

Sistemas de extracción como técnicas constructivas para evitar la entrada de gas radón en las viviendas

Extraction systems as construction techniques to prevent the entry of radon gas in homes

B. Frutos^(*), M. Olaya^(*), J. L. Esteban^(*)

RESUMEN

El riesgo que supone para la salud el habitar en espacios con altos contenidos de gas radón conlleva a realizar actuaciones en los edificios con soluciones constructivas enfocadas a frenar la entrada del gas para reducir así la concentración interior hasta unos niveles aceptables. Dentro de este tipo de soluciones, los sistemas de extracción constituidos por elementos captadores enterrados en el terreno y conectados al exterior mediante tuberías de expulsión, han demostrado poseer una alta efectividad en la reducción del flujo de radón, que proveniente del terreno, penetra en un edificio. En este artículo se presentan los resultados de efectividad de 4 soluciones de extracción ejecutadas en un módulo representativo de una vivienda, construido en un terreno con altas concentraciones de radón. Las efectividades se analizan en función de las localizaciones de los elementos captadores, con situación centrada o perimetral conforme a la planta del módulo, y con distintos tipos de expulsión del gas, por convección natural o por convección forzada. Como conclusión principal cabe destacar la alta efectividad que manifiestan las medidas de extracción con rangos de reducción que oscilan entre un 91% y un 99%, a excepción de la medida que hace uso del elemento captador enterrado por el perímetro exterior del módulo, y que funciona por convección natural, que únicamente consiguió efectividades en el rango de 53% a 58%.

SUMMARY

The health risk associated to high radon levels in living spaces leads to perform remedial actions in buildings with radon reduction techniques to reduce radon concentration down to acceptable levels. Within this type of solution, extraction systems, consisting in sumps buried in the ground and connected to the outside through pipes, have demonstrated a high effectiveness in reducing the flow of radon that penetrates into a building from the field. This article presents the results of effectiveness of 4 extraction solutions implemented in a module representative of a home, built in an area with high radon concentrations. Effectiveness is studied depending on the locations of the sumps, with centered or perimeter situation under the floor of the module, and with different types of expulsion of gas, natural convection or forced convection. The main conclusion include the high efficiency displayed by extraction system, with reduction ranges between 91% and 99%, with the exception of the system that use the sump buried by the outer perimeter of the module, and working by natural convection, which actually awarded only in the range of 53% to 58%.

319-6

Palabras clave: Radón, actuaciones correctoras, soluciones de extracción, mitigación, efectividad.

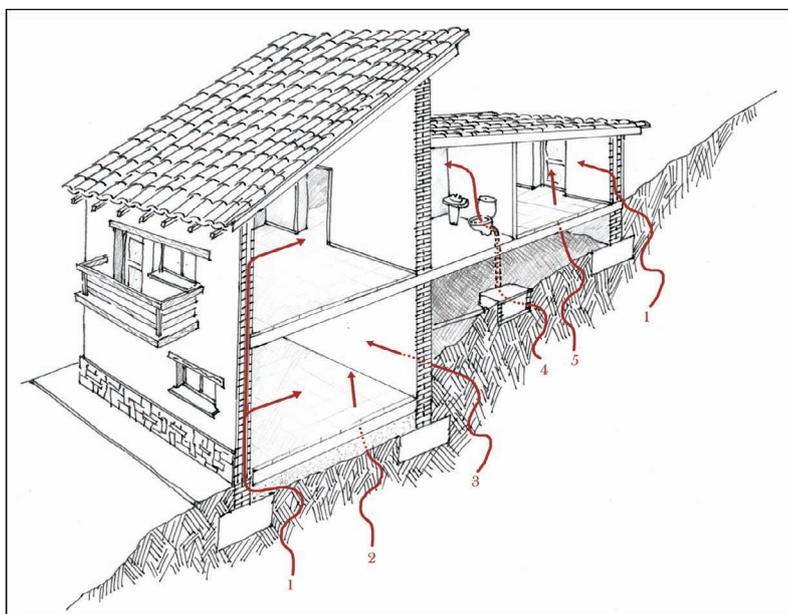
Keywords: Radon, prevention of entry, mitigation actions, extraction solutions, Efficiency

(*) Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, Madrid (España)
Persona de contacto/Corresponding autor: borjafv@ietcc.csic.es (B. Frutos)

1. Posibles vías de entrada de radón en los edificios. 1- A través de las cámaras de aire de los muros; 2- A través de la solera; 3- A través de los muros de sótano; 4- A través de conductos de saneamiento; 5- A través de los forjados sanitarios.

1. INTRODUCCIÓN

El uranio (U-238), elemento presente en la composición de suelos, aparece como origen de una cadena de desintegración de elementos radiactivos dentro de la cual se halla el gas radón (Rn-222). Este gas inerte de origen natural, con un periodo de vida de 3,8 días, es capaz de viajar entre los poros del suelo hasta alcanzar la superficie y diluirse entre los gases de la atmósfera o penetrar en el interior de los edificios si éstos no se encuentran debidamente protegidos. Los caminos habituales por los que el radón puede penetrar en un edificio lo constituyen los puntos débiles en la estanquidad de los materiales de cerramiento, tales como los que muestra la Figura 1. 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 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 carcinógeno de grado (1). Según este Organismo, el radón es la segunda causa de contracción de cáncer pulmonar detrás del tabaco (2). El porcentaje de riesgo de padecer cáncer pulmonar en personas que durante su vida están expuestas a concentraciones de radón de 0, 100, y 400 Bq/m³ supone un



1

0,4%, 0,5% y un 0,7%, respectivamente, para no fumadores, y 25 veces superior (10%, 12% y 16%) para personas que además son fumadoras (3).

En las últimas décadas se han ido recogiendo, en la normativa de salubridad de distintos países, las sucesivas recomendaciones emanadas de investigaciones sobre los efectos en

la salud que supone respirar en espacios con presencia de gas radón.

El denominador común de estas normativas es la asignación de niveles límite de concentración de radón en tales espacios así como la intervención con soluciones constructivas que reduzcan dichas concentraciones por debajo de los niveles recomendados. Concretamente la Unión Europea establece la siguiente recomendación de niveles (4):

NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE REFERENCIA:

200 Bq/m³ Valor de diseño para viviendas de nueva construcción

400 Bq/m³ Valor de actuación para viviendas construidas.

En España, las condiciones de salubridad en la edificación, están recogidas en el Documento Básico HS3 del Código Técnico de la Edificación (CTE) (5) derivado de la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE) (6) Aunque en dicho documento se establecen unas pautas para procurar una calidad de aire interior libre de contaminantes atmosféricos, no se contempla expresamente la protección de los edificios frente al riesgo de habitar con excesiva concentración de gas radón. Durante la fase de redacción del CTE, el Consejo de Seguridad Nuclear de España (CSN), presentó una propuesta de inclusión de un capítulo que incluyese medidas de protección frente a la entrada de radón en edificios de nueva construcción. La propuesta se basaba en los niveles de concentración de radón propuestos por la Comisión Europea.

En esta primera versión del CTE, aprobada el 28 de marzo 2006, el Ministerio no creyó oportuno incluir aspectos relativos a la protección frente al gas radón. Uno de los argumentos para no hacerlo fue el de evitar una percepción de riesgo en la sociedad en aquellas viviendas que ya estaban construidas y para las que no se tenían datos suficientes sobre medidas correctoras probadas. Por este motivo se creyó oportuna la presentación de un proyecto de investigación que se realizó bajo el amparo y subvención del Consejo de Seguridad Nuclear.

El proyecto tuvo como título "Estudio de la viabilidad y la efectividad de las acciones de remedio frente a la presencia de gas radón en los edificios existentes". La primera parte del mismo se dedicó al estudio de las técnicas de protección que se estaban usando en otros países (7) para, en una fase posterior, poder rediseñar las medidas correctoras y aplicarlas al sistema constructivo habitual de España, con la tipología y materiales propios del país.

"La investigación presentada en este artículo fue objeto del premio ALCONPAT (Edición 2009, Valparaíso, Chile) al mayor aporte en patología y rehabilitación de las construcciones".

A modo de introducción, se puede hacer una clasificación general de dichas técnicas en función de la estrategia de actuación, resultando dos grupos claramente diferenciados: Las técnicas enfocadas a incrementar la estanquidad del edificio frente al paso del radón mediante la interposición de barreras impermeables a los gases en todo elemento constructivo que esté en contacto con el terreno, y las técnicas que, mediante sistemas de extracción, expulsan el gas del terreno bajo la vivienda hacia al exterior, atenuando su entrada hacia el interior.

