



Received: 24-05-2018  
Accepted: 28-07-2018

Anales de Edificación  
Vol. 4, Nº 2, 32-39 (2018)  
ISSN: 2444-1309  
Doi: 10.20868/ade.2018.3776

## Singularidades en el diseño de soluciones de protección frente a gas radón. Singularities in the design of protection solutions against radon gas.

B. Frutos<sup>a</sup>, E. Muñoz<sup>a,b</sup>, M. Olaya<sup>a</sup>, C. Alonso<sup>a</sup>, F. Martín-Consuegra<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – (CSIC), Madrid, (borjafv@ietcc.csic.es; emunozlorenzo@ietcc.csic.es; olaya@ietcc.csic.es; c.alonso@ietcc.csic.es; martin-consuegra@ietcc.csic.es), <sup>b</sup>Universidad Politécnica de Madrid

**Resumen**— El isótopo del radón Rn-222, aparece en la naturaleza como producto de la desintegración natural del radio-226, común en la corteza terrestre. El potencial de exhalación de un terreno viene definido, por un lado, por el contenido de radio del sustrato (por ejemplo, los graníticos), y por otro, por la permeabilidad del mismo que permite la movilidad a través de los poros (fracturados). El radón, como elemento gaseoso, posee una alta movilidad y puede penetrar en los edificios a través de fisuras o grietas por advección o por difusión a través de la propia permeabilidad de los materiales de la envolvente que estén en contacto con el terreno. La acumulación de este gas en los recintos cerrados puede elevar las concentraciones y constituir un riesgo para la salud de las personas que lo inhalen. La OMS advierte de sus efectos, situándolo como agente cancerígeno de grado uno, siendo la segunda causa de contracción de cáncer de pulmón (la primera sería el tabaco). En esta comunicación se ofrecen pautas de diseño, y las particularidades asociadas a las estrategias de actuación, basándose en los estudios llevados a cabo a través de proyectos de investigación.

**Palabras clave**— Radón, protección, salud, mitigación, soluciones.

**Abstract**- The isotope of radon Rn-222, appears in nature as a product of the natural disintegration of radio-226, common in the earth's crust. The exhalation potential of a terrain is defined, on the one hand, by the radio content of the substrate (for example granitic), and on the other, by the permeability of the same that allows mobility through the pores (fractured). Radon, as a gaseous element, has a high mobility and can penetrate buildings through fissures or cracks by advection or diffusion through the permeability of the materials of the envelope that are in contact with the ground. The accumulation of this gas in enclosed areas can increase concentrations and constitute a risk to the health of people who inhale it. The WHO warns of its effects, placing it as a carcinogen of grade one, being the second cause of lung cancer contraction (the first would be tobacco). This communication offers design guidelines, and the particularities associated with the strategies of action, based on the studies carried out through research projects.

**Index Terms**— Radon, protection, health, mitigation, solutions.

B. Frutos, M. Olaya, C. Alonso, F. Martín-Consuegra pertenecen al Departamento de Construcción. Instituto de ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – (CSIC), Madrid, España.

E. Muñoz pertenece al Departamento de Construcción. Instituto de ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – (CSIC) y al Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas (UPM).

## I. INTRODUCCIÓN

El radón, como gas noble, se presenta en la naturaleza en tres isótopos, el  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ , siendo este último el de mayor significación radiológica y al que nos referiremos, de ahora en adelante, como radón. Este gas inerte de origen natural, derivado de la desintegración del radio ( $^{226}\text{Ra}$ ) presente en los suelos terrestres, es capaz de viajar entre los poros del terreno hasta alcanzar la superficie, donde podrá diluirse entre los gases de la atmósfera, o penetrar en el interior de los edificios si éstos no se encuentran debidamente protegidos. Al penetrar en un espacio cerrado, el radón se acumula aumentando su concentración. La inhalación de este gas puede llegar a generar cáncer pulmonar debido a que la radiación que se produce de la desintegración del mismo y de sus descendientes de vida corta ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  y  $^{214}\text{Po}$ ) en el interior de nuestro organismo, es capaz de alterar el ADN de los tejidos pulmonares. La Organización Mundial de la Salud califica al radón como agente cancerígeno de grado 1. Según este Organismo, el radón es la segunda causa de contracción de cáncer pulmonar detrás del tabaco (WHO, 2009).

En base a la percepción del riesgo derivada de estudios

médicos epidemiológicos, algunos países han establecido unos niveles de concentración de radón de referencia, por encima de los cuales se recomienda, o se obliga, según el caso, a una intervención arquitectónica para reducir dichos niveles. Esta concentración, expresada en Bequerelios (número de desintegraciones subatómicas por segundo) por metro cúbico de aire, ya aparecía en una Recomendación Europea del 21 de Febrero de 1990 (90/143/EURATOM) (Comisión, 1990), con valores  $400\text{ Bq/m}^3$  para viviendas existentes y  $200\text{ Bq/m}^3$  para viviendas de nueva construcción (valor de diseño).

