

SOLUÇÕES PARA PREVENÇÃO E MITIGAÇÃO DO RADÃO EM EDIFÍCIOS

- Luís Pimentel, João Viegas, Jorge Patrício (LNEC)
- Alcides Pereira, José Costa (Universidade de Coimbra)
- Pilar Linares-Alemparte (CSIC, Madrid)

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS

CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024

6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal



5º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de
Construção Sustentáveis | Congresso Construção 2024
Lisboa, 6-8 Novembro 2024

LeaRn4LIFE
Learning Radon



Co-funded by
the European Union



TÓPICOS

- ✓ Origem do radão
- ✓ Fatores influenciadores da migração do radão do solo.
- ✓ Contributo dos materiais de construção para a exalação do radão.
- ✓ Modo de entrada do radão nos edifícios.
- ✓ Plano nacional do radão
- ✓ Principais soluções tecnológicas para controlar, reduzir e mitigar o radão
- ✓ Dimensionamento de membranas e de sistemas de ventilação natural
- ✓ Recomendações, conclusões e desenvolvimentos futuros

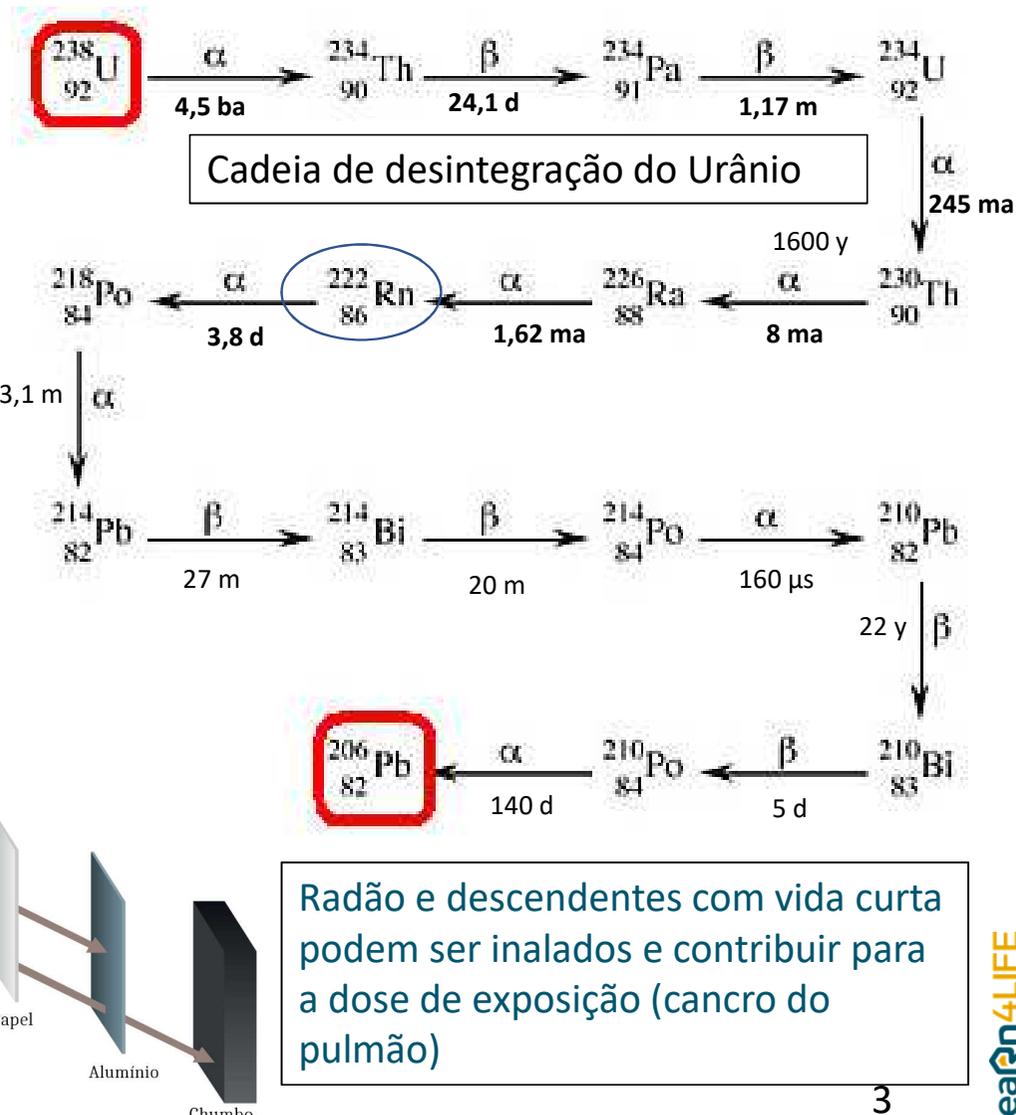
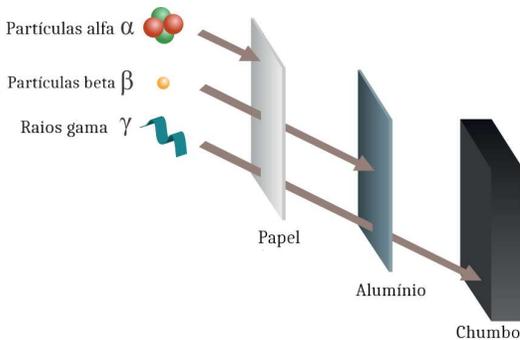
Radão

✓ radão (Rn) poluente (sem cheiro, sabor ou cor). Maior fonte natural de radiação ionizante. Afeta a QAI.