El objeto de este artículo es presentar los resultados comparativos de efectividades de reducción de concentración de radón que obtuvieron 4 medidas correctoras basadas en estrategias de extracción, aplicadas en un módulo experimental que se construyó reproduciendo las características tipológicas de una vivienda rural en España.

Para ello, previamente se estudió la entrada de radón en el módulo cuando éste se encontraba sin ninguna medida correctora ejecutada, correlacionando los datos de concentración con las variables atmosféricas, para entender la influencia de los cambios climáticos en el flujo de radón hacia el interior. De esta primera fase se observó una clara relación inversa entre las presiones atmosféricas y las concentraciones de radón interior.

En la segunda fase de la investigación se procedió a ejecutar cada una de las medidas correctoras, y a estudiar, en cada caso, la eficiencia de reducción en la concentración interior del gas. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto una efectividad un 40% mayor para los sistemas de despresurización forzada frente a los de convección natural en la situación de la arqueta exterior, mientras que para la arqueta central bajo la solera, la diferencia entre el sistema forzado y el natural es únicamente de un 3%.

La posibilidad de probar las distintas técnicas correctoras en un mismo edificio y en las mismas condiciones de terreno, ha permitido obtener unos resultados comparativos para unas mismas condiciones de contorno.

El equipo investigador lo formó personal del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC) y de la Cátedra de Física Médica de la Facultad de Medicina de la Universidad de Cantabria.

2. MÉTODOS

Para la realización del proyecto, y con el objeto de analizar todas las técnicas en un

mismo edificio y en las mismas condiciones de terreno, se planteó la necesidad de construir un módulo experimental donde poder ejecutar las soluciones constructivas y analizar el comportamiento del radón.

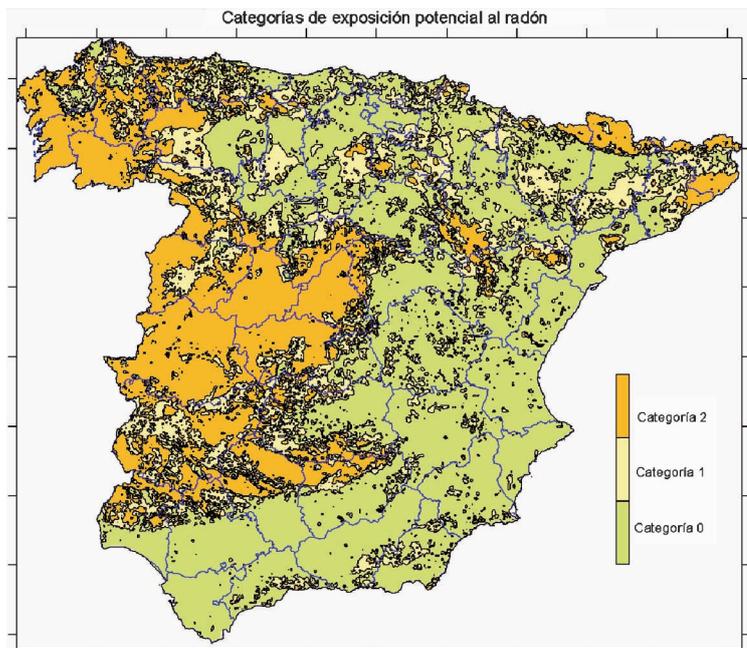
Los pasos que se siguieron para la elección del lugar de actuación, la caracterización del terreno, y el diseño y ejecución del módulo, se muestran en los apartados siguientes.

2.1. Ubicación del módulo experimental

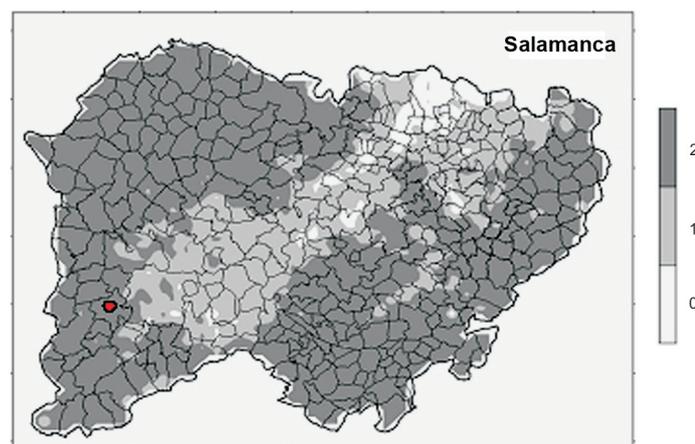
Para la elección del lugar donde construir el módulo experimental se pretendió escoger un terreno con alta presencia de radón para así poder llegar a testar las actuaciones de remedio de mayor efectividad. La empresa ENUSA Industrias Avanzadas S.A., que ha dedicado su actividad a la extracción de uranio en las inmediaciones de Ciudad Rodrigo en la mina de Saélices el Chico, Salamanca, España, ha colaborado en el proyecto cediendo el terreno donde se ha construido el módulo. La alta presencia de radón en la zona y la disponibilidad

2. Mapa de categorías de exposición potencial al radón en España. CSN (Categoría 0- Baja; Categoría 1- Media; Categoría 2- Alta).

3. Mapa de categorías de exposición potencial al radón en Salamanca (CSN). Presenta unos índices altos (grado 2) en la mayoría del territorio. El punto rojo indica la situación exacta de la ubicación del módulo en las instalaciones de ENUSA, Ciudad Rodrigo, Salamanca, España.



2



3

de la empresa ENUSA fueron factores determinantes para la elección de la ubicación final. Como se puede observar en los mapas elaborados por el Consejo de Seguridad Nuclear, la zona de actuación se encuentra dentro de la categoría máxima de exposición potencial al radón al radón (Figuras 2 y 3).

2.2. Caracterización del terreno donde se construyó el módulo

Se llevó a cabo una caracterización del terreno que consistió básicamente en:

- a) Determinación de la concentración de elementos radiactivos en suelo.
- b) Evaluación de la concentración de radón en profundidad.
- c) Estudio granulométrico del suelo y permeabilidad.

A continuación, se presentan los principales

Tabla 1

Caracterización radiológica de una muestra de terreno obtenida en la excavación realizada para construir el módulo experimental

PROCEDENCIA	Instalaciones de Enusa – Saélices El Chico (Salamanca)		
REFERENCIA	CSIC-ENUSA 03		
REFERENCIA UC	068/05		
FECHA RECOGIDA	10/02/05		
FECHA ANÁLISIS	10/03/05		
PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS : CFM-FM-1003.01			
	ACTIVIDAD (Bq/Kg)	ERROR DE LA ACTIVIDAD (Bq/Kg)	L.I.D. (Bq/Kg)
²³⁸ U (²³⁴ Th)	1.279	94	160
²²⁶ Ra (²¹⁴ Bi)	1.012	62	16
²³² Th (²²⁸ Ac)	47	11	32
⁴⁰ K	826	67	107
¹³⁷ Cs	—	—	11

resultados alcanzados en cada uno de los apartados indicados según el protocolo del laboratorio de la Cátedra de Física Médica de la Facultad de Medicina de la Universidad de Cantabria.

- a) Determinación de la concentración de elementos radiactivos en suelo.

Se caracterizaron 9 muestras de terreno en el lugar de construcción del módulo experimental. En la Tabla 1 se muestran los resultados de una muestra obtenida en la excavación realizada bajo el módulo.

Destaca la elevada concentración de radio en el terreno de construcción, 1.012 Bq/Kg, dato que

supera 25 veces la concentración promedio de un suelo terrestre (en torno a los 40 Bq/Kg) (8)

- b) Evaluación de la concentración de radón en profundidad.

Mediante el empleo de una sonda, células de centelleo, y equipo contador, se evaluó la concentración de radón a 1 metro de profundidad en la zona donde, posteriormente, fue construido el módulo. Los resultados de las 20 medidas realizadas, en una superficie de unos 150 m², muestran una concentración media de radón, a un metro de profundidad, de 250.000 Bq/m³, valor muy superior al habitual de los suelos terrestres (Rango de 10.000 a 50.000 Bq/m³) (7).

- c) Estudio granulométrico del suelo y permeabilidad.

Al objeto de disponer de una información global del terreno, se llevó a cabo un análisis granulométrico, en dos de las muestras recogidas, que dieron un resultado de permeabilidad media de 10⁻¹² m². Este valor representa una permeabilidad de orden medio en el rango comprendido entre 10⁻⁷ para gravas y 10⁻¹⁵ para las arcillas (9).

Usando el método que establece la República Checa para clasificar el territorio en función de la concentración de radón en terreno y de la permeabilidad del mismo (10) la zona de actuación aparece clasificada como de alto riesgo en la exhalación de radón, corroborando así la clasificación establecida en los mapas de exposición potencial al radón que elaboró el CSN (Figuras 2 y 3).

