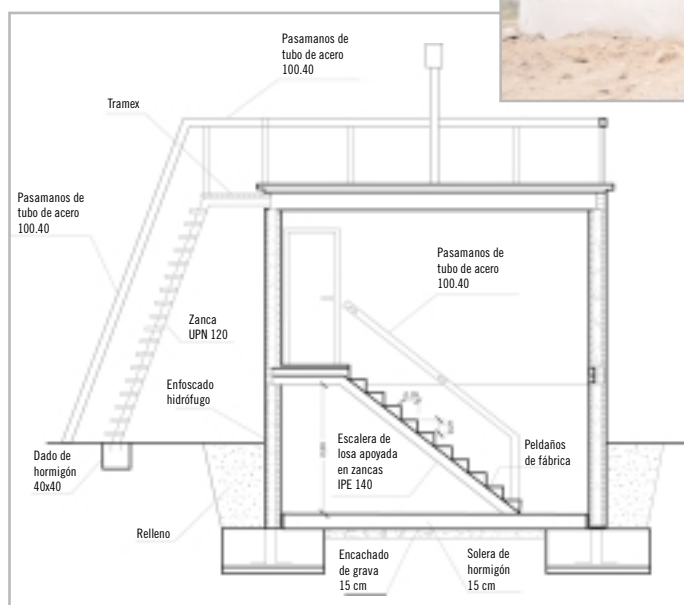
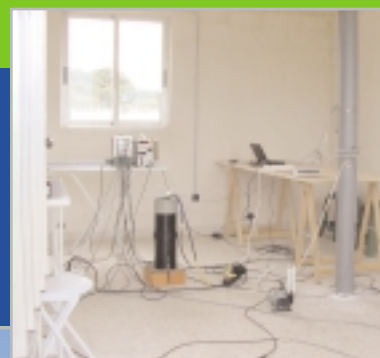


Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios

CSN



Colección
Informes Técnicos
24.2010

Protección frente a la inmisi3n
de gas rad3n en edificios

Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios

Autores: Borja Frutos Vázquez y
Manuel Olaya Adán
(Instituto de Ciencias de la Construcción
Eduardo Torroja, IETcc-CSIC)

Colección
Informes Técnicos
24.2010



Colección Informes Técnicos
Referencia INT-04.20

© Copyright 2010, Consejo de Seguridad Nuclear

Edita y distribuye:
Consejo de Seguridad Nuclear
Pedro Justo Dorado Dellmans, 11
28040 - Madrid-España
www.csn.es
peticiones@csn.es

Maquetación y fotomecánica: Pilar Guzmán
Impresión:

Depósito legal: M-00000-2010

En las últimas décadas se han ido recogiendo, en la normativa sobre salubridad en distintos países, las sucesivas recomendaciones que derivan de investigaciones sobre los efectos que supone para la salud respirar en espacios cerrados con presencia de gas radón, como por ejemplo las de organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), la Comisión Europea, etc.

El denominador común de estas recomendaciones es el establecimiento de niveles de referencia de concentración de radón en tales espacios, así como la intervención mediante técnicas correctoras para la reducción de las concentraciones en función de dichos niveles. En general, contemplan ámbitos de aplicación, bien relacionados con las condiciones que deben cumplir los espacios destinados a puestos de trabajo, o los espacios residenciales.

En particular, en lo referente a espacios residenciales, las condiciones de salubridad en la edificación para España, están recogidas en el Código Técnico de la Edificación (CTE) derivado de la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE) (www.codigotecnico.org). En la actualidad, esta normativa no contempla la protección de los usuarios de los edificios frente al riesgo de habitar en espacios con excesiva concentración de gas radón.

El Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, junto con la Cátedra de Física Médica de la Universidad de Cantabria, colaboran con el Consejo de Seguridad Nuclear, en dos líneas de investigación:

1. Fundamentos científico técnicos para abordar un requisito específico dentro del CTE que contemple las condiciones mínimas de salubridad, referente a concentraciones de radón, exigidas a los espacios habitados.
2. Investigaciones concretas sobre la efectividad de distintas medidas correctoras para evitar la penetración de gas radón en los espacios habitados.