1																	18				
H 1 Hidrogênio																	He 2 Hélio				
2																					
Li 3 Lítio	Be 4 Berílio															B 5 Boro	C 6 Carbono	N 7 Nitrogênio	O 8 Oxigênio	F 9 Fluor	Ne 10 Neônio
3																					
Na 11 Sódio	Mg 12 Magnésio															Al 13 Alumínio	Si 14 Silício	P 15 Fósforo	S 16 Enxofre	Cl 17 Cloro	Ar 18 Argônio
4																					
K 19 Potássio	Ca 20 Cálcio	Sc 21 Escândio	Ti 22 Titânio	V 23 Vanádio	Cr 24 Cromo	Mn 25 Manganês	Fe 26 Ferro	Co 27 Cobalto	Ni 28 Níquel	Cu 29 Cobre	Zn 30 Zinco	Ga 31 Gálio	Ge 32 Germânio	As 33 Arsênio	Se 34 Selênio	Br 35 Bromo	Kr 36 Criptônio				
5																					
Rb 37 Rubídio	Sr 38 Estrôncio	Y 39 Ítrio	Zr 40 Zircônio	Nb 41 Níbio	Mo 42 Molibdênio	Tc 43 Técnetio	Ru 44 Rutênio	Rh 45 Ródio	Pd 46 Paládio	Ag 47 Prata	Cd 48 Cádmio	In 49 Índio	Sn 50 Estanho	Sb 51 Antimônio	Te 52 Telúrio	I 53 Iodo	Xe 54 Xenônio				
6																					
Cs 55 Césio	Ba 56 Bário	La-Lr 57-71 Lantanídeos	Hf 72 Háfnio	Ta 73 Tântalo	W 74 Wolfrâmio	Re 75 Rênio	Os 76 Ósmio	Ir 77 Írio	Pt 78 Platina	Au 79 Ouro	Hg 80 Mercúrio	Tl 81 Telúrio	Pb 82 Chumbo	Bi 83 Bismuto	Po 84 Póloônio	At 85 Astato	Rn 86 Radônio				
7																					
Fr 87 Francium	Ra 88 Rádium	Ac-Lr 89-103 Actínios	Rf 104 Riférmio	Db 105 Dubnium	Sg 106 Seabórgio	Bh 107 Bohrium	Hs 108 Háscio	Mt 109 Moscóvio	Ds 110 Darmstádio	Rg 111 Roentgênio	Cn 112 Copernício	Nh 113 Nihônio	Fl 114 Flavóvio	Mc 115 Moscóvio	Lv 116 Livermório	Ts 117 Tenessóvio	Og 118 Oganessônio				
8																					
		La 57 Lantanídeos	Ce 58 Cério	Pr 59 Praseodímio	Nd 60 Néodímio	Pm 61 Promécio	Sm 62 Samarco	Eu 63 Európio	Gd 64 Gadolínio	Tb 65 Terbópio	Dy 66 Dísprio	Ho 67 Hólio	Er 68 Ério	Tm 69 Tulio	Yb 70 Ítrio	Lu 71 Lutécio					
		Ac 89 Actínios	Th 90 Tório	Pa 91 Protactínio	U 92 Urânio	Np 93 Neptúncio	Pu 94 Plutônio	Am 95 Americó	Cm 96 Cúrio	Bk 97 Berkelópio	Cf 98 Califórnia	Es 99 Einsteinó	Fm 100 Fermió	Md 101 Mendelevó	No 102 Nobeló	Lr 103 Lawrencio					

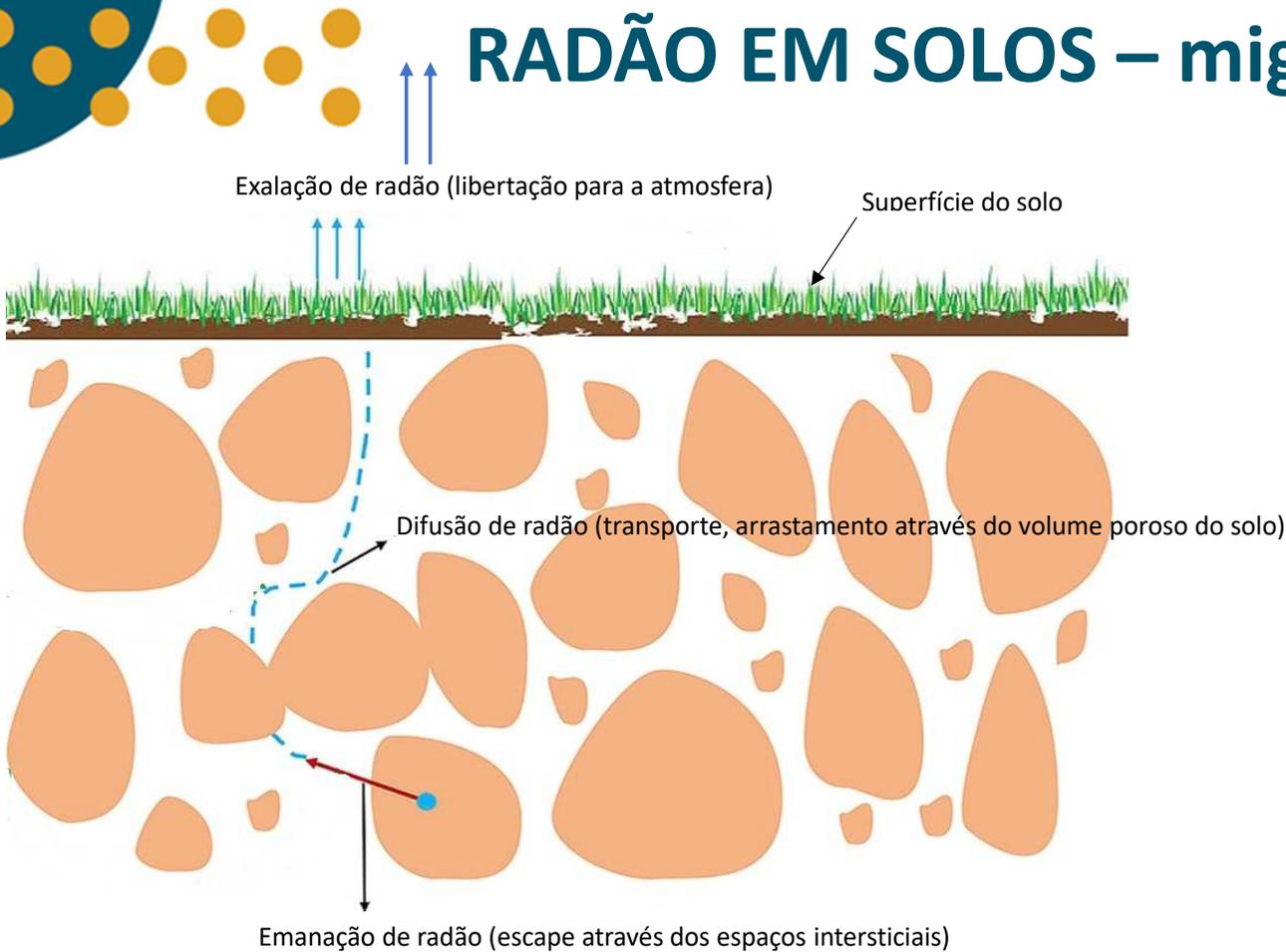
Símbolo → **H** Nome → **Hidrogênio**
Número atômico → **1**