Actualmente existe una nueva Directiva Europea, de obligado cumplimiento y transposición directa a los estados miembros, en la que se contemplan valores actualizados (DIRECTIVA 2013/59/) (Unión Europea, 2013), situando el máximo en  $300\text{ Bq/m}^3$ .

El Consejo de Seguridad Nuclear ha publicado recientemente unos mapas actualizados del potencial de riesgo por comunidades y municipios, donde dibuja el territorio nacional en función del riesgo potencial de encontrar radón en las viviendas sobre él situadas (Consejo, 2017). La división la establece en varios niveles según la concentración estimada. La figura 1 da una imagen de que zonas son las de actuación

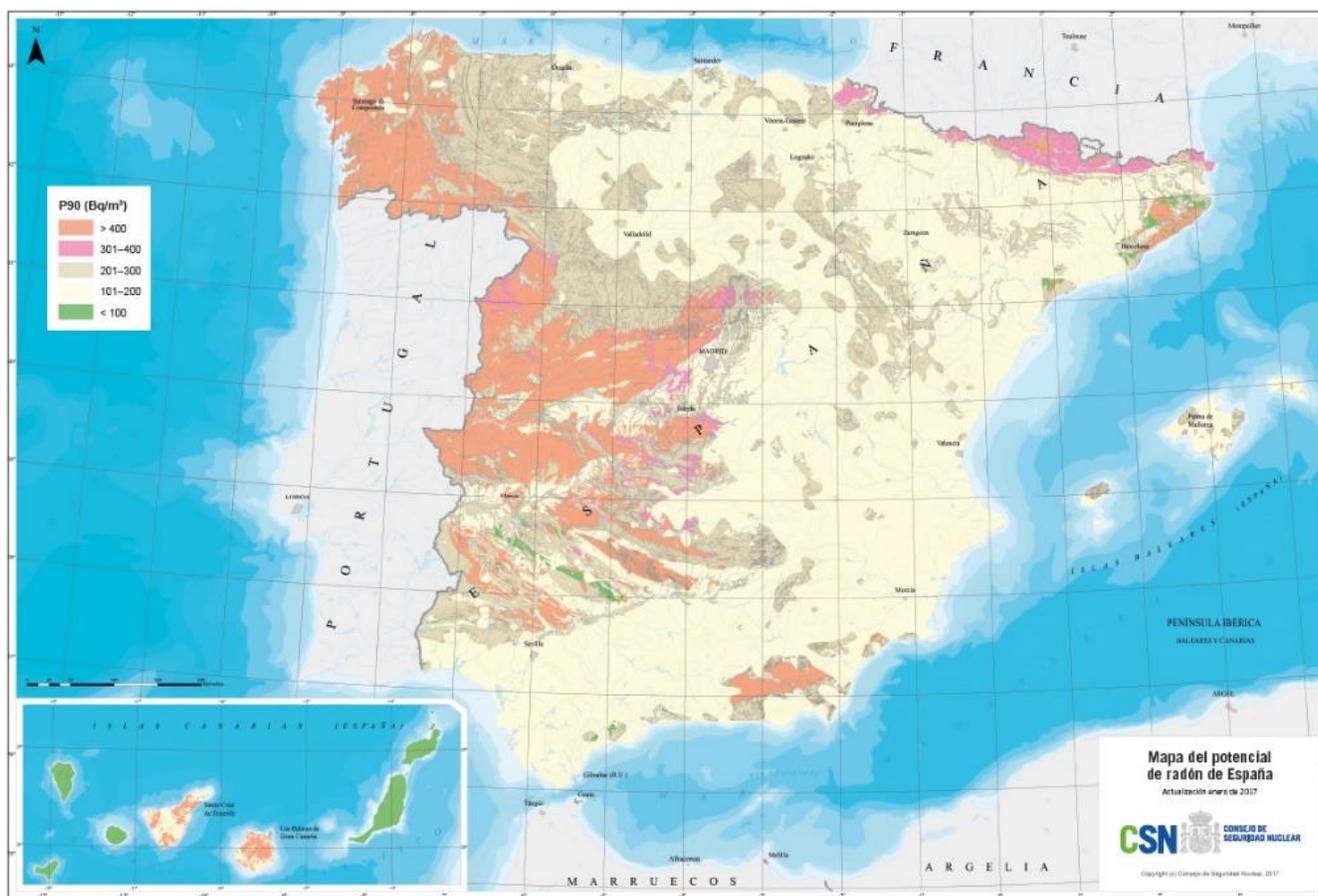


Fig. 1. Mapa nacional de Exposición Potencial al Radón. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