Esta publicación comienza con un acercamiento a la problemática que supone habitar en espacios con excesivas concentraciones de gas radón, continúa con un planteamiento a nivel normativo para afrontar la protección frente a la penetración del gas en viviendas nuevas, y termina con la presentación de los resultados de una investigación sobre técnicas de intervención probadas en un módulo que reproduce las características de una vivienda construida.

Con este documento se pretende ofrecer al lector una visión sobre técnicas de protección destinadas a reducir la presencia de radón en el interior de los edificios, diseñadas con sistemas constructivos habituales en España y en base a los conocimientos adquiridos experimentalmente, con el objetivo de servir de referencia técnica para normativas futuras y por otro lado, como directrices para la aplicación práctica en casos reales.

Sumario

Introducción	5
El radón y su problemática en espacios habitados	9
Aproximación a una propuesta normativa en España para viviendas nuevas	17
La experiencia adquirida en las soluciones contra la inmisión de radón.	37
Conclusiones y perspectivas futuras	69
Referencias bibliográficas	71

EL RADÓN Y SU PROBLEMÁTICA
EN ESPACIOS HABITADOS



El radón, como gas noble, se presenta en la naturaleza en tres isótopos: el ^{222}Rn , al que se denomina específicamente radón, proveniente de la cadena de desintegración del uranio ^{238}U y con un periodo de semidesintegración ($T_{1/2}$) de 3,8 días; el ^{220}Rn ($T_{1/2}$ de 54,5 segundos) que proviene de la serie de desintegración del torio ^{232}Th y que se denomina torón; y el ^{219}Rn ($T_{1/2}$ de 3,92 segundos) proveniente de la desintegración del actinio ^{235}U y al que se denomina actinón.

De estos tres isótopos del radón, el de mayor significación radiológica es el ^{222}Rn , al que nos referiremos, de ahora en adelante, como radón.

Este gas inerte de origen natural, derivado de la desintegración del radio (^{226}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}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{214}Po) en el interior de nuestro organismo, es capaz de alterar el ADN de los tejidos pulmonares.

El radón es considerado cancerígeno por la Organización Mundial de la Salud (OMS), de acuerdo con la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EEUU, que lo clasifican como cancerígeno del grupo 1. Advierten que el principal efecto adverso derivado de la inhalación de radón y en especial de sus productos de desintegración es el riesgo de contraer cáncer de pulmón, siendo la segunda causa detrás del tabaco.

La magnitud con la que medimos la actividad de la radiación producida por la desintegración del núcleo de cualquier elemento radiactivo es el Becquerel (Bq), que indica el número de desintegraciones por segundo del núcleo atómico, en este caso del radón. Para el

caso de la concentración de la actividad en un espacio cerrado usamos el bequerelio por metro cúbico de aire (Bq/m^3) que expresa el número de desintegraciones por segundo en un metro cúbico de aire. Esta magnitud aparece definiendo los niveles máximos aconsejables, según recomendaciones normativas, que no deben sobrepasarse en los espacios cerrados y habitados con el fin de proteger la salud de los habitantes.

A nivel internacional, y en distintos países, se han desarrollado este tipo de normativas referentes a la protección de los espacios habitados frente a una excesiva concentración de gas radón.

En el ámbito europeo, la recomendación de la Comisión Europea de 21 de febrero de 1990 (90/143/Euratom) establece los siguientes niveles de radón en viviendas:

- 200 Bq/m^3 . Nivel de diseño (edificios de nueva construcción). Recomendación de no sobrepasar este nivel en el interior de una vivienda que va a ser construida.
- 400 Bq/m^3 . Nivel de actuación (edificios existentes). Recomendación de actuación para reducir la concentración en una vivienda construida cuando los niveles de radón registrados superen dicho valor.