222
Rn
86



Origem do radão: solo e materiais de construção

RADÃO EM SOLOS – migração



Granito e tufos vulcânicos



Permeabilidade (tipo de solo, porosidade, fissuração, tamanho dos grãos, temperatura e humidade/teor em água, movimentos do ar devido a grad T e grad P, velocidade do vento)

Huynh Nguyen Phong Thu, Nguyen Van Thang, Le Cong Hao (2020)
The effects of some soil characteristics on radon emanation and diffusion. *Journal of Environmental Radioactivity*, 216
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106189>



Radão em materiais de construção

Exalação de Radão 222



Material	Média	Gama
	mBq kg ⁻¹ h ⁻¹	
tijolos	17	0,6-137
betão	21	1-72
cimento	21	8-32
agregados	31	6-84
matérias-primas naturais	39	4-170
pedras naturais de revestimento	196	3-2232

NUCETELLI, LEONARDI & TREVISI, 2020

Grande variabilidade

O fluxo de radão proveniente do terreno é cerca de duas ordens de grandeza superior ao dos materiais de construção

Contribuição para a concentração de radão no interior dos edifícios:

- Solo (80%)
- Materiais de construção (20%): 5 a 20 Bq/kg

Swiss Radon handbook, Swiss federal Office of Public Health, 2000



Concentração de radão no interior de edifícios

A concentração no solo pode ser 1000 vezes superior à existente no interior

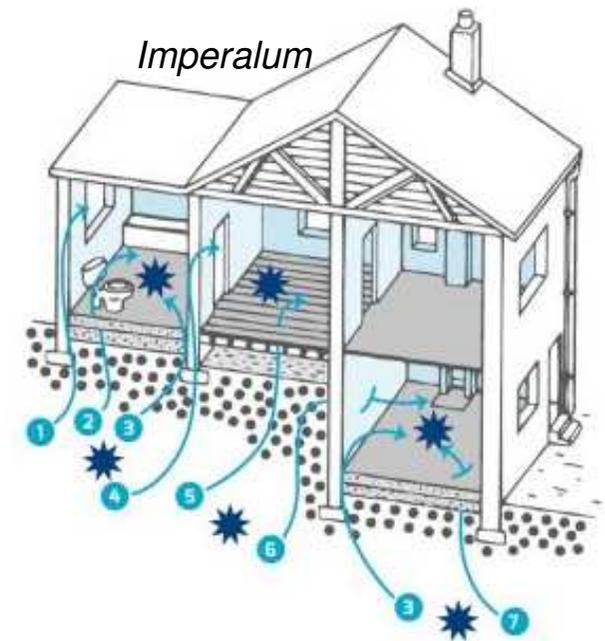
A concentração de radão no interior do edifício depende da **permeabilidade** do solo e da envolvente do edifício, podendo o risco de exposição no interior (RI) ser baixo, médio ou elevado.

O radão pode entrar nos edifícios, por convecção através de fissuras na envolvente ou por difusão através da própria envolvente quando esta é porosa.

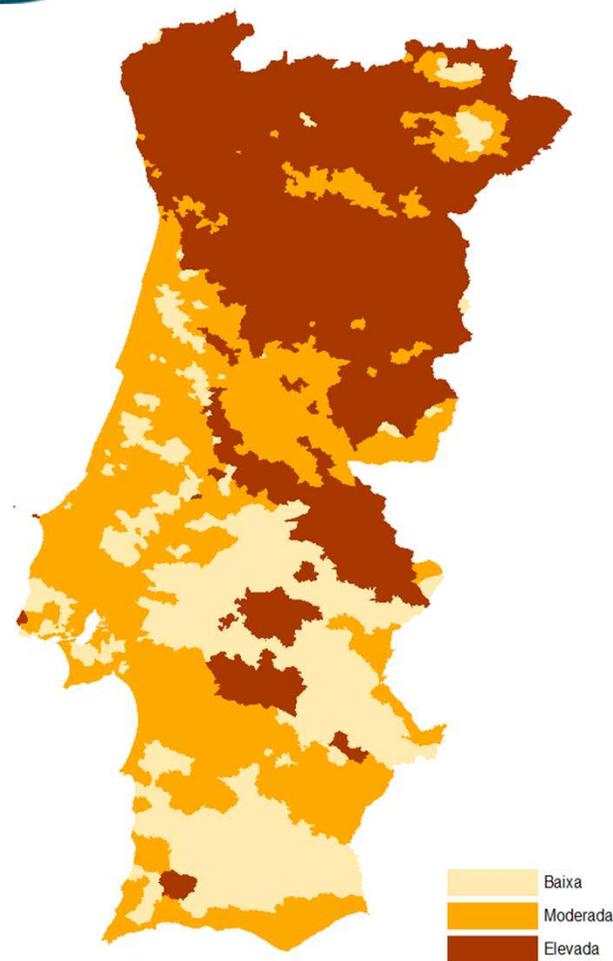
Fatores influenciadores:

Características e uso do edifício.

