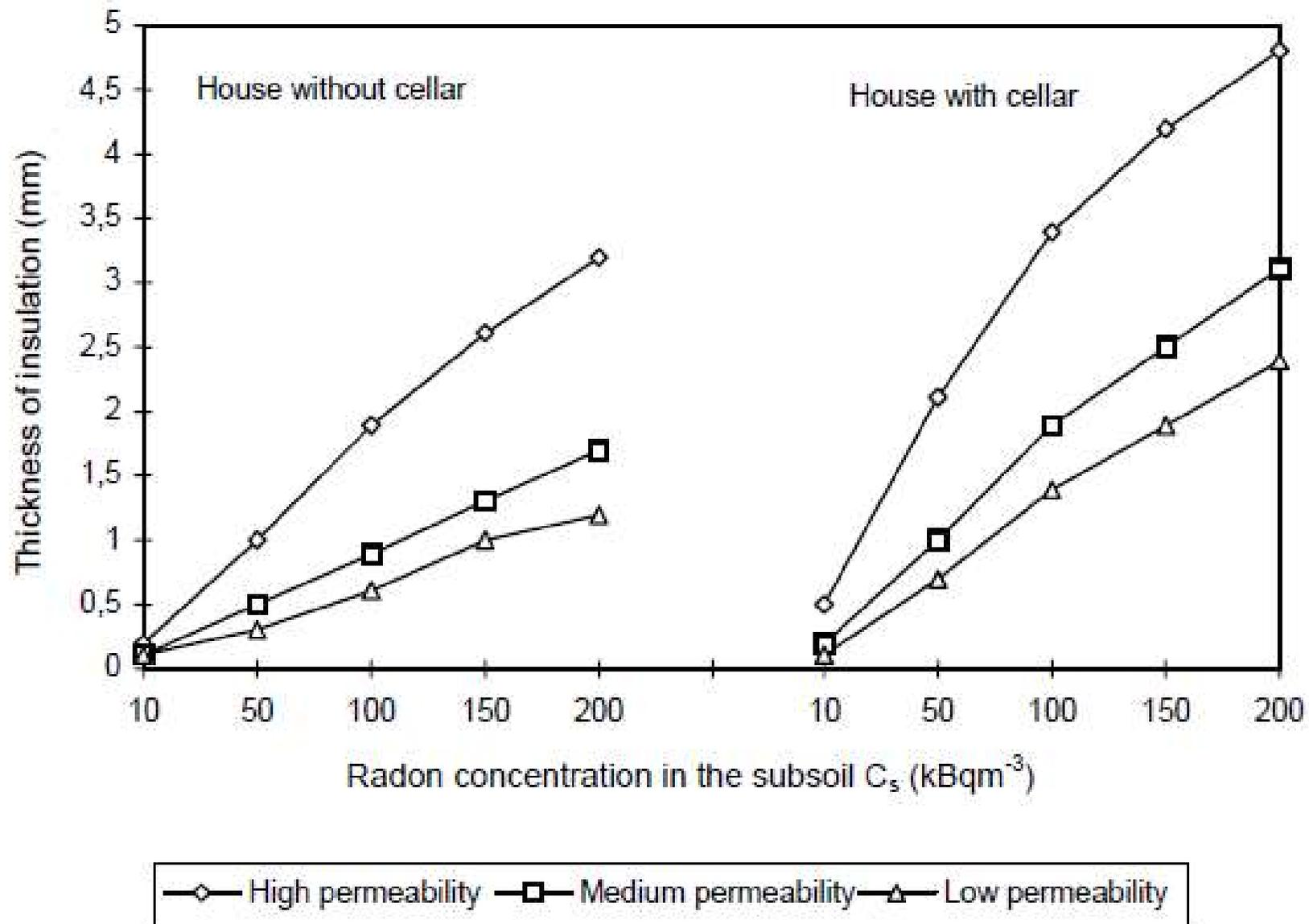


Fig. 6: The thickness of the insulation with $D = 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ plotted against the soil gas radon concentration, soil permeability and the type of a house