2.3. Diseño y construcción del módulo. Materiales empleados

El diseño del módulo experimental partió de la idea de reproducir las características tipológicas de una vivienda en España usando los materiales comunes para este tipo de construcciones.

El módulo se diseñó y ejecutó con dos alturas, una de ellas sobre la rasante del terreno y la otra semienterrada. De esta manera se pudo estudiar la presencia de radón en sótanos y en plantas elevadas. También se pudo usar el semisótano para reproducir el caso de una cámara ventilada bajo un forjado sanitario. La planta, de forma cuadrada con 5 metros de lado, ocupa una superficie de 25 m². Las dos plantas están unidas mediante una escalera interior con puerta que independiza ambos espacios. La cubierta se diseñó plana y transitable para poder acceder a ella y manipular los sistemas de extracción que se instalaron. En las Figuras 4 y 5 se muestran los planos con el diseño arquitectónico.

Para la construcción se usaron materiales y sistemas constructivos propios de este tipo de edificaciones de baja altura. Por otro lado, y con el fin de partir de las condiciones más desfavorables en cuanto a la entrada de radón desde el terreno, no se impermeabilizaron los elementos de cerramiento.

– Sótano: Muros de sótano de 1 pie de ladrillo perforado con enfoscado de mortero de cemento exterior. Sin drenaje ni lámina impermeabilizante. De esta manera, el módulo se encuentra con menor protección frente al paso de radón desde el terreno.

– Solera: Losa de hormigón de 10 cm. de espesor sobre encachado de grava. No se instaló lámina impermeabilizante para no obstaculizar el paso de radón hacia el interior.

– Cerramiento de planta: Muro de 1/2 pie de ladrillo exterior, cámara de aire y trasdosado interior con tabique de hueco sencillo.

– Cubierta: La cubierta es plana con acceso desde el exterior para la instalación de sistemas de extracción. Se ejecutó con forjado unidireccional de bovedilla cerámica y capa de compresión de 5 cm, más un solado como revestimiento exterior previa lámina impermeabilizante. Sin aislamiento térmico.

El módulo cuenta con una puerta de acceso y dos ventanas en fachadas opuestas. Además está dotado de red eléctrica a través de un generador de gasoil que garantiza un suministro constante para abastecer a los equipos de medida y a los extractores de las soluciones correctoras. En la Figura 6 se puede ver el módulo terminado.



6

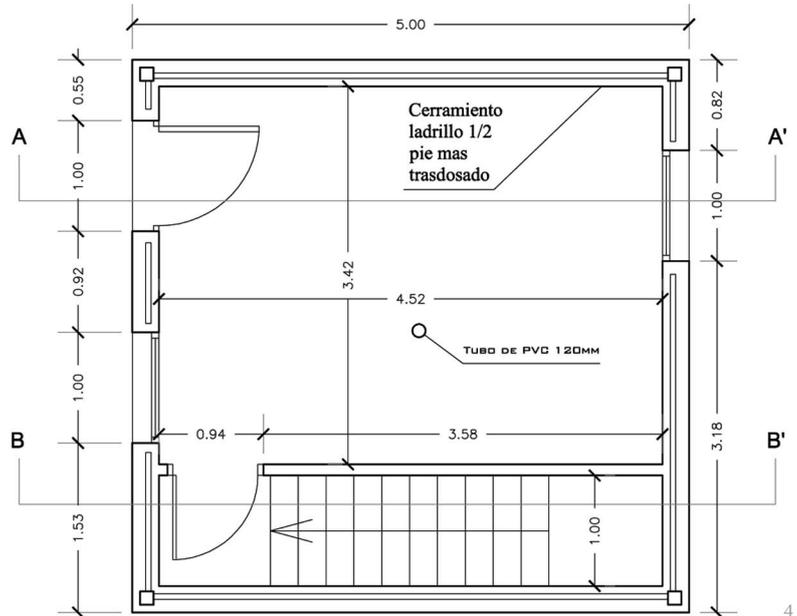


2.4. Programa de trabajo

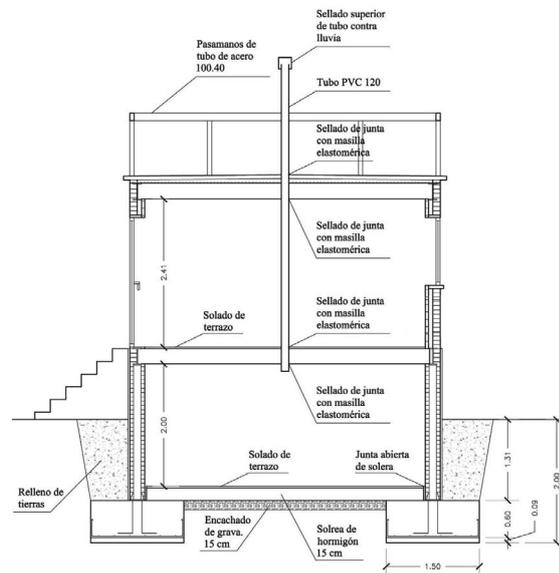
El proyecto de investigación tuvo como objetivo previo estudiar la entrada de radón en el módulo experimental construido sin protección alguna frente al paso del gas. Se estudió la concentración de radón en los dos espacios interiores (planta de sótano y planta baja) correlacionando los registros con los

4. Diseño de planta baja del módulo experimental. Sin escala.

5. Sección del módulo experimental por el eje central. Sin escala.



4



5



6. Fotografía del módulo terminado.

7. Laboratorio instalado en el interior del módulo para la medida en continuo de los diferentes parámetros de registro.

datos de variables atmosféricas como el viento, la presión atmosférica, las precipitaciones y las temperaturas.

En la segunda fase del proyecto se ejecutaron, de forma independiente y en fases distintas, las medidas correctoras basadas en sistemas de extracción. Se estudió la viabilidad de ejecución de dichas soluciones constructivas en el edificio ya terminado, y la efectividad de reducción de radón que ofrecían, monitorizando, durante un mes para cada una de ellas, la concentración de radón resultante tras la ejecución de las mismas.

2.5. Equipo para el registro de los diferentes parámetros

En el interior del módulo se instalaron los equipos necesarios para registrar los distintos parámetros (Figura 7).

- Para medir la permeabilidad del terreno "in situ" se utilizó el equipo Checo RADON-JOK que usa el flujo de aire que se extrae a un 1 metro de profundidad.
- Para el registro de las concentraciones de radón se usaron equipos DOSEMAN (Sarad) y SCOUT (Sarad) que proporcionan valores en continuo con promedios de hora en hora.

También se usaron 8 sondas de temperaturas en el interior y exterior y otras 4 para el registro de diferencias de presión entre el interior y el exterior del módulo y entre la planta superior e inferior. Por otro lado, se contó con la información meteorológica que proporcionaba la estación de ENUSA en Saélices (lluvia, viento, temperatura, humedad), a una distancia de 1 Km. del módulo.

través de comparaciones de concentraciones de radón antes y después de introducir dichas medidas.

3.1. Concentraciones de actividad de radón en el módulo sin medidas correctoras

El módulo construido se mantuvo sin medidas correctoras durante el periodo inicial (3 meses) con el fin de estudiar el comportamiento del radón en el prototipo de edificio. Se trata de una edificación construida sin ningún tipo de medida de protección frente al radón y que, por tanto, es permeable a la penetración del mismo a través de su envolvente.

Los resultados promedios para las dos plantas durante esta primera fase, que comprende 3 meses de registro, se muestran en la Tabla 2.

Como se puede observar, los valores registrados son muy elevados. El marco comparativo se puede establecer con la recomendación de la Comisión Europea (90/143/Euratom) en la que se indica un nivel máximo de 400 Bq/m³, por encima del cual se debe reducir la concentración mediante la incorporación de medidas correctoras. En nuestro caso obtuvimos concentraciones del orden de 20 veces más en planta 1 y 100 veces más en planta de sótano, valores muy elevados de concentración que responden claramente a la alta presencia de radio en la zona de construcción del módulo.

Estos datos de promedios iniciales se usaron como base comparativa para poder evaluar las reducciones de radón que ofrecían las soluciones correctoras que se probaron en fases posteriores.

Tabla 2

Concentraciones de actividad de radón. Situación de módulo sin protección

	Planta SÓTANO	Planta 1 ^a	Relación P. sótano / P.1
Concentración (3 meses)	39.385 Bq/m ³	6.855 Bq/m ³	5,75

3. RESULTADOS

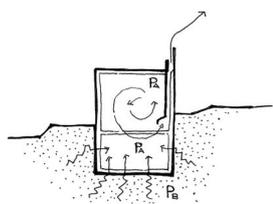
En primer lugar se presentan los registros de concentración de radón obtenidos en el interior del módulo cuando aún no se habían ejecutado las medidas correctoras. En un apartado posterior se correlacionan con los datos atmosféricos para estudiar la influencia del clima sobre la penetración y acumulación de radón en el interior.

