

08-023

## **ANALYSIS OF THE USE OF RADON-PROOF BARRIERS AS AN EFFECTIVE MEANS OF PROTECTION IN ENCLOSED LIVING SPACES.**

Ruvira Quintana, Beatriz <sup>(1)</sup>; García Fayos, Beatriz <sup>(1)</sup>; Juste Vidal, Belén Jeanine <sup>(1)</sup>; Arnal Arnal, Jose Miguel <sup>(1)</sup>; Verdú Martín, Gumersindo <sup>(1)</sup>  
<sup>(1)</sup> Universitat Politècnica de València

Radon is a radioactive noble gas, the inhalation of which can lead to lung cancer. EU Directive 2013/59 Euratom sets a concentration limit in closed spaces of 300 Bq/m<sup>3</sup>. Radon is present in soils containing uranium; as a gas it can travel through cracks and penetrate buildings, accumulating. The transposition of the Euratom directive in Spain modified the “Technical Building Code” in December 2019, generating a new basic document for protection against exposure to radon. This modification establishes the obligation to install protective barriers to limit the gases coming from the ground in new buildings located in vulnerable areas and defines its technical characteristics. Given that in Spain it is estimated that there are more than 250,000 buildings affected by the accumulation of radon, and that the revision of the limit concentration of exposure is near, in the next few years it will be necessary to install this type of barrier to comply with the current legislation. The present work carries out a review of the types of barriers, their composition as well as their effectiveness in protecting against radon.

Keywords: Radon; mitigation; Radon-proof barrier; diffusion coefficient; Technical Building Code.

## **ANÁLISIS DEL USO DE BARRERAS ANTI-RADÓN COMO MEDIO EFECTIVO DE PROTECCIÓN EN ESPACIOS CERRADOS HABITABLES.**

El radón es un gas noble radioactivo, cuya inhalación puede llegar a producir cáncer de pulmón, por lo que la Directiva EU 2013/59 Euratom, establece un límite de concentración en espacios cerrados de 300 Bq/m<sup>3</sup>. El radón está presente en suelos con contenido en uranio; al ser un gas puede difundir a través de grietas y penetrar en los edificios, acumulándose. La transposición de la directiva europea en España, modificó el Código Técnico de la Edificación en diciembre de 2019, generando un nuevo documento básico para la protección frente a la exposición a radón. Esta modificación establece la obligación de instalar barreras de protección para limitar los gases provenientes del terreno en edificios de nueva construcción situados en zonas vulnerables y define las características técnicas de las mismas. Dado que en España se estima que hay más de 250.000 edificios afectados por acumulación de radón, y que está próxima la revisión de la concentración límite de exposición, en los próximos años será necesario instalar este tipo de barreras para cumplir con la legislación vigente. El presente trabajo realiza una revisión sobre los tipos de barreras, su composición así como su efectividad en la protección frente al radón.

Palabras claves: Radón; mitigación; barrera anti-radón; coeficiente difusión; Código Técnico de la Edificación.

Correspondencia: Beatriz García Fayos beagarfa@iqn.upv.es

Agradecimientos: Este trabajo está financiado por el proyecto Bioingeniería de las Radiaciones Ionizantes. Biorad (PROMETEO/2018/035), por el proyecto MEMO RADION (IDIFEDER/2018/038) cofinanciado por el Programa Operativo del Fondo Social Europeo 2014-2020 y por la Ayuda Garantía Juvenil Gva-Capacidades de Análisis de detección del Laboratorio de Radiaciones Ionizantes (GJIDI/2018/A/016) de la Generalitat Valenciana.



©2021 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

### 1.1 El Radón

El radón es un elemento químico, perteneciente a la familia de los gases nobles, cuyo número atómico es 86. Fue descubierto en 1900 por Fredrich Ernst Dorn pero no fue aislado hasta 1908 por William Ramsay y Robert W. Gray (Helmenstine, 2021).

El radón tiene tres isótopos naturales presentes en la naturaleza y más de veinte artificiales. Los isótopos naturales son (Fuente Lastra, 2016):

- Radón-219, llamado actinón. Procede de la cadena de desintegración del uranio-235 (0.72% abundancia) y su periodo de semidesintegración es de 3.96 segundos.
- Radón-220, llamado torón. Se forma tras varias desintegraciones del torio-232 y su vida media es de 55.6 segundos.
- Radón-222, llamado radón. Procede de la serie de desintegración del uranio-238 (99.27% abundancia) y su periodo de semidesintegración es de 3.82 días.

Debido a la poca abundancia del uranio-235 y a las vidas medias tan cortas de los isótopos 219 y 220 del radón, el isótopo más importante de este elemento es el radón-222 y es el único que se tiene en cuenta cuando se habla de este gas ya que es capaz de viajar distancias más largas y alcanzar concentraciones más altas antes de desintegrarse (Fuente Lastra, 2016; Lugg & Probert, 1997).

En la Figura 1 se muestra la cadena de desintegración del uranio-238, a partir del cual se forma el radio-226 y el radón-222. Los colores de los distintos elementos representan los periodos de semidesintegración de manera que los colores azules significan periodos más largos (del orden de miles de años), mientras que los tonos rojos y naranjas corresponden a segundos y microsegundos; el color blanco representa el átomo estable. Los colores de las flechas indican el tipo de desintegración que se produce (alfa para el color amarillo y beta para el color lila) mientras que el grosor de las flechas representa la probabilidad con la que se produce esa desintegración (en el caso de que haya dos caminos posibles).