Se entiende, que los edificios construidos deben protegerse frente a la inmisión de radón, mediante la intervención con soluciones constructivas, para que en su interior se reduzcan los niveles por debajo de 400 Bq/m^3 y que, en edificios de nueva construcción, el proyecto deberá contemplar las soluciones adecuadas para que, una vez construido, el nivel de concentración no supere 200 Bq/m^3 y sea tan bajo como sea posible.

1. Medida de la concentración de radón

Como se ha indicado, el parámetro que mide la concentración de radón y sus descendientes es el bequerelio por m^3 de aire (1 Bq equivale a una desintegración atómica por segundo).

Existen varios métodos para determinar la concentración en un espacio (por ejemplo en un edificio) o en

los poros del mismo terreno. La mayoría de ellos se basan en el recuento de las partículas alfa emitidas por la desintegración del radón y sus descendientes de vida corta.

Existen equipos de medida en continuo que muestran las concentraciones de actividad de radón en un espacio en tiempo real, y medidores integradores, que ofrecen los resultados de concentraciones de actividad de radón para periodos de tiempo largo¹.

2. Fuentes de radón

El radón ^{222}Rn procede del radio ^{226}Ra presente en la composición de determinados materiales. Se puede encontrar tanto en suelos terrestres, en mayor o menor proporción en función del tipo de roca, en el agua al disolverse el gas en ella en corrientes subterráneas, o en materiales de construcción al usarse materias primas con contenidos de radio en el proceso de fabricación.

Como fuentes principales encontramos las siguientes:

2.1. Terreno

El terreno es la principal fuente de radón. En función del contenido de uranio que posea la roca, el terreno será potencialmente activo en la generación de radón. En la siguiente tabla, se muestran las concentraciones representativas de uranio en rocas presentes en la corteza terrestre.

Tabla 1.1. Concentración de uranio en rocas²

Tipo de roca	Concentración de uranio ^{238}U (ppm)
Basálticas	1.0
Granitos	5.0
Arcillas	3.7
Arenas	0.5

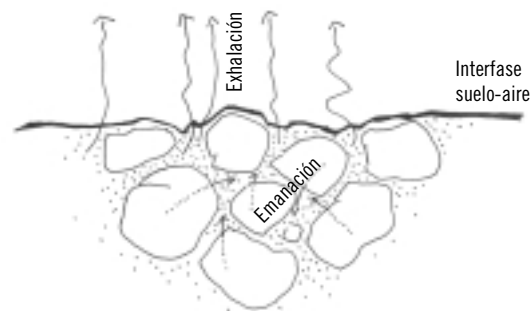
¹ A. Vargas Drechsler y X. Ortega Aramburu. *Calidad metrológica y dosimetría del radón*. Colección Documentos I+D, 12.2004. CSN.

² L. S. Quindós Poncela. *Radón, un gas radiactivo de origen natural en su casa*. Universidad de Cantabria. Consejo de Seguridad Nuclear, 1995.

Aun siendo el contenido de uranio ^{238}U un factor determinante a la hora de catalogar a un terreno en su capacidad de generar radón, la permeabilidad del mismo es sumamente importante ya que de este parámetro depende que el radón sea capaz de escapar de la estructura de la roca, viajar entre los poros del terreno y alcanzar la superficie.

Se denomina *exhalación* al parámetro que pondera la cantidad de gas que deja escapar la roca fuente de radón, y *emanación* al parámetro que determina el movimiento del radón entre los poros del terreno hasta alcanzar la superficie terrestre.

Figura 1.1. Procesos de emanación y exhalación



2.2. Agua

El gas radón, tras haber emanado de las rocas puede disolverse en corrientes de agua subterráneas y transportarse de esta manera hacia su destino final (balnearios de aguas termales, manantiales, etc.). Una vez liberado al aire, el radón disuelto en el agua puede contribuir al incremento de la concentración en locales cerrados.