Posteriormente se muestran los resultados de efectividad de las soluciones correctoras introducidas basadas en estrategias de extracción. Las efectividades se han determinado a

3.2. Concentraciones de radón correlacionadas con datos atmosféricos. Módulo sin medidas correctoras

Hay que entender que el proceso por el que el radón, procedente del terreno, entra en un edificio, parte de la desintegración del radio que da lugar al radón. La tasa de exhalación cuantifica la cantidad de radón que es capaz de alcanzar la superficie del terreno, donde se encuentra el edificio, y tiene que ver con la cantidad de radio en origen y la permeabilidad del suelo.

Por otro lado, la diferencia entre las presiones que existen en el terreno y las que existen en el



8

8. Vectores del esquema del flujo de radón al interior inducido por diferencias de presiones.

interior de un edificio, determinan, entre otros factores, el mayor o menor flujo de radón hacia el interior debido a movimientos convectivos. Las ventilaciones, extracciones de aire viciado o los gradientes de temperaturas, pueden provocar una ligera depresión en el interior de un edificio que facilite aún más el flujo de radón por convección desde el terreno hasta el interior (Figura 8).

En la bibliografía se pueden consultar modelos predictivos, como por ejemplo RAGENA (Font, Ll. and Baixeiras, C. 2002) (11) que haciendo uso de los distintos parámetros que influyen en el movimiento del radón, modelizan el flujo del gas hacia el interior de un edificio. Dichos flujos no son estacionarios y se ven afectados por los cambios atmosféricos, tales como vientos, presiones atmosféricas, temperaturas o precipitaciones, en la medida que éstos son capaces de modificar el gradiente de presiones existente entre el terreno y el interior del edificio, o la permeabilidad del terreno por la saturación de los poros en periodos de lluvia. Estos fenómenos, estudiados por diversos autores (Hintenlang & Al-Ahmady, 1992) (12) son los que se analizaron experimentalmente en la primera fase del proyecto para identificar que grado de afectación podrían tener dichos cambios sobre la concentración interior de radón. A continuación se muestran los resultados de mayor relevancia:

a) Concentraciones de radón correlacionadas con datos de precipitaciones.

En la Figura 9, donde se muestra la concentración de radón en planta de sótano y planta baja conjuntamente con los datos de precipitaciones, se observa una correlación positiva entre la lluvia y el aumento de la concentración interior de radón. Este efecto de la precipitación puede estar relacionado con una reducción de la permeabilidad del suelo en el entorno del módulo (Quindós 1995) (8), que induce una salida preferente del radón por el suelo seco bajo el mismo.

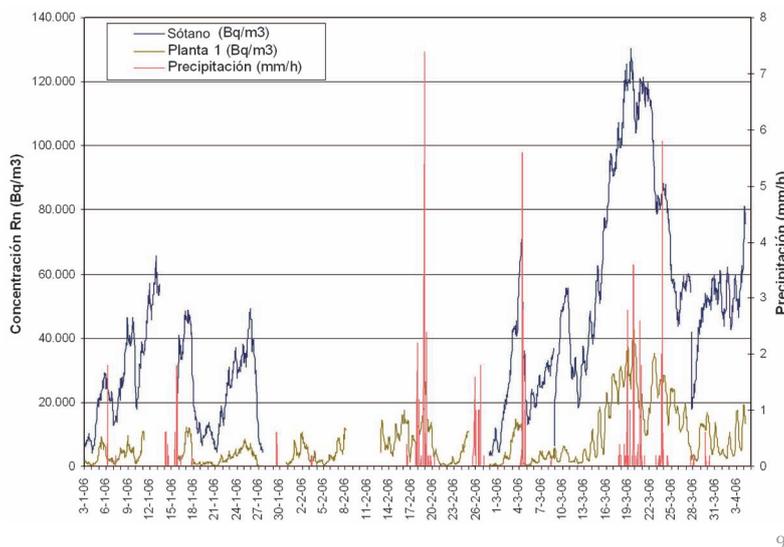
b) Concentraciones de radón correlacionadas con datos de velocidad de viento y presión producida por éste.

La acción del viento sobre la concentración de radón interior tiene dos vertientes opuestas. Por un lado, en función de las características arquitectónicas de la vivienda, el viento puede favorecer el intercambio de aire entre el interior y el exterior de la misma (Yu et al 1996) (13). Este aporte de aire con baja concentración de radón, daría lugar a una reducción de la misma en el interior.

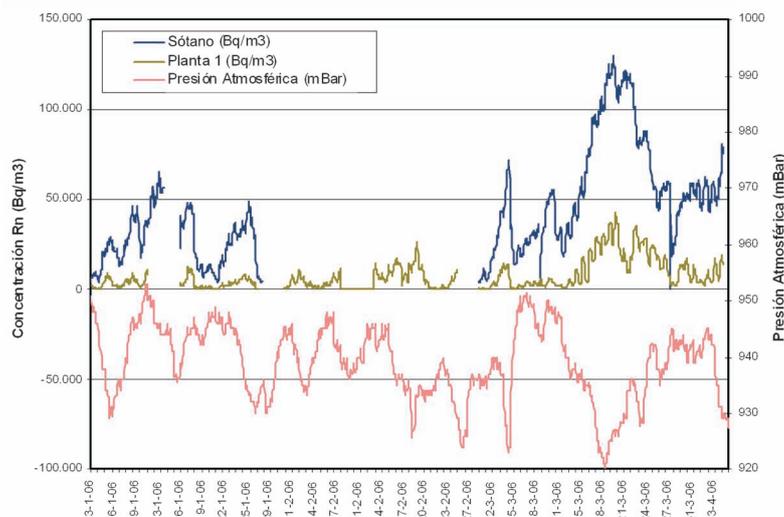
Por otra parte, la fuerza del viento sobre las fachadas induce diferencias locales de presiones entre el interior y el exterior, que podrían

generar depresiones interiores y favorecer así la entrada de radón desde el terreno (Ward et al 1993) (14). Aprovechando las formulas que ofrece el Código Técnico de la Edificación en el Documento Básico de Seguridad Estructural - Acciones en la Edificación, se pudo estimar que la mayor diferencia de presión inducida por la acción del viento no supera-

9. Concentraciones de radón en los espacios de sótano y planta baja, correlacionados con las precipitaciones registradas en la zona.



9



10

ba los 30 Pa, valor que es significativamente menor a las diferencias observadas debidas a cambios en la presión atmosférica, como se muestra más adelante en apartado d), y que por ello no ha sido posible encontrar una correlación manifiesta en este caso.

c) Concentraciones de radón correlacionadas con datos de temperaturas exteriores.

Las diferencias de temperatura entre el exterior y el interior del edificio generan un gradiente de presiones entre el interior y exterior que puede explicarse a través del denominado efecto "Stack" (efecto chimenea)[1].

10. Concentraciones de radón de los espacios de sótano y planta baja, correlacionados con la presión atmosférica.

$$\Delta P = C.a.h.(1/T_0 - 1/T_i) \quad [1]$$

- 11. Medidas de barreras.
- 12. Medidas de extracción.

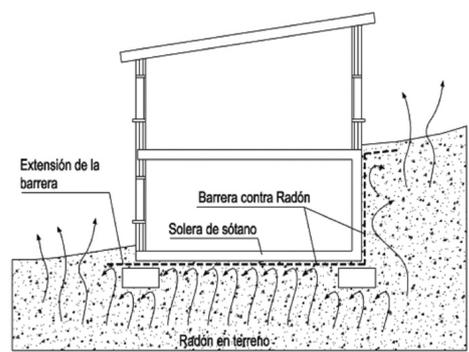
Donde C es un coeficiente, a , es la presión atmosférica, h , la altura de la edificación y T_0 y T_i son, respectivamente, la temperatura exterior e interior.

El aire caliente que se genera en una vivienda en invierno, se expande y tiende a fugarse por chimeneas, fisuras, grietas, ventanas, etc. Ese proceso crea una depresión interior que favorece la entrada de radón desde el suelo por succión (Nazaroff 1998) (15).