## II. ESTRATEGIAS DE PROTECCIÓN

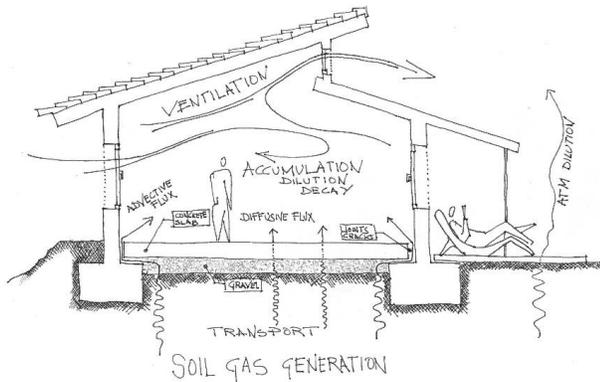


Fig. 2. Esquema de procesos físicos de generación, transporte, desintegración, acumulación y dilución.

prioritaria para ser incorporadas dentro del marco regulador, con una referencia de  $300 \text{ Bq/m}^3$ .

Sobrepasados estos niveles, resulta necesario realizar una actuación correctora que consiga reducir las concentraciones por debajo de estos límites. Estas actuaciones son de tipo arquitectónico y suponen ejecuciones constructivas de diversa índole, cuyo desarrollo dependerá del nivel de concentración inicial, de la efectividad que se deba conseguir para reducir los niveles por debajo de los límites de seguridad, y de la configuración tipológica de la edificación.

Desde una perspectiva arquitectónica, se han venido estudiando diversas técnicas constructivas destinadas a frenar la inmisión de radón hacia el interior de los edificios. El Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja desarrolló, junto a la Universidad de Cantabria, un proyecto de investigación (Instituto, 2004) cuyo fin es el estudio de las efectividades de distintas soluciones de protección, usando metodologías y materiales propios de nuestro país. Los resultados fueron entregados al Ministerio de Fomento, quien tiene el encargo de desarrollar la normativa, en aspectos constructivos, a través del Código Técnico de la Edificación. Con el fin de seguir profundizando en el conocimiento de estas técnicas, y sus singularidades en la aplicación y el diseño, se están desarrollando en la actualidad dos proyectos de investigación que pretenden poder generar una metodología de diseño en base a los resultados de estudios paramétricos que se están obteniendo mediante el uso de cálculos numéricos por elementos finitos aplicados a geometrías distintas, y condiciones de terreno y contorno diversas. Estos resultados permitirán, en un futuro, implementar las soluciones de remedio con mayores garantías de éxito. En esta comunicación, se presentan los avances en estos estudios, en algunas de las técnicas comúnmente usadas.

Para poder comprender el objetivo de las soluciones de remedio, es conveniente conocer cómo se transporta el radón, y como penetra en el interior de los edificios.

## A. Mecanismos de entrada del gas radón

El gas radón proveniente del subsuelo, generado por la desintegración del radio, exhala a la atmósfera y se mezcla con el resto de los gases, disminuyendo así su concentración sin que alcance niveles importantes. Ahora bien, si existiese una edificación sobre el terreno, y debido fundamentalmente a la diferencia de presión que se establece entre los poros del terreno y el espacio cerrado de la edificación (normalmente alta debido a ventilaciones o ausencia de las mismas), se establecería un flujo del gas hacia el interior. Por su condición de gas, su movilidad es alta entre los poros de los materiales normalmente usados en la edificación y penetrará fácilmente en el interior de la vivienda, atravesando los forjados, soleras, muros, e introduciéndose a través de grietas o fisuras. La acumulación de radón en el interior de los edificios eleva las concentraciones y por tanto el riesgo para la salud de sus habitantes.

De una forma general, la ecuación diferencial que describe la generación, transporte, desintegración y acumulación de radón, puede escribirse de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \varepsilon C}{\partial t} = D \nabla^2 C + \frac{k}{\mu} \nabla C \nabla P - \lambda \varepsilon C + \varepsilon G \quad (1)$$

La ecuación (1), contemplada en distintos estudios (Muñoz et al., 2017), define la concentración de radón en un espacio y tiempo determinado, en función de la tasa de entrada descrita por el mecanismo difusivo (primer término), dependiente del gradiente de concentraciones, la tasa advectiva (segundo término), que depende del gradiente de presiones entre la existente en los poros del terreno y la del interior de la edificación, la desintegración del átomo, la desintegración (tercer término) y la generación del mismo en el sustrato de terreno (cuarto término).