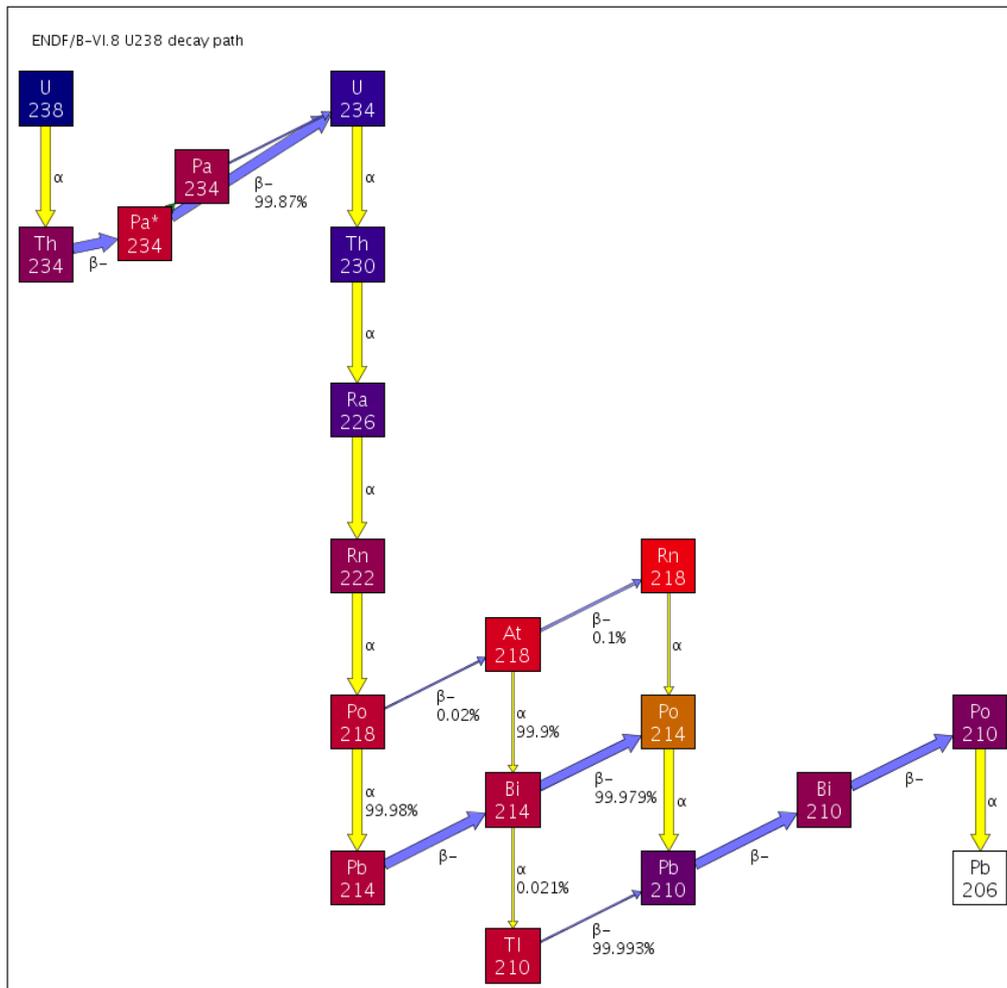
El radón es un gas inodoro, incoloro e insípido, por lo que no es fácil de detectar. Como se observa en la Figura 1, el radón se desintegra emitiendo una partícula alfa y comienza una cadena de elementos radioactivos de vida corta (polonio-218, plomo-214, bismuto-214 y polonio-214) que se desintegran emitiendo partículas alfa y beta y radiación gamma.

Los tres tipos de desintegraciones que puede sufrir un elemento radioactivo son las siguientes (Abd elBagi, 2013):

- Desintegración alfa: el elemento radioactivo se transforma emitiendo una partícula alfa, que es un núcleo de helio con dos protones y dos neutrones. Posee baja energía y se para fácilmente con una hoja de papel, unos centímetros de aire o la capa externa de la piel. Sin embargo, estas partículas poseen carga y gran poder de ionización, lo que las hace muy dañinas.
- Desintegración beta: el elemento radioactivo se transforma emitiendo partículas beta, que son electrones o positrones. Tienen una alta energía y pueden viajar varios metros en el aire, necesitando una lámina de aluminio para pararlas.
- Desintegración gamma: son fotones que libera el núcleo de un átomo después de desintegrarse para liberar energía y pasar a un estado no excitado. Estos fotones

tienen una energía muy alta y solamente pueden pararse con grandes espesores de plomo o cemento.