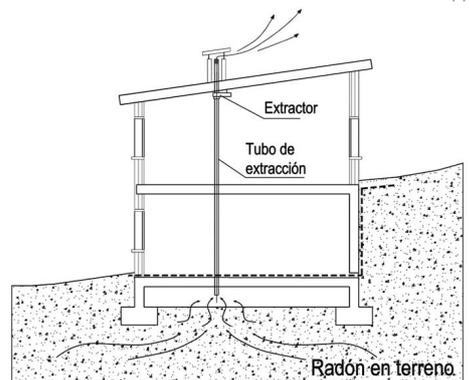
Durante el periodo analizado, usando los datos disponibles de la estación meteorológica, se estimó que el efecto "Stack" podía generar una diferencia de presión máxima inducida del orden de 3 Pa. Esta diferencia de presiones, notablemente inferior a la obtenida a partir de los cambios en la presión atmosférica (del orden de 3.000 Pa, apartado d) no parece responsable de las variaciones observadas en la concentración de radón interior.

d) Concentraciones de radón correlacionadas con datos de presión atmosférica.

En la Figura 10 se observa una correlación negativa entre la presión atmosférica y las concentraciones de radón en el interior del módulo. Los descensos de presión provocan un incremento significativo de la concentración de radón. En el periodo analizado, ante una bajada de presión atmosférica de 3.000 Pa, se produjo un incremento de radón en el interior del sótano de un 225%, lo que supuso un extra de concentración de 90.000 Bq/m³ sobre el promedio del periodo.



11



12

La explicación de este fenómeno se encuentra en que los cambios de presión atmosférica no afectan de la misma manera al aire ocluido en los poros del terreno que al aire del interior del módulo. Se puede suponer que las presiones en el terreno llegan a igualar también a la presión atmosférica, pero esto ocurre con un desfase de tiempo que depende de la capacidad que tiene un terreno en cambiar su presión en respuesta a los cambios de presión atmosférica, y está relacionada con la porosidad del terreno y la longitud de masa de suelo hasta la capa impermeable. En terrenos muy porosos, tras una perturbación de la presión atmosférica, el tiempo que transcurre hasta que la presión en el terreno llega a igualarse a la presión exterior es menor que en terrenos compactos (Hintenlang & Al-Ahmady, 1992) (11). Por otro lado, en épocas de precipitaciones, el terreno satura sus poros y la permeabilidad se reduce. En dichos periodos el terreno se comporta como si tuviera una porosidad menor y por tanto un mayor desfase en tiempo para igualar las presiones con la presión atmosférica. (Renault et al 1998) (16)

Este desfase en el tiempo origina, de forma puntual, un incremento en la diferencia de presiones entre el terreno y el interior del módulo que induce un mayor flujo de radón al interior cuando el gradiente de presiones es negativo (A. L. Robinson et al 1997) (17). Es decir, en caso de una bajada repentina de la presión atmosférica, la presión en el interior del módulo seguiría la misma caída mientras que el terreno tardaría un tiempo en ajustarse a las nuevas presiones, lo que provocaría un incremento del gradiente de presiones "momentáneo" entre el terreno y el interior del módulo que induciría un mayor flujo de radón hacia el interior.

En este estudio, la máxima variación de presión observada alcanza 3.000 Pa, valor superior en dos órdenes de magnitud a la inducida por el viento (30 Pa) y en tres a la inducida por las diferencias de temperaturas (3 Pa), lo cual indica que se trata del parámetro dominante, en la variación del flujo de radón, de entre los analizados anteriormente.

Complementariamente se observó una relación entre los cambios de presión atmosférica, las precipitaciones y la velocidad del viento, por lo que resulta imposible precisar el grado de influencia de cada uno de estos factores en la concentración interior.

3.3. Actuaciones para reducir la concentración de radón. Medidas correctoras

Con el fin de reducir las altas concentraciones de radón detectadas, se probaron distintas medidas correctoras, ejecutadas en el módulo en fases consecutivas, y se evaluó la efectividad que mostraban en la capacidad para reducir dicha concentración.

A modo de introducción sobre este tipo de medidas comentar que, del estudio de la bibliografía referente a técnicas de actuación, se desprende una clasificación genérica de las mismas en dos grandes grupos que se distinguen en la estrategia de actuación:

Aquellas técnicas basadas en interponer barreras frente al paso de radón en todo elemento del edificio que esté en contacto con el terreno (soleras, muros de sótano, etc.) (Figura 11) y aquellas que extraen el gas del terreno antes de que pueda penetrar en los edificios, mediante la instalación de sistemas de expulsión de aire conectados a elementos captadores (SUMP) enterrados en el terreno (Figura 12).

Dentro de éstas últimas existen variaciones como la presurización en lugar de la extracción, o las ventilaciones de forjados sanitarios.

En este trabajo se muestran los resultados de 4 medidas de extracción que se basan en la despresurización de elementos captadores enterrados en el terreno. La diferencia entre las cuatro medidas estriba en la ubicación del elemento captador (arqueta con paredes permeables), con dos posiciones, una enterrado bajo la solera y otra enterrado por el exterior y adosado al muro de sótano, y con dos tipos de extracción, bien por convección natural o bien por convección forzada. Se enumeran las 4 medidas:

- a) Medida de extracción por arqueta central. Extracción natural
- b) Medida de extracción por arqueta exterior. Extracción natural
- c) Medida de extracción por arqueta central. Extracción forzada
- d) Medida de extracción por arqueta exterior. Extracción forzada

Todas las medidas correctoras están realizadas con materiales habituales en el campo de la edificación en España. Los detalles se muestran en los apartados siguientes.

El análisis de las efectividades de las distintas medidas correctoras se realiza comparando los registros de radón del periodo inicial (apartado 3.1.) con el resultante tras la incorporación de las medidas correctoras. El periodo de funcionamiento para el análisis de cada medida correctora es aproximadamente de 1 mes para cada una de ellas.

3.4. Análisis de efectividades de las 4 medidas correctoras de extracción

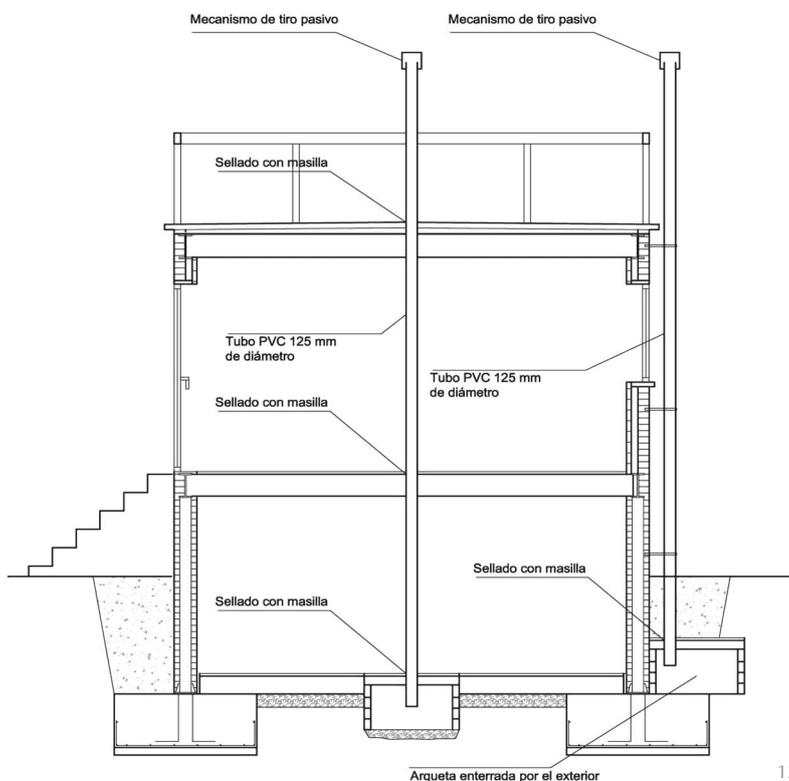
- a) Medida de extracción por arqueta central. Extracción natural:

Se perforó la solera de hormigón de la planta de sótano para construir, bajo ella, una

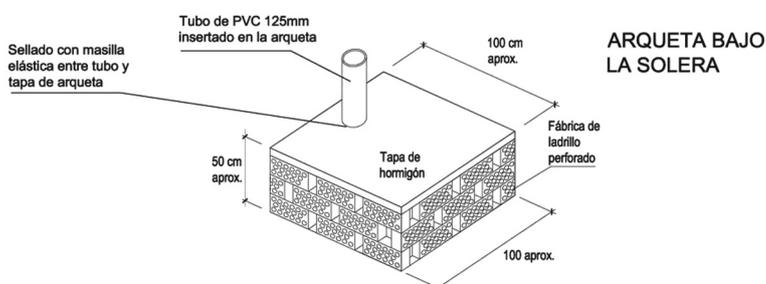
arqueta permeable. Esta arqueta constituye el elemento captador de las medidas a) y c). También se construyó otra arqueta enterrada