Los principales factores que influyen en la tasa de flujo de radón hacia el interior son los siguientes:

- La potencialidad del suelo de generar gas radón. Rocas con contenidos altos de radio.
- La capacidad que tenga el gas de escapar de la estructura de la roca (Emanación).
- La porosidad y humedad que presente el terreno para que el radón pueda alcanzar la superficie (Exhalación).
- La diferencia de presiones entre el terreno y el interior de la edificación.

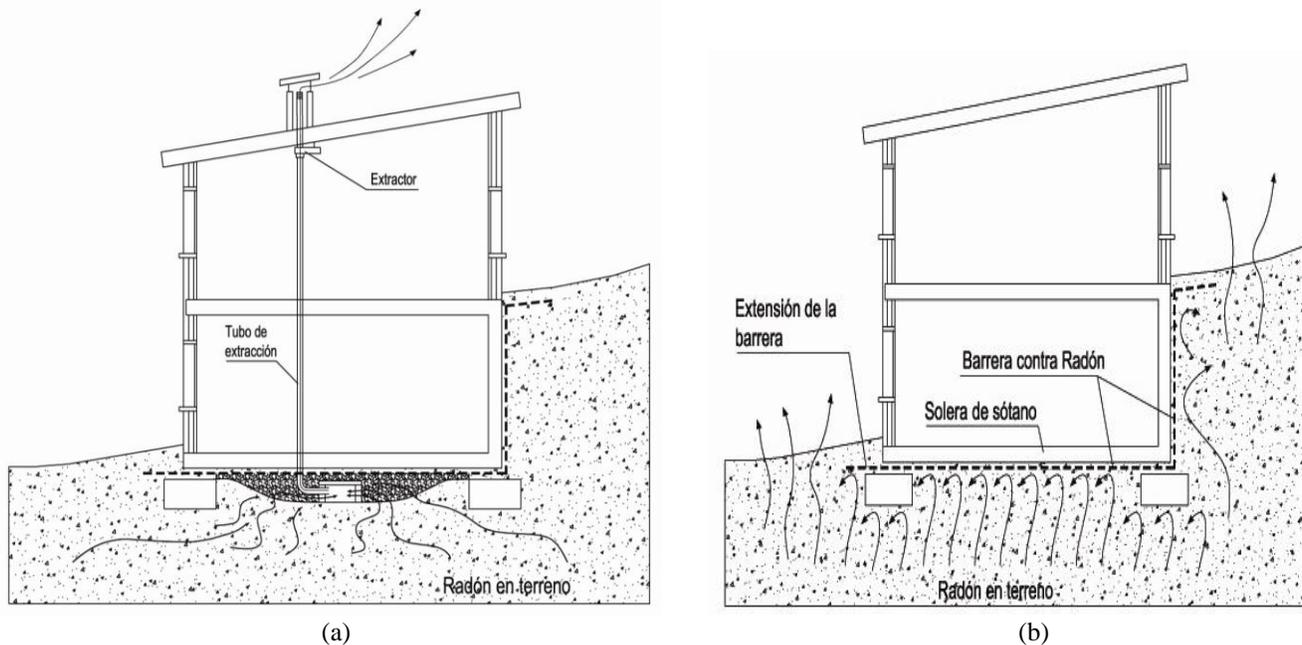


Fig. 3. Esquema de elementos que componen un sistema de extracción (a), y esquema de colocación de barrera anti radón (b).

- Las condiciones meteorológicas que modificarán el flujo de radón por variación del gradiente de presiones entre los poros del terreno y el interior del edificio.

En la figura 2, se esquematizan los distintos procesos físicos que afectan a las concentraciones de radón interior.

#### B. Estrategias de protección. Sobre su funcionamiento

Se trata de actuaciones constructivas destinadas a frenar la entrada de radón al interior del edificio. Estas técnicas pueden aplicarse a edificios existentes, en los que habrá que intervenir para la introducción de las mismas, o a edificios de nueva planta en los que podrán ser planteadas en fase de proyecto. Lógicamente, las técnicas planteadas para edificios de nueva planta supondrán un menor coste, una mayor facilidad de ejecución y una integración en el diseño del edificio, además de conseguir efectividades de reducción de radón de mayor rango.

En general, e independientemente de si se trata de un edificio de nueva planta o un edificio ya construido, las técnicas de actuación se basan en 3 estrategias claramente diferenciadas (Frutos et al., 2015) que se exponen a continuación.

##### a) Sistemas de extracción de radón desde el terreno. Despresurización

Se trata de despresurizar el terreno extrayendo aire desde el área de asiento del edificio. Tiene una doble función, por un lado, forzar una vía de escape del gas del terreno reduciendo la concentración en él, y por otro invertir el gradiente de presiones para anular el mecanismo advectivo de la física de transporte de gases. Este aspecto se comenta más en detalle en el punto de 3.