Respecto a los contenidos de radón en aguas, existen como referencia los valores establecidos por la Recomendación de la Comisión Europea (2001/928/Euratom) de 20 de diciembre de 2001 relativa a la protección de la población contra la exposición al radón en el agua potable.

2.3. Materiales de construcción

Los materiales de construcción pueden constituir otra fuente de radón. Muchos de ellos están formados a

partir de materias que presentan contenidos, más o menos elevados, de radio ^{226}Ra . La problemática en este caso es diferente, pues no se trata de proteger los espacios habitados de la exhalación del gas proveniente del suelo, sino de procurar usar materiales con bajos contenidos de radio o resolver adecuadamente la estanquidad del espacio interior frente a la exhalación del gas proveniente de los materiales usados en la vivienda.

Entre los materiales con contenido en radio, se encuentran los habitualmente usados en los sistemas de construcción, como son los ladrillos cerámicos, los hormigones, los morteros de albañilería, los yesos, los cementos, y adiciones tales como las cenizas volantes. Al tratarse de productos elaborados con materias primas que proceden de diferentes orígenes, su caracterización radiológica tiene que ser específica para un material determinado³.

Se estima que el porcentaje de radón debido a los materiales empleados en la construcción puede ser del orden de un 20% del total registrado en una habitación y que su contribución puede ser del orden de 5 a 20 Bq/m³ ⁴.

3. Movilidad del radón

En cuanto al movimiento del gas radón a través del terreno o a través de los materiales se contemplan dos procesos:

- *Movimiento por difusión.* Por difusión se entiende la migración de un soluto desde una zona de alta concentración a una zona de baja concentración. Es decir, el flujo de radón por difusión depende de la diferencia de concentraciones del gas que exista entre un espacio y otro, por ejemplo, entre los poros del

terreno y el interior de un edificio. Se puede modelizar por medio de la Ley de Fick.

- *Movimiento por convección.* Por otro lado, están los procesos convectivos (advectivos), determinantes en la entrada de radón en los edificios. El flujo convectivo se establece por una diferencia de presión entre la existente en el sustrato donde se encuentra el radón y la que existe en la atmósfera o en el interior del edificio. Este proceso depende de la permeabilidad del medio y del gradiente de presión y se modeliza mediante la Ley de Darcy.

Por otro lado, la concentración del gas en el aire dependerá también de las condiciones meteorológicas:

- *El viento.* Las infiltraciones de aire producidas por el viento pueden modificar las concentraciones de radón mientras que por otro lado, las velocidades de viento se asocian a cambios de presión que modifican el flujo convectivo.
- *La presión atmosférica.* Las modificaciones de las presiones atmosféricas afectan de distinta manera al espacio intersticial de los poros del terreno que al espacio aéreo en las proximidades de su superficie, por lo que se produce un cambio en el gradiente de presión que modifica el flujo convectivo que se traduce en una mayor exhalación de radón en periodos de bajas presiones.
- *La altura con respecto al suelo.* Dado que se trata de un gas más pesado que el aire (aproximadamente ocho veces más) la probabilidad de encontrar altas concentraciones a altura elevada sobre el terreno es baja.
- *La temperatura* afecta a los movimientos convectivos del aire como medio de transporte del radón. Durante el día, las concentraciones del gas a nivel de suelo son menores, debido a la dispersión vertical producida por el calentamiento de la atmósfera, mientras que por las noches, debido a una mayor estabilidad atmosférica, se produce un incremento.

En interiores, se puede producir el llamado efecto *stack* por el cual, el aire caliente, por expansión,

³ Chen, C.-J.; Weng, P.-S., y Chu, T.-C. "Radon exhalation rate from various building materials". *Health Phys.* 64:613-619. 1993.