Outros aspetos: localização do edifício, tipo de fundações, permeabilidade dos pavimentos, paredes e pisos intermédios, comunicações interiores, caixas de ar, direção dos ventos dominantes.



Plano nacional do radão



Mapa do radão

Prevista **regulamentação** em Portugal: medidas de prevenção e de remediação da admissão de radão em edifícios localizados nas zonas de suscetibilidade moderada ou elevada no Mapa de Suscetibilidade ao Radão

Previstas ações de formação dirigidas a técnicos de construção, engenheiros, arquitetos, projetistas e responsáveis da administração pública e autárquica (Projeto LeaRn4LIFE).

<https://apambiente.pt/prevencao-e-gestao-de-riscos/mapa-de-suscetibilidade-ao-radao>

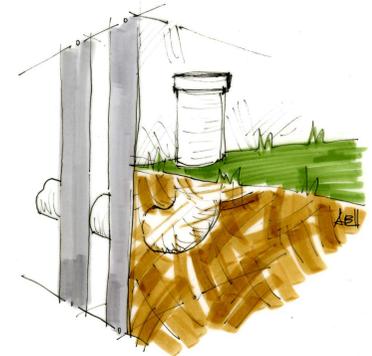
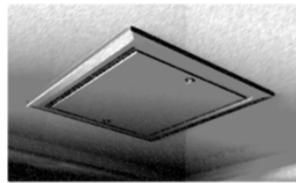
https://apambiente.pt/sites/default/files/_Prevencao_gestao_riscos/Protecao_radiologica/DPA_Rad%C3%A3o/SuscetibilidadeRadao_Freguesia.pdf



Principais soluções tecnológicas para controlar, reduzir e mitigar o radão

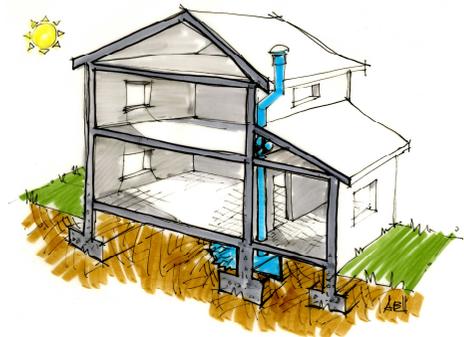
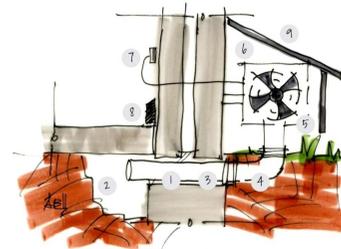
ISOLAMENTO

1. Selagem
2. Membranas



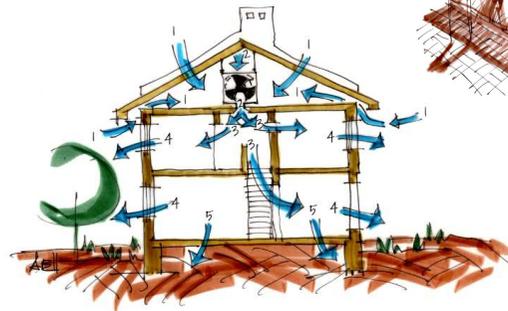
VENTILAÇÃO passiva (natural) ou ativa (mecânica)

1. Espaço de contenção ventilado
2. Sistema de despressurização do subsolo
3. Ventilação de espaços habitáveis



MISTO

Pressurização positiva





✓ Soluções para mitigar o radão - membranas

Requisitos mais importantes para garantir a eficácia e a durabilidade das membranas:

- ✓ **Instalação com qualidade** em continuidade, sem fendas, com juntas e encontros selados.
- ✓ **Especificação técnica com características de desempenho** (propriedades físicas - coeficiente de difusão ao radão e espessura, propriedades mecânicas - tração e resistência ao rasgamento, conteúdo/VOC's).
- ✓ Especificações dependentes da natureza do material constituinte (betuminosas: betume oxidado, betume-polímero de PPA, SBS; sintéticas: PVC-P à base de borracha (EPDM), PE, PP).
- ✓ **Durabilidade adequada** à vida útil do edifício (recomendado > 25 anos).

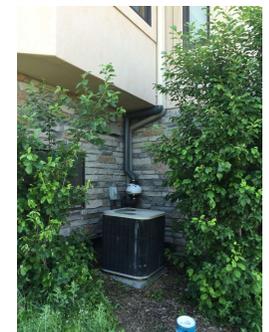
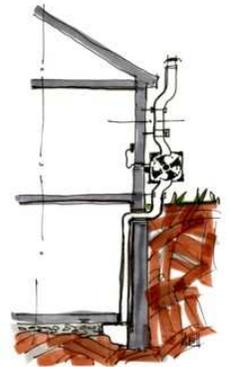
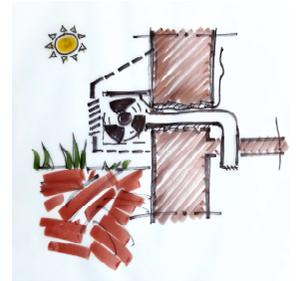


✓ Soluções para mitigar o radão - ventilação

Aspetos mais importantes para garantir a eficácia da ventilação:

- ✓ Selecionar a solução de ventilação mais adequada (em função das características do edifício e da concentração de radão)
- ✓ Especificar a potência e o caudal
- ✓ Dar preferência a soluções de ventilação natural, sempre que possível
- ✓ Ter em conta o conforto dos ocupantes, evitando correntes de ar e variações significativas de temperatura (HRV)
- ✓ Seguir recomendações (posicionamento, estética, ruído, segurança, funcionamento e manutenção):

<https://apambiente.pt/prevencao-e-gestao-de-riscos/prevencao-e-remediacao>



Dimensionamento de membranas

$$E < E_{lim}$$

$$E_{lim} = C_d \cdot \frac{Q}{A} \quad (1)$$

$$E = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot \lambda \cdot l}{\sinh\left(\frac{d}{l}\right)} \quad (2)$$

$$E = \frac{\alpha \cdot C_s \cdot \lambda \cdot l}{\sinh \frac{d}{l}} \quad (3)$$

$$l = \sqrt{\frac{D \cdot 3600}{\lambda}} \quad (4)$$

$V = f(H, A)$
 $Q = f(V, n)$
 $\alpha = f(\text{perm}, \text{vent})$
 $E_{lim} = \text{constante}$