**Figura 1. Cadena de desintegración del uranio-238 (Fuente: Nuclear Energy Agency [NEA], Janis Web)**



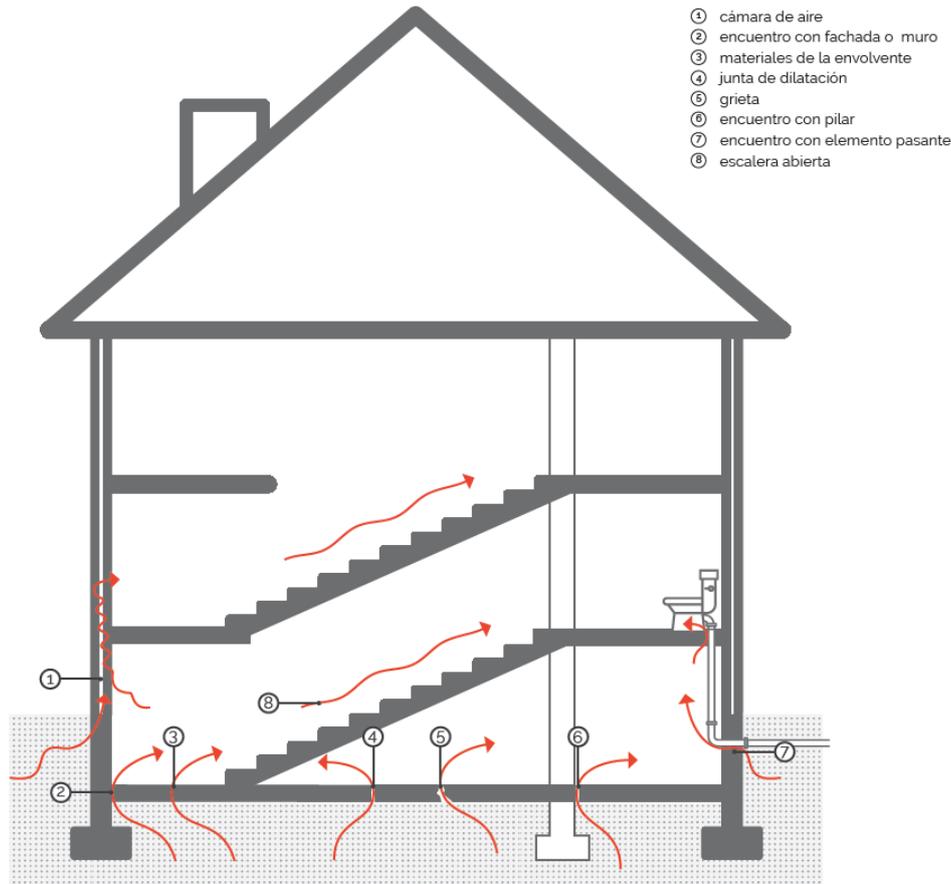
La principal peligrosidad del radón radica en que, al ser un gas, se inhala y pasa al interior de los pulmones. Aunque la mayor parte del radón se exhala, si se desintegrara dentro de los pulmones los descendientes, al ser partículas sólidas, permanecerían en el interior y continuarían desintegrándose, haciendo que el tejido reciba la energía de las partículas alfa, beta y de la radiación gamma; dicho daño celular puede provocar distintos tipos de cáncer. De hecho, el radón es la segunda causa de cáncer de pulmón tras el tabaco (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2009).

## 1.2 Entrada de radón a los edificios

El radón puede ser exhalado desde cualquier suelo que contenga uranio y radio, y emitirse a las aguas y en el propio suelo; especialmente se da en rocas graníticas, rocas sedimentarias, fosfatos y algunas arenas; por tanto, el tipo de terreno juega un papel importante en la concentración de radón (Brill et al., 1994; Khan, Gomes & Krewski, 2019; Ota et al., 2007; Singh, S., Singh, J., & Singh, L., 2005). La entrada de radón a los edificios también está afectada por la presencia de fracturas en la roca, la permeabilidad y la porosidad del suelo y

la aparición de grietas en los cimientos; además, la difusión y las diferencias de presión y temperatura son los principales mecanismos de entrada a los edificios (Brill et al., 1994; Fucic et al., 2011; Gandolfo et al., 2017; Goh et al., 1991; Khan, Gomes & Krewski, 2019; Pampuri, Caputo & Valsangiacomo, 2018). Además del suelo, el radón también puede exhalar de algunos materiales de construcción, como algunos tipos de cemento o de ladrillos (Donohoe & Royal, 1996; Pacheco-Torgal, 2012).

**Figura 2. Principales entradas de radón desde el terreno hacia el interior del edificio (Fuente: MITMA, Guía de rehabilitación frente al radón, 2020)**



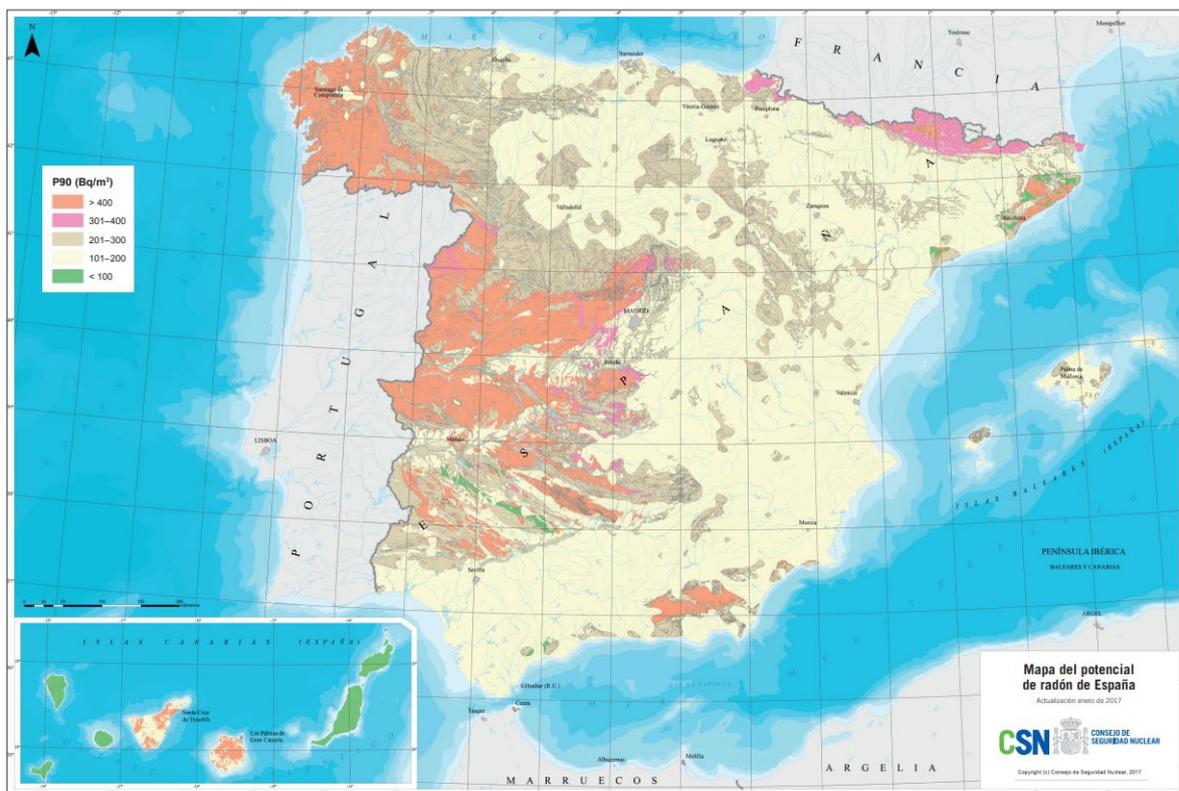
En la Figura 2 se muestran las principales vías de acceso del radón al interior de los edificios. Como se puede observar, los puntos de entrada más frecuentes se producen en lugares en contacto con el terreno como puede ser el encuentro con fachadas o muros, pilares o elementos pasantes (2, 6, 7), juntas de dilatación (4), los propios materiales de la envolvente (3), y la presencia de grietas (5). Además, si el radón entra a las cámaras de aire (1) puede llegar a distribuirse por el edificio al igual que si los accesos (escaleras [8] o puertas) están abiertos o mal sellados (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana [MITMA], 2020).

