



SOLUÇÕES PARA PREVENÇÃO E MITIGAÇÃO DO RADÃO EM EDIFÍCIOS

Luís Pimentel Real^{a,e}; João Viegas^a; Jorge Patrício^a, Alcides Pereira^b, José Costa^c, Pilar Linares- Alemparte^d

^aLaboratório Nacional de Engenharia Civi (LNEC), Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

^bUniv Coimbra, IDL, Departamento de Ciências da Terra, Rua Sílvio Lima, 3030-790 Coimbra, Portugal

^cUniv Coimbra, ADAI, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal

^dInstituto de las Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC), Serrano Galvache, 4, Madrid 28033, Espanha

^eautor correspondente: lpimentel@lnec.pt

RESUMO

O radão (Rn) é a maior fonte natural de radiação ionizante e a exposição a níveis elevados deste gás, durante períodos prolongados, pode tornar-se um problema de saúde pública.

O radão pode entrar nos edifícios, por convecção através de fissuras na envolvente ou por difusão através da própria envolvente quando esta é porosa, e atingir concentrações acima dos níveis de referência recomendados.

O objetivo desta comunicação é apresentar os fatores que mais influenciam o potencial do gás radão nos edifícios e indicar as principais soluções tecnológicas para controlar, reduzir e mitigar os seus efeitos.

Assim, são apresentados cálculos evidenciando que um adequado dimensionamento de membranas e de sistemas de ventilação permitem assegurar a qualidade do ar interior, qualquer que seja o nível de radão existente nos edifícios.

As conclusões permitem destacar a importância das tecnologias de ventilação nos sistemas de redução do radão, bem como a sua eficácia, quer para impedir a entrada do gás radão quer para diminuir a sua concentração após entrada no edifício.

Destaca-se ainda a 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.

Por fim, referem-se os principais desenvolvimentos futuros, visando assegurar uma maior sustentabilidade dos materiais, produtos e sistemas de proteção utilizados.

Palavras-chave: Edifícios, Radão, Prevenção, Mitigação, Ar interior

1 INTRODUÇÃO

O problema do radão tem sido objeto de muitos estudos de investigação e intervenções em todo o mundo (Khan *et al.* 2019). A fim de minimizar esse problema, existem publicações dedicadas a vários sistemas de mitigação, como barreiras de proteção (Jiránek *n/d*), ventilação por baixo do piso térreo



(Scivyer 2012), pressurização positiva e sistemas de despressurização (Scivyer 2013ab), entre outras soluções. Analogamente, estão também disponíveis na literatura científica estudos de investigação relativos a materiais de construção utilizados em edifícios onde a exposição à radiação ionizante não é negligenciável (Aladeniyi *et al.* 2021), (Baeza *et al.* 2018), (Domingos *et al.* 2021), (Madruga *et al.* 2019), (Mustonen *et al.* 1999), (Pereira *et al.* 2012), (Pereira *et al.* 2013), (Ramadan e Ubeid 2018), (Siegesmund *et al.* 2022). A presença de radão na água foi também objeto de vários estudos (Di Carlo *et al.* 2019), (EPA 2012), (Martins *et al.* 2019).

Embora o problema do radão continue a ser desconhecido de uma larga faixa de população portuguesa, o interesse e preocupação com este gás tem vindo a aumentar nos últimos anos, em virtude uma maior divulgação e consciencialização do perigo e do risco associados à sua acumulação em locais fechados com nível de ocupação elevado, bem como das consequências que pode ter para a saúde das pessoas.

A implementação de regulamentação em Portugal irá estabelecer as 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, que faz parte integrante do Plano Nacional para o Radão [PNR], e contribuirá certamente para minimizar o problema, desde que tal seja acompanhado de disseminação adequada ao público e da realização de ações de formação dirigidas a técnicos de construção, engenheiros, arquitetos, projetistas e responsáveis da administração pública e autárquica.

O âmbito desta comunicação é elencar os fatores que influenciam o nível de radão nos edifícios e apresentar algumas soluções tecnológicas que permitam controlar, reduzir e mitigar, os efeitos do gás radão nos edifícios, destacando a importância das barreiras de proteção e da ventilação para o cumprimento deste objetivo, com enfoque no cumprimento das boas regras de construção durante a instalação dessas soluções, de modo a garantir a proteção das pessoas contra o radão.

2 FATORES INFLUENCIADORES DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO

A concentração de radão no interior dos edifícios pode variar em função de diversos fatores, destacando-se como determinante o tipo de solo. Porém, tanto as condições climáticas, como as características do edifício, bem como o seu uso, podem também ser muito relevantes nas alterações de concentração de radão num mesmo edifício e na sua variabilidade entre diferentes edifícios no mesmo local, respetivamente (Linares e Ortega 2020).