Como se muestra en la figura 3 (a), para la extracción es necesario un punto de captación en el terreno, un conducto de

evacuación hacia el exterior y un extractor mecánico en el caso de que las concentraciones sean excesivas y no funcione por tiro natural.

Este tipo de medidas están clasificadas como las de mayor efectividad de las estrategias habitualmente empleadas en protección (Scivyer & Jaggs, 1998).

##### b) Sistemas de barreras frente al paso del gas radón

Como se observa en la figura 3 (b), consiste en interponer una membrana de material impermeable frente al paso de los gases entre el terreno y los elementos constructivos que están en contacto con el edificio (soleras, muros de sótano, forjados sanitarios, etc). El objetivo es dotar de mayor estanquidad a la vivienda para atenuar el flujo de radón hacia su interior desde el terreno.

##### c) Ventilación

La ventilación es una técnica habitual en casos de baja concentración. La mezcla de aire con el exterior reduce la concentración interior por dilución. Esta técnica, aunque bastante obvia, no llega a ser de alta efectividad, al menos con las tasas de ventilación habituales en las viviendas. El estudio de tasas requeridas para la reducción implica un conocimiento previo de tasas de hermeticidad que se comentarán más adelante.

### III. ESTUDIOS PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE LAS SOLUCIONES

El diseño óptimo de estas estrategias requiere de estudios pormenorizados para lograr el máximo de efectividad posible. A través de varios proyectos de investigación (Proyecto, 2014;

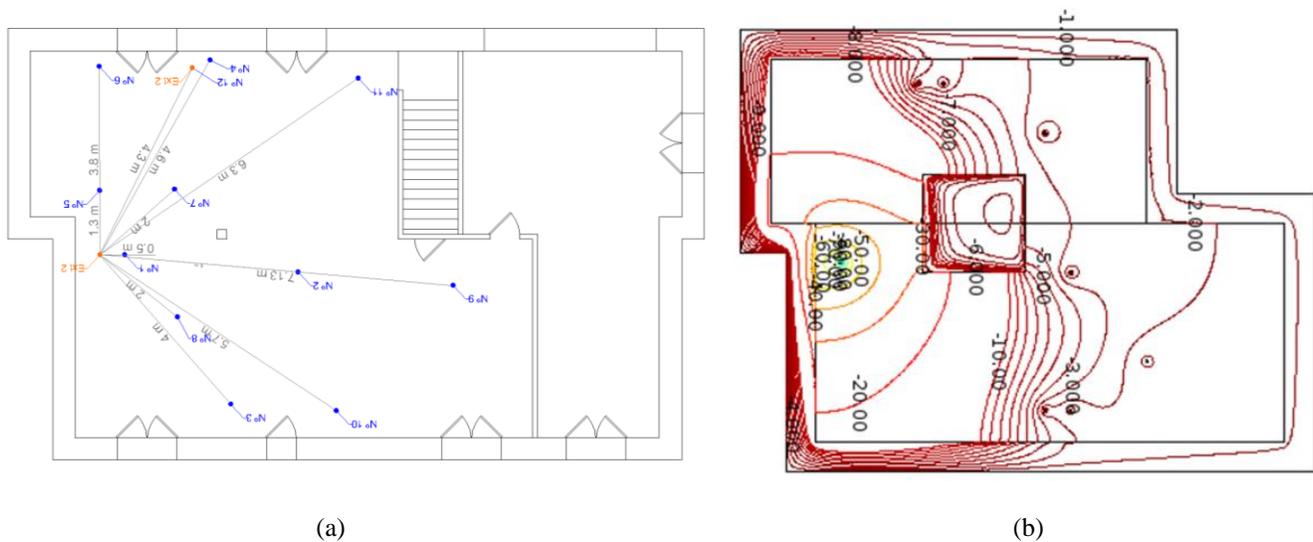


Fig. 4. Medida de campo de presiones (a), y modelo numérico validado (b).

Proyecto, 2015), en el Instituto de ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, se están logrando crear metodologías de estudio combinando modelos numéricos y ensayos de validación, que están permitiendo alcanzar altas efectividades, y particularizar los diseños a casos concretos de geometrías de edificación dadas. A continuación, se comentan los avances.