Debido a su peligrosidad y a la facilidad con la que entra en los espacios cerrados, la OMS recomienda una concentración máxima en el aire interior de  $100 \text{ Bq/m}^3$  pero si esta concentración no se puede alcanzar, recomienda que el nivel de referencia (la concentración de radón máxima aceptada) no supere los  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Por ello, numerosos países han establecido límites entre  $200$  y  $400 \text{ Bq/m}^3$  para edificios ya construidos y algunos países han establecido diferentes niveles para edificios nuevos y edificios ya construidos (OMS, 2009).

La Unión Europea en su Directiva 2013/59/Euratom estableció un límite inferior de 300 Bq/m<sup>3</sup> para lugares de trabajo y viviendas (Unión Europea, 2013). En España, la trasposición de esta directiva ha dado lugar a la modificación del Código Técnico de la Edificación [CTE] en el que se establece un nivel de referencia de 300 Bq/m<sup>3</sup> y se clasifican los municipios en dos zonas (categoría I y categoría II) en las que es obligado instalar medidas de protección frente al radón (España, 2019).

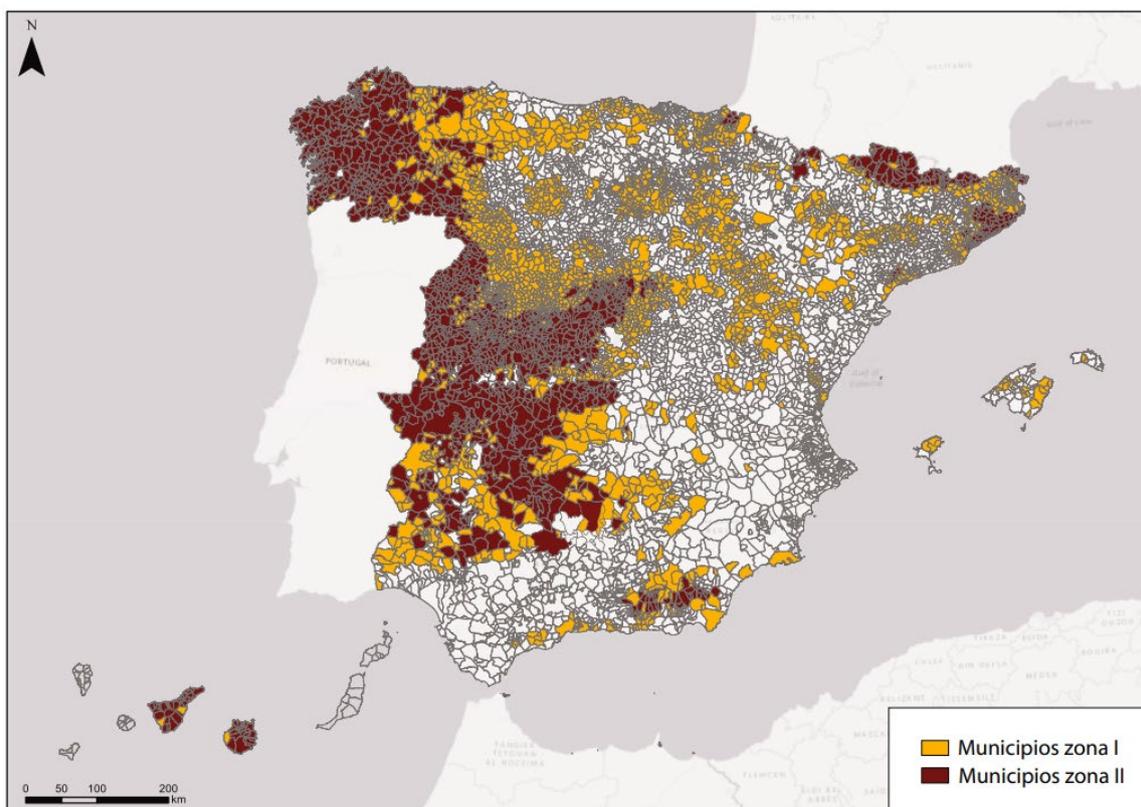
La Figura 3 muestra el mapa del potencial de radón de España elaborado por el Consejo de Seguridad Nuclear [CSN]. En color rosa y naranja se representan las zonas en las que el 10% de los edificios tienen una concentración de radón en el aire interior de entre 301 y 400 Bq/m<sup>3</sup> o superan los 400 Bq/m<sup>3</sup>, respectivamente. Estas zonas, que se extienden principalmente por Galicia, Castilla y León, Extremadura, Andalucía, Castilla-La Mancha, Cataluña y Canarias, serían de actuación prioritaria para reducir la concentración de radón en el interior de los edificios.