Aos solos derivados de rochas graníticas associa-se geralmente maior capacidade de produção de radão. Por outro lado, a permeabilidade do solo determina a facilidade de migração do gás, controlada, nomeadamente, pela porosidade e sua tipologia, pela fissuração, o pelo teor em água.

Dada a maior densidade relativamente ao ar, a concentração de radão é normalmente mais elevada nos espaços localizados junto ao solo (rés do chão, caves e semicaves). Contudo, outros fatores, tais como exalação a partir de materiais de construção existentes, comunicações interiores não seladas (como uma escada contínua entre a cave ou o rés do chão e o topo do edifício, sem patamares ou portas corta-fogo nos patamares, e caixas de elevador), que permitem a ascensão do gás por efeito de chaminé (quando a temperatura interior é superior à exterior) e podem levar à sua acumulação, se não houver adequada ventilação.

A localização do edifício e a direção dos ventos dominantes também influencia o nível de radão nos edifícios. Há casos em que as pressões geradas pelo vento tanto podem promover o transporte do gás através do solo (se este for permeável) para o interior das caves, como, por outro lado, e na maioria



dos casos, diluir e escoar o radão para o exterior (devido ao aumento de ventilação originado pela associação de pressões positivas nas fachadas de barlavento e de pressões mais baixas nas restantes fachadas).

O tipo de fundações também constitui um fator relevante, considerando-se que a existência de caixas de ar ventiladas reduz o caudal de radão que entra na zona habitável do edifício.

A permeabilidade ao ar dos pavimentos do edifício, em particular junto ao solo, tem grande influência no fluxo de gás radão do solo para interior dos espaços edificados.

O tipo de paredes de caves parcial ou totalmente enterradas, e a sua permeabilidade, também influenciam a entrada de radão.

A transferência para o interior dos edifícios é obviamente maior na inexistência de barreiras de proteção, com a fissuração (em conjugação com a humidade) e com a porosidade dos materiais constituintes (rocha do local, tijolo, pedra, argamassas) dos pavimentos e tetos.

O tipo de pavimentos intermédios, que separam as caves do pavimento imediatamente sobrejacente e seguintes, é tão importante quanto maior for a concentração de radão nos pisos inferiores, sendo que o caso mais desfavorável é o constituído por pavimentos de madeira (ou seus derivados), que apresentam juntas entre as tábuas, ou tetos falsos não completamente estanques (Real *et al.* 2020a). Em contrapartida, as lajes de betão armado monolíticas ou aligeiradas, ou lajes aligeiradas com elementos pré-fabricados (por exemplo, vigas e abóbadas) são as que apresentam menor permeabilidade ao radão, desde que se assegure a existência de juntas devidamente seladas, resultantes do atravessamento da laje por várias tubagens, e a inexistência de fissuração dos materiais constituintes do pavimento (Real *et al.* 2020a).

Também as aberturas entre as caves e os pisos superiores desempenham um papel importante no transporte do radão, caso sejam insuficientemente herméticas (Real *et al.* 2020a). As portas com classe de permeabilidade ao ar C ou D, de acordo com a norma EN 12207, são adequadas do ponto de vista da estanquidade ao ar (Linares e Ortega 2020), contribuindo para a redução da concentração do radão.

Em qualquer caso, sejam fundações, paredes ou pavimentos, deve optar-se pela utilização de materiais de construção com menor exalação de radão, e mais sustentáveis, cumprindo os requisitos de resistência mecânica e estrutural apropriada.

3 PRINCIPAIS SOLUÇÕES DE MITIGAÇÃO

3.1 MEMBRANAS

Uma barreira ou membrana de proteção consiste num elemento laminar em material plástico flexível ou compósito, contínuo, colocado entre o espaço a proteger e o solo, e cuja eficácia possa ser evidenciada. Estas membranas podem também contribuir como uma barreira contra a ascensão capilar da água subterrânea (Real *et al.* 2020ab).

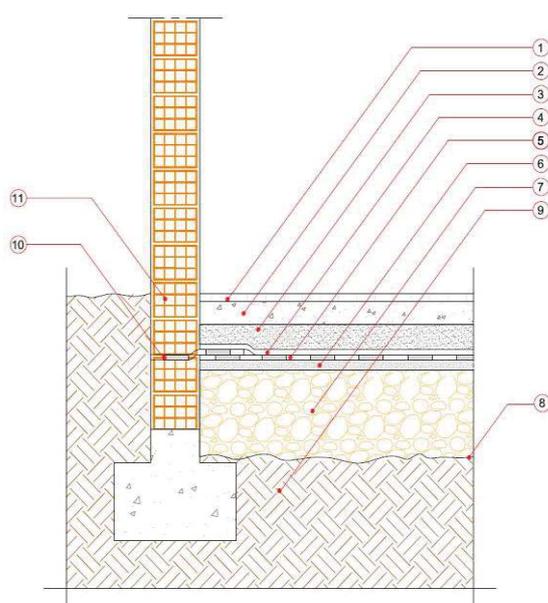
Os requisitos mais importantes para garantir a eficácia e a durabilidade das membranas são os seguintes:

- Instalação com qualidade em continuidade, sem fendas, com juntas e encontros selados, recorrendo a componentes pré-formados ou produtos compatíveis, em particular nas situações de atravessamento por tubagem, colunas e pilares (Real *et al.* 2020ab), (Linares e Ortega 2020).
- Aplicação com garantia de resistência adequada ao seu uso.



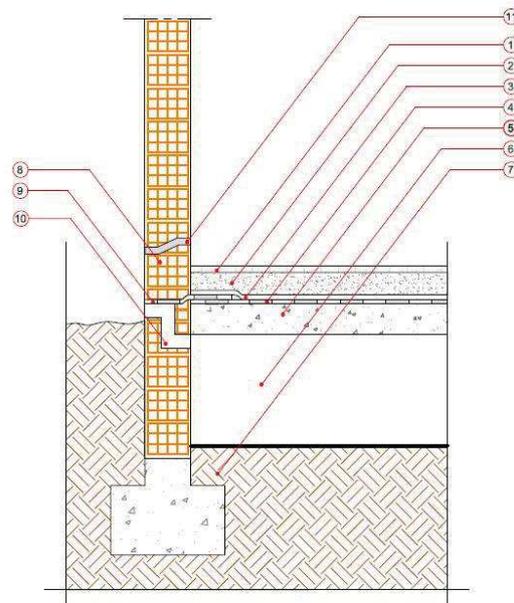
- Com especificação técnica que inclua um conjunto de características de desempenho, suportada com documentação emitida por entidades qualificadas, incluindo resultados de ensaios essenciais (coeficiente de difusão ao radão, características dimensionais, classificação de reação ao fogo, transmissão de vapor de água, propriedades em tração, resistência ao rasgamento e conteúdo, emissão e/ou libertação de substâncias perigosas), entre outras características específicas do tipo de materiais constituintes das membranas.
- Durabilidade adequada à vida útil do edifício, não devendo ser inferior a 25 anos.

Seguidamente apresentam-se ilustrações típicas exemplificativas da instalação de membranas por baixo e sobre a laje de soleira, figuras 1 e 2, respetivamente. A instalação representada na figura 1 é típica da instalação em edifícios novos, enquanto a figura 2 é mais representativa de instalação em edifícios existentes, por cima de caves enterradas (com abertura periscópica para ventilação). Outros exemplos seriam possíveis, tais como instalações sobre caixa de ar, sobre pisos suspensos, complementados ou não com colocação de membranas nas paredes exteriores ou interiores.



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)

Figura 1 – Membrana sob a laje aplicada sobre o terreno (edifícios novos)



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 eventual perfil metálico de drenagem

Figura 2 – Membrana sobre a laje aplicada por cima de uma cave enterrada ou semienterrada



3.1.1 Metodologia para o dimensionamento da membrana de proteção ao radão

A membrana deve ter uma espessura e coeficiente de difusão tais que o fluxo de radão na sua superfície (E) seja menor que um dado valor limite (E_{lim}). Este expressa-se em $Bq/m^2 \cdot h$ e é determinado pela seguinte expressão (DBHS6 2019):

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

em que:

C_d é a concentração de projeto, que corresponde a 10% do nível de referência ($[Rn]_{ref}=300 Bq/m^3$);

Q é o caudal de ventilação das instalações a serem protegidas (m^3/h), o qual depende do volume do espaço e da taxa de renovação de ar. Caso o valor da taxa de ventilação não seja definido em função do tipo de compartimentos (quartos, cozinha, WC) ou seja desconhecido, pode ser considerado um cálculo de caudal minimalista correspondente a 0,1 renovações/hora;

$A = V/h$, é a área superficial da membrana (m^2), equivalente à área do espaço a proteger, V o volume e h a altura.

Na ausência de estudos específicos, o fluxo de radão previsto através da barreira (E) pode ser estimado a partir da seguinte expressão (DBHS6 2019):

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

em que:

λ é a constante de decaimento/desintegração do radão ($7,56 \times 10^3 h^{-1}$);

\sinh é o seno hiperbólico;

d é a espessura da barreira, em m;

l é a dimensão linear da penetração do radão na barreira, em m, calculado de acordo com a equação (3) (DBHS6 2019):

$$l = \sqrt{\frac{3600 \cdot D}{\lambda}} \quad (3)$$

em que D é o coeficiente de difusão da barreira ao radão (em m^2/s).