⁴ G.-A. Roserens; H.-U. Johner; G. Piller, y P. Imbaumgarten. *Swiss Radon handbook*. Swiss Federal Office of Public Health. Berna, 2000. Suiza.

tiende a *fugarse* del edificio generando una ligera depresión que puede aumentar el flujo de radón hacia el interior.

- *La humedad ambiental y las lluvias.* En terrenos saturados, los poros se colmatan y el radón se disuelve en el agua desplazándose con ella por corrientes subterráneas dificultando la exhalación a la superficie.

Por tanto, y resumiendo, la concentración de radón en el aire dependerá de:

- 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*).
- Las condiciones meteorológicas en la proximidad de la superficie que modifiquen el flujo por diferencias de presión, saturación de poros, ventilaciones, etc.

4. Penetración y acumulación del radón en espacios habitados

El gas radón proveniente del subsuelo, generado por la desintegración del radio, exhala a la atmósfera y se mezcla con el resto de gases, disminuyendo así su concentración sin que alcance niveles importantes.

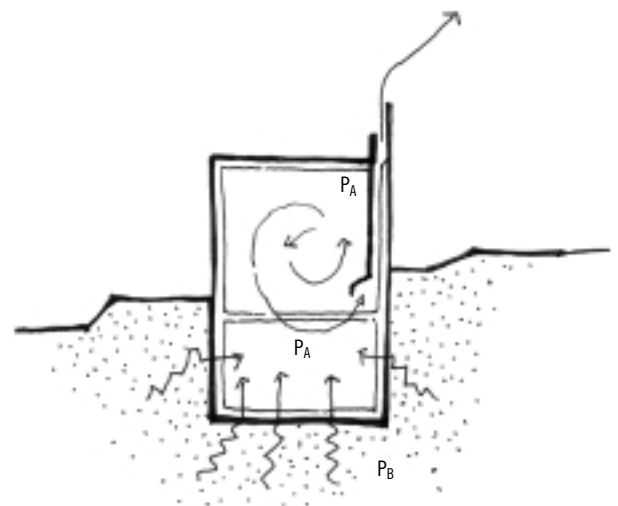
Ahora bien, si existiese una edificación sobre el terreno, y debido a la diferencia de presión que se establece entre los poros del terreno y el espacio cerrado de la edificación (normalmente alta debido a ventilaciones o ausencia de las mismas), se establecería un flujo desde el terreno hacia el interior de la edificación.

Por su condición de gas, su movilidad es alta entre los poros de los materiales normalmente usados en la edificación y penetra fácilmente en el interior de la vivienda, atravesando los forjados, soleras o muros o 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.

Debido a las ventilaciones de los edificios, a las evacuaciones de aire viciado de cuartos húmedos, a las chimeneas, y a las filtraciones por ventanas y puertas, unido todo ello a las variaciones atmosféricas, es normal que exista una pequeña depresión en el interior de los edificios en comparación con la que existe en el terreno donde se está generando radón de forma continua.