**Figura 3. Mapa del potencial de radón en España (Fuente: CSN, Cartografía del potencial de radón de España, 2017)**



En la Figura 4 se representa la clasificación de los municipios según las zonas que marca el Código Técnico de la Edificación, en la sección de protección frente al radón del Documento Básico de Salubridad. Los municipios situados en zonas de categoría II corresponden a aquellos en los que más del 5% de la zona urbana tiene concentraciones de radón en el interior mayores de 300 Bq/m<sup>3</sup> (prácticamente las zonas rosa y naranja de la Figura 3), mientras que los municipios de la zona I son aquellos que hasta el 5% de la zona urbana tiene concentraciones de radón en el interior mayores de 300 Bq/m<sup>3</sup> o más de 5% tiene concentraciones de radón en el interior entre 200 y 300 Bq/m<sup>3</sup> (zona marrón de la Figura 3).

**Figura 4. Clasificación por municipio según lo establecido en el Documento Básico de Salubridad (DB-HS), sección 6-Protección frente al radón (Fuente: CSN, Cartografía del potencial de radón de España, 2019)**



### 1.3 Técnicas de mitigación de radón

Existen diferentes técnicas para limitar la entrada de radón a los edificios y disminuir su concentración dependiendo de si el edificio ya está construido o todavía no. Sin embargo, es mucho más caro tratar de remediar altas concentraciones de radón en edificio ya existentes que tratar de mitigar la entrada de radón durante la construcción (Khan, Gomes & Krewski, 2019; Ratti, Piardi & Baglioni, 1998). Por ello, la OMS en su Manual sobre el radón en interiores (OMS, 2009) establece que las técnicas de mitigación para edificios nuevos son:

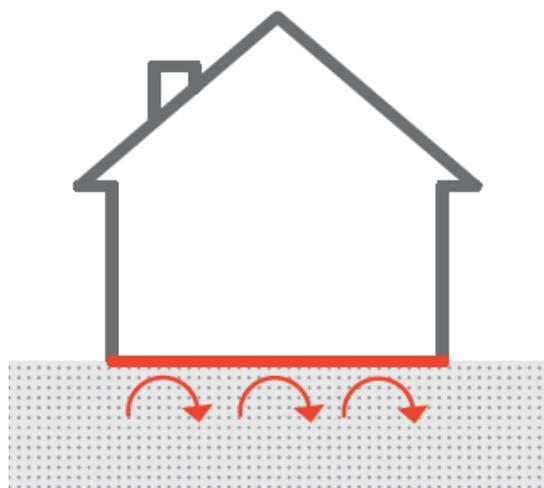
- Despresurización activa del suelo
- Despresurización pasiva del suelo
- Sellado de superficies
- Barreras
- Ventilación de espacios ocupados
- Ventilación de espacios no ocupados

De todas ellas, la más importante es la instalación de barreras frente al radón sobre los cimientos (Daoud & Renken, 2001; Khan, Gomes & Krewski, 2019) y, de hecho, en muchos países europeos la normativa exige la instalación de este tipo de barreras si la exhalación del suelo lo requiere, permitiendo una reducción de la concentración de radón de alrededor del 50% (Holmgren & Arvela, 2012).

#### 1.4 Barreras frente al radón

Una barrera frente al radón es una membrana que tiene una muy baja permeabilidad al radón y se utiliza para prevenir la entrada de radón a los espacios cerrados. Se extiende sobre el suelo y bajo la estructura de la casa y debe ser continua y estar completamente sellada para asegurar un buen aislamiento, tal y como se muestra en la Figura 5 (Long et al., 2013; Pacheco-Torgal, 2012; Papp & Cosma, 2015; Ratti, Piardi & Baglioni, 1998). Además, estas barreras deben ser asequibles, accesibles, no tóxicas y los materiales con los que se fabriquen deben tener una alta resistencia y durabilidad para asegurar su buen funcionamiento durante su periodo de vida útil (Goh et al., 1991; Jiránek & Hůlka, 2001).

**Figura 5. Esquema de instalación de una membrana frente al radón (Fuente: MITMA, Guía de rehabilitación frente al radón, 2020)**



La efectividad de las barreras anti-radón ha aumentado, se ha ido incrementando y su uso se ha vuelto más común en los últimos años, lo que ha permitido la adquisición de experiencia en su instalación. Además, los materiales con los que se fabrican estas barreras también han ido mejorando técnicamente consiguiendo aumentar su eficacia (Long et al., 2013).

Si se considera que la barrera es estanca, el transporte convectivo del radón al interior del edificio se puede considerar insignificante y que la entrada solamente se produce por difusión a través de la barrera (Jiránek & Hůlka, 2001). El espesor de la barrera es importante ya que el porcentaje de reducción de radón que entra a los edificios aumenta a medida que también aumenta el espesor de la barrera (Singh, S., Singh, J., & Singh, L., 2005).

Existen numerosos materiales con los que se fabrican este tipo de barreras pero los más frecuentemente utilizados son policloruro de vinilo (PVC), polietileno tanto de alta como de baja densidad (HDPE, LDPE), polipropileno (PP), algunos tipos de membrana bituminosa y revestimientos de cemento polimérico (Jiránek & Kotrbatá, 2011). Con tantos materiales distintos disponibles se utiliza el coeficiente de difusión al radón para determinar la eficacia del material para frenar el paso del radón al interior de los edificios.