3.1.2 Resultados do dimensionamento da membrana de proteção ao radão

No Quadro 1 apresentam-se resultados típicos de cálculo de dimensionamento de membranas, nos casos em que não há conhecimento do fluxo de radão do solo, determinando-se a espessura d em função do coeficiente de difusão da membrana D para respeitar a condição ($E < E_{lim}$). Como se pode confirmar através do Quadro 1, à medida que se aumenta o coeficiente de difusão ao radão (D) das membranas, também se tem de aumentar a espessura para garantir um resultado satisfatório. Assim, para um valor máximo de $D = 1 \times 10^{-11} m^2/s$ tem de se garantir uma espessura mínima de 1,3 mm, enquanto para um valor máximo de $D = 1 \times 10^{-12} m^2/s$ basta uma membrana com espessura de 140 μm .



Quadro 1 – Resultados obtidos para um compartimento com 100 m² de superfície e 2,7 m de altura, desconhecendo-se a exalação de radão no solo

C_d	30						
Q	27						
E_{lim}	8,1						
D	1 x 10 ⁻¹⁰	1 x 10 ⁻¹¹	1 x 10 ⁻¹¹	1 x 10 ⁻¹²	1 x 10 ⁻¹²	1 x 10 ⁻¹³	1 x 10 ⁻¹³
l	0,00690	0,00218	0,00218	0,00069	0,00069	0,00022	0,00022
d	9 x 10 ⁻³	1,3 x 10 ⁻³	1,2 x 10 ⁻³	1,4 x 10 ⁻⁴	1,3 x 10 ⁻⁴	1,4 x 10 ⁻⁵	1,3 x 10 ⁻⁵
E	9,2	7,8	8,6	7,7	8,3	7,7	8,3
E < E_{lim}	Não conforme	Conforme	Não conforme	Conforme	Não conforme	Conforme	Não conforme

3.2 VENTILAÇÃO

Com exceção das membranas, todos os sistemas de prevenção e mitigação do radão em edifícios recorrem a tecnologias de ventilação passiva (natural) ou ativa (mecânica), designadamente nos espaços de contenção, nos sistemas de despressurização do subsolo e com ventilação dos espaços habitáveis. Todos estes sistemas podem, no entanto, ser complementados com a instalação de membranas de forma a aumentar a eficácia global na proteção ao radão, em particular quando o nível de gás é elevado.

3.2.1 Espaço de contenção ventilado

Os espaços de contenção ventilados, tais como uma caixa de ar sob o pavimento (desvão sanitário) ou no interior de paredes duplas, ou uma cave raramente utilizada, podem ser utilizados para diluir, por meio da ventilação, o radão que preenche este espaço, dificultando o escoamento deste gás para as divisões habitáveis do edifício, funcionando assim como um espaço de contenção do radão. Estas soluções são aplicáveis a edifícios novos e a edifícios existentes (Linares e Ortega 2020), (Real *et al.* 2023).

3.2.2 Sistema de despressurização do subsolo

Uma das técnicas de proteção mais eficazes para reduzir o fluxo de radão nos edifícios é a despressurização do subsolo, que consiste num único reservatório subterrâneo ou em vários reservatórios, nos quais são inseridos tubos de exaustão destinados a aspirar o ar contaminado de radão existente no solo, descarregando-o inofensivamente na atmosfera (Real *et al.* 2020ab), (Scivyer 2013b]. A extração pode ser passiva, com base no efeito chaminé e na ação do vento, ou ativa, com a utilização de um ventilador elétrico.

Para uma melhor eficácia ótima, a permeabilidade do substrato em contacto com o edifício (camada de enchimento) deve ser elevada e a permeabilidade ao ar do espaço em relação ao solo deve ser baixa, pelo que o sistema idealmente deve ser complementado com recurso a membranas.

Os sistemas de drenagem de água podem ser utilizados de forma similar e com praticamente o mesmo nível de eficiência (Real *et al.* 2020ab), quer colocando uma conduta de ventilação inserida num tanque de recolha e bombagem de águas pluviais do solo, instalado na cave, quer usando condutas de



drenagem perfuradas, instaladas sob os pisos térreos, para escoamento de água; em ambos os casos recorrendo a um sistema de ventilação constituído por condutas de ventilação e de exaustão.

3.2.3 Ventilação em espaços habitáveis

A ventilação é necessária para assegurar a qualidade do ar interior dos espaços habitáveis e reduz a concentração de radão, devendo ser tanto maior quanto maior for o grau de ocupação, ou seja, deverá ser devidamente proporcional ao número de ocupantes tendo em conta o volume do espaço a ventilar.