#### A. Técnicas de despresurización

En condiciones normales, la presión en el interior de un edificio tiende a igualarse con la presión atmosférica en el exterior, a través de la comunicación aérea que existe entre los puntos de infiltración como carpinterías, rejillas, chimeneas, etc. Lo mismo ocurre con respecto a las presiones que se establecen en el terreno, pero con un ligero desfase temporal función de la permeabilidad el suelo. Por otro lado, el estado de presiones en el interior sufre una ligera despresurización inducida por la fuga de aire que se produce por las chimeneas y rejillas debido al efecto “stack” y “venturi”, que oscila entre -2 y -5 Pa con respecto a la exterior y la del terreno. Esta gradiente provoca un flujo advectivo del gas hacia el interior del edificio. La estrategia de despresurización persigue invertir este gradiente provocando una presión diferencial negativa en el terreno del orden de -10 Pa respecto a la interior (valor de garantía), normalmente mediante el uso de extractores conectados a la red de inserción. Lograr este objetivo parte por comprender la mecánica de fluidos, en su componente de extensión de presiones en terreno, contando con los parámetros involucrados, tales como el ratio de permeabilidad entre el terreno y el lecho gravoso, la estanquidad del espacio bajo la losa de solera, las potencias de extracción, la distribución de puntos o red de inserción, o las barreras que pueden provocar las cimentaciones.

Para el estudio de la extensión del campo de presiones en viviendas construidas, resulta útil la combinación de las siguientes técnicas:

a) Diagnósticos de presiones diferenciales en distintos puntos de la losa aplicando una aspiración bajo la misma, como se esquematiza en la figura 4 (a). Rojo, aspiración; rojo, registro.

b) Generación de un modelo numérico de predicción, validarlo con el estudio de campo de presiones medido, y aplicarlo al diseño para controlar el área despresurizada con -10Pa de objetivo. En nuestro caso, se ha hecho uso del Software Comsol Multiphysics, de cálculo numérico mediante elementos finitos. Se pueden ver las referencias y validación en el artículo (Muñoz et al., 2017).

La aplicación de este modelo validado a las distintas alternativas que se propongan de red y potencias permite conocer a priori su efectividad y ajustar al óptimo deseado. La figura 5 muestra el ajuste entre medidas de campo, y modelo numérico, que permitieron poder diseñar la red para alcanzar las presiones deseadas en el área de asiento del edificio que se pretendía proteger. Como se puede observar, fue necesario introducir las grietas observadas en la solera, para llegar al ajuste, confirmando de esta manera el punto fundamental de estanquidad de la losa de suelo, en su comunicación entre los ambientes Terreno/Espacio interior.

#### B. Técnicas de barreras

En cuestiones de aplicación de barreras, los estudios se enfocan a establecer una serie de requisitos mínimos para garantizar sus prestaciones de estanquidad frente al gas. Entre los ensayos que pueden tenerse en cuenta destacan los propiamente encaminados a analizar su estanquidad, como el ensayo de difusión de membranas a gas radón, y los que

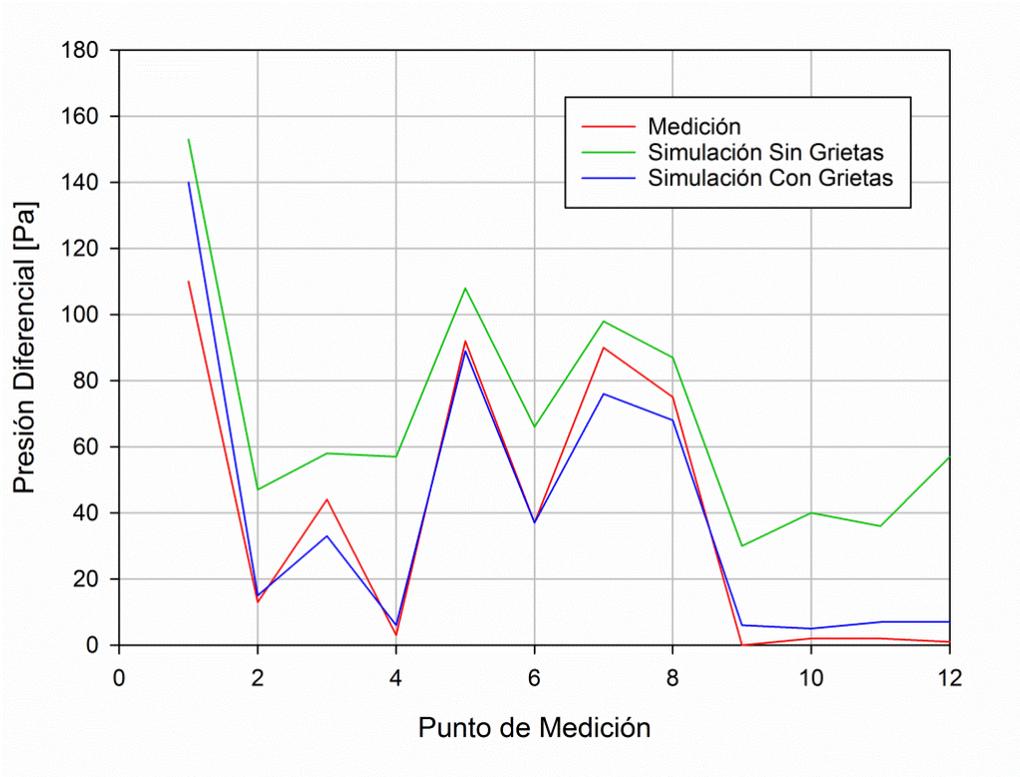


Fig. 5. Comparación y ajuste entre la medida de campo y la simulación en modelo numérico.