El coeficiente de difusión al radón es una propiedad que define el transporte de radón a través del material y que permite conocer la idoneidad de un material para usarlo como barrera (Jiránek, Rovenská & Froňka, 2008). Inicialmente, no había una metodología a seguir para la determinación de este coeficiente y cada grupo de investigación establecía su propio método de medida (Rovenská & Jiránek, 2011). En 2017 se publicó la norma ISO (ISO/TS 11665-13:2017 - *Measurement of radioactivity in the environment — Air: radon 222 — Part 13: Determination of the diffusion coefficient in waterproof materials: membrane two-side activity*

*concentration test method*) que ha estandarizado la metodología de medida y ha establecido pautas para los montajes experimentales, así como para el cálculo de este coeficiente (International Standardization Organization [ISO], 2017).

Numerosos estudios ilustran los resultados de las determinaciones del coeficiente de difusión al radón de los materiales más habituales que se usan para impermeabilizar los edificios, en los cuales se establece que tienen valores del coeficiente de difusión entre  $10^{-8}$  y  $10^{-15}$  m<sup>2</sup>/s. Los materiales que presentan valores de coeficiente de difusión más bajos corresponden a membranas bituminosas con una lámina de aluminio y membranas de etilvinilacetato (EVA), mientras que los valores más altos se obtienen para membranas de bentonita sódica y para membranas de caucho y revestimientos de cemento polimérico (Jiránek & Hůlka, 2000, 2001; Jiránek & Kotrbatá, 2011). Este último grupo de membranas, al tener coeficientes de difusión por encima de  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s serían demasiado dependientes de las características del edificio y de la concentración de radón del suelo, por lo que podrían no proteger adecuadamente contra el radón (Jiránek & Hůlka, 2000; Jiránek, Rovenská & Froňka, 2008).

Los materiales impermeables utilizados habitualmente para proteger los edificios frente a la humedad, por ejemplo, PE, PP, PVC y membranas bituminosas, tienen coeficientes de difusión al radón entre  $10^{-11}$  and  $10^{-13}$  m<sup>2</sup>/s, lo que los hace adecuados para actuar también como barrera frente al radón (Jiránek & Hůlka, 2000, 2001; Jiránek & Kotrbatá, 2011). En la Tabla 1 se muestran valores del coeficiente de difusión al radón de estos materiales comunes obtenidos en diferentes estudios. En los casos en los que está especificado, también se presenta el espesor de la barrera, medido en micras.

**Tabla 1. Coeficientes de difusión al radón para algunos materiales comunes utilizados como barrera anti-radón**

Material	Coeficiente de difusión al radón, D (m <sup>2</sup> /s)	Referencia
HDPE	$6.2 \cdot 10^{-12}$	(Jiránek & Hůlka, 2001)
	$7.43 \cdot 10^{-12}$ (330 μm)	(Singh, S., Singh, J., & Singh, L., 2005)
	$5.8 \cdot 10^{-12}$	(Jiránek, Rovenská & Froňka, 2008)
	$6.1 \cdot 10^{-12}$	(Jiránek & Kotrbatá, 2011)
	$(4.24 \pm 0.16) \cdot 10^{-12}$	(Papp & Cosma, 2015)
	$1.62 \cdot 10^{-12}$	(Georgiev et al., 2019)
LDPE	$1.64 \cdot 10^{-11}$ (152 μm)	(Daoud & Renken, 2001)
	$1.24 \cdot 10^{-11}$	(Jiránek & Hůlka, 2001)
	$(1.8-3.3) \cdot 10^{-11}$ (25-187 μm)	(Singh, S., Singh, J., & Singh, L., 2005)
	$1.9 \cdot 10^{-11}$	(Jiránek, Rovenská & Froňka, 2008)
	$1.8 \cdot 10^{-11}$	(Jiránek & Kotrbatá, 2011)
	$1.93 \cdot 10^{-10}$	(Kumar & Chauhan, 2014)
	$(6.47 \pm 0.17) \cdot 10^{-12}$	(Papp & Cosma, 2015)
$3.07 \cdot 10^{-12}$	(Georgiev et al., 2019)	
VLDPE	$(7.36 \pm 0.22) \cdot 10^{-12}$	(Papp & Cosma, 2015)
PP	$2.7 \cdot 10^{-13}$	(Jiránek & Hůlka, 2001)
	$(1.1-1.4) \cdot 10^{-11}$ (30-55 μm)	(Singh, S., Singh, J., & Singh, L., 2005)
	$1.0 \cdot 10^{-11}$	(Jiránek, Rovenská & Froňka, 2008)
	$6.4 \cdot 10^{-12}$	(Jiránek & Kotrbatá, 2011)

	8.2·10 <sup>-14</sup>	(Georgiev et al., 2019)
PVC	5.0·10 <sup>-11</sup>	(Jha, Raghavayya, & Padmanabhan, 1982)
	5.8·10 <sup>-13</sup>	(Hafez & Somogyi, 1986)
	6.1·10 <sup>-13</sup>	
	7.81·10 <sup>-12</sup>	(Jiránek & Hůlka, 2001)
	1.5·10 <sup>-11</sup> (70 μm)	(Singh, S., Singh, J., & Singh, L., 2005)
	1.3·10 <sup>-11</sup>	(Jiránek, Rovenská & Froňka, 2008)
	1.8·10 <sup>-11</sup>	(Jiránek & Kotrbatá, 2011)

El coeficiente de difusión al radón depende de la composición química del material, así como del proceso de fabricación, la densidad del material, la fuente de que se obtienen los materiales, la concentración de radón en el aire, etc., por lo que incluso para el mismo tipo de material se pueden encontrar diferencias en los valores del coeficiente de difusión (Daoud & Renken, 2001; Jiránek & Hůlka, 2000; Jiránek & Kotrbatá, 2011; Szajerski & Zimny, 2020), tal y como también se puede apreciar en la Tabla 1.