Em edifícios novos, as taxas de ventilação têm de cumprir os regulamentos relativos à QAI (qualidade do ar Interior), que normalmente especificam taxas de ventilação mínimas em função da utilização do espaço ou do edifício, devendo assegurar-se um equilíbrio com os regulamentos de conservação de energia (Linares e Ortega 2020). Para edifícios novos de habitação, o regulamento português estipula um valor mínimo de ventilação natural correspondente a 0,5 renovações de ar por hora (RPH) (Portaria n.º 138-I/2021).

Na Figura 3 ilustra-se o efeito da ventilação para garantir que a concentração de radão no ar interior de um espaço habitado de um edifício, situado numa zona de risco e com o piso térreo em contacto direto com o solo, não excede um limite de referência considerado seguro ($[Rn]_{ref}=300 \text{ Bq/m}^3$). A simulação baseia-se na equação diferencial transiente para a concentração de radão, cuja solução traduz a sua evolução temporal $C(t)$ num volume de controlo, em Bq/m^3 :

$$C(t) = C_{equil} + (C_0 - C_{equil}) \cdot e^{-(\lambda+n)t} \quad (4)$$

onde C_{equil} é a concentração de equilíbrio em regime permanente (*i.e.*, quando $t \rightarrow \infty$), em Bq/m^3 , dada por:

$$C_{equil} = \frac{E \cdot A}{(\lambda+n)V} \quad (5)$$

C_0 é a concentração inicial ($t=0$) de radão no ar interior, V (m^3) é o volume efetivo do espaço em estudo, n (h^{-1} ou RPH) é a taxa de renovação de ar, a que corresponde um caudal de ventilação $Q=n \cdot V$ (m^3/h), e os restantes parâmetros estão definidos na figura. O fluxo E [$\text{Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] é vulgarmente designado por taxa de exalação e o produto $G=E \cdot A$ (Bq/h) por taxa de geração de radão. Deve ter-se em conta que a dedução da equação diferencial de base, bem com a sua solução [Eqs. (4) e (5)] assentam nos seguintes pressupostos de simplificação: (i) o caudal de ventilação e a taxa de geração de radão são constantes no tempo; (ii) a diluição do poluente é perfeita, *i.e.*, a concentração de radão no ar interior é uniforme em todo o espaço em qualquer instante t ; e (iii) considera-se desprezável a concentração de radão no ar exterior, o que é plausível para este poluente, face aos valores no ar interior nos casos em estudo.

O gráfico da Figura 3 representa o efeito da ventilação num caso de descontaminação (*e.g.*, de uma habitação situada numa zona de risco que tivesse estado desocupada e sem ventilação significativa. Por outro lado, a Eq. (5) é útil para se determinar o valor de projeto do caudal de ventilação necessário; com efeito, tornando-a explícita em n , em h^{-1} , pode escrever-se:

$$n_{min} = \frac{G}{C_{equil} \cdot V} - \lambda \quad (6)$$

No caso apresentado na Figura 3, estipulou-se o objetivo de garantir $C_{equil}=250 \text{ Bq/m}^3$, um valor de concentração de radão inferior ao limite de referência ($[Rn]_{ref}=300 \text{ Bq/m}^3$), representado no gráfico pela linha horizontal a traço interrompido vermelho. Por um lado, esta opção permite ilustrar melhor o efeito de descontaminação; por outro, ela constitui uma margem de segurança adicional, prática aconselhável numa fase de projeto, dada a grande variabilidade real do fluxo de radão proveniente do



solo. Assim, a Eq. (6) permite indicar que, para este caso, com um fluxo de radão de $E=60 \text{ Bq}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$, o valor mínimo da taxa de ventilação necessária é $n\approx 0,1 \text{ h}^{-1}$ (RPH), o que equivale a um caudal de ventilação de $7,7 \text{ m}^3/\text{h}$.