Coefficiente di Diffusione in funzione della densità del Polietilene

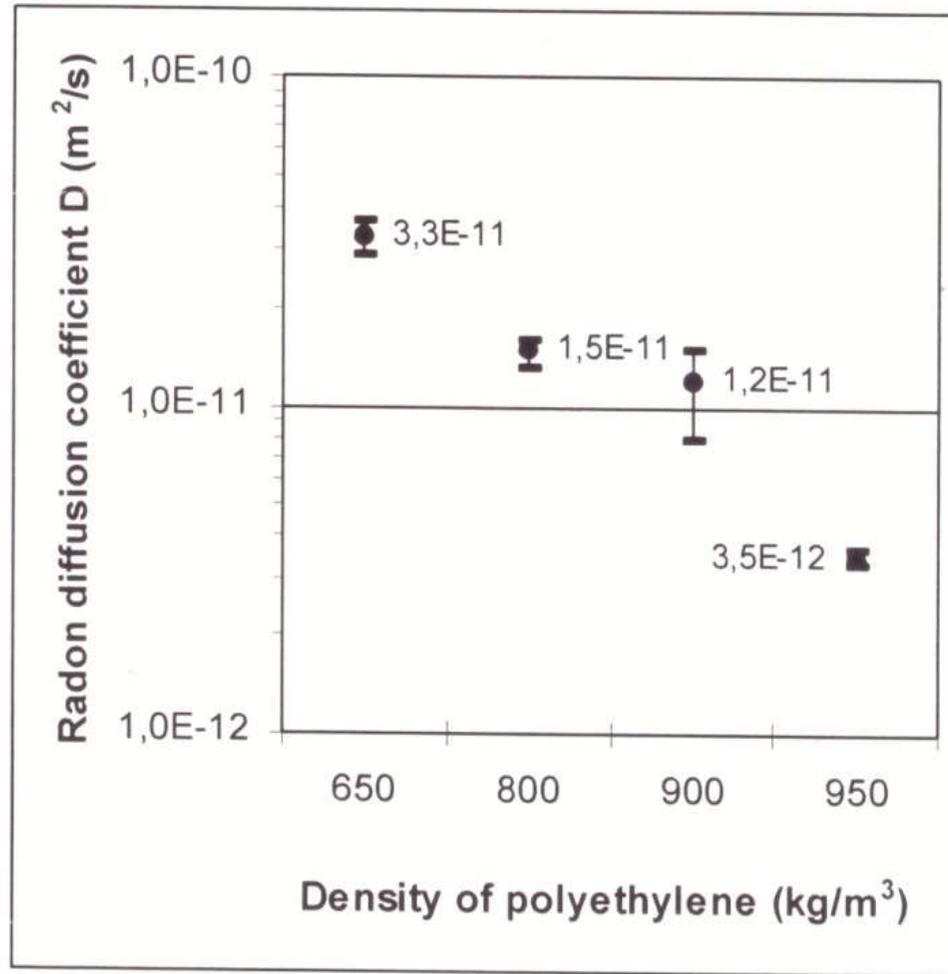


Fig. 2. Radon diffusion coefficient in polyethylene membranes plotted as a function of the density of polyethylene (membranes with the density lower than 920 kg/m³ are foamed LDPE membranes)

Coefficienti di Diffusione del Radon in alcune membrane

bitumen membranes with Al foils, PVC-P, HDPE and LDPE membranes, polymer modified bitumen compositions and membranes made of modified bitumen.