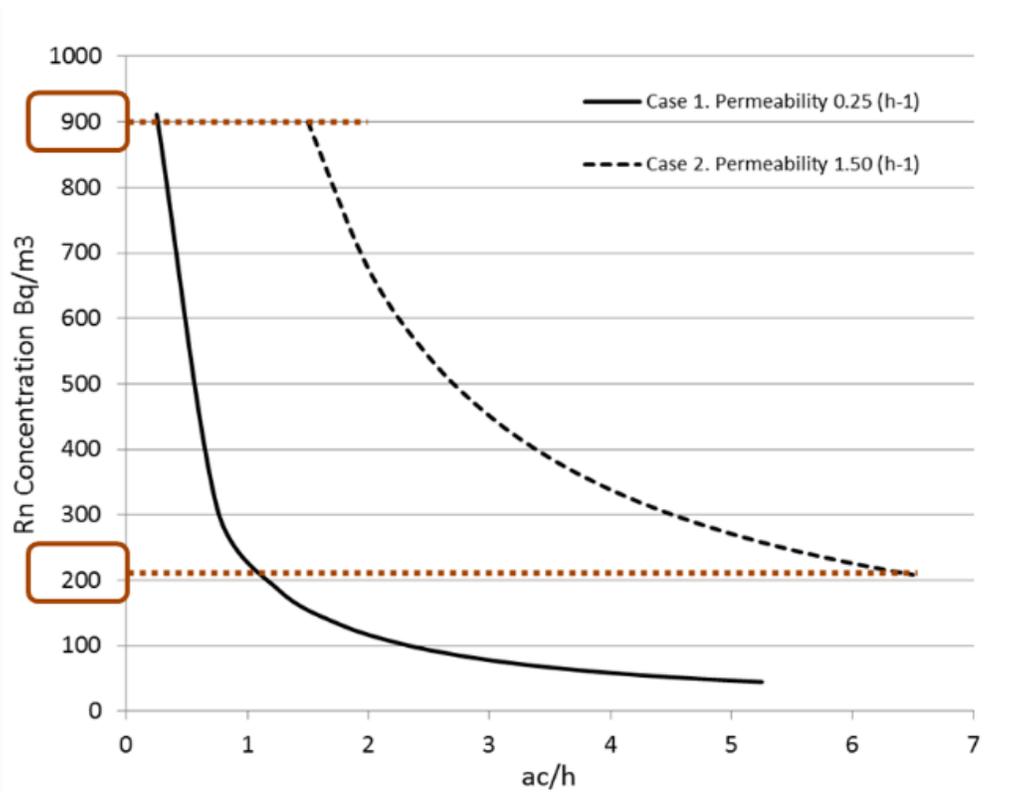


Fig. 6. Cálculo de tasas de ventilación necesarias en función del grado de hermeticidad de la vivienda.

analizan las propiedades mecánicas que deban garantizar su durabilidad y resistencia frente a elongaciones, roturas, punzonamientos, ataques químicos, etc. En la actualidad, estos requisitos se están contemplando en los nuevos Documentos de Idoneidad Técnica (DIT) que fabricantes comienzan a solicitar de cara a la puesta en mercado de sus materiales con función de barreras. Estos han quedado reflejados en una comunicación en un congreso que puede encontrarse en (Frutos & Olaya, 2010).

### C. Técnicas de ventilación

La ventilación de un espacio ha sido una práctica muy usada para eliminar contaminantes interiores, suponiendo que el aire exterior está libre de ellos o al menos en concentraciones muy bajas. Eso suele ocurrir con gases como el CO<sub>2</sub>, exhalado por el ser humano, o los compuestos orgánicos volátiles, emitidos por algunos materiales plásticos, disolventes, combustibles, etc. Las tasas de ventilación, intercambio de aire con el exterior, ya están contempladas para este tipo de contaminantes, como por ejemplo en los cálculos que establece el Documento Básico HS3 del Código Técnico de la Edificación. Sin embargo, de los cálculos teóricos realizados (Frutos et al., 2015), se obtiene que no son suficientes para lograr reducir las concentraciones de radón cuando estas superan valores del orden de 400 Bq/m<sup>3</sup>.