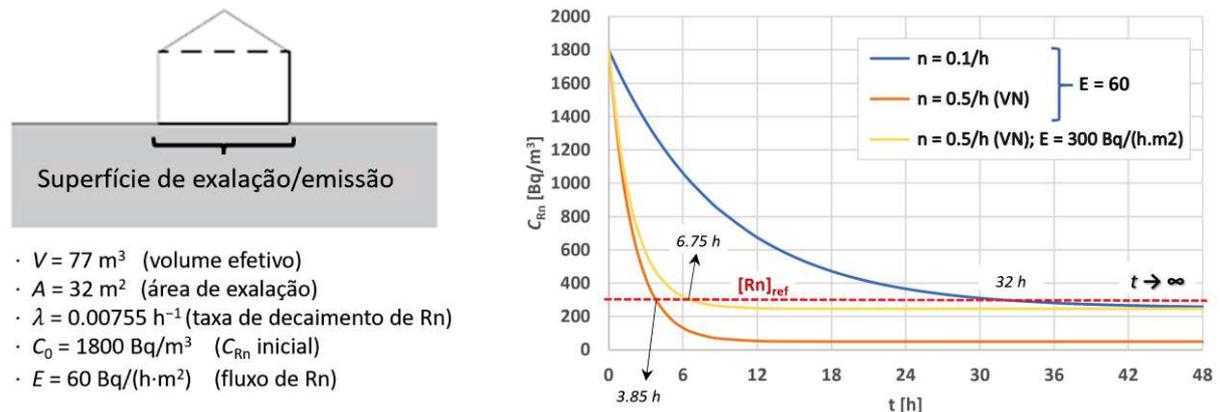


Figura 3 – Exemplo do efeito da ventilação natural (VN) permanente num espaço habitável inicialmente contaminado com radão

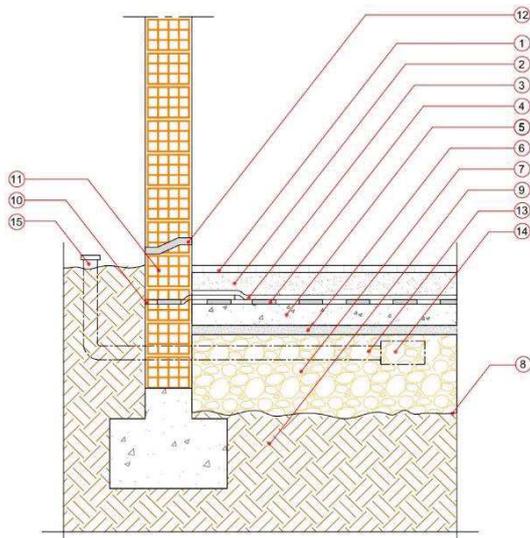
Usando a Eq. (4), e observando o gráfico da Figura 3, conclui-se que, neste processo de descontaminação com aquele nível mínimo de ventilação, o limite de referência seria alcançado só ao fim de 32 horas. Porém, se se considerar o requisito regulamentar de ventilação natural (VN) para edifícios novos habitacionais, $n=0,5$ RPH, o período de descontaminação reduzir-se-ia para apenas 3,85 horas. Conclui-se também que, mesmo numa situação de risco muito elevado, *i.e.*, considerando um fluxo de radão 5 vezes superior, $E=300 \text{ Bq}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$, o requisito de ventilação natural acima referido seria suficiente para garantir uma boa QAI neste espaço habitável, em termos de concentrações de radão. O gráfico da figura sugere, ainda, que um processo de ventilação, passiva ou ativa, para prevenção ao radão em edifícios habitacionais deve ser permanente, para garantir a segurança dos ocupantes em termos de saúde humana.

No caso da ventilação mecânica, pode produzir-se uma depressão que favorece a entrada de radão do solo através de fendas e fissuras, pelo que se recomenda a instalação complementar de membranas e a implementação de ventilação de duplo fluxo (equilibrando o fluxo de extração e o fornecimento de ar) ou 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 (Real *et al.* 2020a).

Em certas situações, designadamente em habitações unifamiliares, pode instalar-se um sistema de pressurização positiva (nas habitações multifamiliares a pressurização de uma habitação pode permitir o escoamento de cheiros gerados numa para outra habitação adjacente, que tenha uma pressão mais baixa), o qual consiste em criar uma diferença de pressão entre o ar no interior do edifício e o solo subjacente, de modo a inverter a diferença de pressão natural. Esta diferença é geralmente produzida por uma unidade de ventilação situada no sótão, que é utilizada para insuflar ar fresco filtrado nos compartimentos principais (quartos e salas de estar) do espaço habitável. O aumento da pressão em todo o edifício reduz a possibilidade de admissão de radão e provoca a diluição e a expulsão do gás radão, que, no entanto, entra no edifício, pelo que também se pode considerar como um método de isolamento (Real *et al.* 2020a), (Scivyer 2013b). A eficácia desta solução depende, em grande medida, da permeabilidade ao ar da envolvente do edifício ou da do compartimento a proteger, que deve ser baixa, pelo que se recomenda a sua utilização em combinação com outras soluções, como a impermeabilização com uma barreira contra o radão (Linares e Ortega 2020).