Parâmetro	Unidades	Parâmetro	Unidades
E_{lim} (exalação limite)	Bq/m ² .h	C _s (exalação do solo)	Bq/m ³
C _d (concentração de projeto =10% Ref)	Bq/m ³	α (coeficiente de segurança)	
Ref (nível de referência) = 300	Bq/m ³	l (comprimento de difusão do Rn na barreira)	m
Q (caudal de ventilação)	m ³ /h	d (espessura da membrana)	m
A (área do compartimento)	m ²	D (coeficiente de difusão ao Rn)	m ² /s
E (fluxo de exalação)	Bq/m ² .h	V (volume do compartimento)	m ³
λ (constante de decaimento do Rn)	h ⁻¹	H (pé direito do compartimento)	m

Permeabilidade ao ar do solo	Sem sistema de ventilação	Com sistema de ventilação	
		Natural	Mecânico
Baixa	2,1	1,5	1,0
Média	3,0	2,0	1,0
Alta	7,0	4,0	1,0

Dimensionamento de membranas (exemplos)

exalação do solo desconhecida

Exemplos (membranas satisfatórias): $E < E_{lim}$ 

- $D \geq 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ ▪ $d \geq 0,02 \text{ mm}$
- $D \geq 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ▪ $d \geq 0,07 \text{ mm}$
- $D \geq 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ▪ $d \geq 0,8 \text{ mm}$

Exemplos (membranas não satisfatórias): $E > E_{lim}$ 

- $D \geq 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$
- $d > 265 \text{ mm!}$ 

exalação do solo conhecida

Exemplos (membranas satisfatórias): $E < E_{lim}$

- $\alpha = 7$ ▪ $D = 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$
- $Cs \approx 40000 \text{ Bq/m}^3$ ▪ $d \geq 0,8 \text{ mm}$
- $Cs \approx 80000 \text{ Bq/m}^3$ ▪ $d \geq 1,3 \text{ mm}$
- $Cs \approx 150000 \text{ Bq/m}^3$ ▪ $d \geq 2,2 \text{ mm}$
- $\alpha = 1$ ▪ $D = 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$
- $Cs \approx 150000 \text{ Bq/m}^3$ ▪ $d \geq 0,4 \text{ mm}$

Exemplos (membranas não satisfatórias): $E > E_{lim}$ 

- $\alpha = 7$ ▪ $D \geq 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$
- $Cs \approx 40000 \text{ Bq/m}^3$ ▪ $d \geq 6 \text{ mm}$



Dimensionamento de sistemas de ventilação

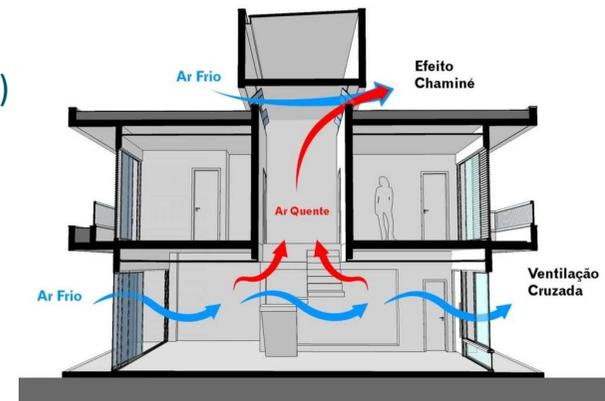


Edifícios novos de habitação: mínimo de ventilação natural correspondente a 0,5 RPH

Simulação de ventilação em espaços habitáveis com equação diferencial transiente para a concentração de radão (5), cuja solução (6) traduz a sua evolução temporal $C(t)$ num volume de controlo

$$C(t) = C_{equil} + (C_0 - C_{equil}) \cdot e^{-(\lambda+n)t} \quad (5) \quad \text{em que} \quad C_{equil} = \frac{E \cdot A}{(\lambda+n)V} \quad (6) \quad \text{e} \quad n_{min} = \frac{G}{C_{equil} \cdot V} - \lambda \quad (7)$$

- C_0 (Bq/m³): concentração inicial ($t=0$) de radão no ar interior
- C_{equil} (Bq/m³): concentração de equilíbrio em regime permanente (i.e., quando $t \rightarrow \infty$) (m³)
- n (h⁻¹ ou RPH): taxa de renovação de ar, a que corresponde um caudal de ventilação $Q=n \cdot V$ (m³/h)
- n_{min} : valor de projeto do caudal de ventilação necessário
- E [Bq/(m²·h)]: taxa de exalação
- V (m³): volume efetivo do espaço em estudo
- A (m²): superfície de exalação
- λ (h⁻¹): taxa de desintegração do radão
- $G = E \cdot A$ (Bq/h): taxa de geração de radão.



Pressupostos de simplificação:

- caudal de ventilação e taxa de geração de radão constantes no tempo;
- diluição do poluente perfeita, i.e., a concentração de radão no ar interior é uniforme em todo o espaço em qualquer instante t ;
- concentração de radão no ar exterior desprezável