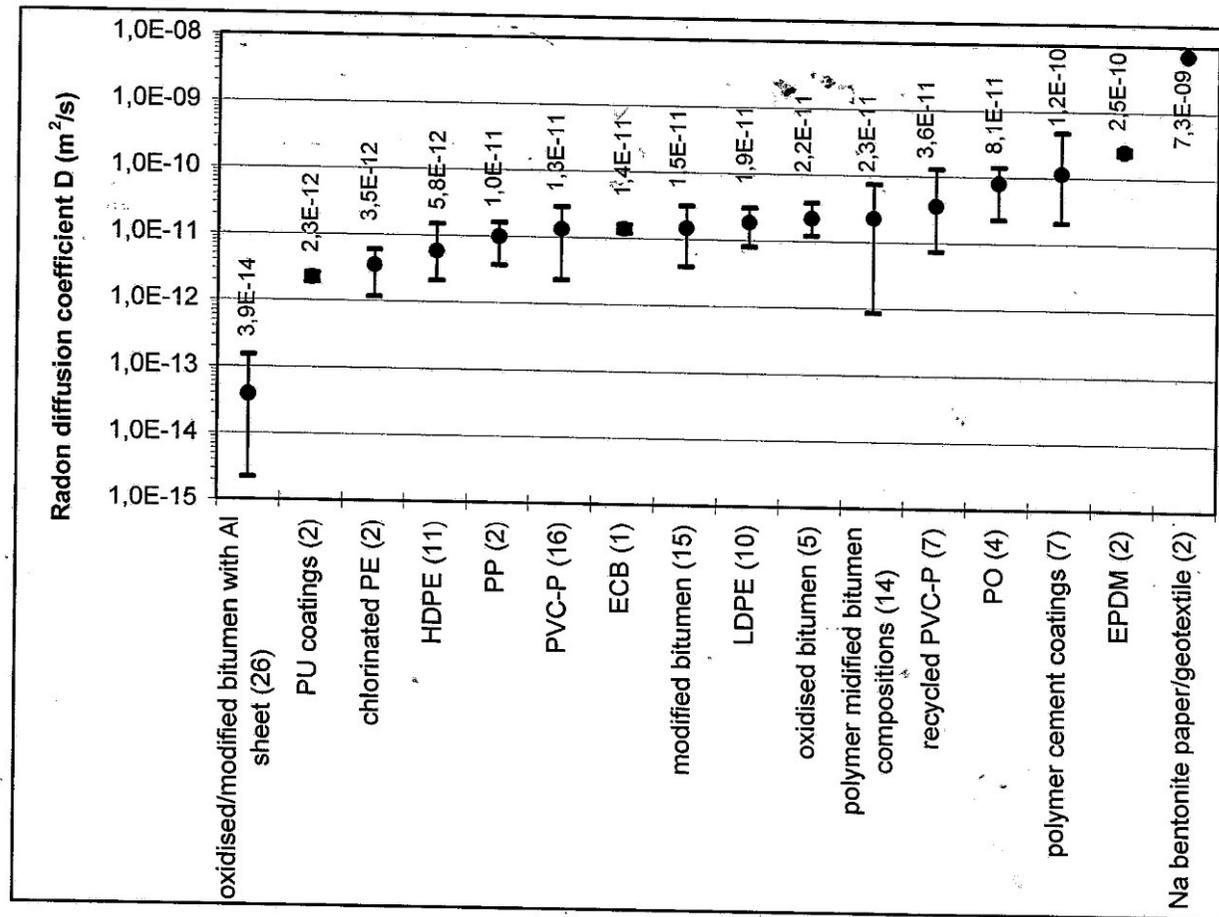
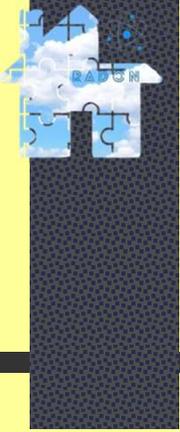


Fig. 1. Summary of the radon diffusion coefficient measurements realized in 126 materials. On x-axis materials are registered with respect to rising order of their diffusion coefficients (HDPE - high density polyethylene, LDPE - low density polyethylene, PVC-P - flexible polyvinyl chloride, PP - polypropylene, PO - polyolefin, PU - polyurethane, ECB - ethylene copolymer bitumen, EPDM - ethylene propylene dien monomer)

Nazaroff et al., 1988

Porous material	Effective radon diffusion coefficient, D_e (m^2s^{-1})
Sabbie siltose compattate	$(3.0 \pm 1.3) \times 10^{-6}$ $(3.2 \pm 1.5) \times 10^{-6}$
Sabbie argillose compattate	$(2.5 \pm 1.0) \times 10^{-6}$
Argille inorganiche compattate	2.7×10^{-6} 2.5×10^{-7}
Argilla sabbiosa siltosa	6.0×10^{-8} $(5.4-7.2) \times 10^{-6}$
Sterili di uranio	8×10^{-7}
argille	5.7×10^{-10}
Fango	$(1.1-4.0) \times 10^{-7}$
Calcestruzzo	1.2×10^{-8} 3.4×10^{-8} 3.3×10^{-8} $(0.8-8.4) \times 10^{-8}$
Altri materiali	—
mattoni	$(0.8-3.0) \times 10^{-7}$
Gesso	$(1.0-4.0) \times 10^{-6}$
Granito	0.053×10^{-6}
Calcestruzzo in polimero PCC	$<10^{-6}$
calcare	0.34×10^{-6}



Lecce, 16 gennaio 2025

Grazie dell' attenzione