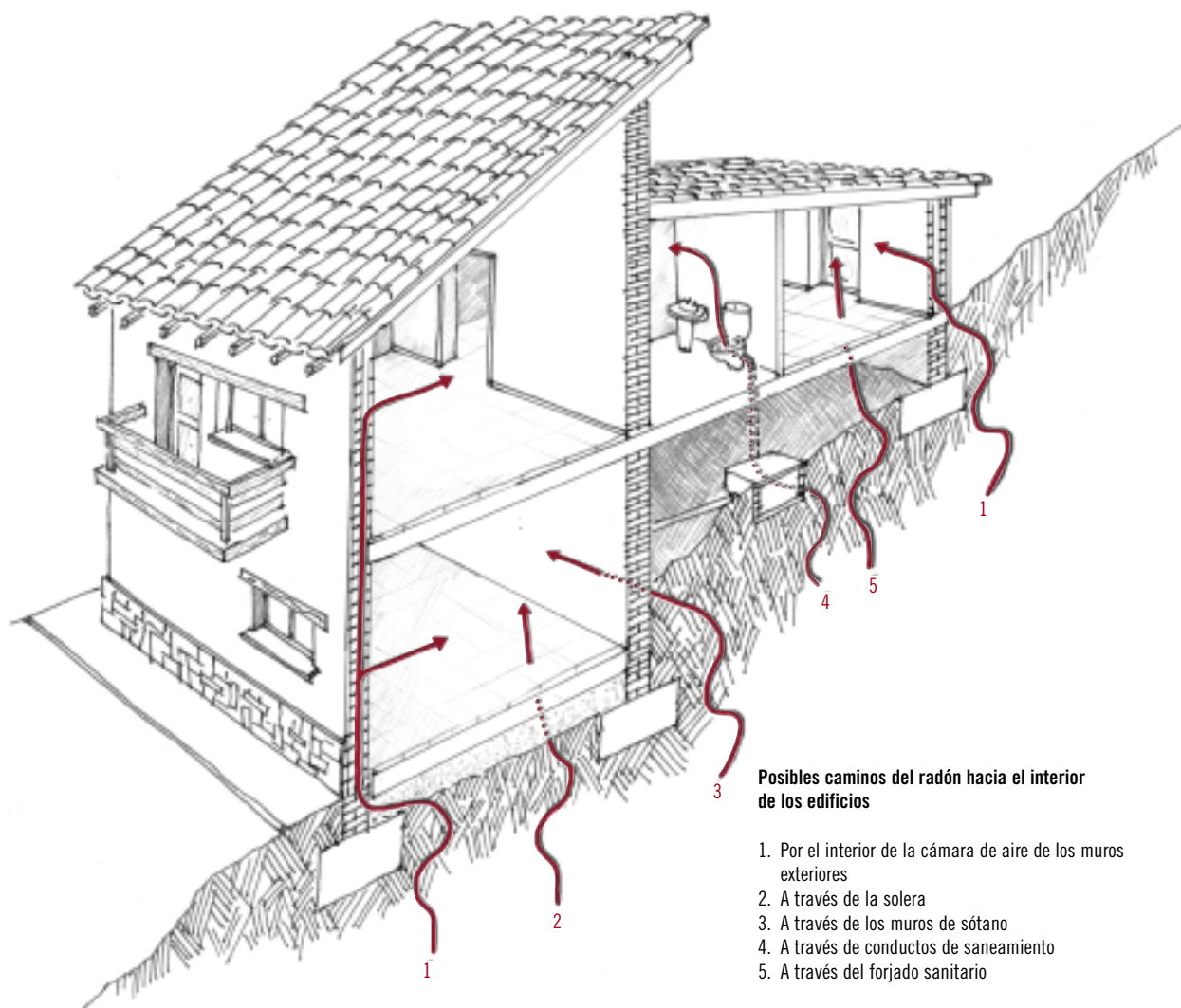
A medida que ha ido evolucionando la construcción, primando conceptos de ahorro energético, los edificios se han ido haciendo cada vez más estancos y con menores filtraciones. Ello ha provocado un incremento en los niveles de radón en el interior por la escasa ventilación. Incluso, usando sistemas de extracción de aire viciado como los que recomienda el actual Código Técnico de la Edificación, si no se disponen holgadas aberturas de inmisión, puede ocurrir el fenómeno de depresión interior que favorezca la entrada de radón.

Figura 1.2. El flujo de radón hacia el interior, debido a procesos convectivos, se establece cuando el gradiente de presiones es positivo ($P_B > P_A$)



En la figura 1.3 se reflejan algunas de las vías de penetración más frecuentes.

Figura 1.3. Vías comunes de entrada de radón. Puntos débiles



1. Cámaras de aire de muros

Ésta es una vía frecuente por donde el radón, tras penetrar en ellas, podrá moverse con absoluta libertad e incluso viajar por estas cámaras hasta pisos altos.