Dimensionamento de sistemas de ventilação

Simulação

$$V = 77 \text{ m}^3$$

$$A = 32 \text{ m}^2$$

$$\lambda = 0.00755 \text{ h}^{-1}$$

$$C_0 = 1800 \text{ Bq/m}^3$$

$$E = 60 \text{ Bq}/(\text{h.m}^2)$$

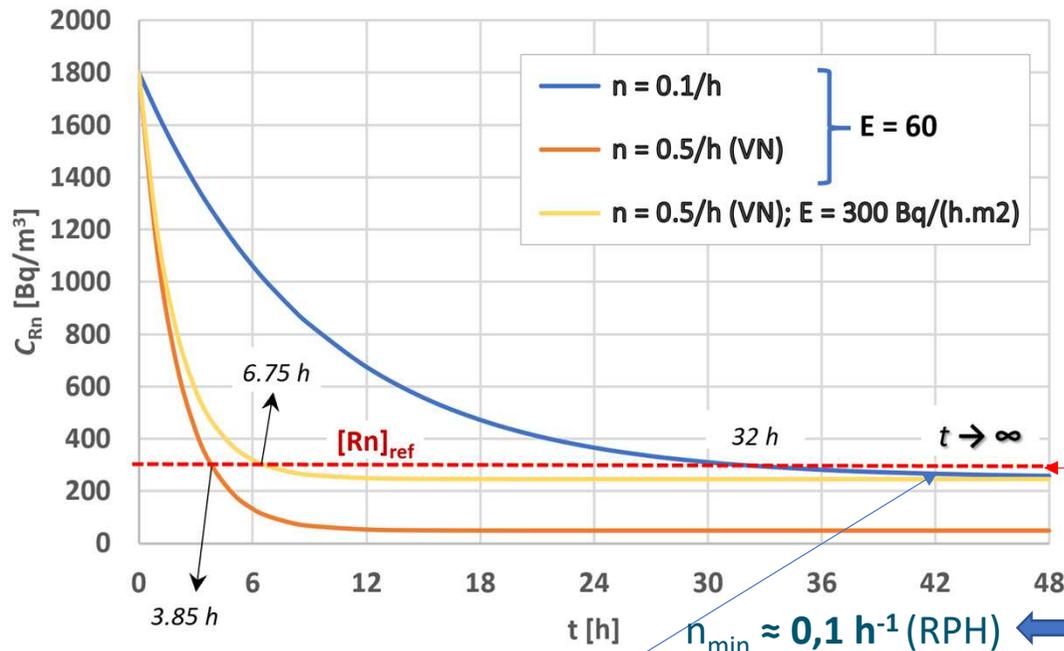
ou

$$E = 300 \text{ Bq}/(\text{h.m}^2)$$

$$n = 0.1 \text{ h}^{-1}$$

ou

$$n = 0.5 \text{ h}^{-1}$$



Exemplo do efeito da ventilação natural (VN) permanente num espaço habitável inicialmente contaminado com radão

Ventilação permanente

limite de referência ($[Rn]_{ref}=300 \text{ Bq/m}^3$),

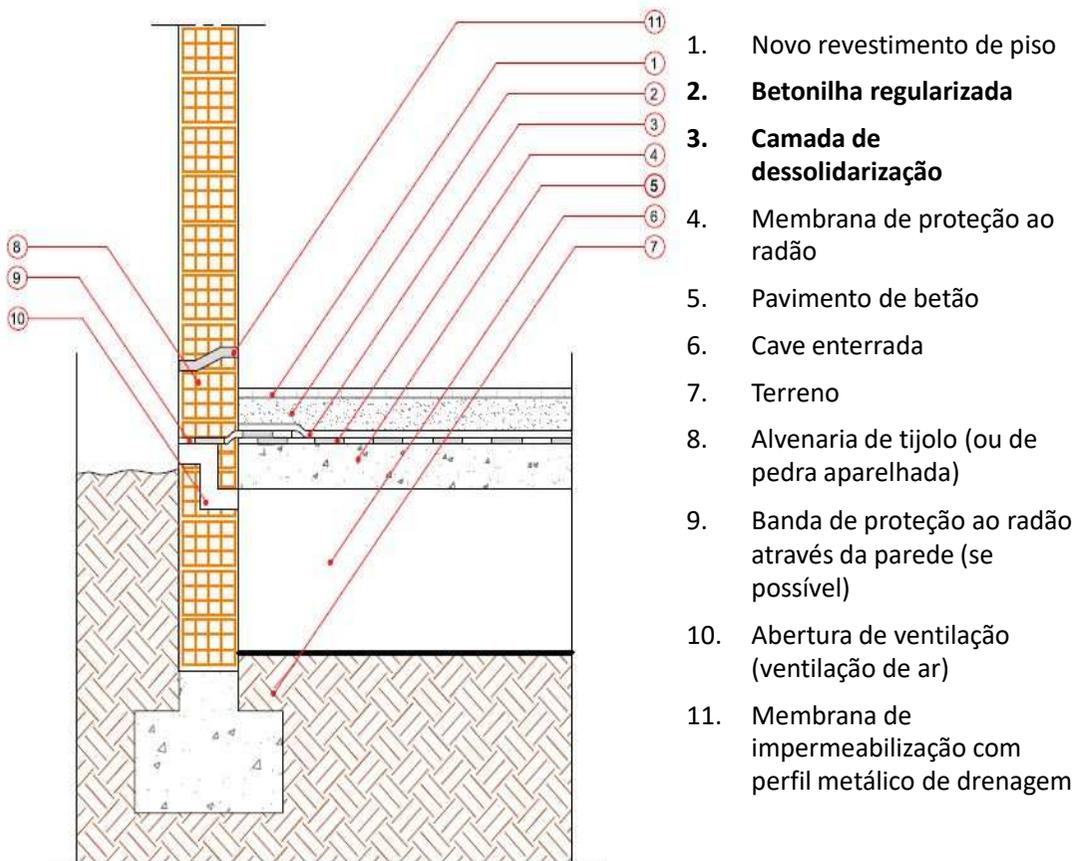
Objetivo: garantir $C_{equil}=250 \text{ Bq/m}^3$ ($< 300 \text{ Bq/m}^3$), permitindo ilustrar melhor o efeito de descontaminação com uma **margem de segurança** adicional (aconselhável em fase de projeto, dada a grande variabilidade real do fluxo de radão proveniente do solo)

Numa situação de risco muito elevado ($E=300 \text{ Bq}/(\text{h.m}^2)$), o requisito de ventilação natural de 0,5 RPH (Portaria n.º 138-I/2021) seria suficiente para garantir uma boa QAI neste espaço habitável, em termos de concentrações de radão.