13. Sección del módulo por el eje central. Se observa el diseño del sistema de extracción.

14. Diseño de la arqueta tipo.



13



14



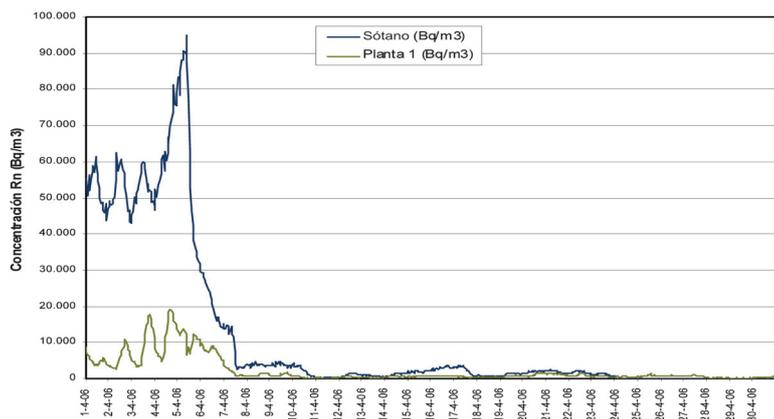
15. Arqueta captadora bajo solera. Las paredes se ejecutaron con ladrillo perforado.



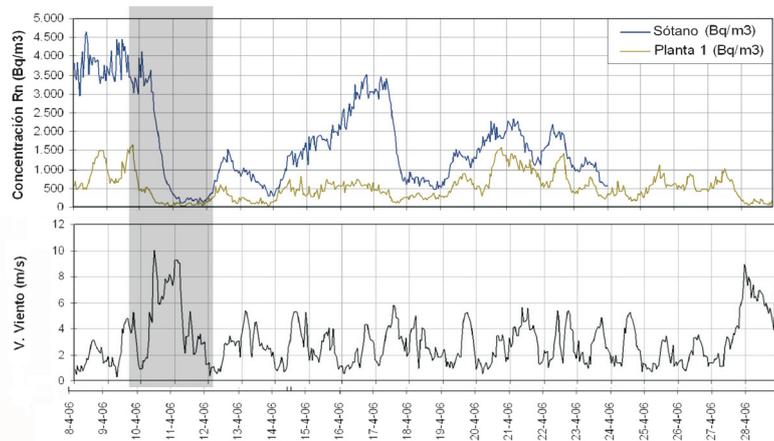
16. Tuberías de expulsión hasta cubierta. PVC 110 mm.

por el exterior del módulo, a la cota de cimentación, que se usó para las medidas b) y d). En la sección de la Figura 13 se localizan estos elementos.

Para la construcción de las paredes de estos elementos captadores, se usó un ladrillo convencional perforado de tipo tosco (formato: 240 mm x 120 mm x 70 mm) para permitir la entrada del gas hacia el interior. (Figuras 13 y 14)



17



18

17. Curvas de concentración de radón durante el funcionamiento de la medida correctora de extracción por arqueta central por convección natural (a).

18. Al Aumentar la velocidad de viento se produce una succión mayor por las arquetas y por tanto una mayor extracción de radón que reduce el flujo hacia el interior.

Por la parte superior de ambas arquetas se insertaron sendos tubos de PVC (diámetro 110 mm), idénticos a los usados para la evacuación de aguas residuales en edificación, que se condujeron hasta el exterior del módulo atravesando forjados y cubierta. (Figuras 15 y 16)

Aunque ambas arquetas se ejecutaron al mismo tiempo, los tubos de expulsión de la arqueta exterior se mantuvieron sellados para probar únicamente la extracción de la arqueta central. En el extremo de éste se colocó un dispositivo de extracción natural para incrementar la succión que produce el viento por el efecto "Venturi".

La Figura 17 muestra las curvas de concentración de radón antes y después de entrar

en funcionamiento esta primera medida correctora el día 05/04/2006. Se observa una reducción considerable de concentración en el interior del módulo que alcanza niveles próximos a 1.500 Bq/m³ para la planta de sótano y 500 Bq/m³ para planta primera.

Se obtuvieron unos promedios de concentración de radón de 1.742 Bq/m³ para planta de sótano y 603 Bq/m³ para planta primera, que aún siendo muy bajos comparados con los datos iniciales de partida (Sótano: 39.385 Bq/m³; Planta 1: 6.855 Bq/m³), no reducen por debajo del nivel de referencia de la Comisión Europea para viviendas existentes (400 Bq/m³).

Por otro lado se correlacionaron los registros con las distintas variables atmosféricas para estudiar las posibles influencias. Se sospechaba que el viento podría provocar un mejor funcionamiento del tiro pasivo debido al efecto "Venturi" y así se confirmó en los días del 10 al 12 del mes de abril, en los que las velocidades alcanzaron 8 y 10 m/s, y en los que se observa una reducción considerable frente a periodos con velocidades de viento inferiores. (Figura 18).

b) Medida de extracción por arqueta exterior. Extracción natural.

La base de funcionamiento de este sistema es la misma que la del sistema anterior. En este caso, se sella el tubo que conecta con la arqueta central y se abre el de la arqueta exterior. La extracción se realiza únicamente por la arqueta exterior mediante tiro natural.

Para el periodo de registro de esta segunda medida correctora, se obtuvieron unos promedios de concentración de radón de 16.607 Bq/m³ para planta de sótano y 3.213 Bq/m³ para planta primera. Estos niveles, notablemente superiores a los conseguidos por la extracción de la arqueta central, indican que la ubicación de la arqueta es un factor a tener en cuenta a la hora de proyectar una solución constructiva de remedio.

En este caso, la menor efectividad conseguida por la arqueta exterior, en funcionamiento por convección natural, se podría explicar por la barrera que constituye la cimentación del módulo. La arqueta se encuentra enterrada por el exterior de la zapata corrida de cimentación. Dicha cimentación perimetral cerca, físicamente, el espacio de terreno bajo él, generando una zona que se ve menos afectada por las succiones creadas en la arqueta. Esta situación provoca que una mayor cantidad de radón penetre en el interior del módulo en lugar de alcanzar la arqueta de captación.

Por otro lado se comprobó que, al igual que ocurría en la medida correctora anterior, el viento jugaba un papel importante en la extracción de radón por arquetas de captación cuando estos sistemas funcionan por convección natural. La succión que produce el viento en la cabeza del tubo crea una mayor depresión en la arqueta y por tanto una mayor efectividad. Se observó que en los días en los que la velocidad del viento se situaba entre 8 y 10 m/s, las concentraciones de radón alcanzaban los 1.200 Bq/m³ (en sótano) mientras que el promedio del periodo es de 16.607 Bq/m³ (en sótano), incrementando la efectividad un 38%.

Por otro lado se observó que la influencia de los cambios atmosféricos quedaba significativamente reducida por la acción del extractor mecánico.

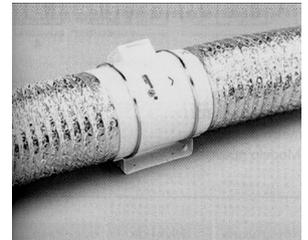
d) Medida de extracción por arqueta exterior.

Extracción forzada

En esta cuarta medida se trasladó el extractor mecánico de 80 W a la salida del tubo de la arqueta exterior. El tubo de la arqueta central se selló. La base de funcionamiento para esta solución es la misma que para la medida (b), extracción natural desde arqueta exterior, con

19. Modelo de extractor colocado en el tubo. Marca: Soler & Palau. Modelo: MIXVENT TD 350/125.

20. Diseño de la solución de extracción (c).



19

Tabla 3
Características técnicas del extractor instalado

Tipo	Velocidad (r.p.m.)	Potencia (W)	Intensidad (A)	Caudal max. (m ³ /h)	Nivel de presión sonora (dBA)	Peso (kg)
MIXVENT TD 350/125	2.210	80	0.37	360	30	2

c) Medida de extracción por arqueta central.