Dado que la protección frente al radón es un tema actual y que está regulado por numerosas normativas, entre ellas el CTE, es posible encontrar en el mercado materiales que se venden como barreras frente al radón. Generalmente suelen ser multicapa y estar formadas por la combinación de materiales poliméricos (como PE o PP) junto con alguna capa de aluminio, llegando a conseguir coeficientes de difusión al radón en torno a 10<sup>-14</sup> m<sup>2</sup>/s.

### 1.5 Expectativas futuras para la problemática del radón

La revisión realizada ha puesto de manifiesto la problemática existente en torno al radón en interiores. En España se estima que actualmente hay más de 250.000 viviendas y edificios ya construidos afectados por altas concentraciones de radón. La trasposición parcial de la Directiva 2013/59/Euratom ha mostrado la necesidad de implementar distintas técnicas que permitan reducir la concentración de radón en el aire hasta valores que no sean perjudiciales para la salud.

De hecho, las publicaciones más recientes presentan la investigación para el desarrollo de nuevos materiales para las barreras, por ejemplo con óxido de grafeno (Gong et al., 2020), para determinar el espesor óptimo de la barrera en función del tipo de edificio (dimensiones, ventilación) y la concentración de radón que exhala del suelo (Kumar & Chauhan, 2021), entre otras.

## 2. Conclusiones

El radón es un gas radioactivo que exhala desde suelos con contenido en uranio y es capaz de entrar en los edificios y alcanzar concentraciones peligrosas para las personas. Por ello, en numerosas normativas de distintos países se limita la concentración de este gas que puede haber en el interior de espacios cerrados; en concreto, en España, esta limitación la marca el Código Técnico de la Edificación (300 Bq/m<sup>3</sup>), así como la obligación de instalar una barrera en los edificios nuevos que se encuentren en las dos zonas que se establecen de actuación prioritaria.

Estas barreras habitualmente se fabrican de materiales poliméricos (PE, PP, PVC), ya que también sirven para proteger los edificios contra la humedad, y que tienen un coeficiente de difusión al radón entre 10<sup>-11</sup> y 10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup>/s. Además, es posible encontrar membranas

comerciales fabricadas a partir de materiales poliméricos combinados con otros materiales, como aluminio, que llegan a mejorar el coeficiente de difusión hasta  $10^{-14}$  m<sup>2</sup>/s.

Las nuevas investigaciones se dirigen hacia el desarrollo de nuevos materiales adecuados para la fabricación de barreras más efectivas y hacia el cálculo de los espesores óptimos que deben tener para asegurar una buena protección.

### 3. Bibliografía

- Abd elBagi, W. K. (2013). *Concentration of some radionuclides in Moringa Oliefera plant*. Trabajo final de master, Sudan Academy of Sciences, Jartum, Sudán.
- Brill, A. B., Becker, D. V., Donahoe, K., Goldsmith, S. J., Greenspan, B., Kase, K., Royal, H., Silberstein, E. B., & Webster, E. W. (1994). Radon update: Facts concerning environmental radon: Levels, mitigation strategies, dosimetry, effects and guidelines. *Journal of Nuclear Medicine*.
- Daoud, W. Z., & Renken, K. J. (2001). Laboratory assessment of flexible thin-film membranes as a passive barrier to radon gas diffusion. *Science of the Total Environment*, 272(1–3), 127–135. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00676-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00676-3)
- Donohoe, K., & Royal, H. (1996). Importance of radon as a threat to public health. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 114(2), 271–276. [https://doi.org/10.1016/S0194-5998\(96\)70182-1](https://doi.org/10.1016/S0194-5998(96)70182-1)
- España. Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, BOE 311, de 27 de diciembre de 2019 [Anejo II]. *Boletín Oficial del Estado*, 23 de diciembre de 2019, núm. 311, pp. 140488-140674.
- Fucic, A., Fucic, L., Katic, J., Stojković, R., Gamulin, M., & Seferović, E. (2011). Radiochemical indoor environment and possible health risks in current building technology. *Building and Environment*, 46(12), 2609–2614. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.020>
- Fuente Lastra, Marta (2016). *Estudio de diferentes técnicas para la medida de exhalación de radón en suelos*. Trabajo Final de Máster, Universidad de Cantabria, Cantabria, España.
- Gandolfo, G., Lepore, L., Pepperosa, A., Remetti, R., & Franci, D. (2017). Radiation protection considerations on radon and building materials radioactivity in Near Zero Energy Buildings. *Energy Procedia*, 140, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.119>
- Georgiev, S., Mitev, K., Dutsov, C., Boshkova, T., & Dimitrova, I. (2019). Partition coefficients and diffusion lengths of (222)Rn in some polymers at different temperatures. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(22), 4523. <https://doi.org/10.3390/ijerph16224523>
- Goh, T. B., Oscarson, D. W., Cheslock, M., & Shaykewich, C. (1991). Fluence rate of radon from soil: Effect of sorption barriers, moisture content, and temperature. *Health Physics*. <https://doi.org/10.1097/00004032-199109000-00005>
- Gong, M. S., Cha, J. R., Hong, S. M., Lee, C., Lee, D. H., Joo, S. W. (2020) Roll-to-roll graphene oxide radon barrier membranes. *Journal of Hazardous Materials*, 383, 121148. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121148>
- Hafez, A. F., & Somogyi, G. (1986). Determination of radon and thoron permeability through some plastics by track technique. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 12(1–6). [https://doi.org/10.1016/1359-0189\(86\)90682-5](https://doi.org/10.1016/1359-0189(86)90682-5)
- Helmenstine, A. M. (2021, 16 Febrero). Radon Chemical and Physical Properties. Obtenido 7 de abril del 2021, de <https://www.thoughtco.com/radon-facts-606584>
- Holmgren, O., & Arvela, H. (2012). Assessment of current techniques used for reduction of indoor radon concentration in existing and new houses in European countries. *STUK-A251*. [www.stuk.fi](http://www.stuk.fi)