$$n \approx 0,1 \text{ h}^{-1} \longrightarrow t_{equil} \approx 32 \text{ h}$$

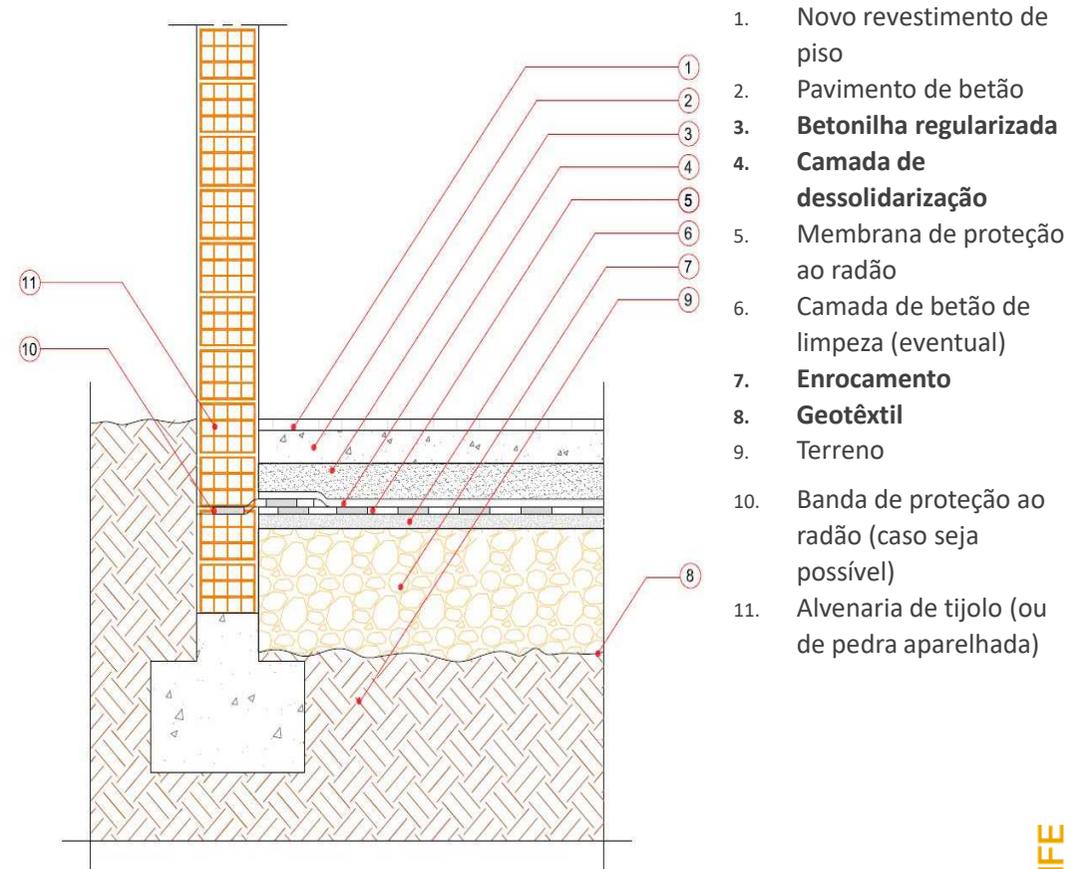
$$n \approx 0,5 \text{ h}^{-1} \longrightarrow t_{equil} \approx 3,85 \text{ h}$$

Ilustrações: membranas de impermeabilização



1. Novo revestimento de piso
2. **Betonilha regularizada**
3. **Camada de dessolidarização**
4. Membrana de proteção ao radão
5. Pavimento de betão
6. Cave enterrada
7. Terreno
8. Alvenaria de tijolo (ou de pedra aparelhada)
9. Banda de proteção ao radão através da parede (se possível)
10. Abertura de ventilação (ventilação de ar)
11. Membrana de impermeabilização com perfil metálico de drenagem

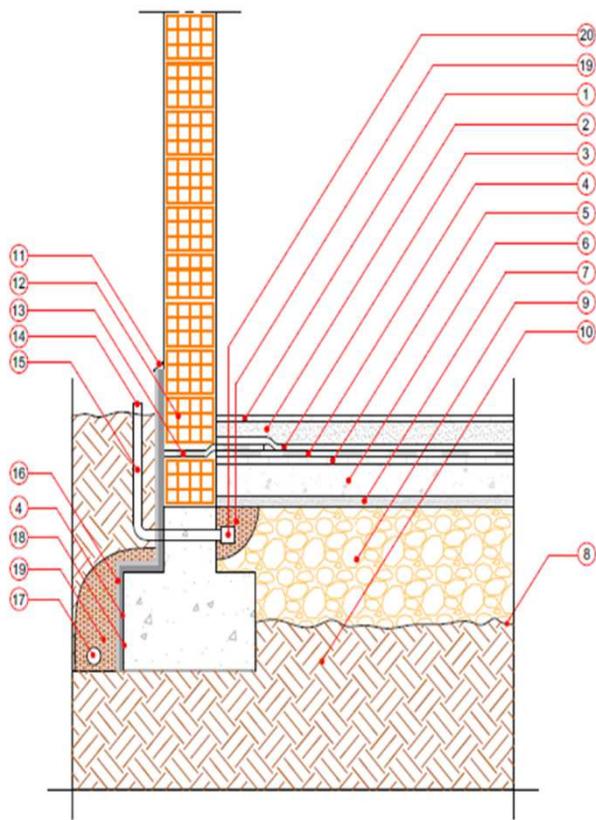
Membrana sobre a laje aplicada por cima de uma cave enterrada ou semienterrada



1. Novo revestimento de piso
2. Pavimento de betão
3. **Betonilha regularizada**
4. **Camada de dessolidarização**
5. Membrana de proteção ao radão
6. Camada de betão de limpeza (eventual)
7. **Enrocamento**
8. **Geotêxtil**
9. Terreno
10. Banda de proteção ao radão (caso seja possível)
11. Alvenaria de tijolo (ou de pedra aparelhada)