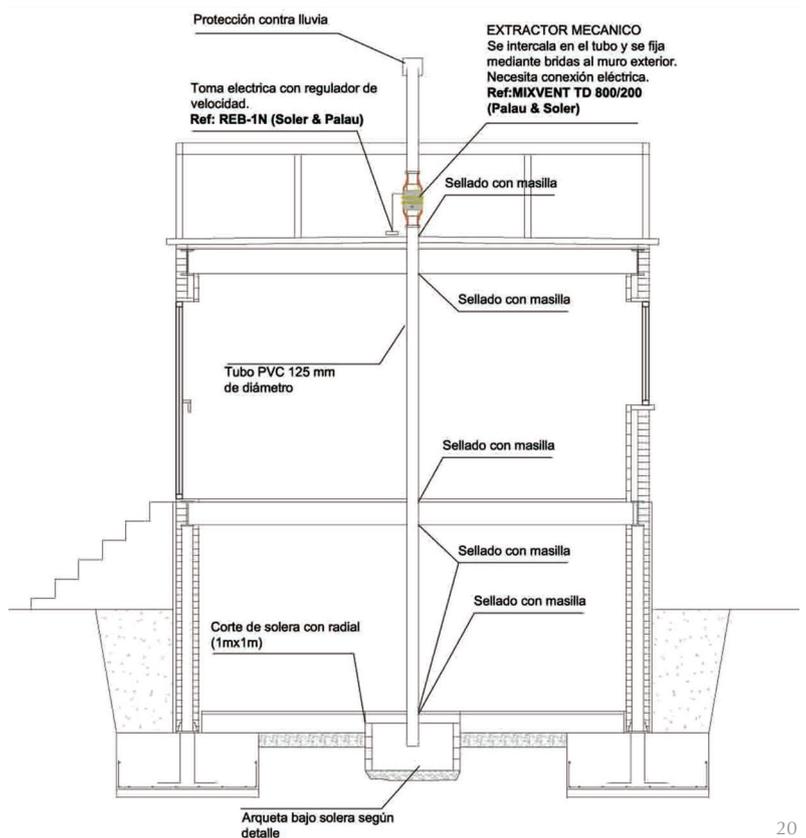
Extracción forzada:

Ésta medida puede considerarse una variante de la medida de extracción natural por arqueta central (a), en la que se fuerza el tiro mediante un extractor mecánico de 80 W de potencia. La base de funcionamiento es la misma, extraer aire contaminado de radón del terreno bajo el módulo para evitar que éste penetre en el interior del edificio. La extracción se realiza a través de la arqueta de captación situada bajo la solera del módulo, y la conexión al exterior es mediante el mismo tubo de la medida (a). En la boca de salida a cubierta se instaló un extractor mecánico de tipo hélico-centrífugo con diámetro de conexión de 125 mm, que generaba una depresión máxima de 155 Pa. En la Figura 19 se puede ver una fotografía del tipo de extractor instalado y en la Figura 20, su ubicación en la tubería de extracción.

Las características de este extractor son las que muestra la Tabla 3.

La efectividad conseguida por esta medida de extracción forzada, supera a la de las medidas de extracción natural, reduciendo los niveles hasta 409 Bq/m³ para planta de sótano y 368 Bq/m³ para planta 1ª.

Hay que tener presente que esta efectividad está condicionada al funcionamiento de un ventilador por lo que el mantenimiento del mismo resulta imprescindible para garantizar dichas reducciones, así como la instalación de alarmas que avisen en caso de fallos en el motor o fallo de suministro eléctrico.



20

la salvedad de que en este caso se fuerza el tiro mediante el uso de un extractor mecánico de 80 W de potencia.

La medida alcanzó reducciones de radón hasta niveles de 327 Bq/m³ para planta de sótano y 480 Bq/m³ para planta primera, valores muy similares a los obtenidos por la medida anterior en la que la extracción forzada se realizaba por la arqueta central.

A continuación se ofrecen los datos comparativos de las 4 soluciones probadas:

situada de forma centrada conforme a la planta, poseía una capacidad de captación mayor que

Tabla 4
Efectividades comparadas

MEDIDA DE REHABILITACIÓN	INICIAL CONCENTRACIÓN MEDIA (Bq/m ³)		CONCENTRACIÓN TRAS LA INTERVENCIÓN (Bq/m ³)		REDUCCIÓN (Bq/m ³)		EFECTIVIDAD REDUCCIÓN %	
	Sótano	P. 1ª	Sótano	P. 1ª	Sótano	P. 1ª	Sótano	P. 1ª
EXTRACCIÓN NATURAL								
a) Extracción natural por arqueta central	39.385	6.855	1.742	603	37.643	6.252	96	91
b) Extracción natural por arqueta exterior	39.385	6.855	16.607	3.213	22.778	3.642	58	53
EXTRACCIÓN FORZADA								
c) Extracción forzada (80 W) por arqueta central	39.385	6.855	349	479	39.036	6.376	99	93
d) Extracción forzada (80 W) por arqueta exterior	39.385	6.855	327	480	39.058	6.375	99	93

3.5. Análisis comparativo de efectividades de las 4 medidas ensayadas

La Tabla 4 muestra las reducciones de concentración de radón alcanzadas por las distintas medidas correctoras, expresadas tanto en Bq/m³ como en un porcentaje de reducción frente a las concentraciones iniciales.

En todas ellas, salvo en la medida (b), extracción natural por arqueta exterior, se consiguieron efectividades superiores al 90%.

Las medidas que mayor efectividad consiguieron, y que se aproximan o alcanzan el nivel de referencia para viviendas construidas según la Comisión Europea (400 Bq/m³), son aquellas que hacen uso de extractores mecánicos para forzar los tiros de las arquetas captadoras, medidas (c) y (d)

En cuanto a los sistemas de extracción natural, medidas (a) y (b), se comprobó que la arqueta

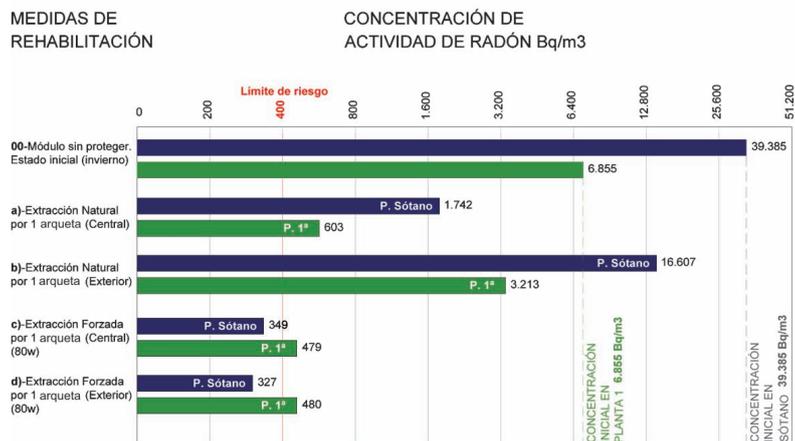
la colocada por el exterior debido a que la cimentación perimetral del edificio obstaculiza los flujos de radón a través del terreno hacia la arqueta.

Por otro lado, en este tipo de medidas de extracción natural, se observó que la velocidad del viento influía positivamente en la reducción de radón. Este efecto está relacionado con la mayor succión que se produce en la arqueta debido al efecto "Venturi" que provoca el viento en la boca del tubo de expulsión. Tanto en el sistema que está conectado a la arqueta centrada o al de la arqueta de exterior, se han obtenido efectividades mayores cuando el viento supera velocidades de 8 m/s.

En la medida (d), extracción forzada por arqueta exterior, se observaron reducciones bastante superiores a la que ofrecía la misma arqueta por tiro natural (b), incrementando la efectividad de 58% a 99% para planta de sótano y de 53% a 93% para planta primera. En este caso, la potencia del extractor sí resultó ser suficiente para extraer el gas del terreno de influencia a pesar de la barrera física que constituía la cimentación perimetral para la arqueta exterior. Este resultado es interesante desde el punto de vista de actuaciones por el exterior de los muros en viviendas cons

En la Figura 21 se expresan los resultados de reducción de radón en un diagrama de barras con los promedios de concentración tras la intervención en cada una de las medidas correctoras. La línea roja indica el nivel de referencia (400 Bq/m³) a partir del cual se debería introducir una actuación de corrección según la Comisión Europea para viviendas existentes. Las líneas discontinuas marcan las concentraciones iniciales tanto en planta de sótano como en planta 1ª.

21. Reducciones de radón en cada una de las medidas correctoras probadas. Porcentajes de efectividad: a) Sótano 96% - P.1ª 91%; b) Sótano 58% - P.1ª 53%; c) Sótano 99% - P.1ª 93%; d) Sótano 99% - P.1ª 93%.



21

A modo de comparación se incluye un gráfico de efectividades que ofrece el Instituto BRE (Building Research Establishment) del Reino Unido (18), para unas medidas correctoras similares a las mostradas en este artículo (Figura 22).