- International Standardization Organization (2017). *ISO/TS 11665-13:2017 - Measurement of radioactivity in the environment — Air: radon 222 — Part 13: Determination of the diffusion coefficient in waterproof materials: membrane two-side activity concentration test method*.
- Jha, G., Raghavayya, M., & Padmanabhan, N. (1982). Radon permeability of some membranes. *Health Physics*, 42(5).
- Jiránek, M., & Hůlka, J. (2000). Radon diffusion coefficient in radon-proof membranes - determination and applicability for the design of radon barriers. *International Journal on Architectural Science*, 1, 149–155.
- Jiránek, M., & Hůlka, J. (2001). Applicability of various insulating materials for radon barriers. *Science of the Total Environment*, 272(1–3), 79–84. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00668-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00668-4)
- Jiránek, M., & Kotrbatá, M. (2011). Radon diffusion coefficients in 360 waterproof materials of different chemical composition. *Radiation Protection Dosimetry*, 145, 178–183. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr043>
- Jiránek, M., Rovenská, K., & Froňka, A. (2008). Radon diffusion coefficient – A material property determining the applicability of waterproof membranes as radon barriers. *Proceedings of the American Association of Radon Scientists and Technologists*. Las Vegas, NV.
- Khan, S. M., Gomes, J., & Krewski, D. R. (2019). Radon interventions around the globe: A systematic review. *Heliyon*, 5(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01737>
- Kumar, A., & Chauhan, R. P. (2014). Active and passive measurements of radon diffusion coefficient from building construction materials. *Environmental Earth Sciences*, 72, 251–257. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2951-5>
- Kumar, A., & Chauhan, R. P. (2021). Measurement of optimal thickness of radon-resistant materials for insulation using diffusion coefficient. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 327, 425–431. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07507-9>
- Long, S., Fenton, D., Cremin, M., & Morgan, A. (2013). The effectiveness of radon preventive and remedial measures in Irish homes. *Journal of Radiological Protection*. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/33/1/141>
- Lugg, A., & Probert, D. (1997). Indoor radon gas: a potential health hazard resulting from implementing energy-efficiency measures. *Applied Energy*, 56(2), 93–196. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(97\)00002-0](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(97)00002-0)
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2020). Guía de rehabilitación frente al radón [Fichas incluidas]. Disponible en: [https://www.codigotecnico.org/pdf/GuiasyOtros/GuiaRadon/Guia\\_de\\_rehabilitacion\\_frente\\_al\\_radon+Fichas.pdf](https://www.codigotecnico.org/pdf/GuiasyOtros/GuiaRadon/Guia_de_rehabilitacion_frente_al_radon+Fichas.pdf)
- Nuclear Energy Agency. Janis Web. <https://www.oecd-nea.org/janisweb/renderer/3222>
- Organización Mundial de la Salud (2009). Indoor radon: A public health perspective. *International Journal of Environmental Studies*, 67(1), 108. <https://doi.org/10.1080/00207230903556771>
- Ota, M., Iida, T., Yamazawa, H., Nagara, S., Ishimori, Y., Sato, K., & Tokizawa, T. (2007). Suppression of radon exhalation from soil by covering with clay-mixed soil. *Journal of Nuclear Science and Technology*. <https://doi.org/10.1080/18811248.2007.9711868>
- Pacheco-Torgal, F. (2012). Indoor radon: An overview on a perennial problem. *Building and Environment*, 58, 270–277. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.004>
- Pampuri, L., Caputo, P., & Valsangiacomo, C. (2018). Effects of buildings' refurbishment on indoor air quality. Results of a wide survey on radon concentrations before and after energy retrofit interventions. *Sustainable Cities and Society*, 42, 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.007>
- Papp, B., & Cosma, C. (2015). Methods for measuring radon diffusion parameter of waterproof membranes. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 303. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3761-2>

- Ratti, A., Piardi, S., & Baglioni, A. (1998). Building techniques for the control of radon pollution in Italy. *Radiation Protection Dosimetry*.  
<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a032332>
- Rovenská, K., & Jiránek, M. (2011). 1<sup>st</sup> International comparison measurement on assessing the diffusion coefficient of radon. *Radiation Protection Dosimetry*, 145(2–3), 127–132.  
<https://doi.org/10.1093/rpd/ncr079>
- Singh, S., Singh, J., & Singh, L. (2005). The study of some common plaster coating materials and plastic foils as a barrier to radon. *Radiation Measurements*, 40(2–6), 673–677.  
<https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2005.05.006>
- Szajerski, P., & Zimny, A. (2020). Numerical analysis and modeling of two-loop experimental setup for measurements of radon diffusion rate through building and insulation materials. *Environmental Pollution*, 256, 113393.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113393>
- Unión Europea. Directiva 2013/59/Euratom del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 17 de enero de 2014, núm. 13, pp. 1-73

**Comunicación alineada con los  
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