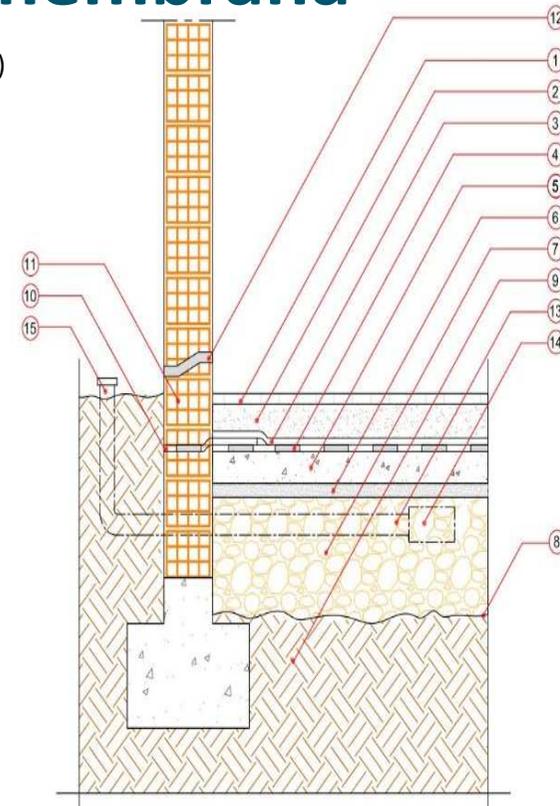
Membrana sob a laje aplicada sobre o terreno (edifícios novos)

Ilustrações: sistemas de despressurização complementado com membrana



1. Novo revestimento de piso (ladrilho, pedra, etc.)
2. **Betonilha regularizada**
3. **Camada de dessolidarização**
4. Membrana anti radão
5. Revestimento de piso existente (ou primário, caso não exista)
6. Pavimento de betão (laje de soleira)
7. Camada de betão de limpeza (eventual)
8. **Geotêxtil**
9. **Enrocamento**
10. Terreno
11. **Perfil de remate**
12. Alvenaria de tijolo (ou de pedra aparelhada)
13. Banda anti radão (caso seja possível)
14. **Chaminé** – para dissipação de vapor (incluindo radão)
15. Ventilação - dissipação de vapor
16. Membrana drenante e dissipadora de vapor (placa pitonada que faz caixa de ar)
17. **Tubo de drenagem perfurado**
18. Primário (eventual)
19. **Camada separadora, com brita ou pedra rolada, envolvida em geotêxtil**
20. **Caixa dissipadora de vapor**

Sistema de drenagem que pode ser adaptado para aspiração de radão com um ventilador mecânico



1. Novo revestimento de piso
2. **Betonilha regularizada**
3. **Camada de dessolidarização**
4. Membrana anti radão
5. Pavimento de betão
6. Camada de betão de limpeza (eventual)
7. **Enrocamento**
8. **Geotêxtil**
9. Terreno
10. Banda anti radão (caso seja possível)
11. Alvenaria de tijolo (ou de pedra aparelhada)
12. Membrana à prova de humidade
13. **Tubagem** do sistema de despressurização
14. **Depósito subterrâneo**
15. Terminal tamponado do tubo do sistema de despressurização

Sistema de despressurização subterrânea com uma membrana aplicada sobre a laje



Recomendações



- Como a ventilação mecânica pode produzir uma depressão que favorece a entrada de radão do solo através de fendas e fissuras, recomenda-se:
 - ✓ a implementação de **ventilação de duplo fluxo** (equilibrando os caudais de extração e de fornecimento de ar)
 - ✓ o **aumento das aberturas de entrada de ar** de forma a reduzir a sua perda de carga e, assim, a reduzir a depressão no interior da habitação
 - ✓ a instalação complementar de **membranas**, com qualidade e assegurando a sua continuidade em toda a superfície



Conclusões



- importância das tecnologias de ventilação nos sistemas de mitigação do radão (cuja ação deve ser permanente), bem como a sua eficácia, quer para impedir a entrada do gás radão quer para diminuir a sua concentração após entrada no edifício.
- Capacidade das barreiras de proteção para isolamentos da envolvente do edificado, desde que devidamente dimensionadas com as características mecânicas apropriadas, com especial foco nos requisitos da instalação.
- Importância do coeficiente de difusão da barreira e da sua espessura no dimensionamento.
- Efeito da conjugação das duas tecnologias para garantir uma maior eficácia de proteção contra o radão



Desenvolvimentos futuros



Visando assegurar uma maior sustentabilidade dos materiais, produtos e sistemas de proteção utilizados.

Ao nível dos materiais constituintes dos sistemas de proteção ao radão, devem promover-se desenvolvimentos tecnológicos futuros, visando a/o:

- Inclusão de nanomateriais em barreiras ou revestimentos exteriores, que para além de melhorar as suas propriedades físicas e mecânicas, também reduza a entrada de contaminantes.
- Minimização dos componentes radioativos (Ra, Th e K) nos materiais de construção, através de novas composições.
- Desenvolvimento de revestimentos líquidos, para impermeabilização de materiais de construção, sustentáveis, eficazes, com resistência adequada e com boa durabilidade
- Utilização de soluções energeticamente mais eficientes em sistemas de recuperação de energia, e de materiais mais leves e mais resistentes em ventiladores
- Utilização de materiais reciclados (e mais amigos do ambiente) nos produtos dos sistemas de proteção contra o radão.

**Thank
you**

LeaRn4LIFE
Learning Radon

www.learn4lifeproject.eu
info@learn4lifeproject.eu
www.facebook.com/learn4lifeproject
www.linkedin.com/showcase/learn4lifeproject



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



**Co-funded by
the European Union**

LIFE21-GIE-PT-LeaRn4LIFE - Learning radon: professional qualification and social awareness as a strategy for reducing radon exposure
"Funded by the European Union". Views and opinions expressed are however those of the authors only and do not necessarily reflect those of the EU or CINEA. Neither the European Union nor the CINEA can be held responsible for them.