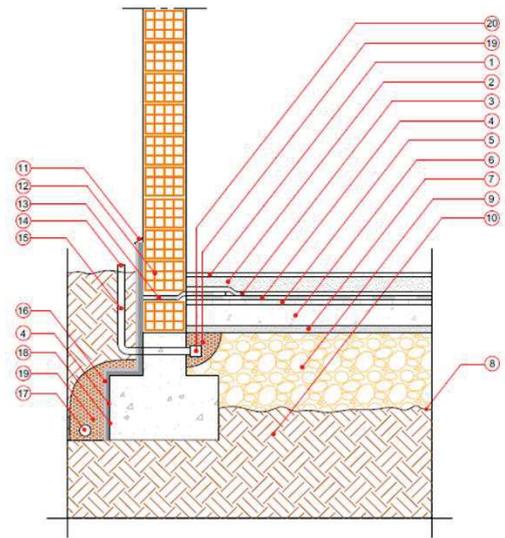


Nas figuras 3 e 4 apresentam-se exemplos típicos de instalação de sistemas de ventilação complementados com membranas.



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

Figura 4 – Sistema de despressurização subterrânea com uma membrana aplicada sobre a laje



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

Figura 5 – Sistema de drenagem que pode ser adaptado para aspiração de radão com um ventilador mecânico



4 CONCLUSÕES

A utilização de membranas, desde que devidamente dimensionadas em termos de espessura (tendo em conta o respetivo coeficiente de difusão para o radão), permite limitar o fluxo de radão proveniente do solo ou de materiais constituintes das soluções construtivas do edifício (paredes ou pavimentos).

Salienta-se a importância da possível existência de zonas de descontinuidade da membrana (rotura da membrana, juntas entre elementos da membrana, juntas com elementos da construção, etc.), que poderá condicionar este meio de limitação da fonte de radão.

O exemplo de implementação de ventilação em espaços habitados evidencia que a taxa de ventilação mínima regulamentar é suficiente para manter a concentração de radão no ar interior, considerando valores correntes de taxa de exalação de radão de um piso da habitação em contacto direto com o solo, abaixo do limite de referência ($[Rn]_{ref}=300 \text{ Bq/m}^3$). A duração do período transiente que ocorre, após a ativação da ventilação, até ser atingido o limite de referência, indicia que a ventilação deverá ser permanente.

Esta análise sugere que, em casos em que a concentração de radão no ar interior exceda o limite de referência, poderá ocorrer um problema mais geral de salubridade devido a reduzidas taxas de ventilação. Recomenda-se que a seleção da solução de mitigação da contaminação do ar interior com radão tenha em conta todo o problema de salubridade da habitação, que venha a ser detetado, e que seja adotada a técnica que permita mitigar também o problema de salubridade, nomeadamente a implementação de um sistema de ventilação.

Do que foi exposto anteriormente, torna-se óbvio que a complementaridade das soluções constituídas por membranas de proteção e sistemas de ventilação, permite uma maior eficácia na proteção ao radão, garantindo uma adequada qualidade do ar interior.

5 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

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 também permitam reter contaminantes.
- Minimização dos componentes radioativos 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
- Estudo de soluções mais eficientes do ponto de vista energético, incluindo a utilização de materiais mais leves e mais eficientes, quer utilizados em ventiladores, quer em sistemas de recuperação de energia.
- Utilização de materiais reciclados (e mais amigos do ambiente) nos sistemas de proteção contra o radão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da União Europeia no âmbito do Projeto LeaRn4LIFE (Grant Agreement nº. 101074516). Os pontos de vista e opiniões expressos são, no entanto, apenas os dos



autores e não refletem necessariamente os da UE ou do CINEA. Nem a União Europeia nem o CINEA podem ser responsabilizados pelos mesmos.