Como se aprecia en la Figura 22, el BRE no garantiza que los sistemas de tiro pasivo (convección natural), en situaciones de concentración de radón superiores a 900 Bq/m³, reduzcan por debajo de 200 Bq/m³. El resultado de esta investigación, para la medida de tiro pasivo (a), tampoco muestra reducciones por debajo de 200 Bq/m³, pero si alcanza niveles bajos (603 Bq/m³ para planta 1ª) teniendo en cuenta que se partía de concentraciones de inicio muy elevadas (6.855 Bq/m³ en planta 1ª). El porcentaje de eficiencia de esta medida (a) es de 91% para planta 1ª y cabría esperar que, si se partiese de concentraciones iniciales menores, el resultado podría haber sido inferior a 200 Bq/m³. No obstante, no ha sido posible establecer una relación entre el porcentaje de efectividad de las medidas y las concentraciones iniciales de partida, por lo que resulta aventurado comparar efectividades de los sistemas en distintas condiciones de partida.

4. CONCLUSIONES

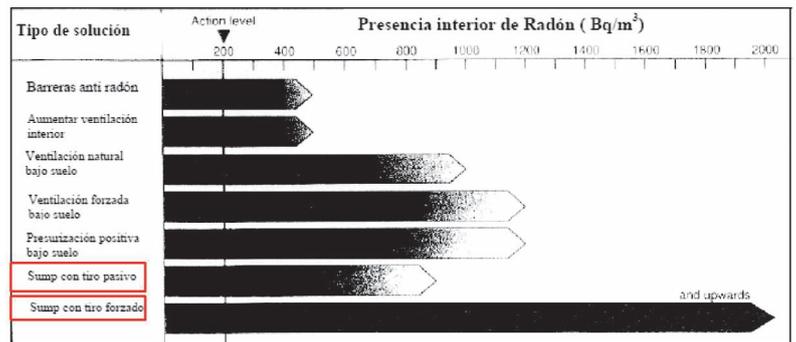
Atendiendo a las advertencias de entidades como la Organización Mundial de la Salud o la propia Comunidad Europea en su directiva de 21 de Febrero de 1990 (90/143/EURATOM), la inhalación de gas radón constituye un riesgo para la salud al aumentar el riesgo de contraer cáncer pulmonar. En este sentido, el sector de la edificación debe plantear sistemas de protección que garanticen que, la inmisión del gas al interior de los espacios habitados, no supere los límites de concentración recomendados.

El equipo formado por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja y la Cátedra de Física Médica de la Universidad de Cantabria, a instancias del Consejo de Seguridad Nuclear, ha desarrollado investigaciones para sentar las bases normativas destinadas a proteger a los usuarios de edificios de concentraciones excesivas de gas radón. En este sentido, el trabajo muestra un análisis de 4 técnicas constructivas basadas en estrategias de extracción aplicadas a un prototipo de vivienda construido en una zona con altas tasas de exhalación de radón.

La primera fase de esta investigación se dedicó al estudio de las concentraciones de radón en el módulo cuando se encuentra sin ningún tipo de protección frente a la entrada del gas. También se estudió la influencia de

las variables atmosféricas en el flujo de radón hacia el interior concluyendo que, de los factores analizados, la presión atmosférica resultaba ser el parámetro dominante en las variaciones de concentración con incrementos de un 225% ante caídas de 3.000 Pa en la presión atmosférica. En cuanto a la relación de las precipitaciones con la concentración de radón en el interior del módulo, parece que se evidencian positivamente cuando adquieren un valor elevado, aunque al ir asociadas a las bajas

22. Efectividades de distintas medidas correctoras. BRE (Building Research Establishment, Reino Unido).



22

presiones, no ha sido posible establecer el grado de influencia.

El análisis de efectividades de las distintas medidas correctoras por extracción muestra resultados favorables y dentro de los rangos esperados. Las efectividades se incrementaron con el uso de extractores mecánicos que fuerzan el tiro, y alcanzaron valores similares para las dos arquetas de captación (una bajo la solera y otra por el exterior). Por otro lado se observó que la arqueta situada por el exterior del perímetro de cimentación del módulo obtiene resultados favorables únicamente cuando funciona por tiro forzado.

Teniendo en cuenta los niveles de referencia de la comisión europea (400 Bq/m³ para viviendas construidas), y en la situación concreta de esta investigación, con concentraciones iniciales muy elevadas debidas a la localización, solo serían recomendables las soluciones de extracción forzada. Sin embargo es probable que en situaciones habituales de concentraciones de radón inferiores a 1.000 Bq/m³, las soluciones estudiadas de tiro natural pudieran ser suficientemente efectivas, en especial para la arqueta situada bajo la solera en situación centrada.

No obstante hay que tener en cuenta que los resultados de efectividades se han obtenido para unas condiciones concretas de edificio y de tasas de exhalación de radón en terreno, por lo que la aplicación de estos porcentajes a otras condiciones de partida no está garantizado. En este sentido convendría profundizar en el

estudio de este tipo de técnicas en otro tipo de edificios y terrenos, para así obtener más datos que ayuden a acotar las efectividades potenciales.

El trabajo de investigación que se ha mostrado constituye una primera base técnica en el estudio de aplicabilidad de las técnicas de protección frente a radón en el ámbito de la edificación en España, y que puede servir como referencia para la redacción de un documento de protección. No obstante se debería profundizar en el conocimiento de este tipo de técnicas así como en las de estrategias

de barreras anti radón, para que finalmente se tengan los datos necesarios que permitan abordar el tema a nivel normativo.

5. AGRADECIMIENTOS

Mostramos un especial agradecimiento a:

Enrique Suárez, José Luis Martín Matarranz, Mahon, J.P., del Consejo de Seguridad Nuclear.

A Luis Santiago Quindós Poncela de la Universidad de Cantabria

BIBLIOGRAFÍA

- (1) IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Volume 43. Man-made mineral fibers and radon. World Health Organization- International Agency for Research on Cancer.1988.
- (2) WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. ISBN 978 92 4 154767 3. World Health Organization 2009.
- (3) Darby S *et al.* Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*. 2005 Jan 29; 330 (7485): 223.
- (4) 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.
- (5) Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. BOE número 74 de 28/3/2006, páginas 11816 a 11831 (16 Págs.) www.codigo-tecnico.org.
- (6) Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación. (BOE núm. 266, de 6-11-1999).
- (7) Algunos documentos de interés en la bibliografía:
 - Bernard Collignan. Réduire la concentration en radon dans les bâtiments existants. Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTB) Francia 1999.
 - BRE Guide. Buildings and radon. ISBN: 1860810705. 1996.
 - C R Scivyer. Surveying dwellings with high indoor radon levels: a BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings. ISBN: 851255825. 1993.
 - Clavensjön Bertil; Akertblom Gustav. The Radon Book. Measures against radon. The Swedish Council for Building Research. Suecia 1994.
 - Environmental Protection Agency (EPA). Building Radon Out. USA 2001.
- (8) Berenguer Subils, M^a José. Notas Técnicas de Prevención. NTP 440: Radón en ambientes interiores. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. España.
- (9) Quindós Poncela, L. S. Radón, un gas radiactivo de origen natural en su casa. Universidad de Cantabria. Consejo de Seguridad Nuclear. 1995. ISBN 84-8102-114-8.
- (10) Neznal M. *et al.* The new method for assessing the radon risk of building sites.- Czech. Geol. Survey Special Papers, 47. p., CGS Prague. 2004.
- (11) Font, Ll. and Baixeiras, C. "The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors" *The Science of the Total Environment*, Vol. 307 pp. 55-69. 2003.
- (12) Hintenlang D.E; Al-Ahmady K.K. Pressure differentials for radon entry coupled to periodic atmospheric pressure variations. *Indoor Air*, Volume 2, Number 4, pp. 208-215(8). December 1992.
- (13) Yu K; Youg E; Li K. A study of factors affecting indoor radon properties. *Health Phys.* vol. 71 (2) 179-184. 1996.
- (14) Ward D; Borak T; Gadd M. Characterization of 222Rn entry into a basement structure surrounded by low- permeability soil. *Health Phys.* vol. 65 (1) 1-11. 1993.
- (15) Nazaroff WW; Moed BA; Sextro RG. Soil as a source of indoor radon: generation, migration, and entry. In: Nazaroff WW, Nero AV, editors. *Radon and its decay products in indoor air*. New York: Wiley-Interscience, p. 57-112. 1988.
- (16) Renault P; Mohrath D; Gaudu J-C; Fumanal J-C. Air pressure fluctuations in a prairie soil. *Soil Science Society of America journal*, vol. 62, no. 3, pp. 553-563. 1998.
- (17) Allen L; Robinson Richard G; Sextro and William J. Riley. Soil-gas entry into houses driven by atmospheric pressure fluctuations-the influence of soil properties. *Atmospheric Environment* vol. 31, no. 10, pp. 1487-1495. 1997.
- (18) Scivyer C R; Jaggs M P R. Dwellings with cellars and basements: a BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings. ISBN: 1860812198. 1998.

* * *