Para la aplicación de estas técnicas, es necesario conocer la tasa de infiltración inicial del edificio (hermeticidad) para poder proponer el flujo extra necesario que reduzca a valores aceptables. Para ello son recomendables los ensayos de puerta soplante (Blower Door), conforme a la norma UNE-EN 13829:2002 “Aislamiento térmico. Determinación de la estanquidad al aire en edificios. Método de presurización por medio de ventilador”.

Una vez obtenidos, es posible llegar a calcular las tasas necesarias mediante la expresión (2):

$$C=R/V.\lambda t \quad (2)$$

siendo, R (Bq/s), la tasa de entrada de radón por el suelo, V (m<sup>3</sup>), el volumen de acumulación y  $\lambda t$  (h<sup>-1</sup>) el sumatorio ( $\lambda_d$  cte desintegración +  $\lambda_h$  tasa de hermeticidad +  $\lambda_r$  tasa de renovaciones /h)

El siguiente ejemplo, figura 6, muestra el cálculo realizado para dos situaciones distintas de hermeticidad de partida, ambos con los mismos niveles iniciales de radón, y las tasas asociadas para su reducción hasta los 200 Bq/m<sup>2</sup>, considerado como valor objetivo en este caso.

## IV. CONCLUSIONES

Las soluciones de protección se basan en estrategias claramente diferenciadas, con un rango de efectividades desde el 50% (ventilaciones) hasta el 99% (despresurizaciones), con

las barreras en un rango intermedio (60-70%). Sin embargo, existe mucha documentación sobre fracasos en la aplicación de dichas técnicas. Sobre todo, en el ámbito de las estrategias de despresurización, en las que no se ha tenido en cuenta los aspectos de estudio que se han mostrado en esta comunicación, como los campos de presiones necesarios, las barreras de cimentación, las permeabilidades de los sustratos bajos solera, etc. Los resultados de los proyectos de investigación que se están llevando a cabo están arrojando datos valiosos para poder proponer pautas de diseño que mejoren la efectividad de las técnicas y puedan ser instrumentos de aplicación para proyectistas en el ámbito de la protección.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha podido desarrollar gracias a los proyectos de investigación RADÓN CERO (Nº Ref. BIA2014-58887-R) y PERFORA (RTC2015-34-64-5), ambos financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad, del Gobierno de España.

### REFERENCIAS

- Comisión (1990). Comisión de las Comunidades Europeas. Recomendación de la Comisión de 21-2-1990 relativa a la protección de la población contra peligros de una exposición al radón en el interior de edificios. (90/143/Euratom). D.O.C.E. L80, 2628.
- Consejo (2017). Consejo de Seguridad Nuclear. Mapa de potencial de radón en España. <https://www.csn.es/mapa-del-potencial-de-radon-en-espana>.
- Frutos, B., Olaya, M. (2010). Las prestaciones en construcción de las barreras anti radón. La evaluación técnica de membranas. En Proceedings de II Congreso Nacional de Investigación en la Edificación. Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.
- Frutos, B., Olaya, M., Martín-Consuegra, F., Alonso, C. (2015). Radon concentration control by ventilation and energy efficiency improvement. En Proceedings de AIVC Conference. Madrid.
- Instituto (2004). Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja-CSIC (2004). Estudio de la viabilidad y la efectividad de las acciones de remedio frente a la presencia de gas Radón en los edificios existentes. Plan Nacional de Investigación (Nº Ref. BIA2004-01460).
- Muñoz, E., Frutos, B., Olaya, M., Sánchez, J. (2017). A finite element model development for simulation of the impact of slab thickness, joints, and membranes on indoor radon concentration. Journal of Environmental Radioactivity. Volume 177, October 2017, Pages 280–289.

- Proyecto (2014). Proyecto de Investigación 2014 (Nº Ref. BIA2014-58887-R). 2014. RADON CERO- Optimización de soluciones constructivas frente a la inmisión de gas radón en edificios y desarrollo de metodologías de diseño de soluciones.
- Proyecto (2015). Proyecto de Investigación 2015 (RTC2015-34-64-5). PERFO-RA. Desarrollo y diseño de técnicas de microperforación como solución para la protección de la salud de usuarios frente a la inmisión de radón en espacios habitados.
- Scivyer C R; Jaggs M P R (1998). Dwellings with cellars and basements: a BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings. ISBN: 1860812198.
- Unión Europea (2013). 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, y se derogan las Directivas 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom y 2003/122/Euratom.
- WHO (2009). Handbook on Indoor Radon. A public health perspective. World Health Organization. [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44149/1/9789241547673\\_eng.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44149/1/9789241547673_eng.pdf)



**Reconocimiento – NoComercial (by-nc):** Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.