REFERÊNCIAS

- Aladeniyi K., Arogunjo A. , Pereira A., Khandaker M., Bradley D., Sulieman A. (2021) Evaluation of radiometric standards of major building materials used in dwellings of South-Western Nigeria. *Radiation Physics and Chemistry*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109021>
- Baeza, A., García-Paniagua, J., Guillén, J., Montalbán, B. (2018). Influence of architectural style on indoor radon concentration in a radon prone area: A case study. *Science of the Total Environment* 610–611 (2018), pp. 258-266. <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.056>
- DBHS6 (2019) Documento Básico de Protección frente a la exposición al radón. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Código Técnico de la Edificación. Madrid. 2019
- Domingos, F. , Seco, S., Pereira, A. (2021). Thoron and radon exhalation and emanation from granitic rocks outcropping in the Central Iberian Zone (Portugal). *Environ Earth Sci* 80, 753 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10008-x>
- Di Carlo, C, Lepore, L, Venoso, G, Ampollini, M, Carpentieri, C, Tannino, A, *et al.*, (2019). Radon concentration in self-bottled mineral spring waters as a possible public health issue. *Scientific Nature Research Reports*. 2019;9:14252, www.nature.com/scientificreports. <https://10.1038/s41598-019-50472-x>
- EPA (2012). A Citizen’s Guide to Radon. The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon. EPA 402/K-12/002|2016. United States Environmental Protection Agency (EPA), Indoor Environments Division. EP 402/K-12/002. 16 pp. May 2012.
- Jiránek, M., (s/d). Testing and design of radon resisting membranes based on the experience of Czeck Republic. Praha. Czeck Technical University, Faculty of Civil Engineering.
- Khan, S. , Gomes, J., Krewski, D. (2019). Radon interventions around the globe: A systematic review. *Heliyon*, Volume 5, Issue 5, May 2019, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01737>.
- Linares-Alemparte, P; García-Ortega, S. (2020). Guía de rehabilitación frente al radón Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana y Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Ministerio de Ciencia e Innovación). Gobierno de España. Madrid. 2020. ISBN: 978-84-498-1045-9.
- Madruga, M., Miró, C., Reis, M., Silva, L. (2019). Radiation Exposure from Natural Radionuclides in Building Materials. *Radiation Protection Dosimetry*, Volume 185, Issue 1, November 2019, Pages 49–57, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncy256>
- Martins L, Pereira A, Oliveira A, Fernandes A, Sanches Fernandes, L., [Pacheco, A.](#) (2019). An assessment of groundwater contamination risk with radon based on clustering and structural models. *Water*. 2019;11(5):1107, <https://doi.org/10.3390/w11051107>
- Mustonen R., Pennanen M., Annanmäki M. and Oksanen E. (1999). Enhanced Radioactivity of Building Materials,. Final report of the contract No 96-ET-003 for the European Commission. Radiation and Nuclear Safety Authority – STUK, Finland, 1997; Radiation Protection 96, Luxembourg.



- Nuccetelli, C., Leonardi, F., Trevisi, R. (2020). Building material radon emanation and exhalation rate: Need of a shared measurement protocol from the European database analysis. *Journal of Environmental Radioactivity* 225 (2020) 106438, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106438>.
- Pereira, D., Neves, L., Pereira, A., Peinado, M., Blanco, J., Tejado, J. (2012). A radiological study of some ornamental stones: the bluish granites from Extremadura (Spain), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 395–401, 2012, <https://doi.org/10.5194/nhess-12-395-2012>
- Pereira, A., Pereira, D., Neves, L., Peinado, M., Armenteros, I. (2013). Radiological data on building stones from a Spanish region: Castilla y León, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 3493–3501, 2013, <https://doi.org/10.5194/nhess-13-3493-2013>
- Portaria n.º 138-I/2021. Diário da República n.º 126/2021, 2º Suplemento, Série I de 2021-07-01, páginas 12 – 53.
- Ramadan, A.; Ubeid, F. (2018). *Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University*, 39 (3), pp. 195-206, 2018.
- Real, L., Lopes, J., Viegas, J. (2020a). Guia para mitigação da admissão de radão para o interior de edifícios existentes. Relatório 479/2020 – DED/NAICI, LNEC, Lisboa, 143 pp., 2020.
- Real, L., Lopes, J., Viegas, J. (2020b) Guia para prevenção da admissão de radão em edifícios novos. Relatório 480/2020 – DED/NAICI, LNEC, Lisboa, 55 pp., 2020.
- Real, L., Linares-Alemparte, P.; Poças, A.; Viegas, J (2023). Discussion of Techniques to Mitigate Radon Infiltration In Buildings, 15 pp, 2023, <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0573>
- Scivyer, C.; Jaggs, M. (1998). A BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings. Dwellings with cellars and basements. 1998. BR 343. ISBN 186081 219 8.
- Scivyer, C. (2012). BRE Good Repair. Guide GRG 37. Part 1 - Radon solutions in homes: improving underfloor ventilation. Bracknell, IHS BRE Press, 2012. ISBN 978-1 -84806-300-6.
- Scivyer, C. (2013a). BRE Good Repair. Guide GRG 37. Part 2 - Radon solutions in homes: positive house ventilation”. Bracknell, IHS BRE Press, 2013. ISBN 978-1-84806-301-3.
- Scivyer, C. (2013b). BRE Good Repair. Guide GRG 37. Part 3 - Radon solutions in homes: Radon sump systems. Bracknell, IHS BRE Press, 2013. ISBN 978-1-84806-302-0.
- Siegesmund, S., Pereira, A., Sousa, L., Rucker, S., Kallas, L., Kopka, B., Domingos, F., Seco, S. (2022). Is there any health danger by radioactivity on the use of dimensional stones? *Environ. Earth Sci.* 81, 383 (2022), <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10483-w>