2. Soleras en sótanos

Las soleras suelen realizarse con hormigón armado o en masa, con juntas de dilatación situadas por tramos de superficie, y con juntas en los encuentros con paramentos verticales, permitiendo de esta manera, que puedan producirse movimientos diferenciales entre

elementos constructivos distintos sin que se presenten patologías por rotura de sistemas. Estas juntas, necesarias en un proceso constructivo, constituyen caminos del gas hacia el interior. También lo constituyen las fisuras de la propia solera e incluso el hormigón mismo (el gas es capaz de atravesar los poros de materiales hasta un determinado espesor definido por la longitud de difusión del material).

3. Muros de sótano

Los muros de los sótanos de viviendas enterradas o semienterradas pueden ser traspasados por el gas del te-

rreno. Ocurrirá lo mismo que con las soleras. Son sistemas que están en contacto directo con el terreno y se deberán proteger de la misma manera.

4. Conductos de saneamiento

En muchas ocasiones, los conductos verticales de saneamiento conectan los aseos, baños y cocinas, con las arquetas de la red horizontal de distribución situada normalmente bajo la solera o el piso de sótano.

Las arquetas no son elementos suficientemente estancos por lo que el gas penetrará en ellas y a través de las bajantes podrá ascender hasta los cuartos húmedos si el sifón perdiese efectividad.

Normalmente las concentraciones altas de radón se encuentran en las plantas bajas que están más cerca del terreno. No obstante se han registrado valores elevados en plantas altas. Este fenómeno puede justificarse, entre otras razones, por los conductos de saneamiento que están en contacto con las arquetas enterradas en el terreno y que a través de ellos asciende el gas hasta plantas más alejadas.

5. Forjados sanitarios

El gas proveniente del terreno podrá acumularse en la cámara de aire bajo el forjado sanitario y si ésta no está ventilada, podrá traspasar el forjado y penetrar en la vivienda.

APROXIMACIÓN A UNA PROPUESTA NORMATIVA
EN ESPAÑA PARA VIVIENDAS NUEVAS



2

1. La salubridad en el Código Técnico de Edificación

Anteriormente a lo que hoy conocemos como Código Técnico de la Edificación (CTE), la normativa del sector estaba dispersa en un conjunto de normas básicas de la edificación y otras normas de distinta índole, que pretendían garantizar el proceso constructivo, la seguridad y la habitabilidad de los edificios. Parte de esta normativa quedaba obsoleta en el avance de la técnica y, fundamentalmente, de las nuevas necesidades sociales. Se vio oportuno por tanto, aprovechando la Ley de Ordenación de la Edificación (Ley 38/1999), realizar una unificación normativa que sirviera como referente de los agentes participantes en el proceso constructivo.

El Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, aprobó el Código Técnico de la Edificación (CTE). En el primer artículo del texto de la primera parte se establece el objeto del mismo:

Artículo 1. Objeto

1. *El Código Técnico de la Edificación, en adelante CTE, es el marco normativo por el que se regulan las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios, incluidas sus instalaciones, para satisfacer los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad, en desarrollo de lo previsto en la disposición adicional segunda de la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación, en adelante LOE.*

En el artículo 2 se establece el ámbito de aplicación, siendo obligatorio para todo tipo de edificación, pública o privada, de nueva planta o de rehabilitación.

En el artículo 13, en el primer requisito básico de habitabilidad, se establecen las exigencias básicas de salubridad:

13.3. Exigencia básica HS 3: Calidad del aire interior

1. *Los edificios dispondrán de medios para que sus recintos se puedan ventilar adecuadamente, eliminando los contaminantes que se produzcan de forma habitual durante el uso normal de los edificios, de forma que se aporte un caudal suficiente*

de aire exterior y se garantice la extracción y expulsión del aire viciado por los contaminantes.

2. *Para limitar el riesgo de contaminación del aire interior de los edificios y del entorno exterior en fachadas y patios, la evacuación de productos de combustión de las instalaciones térmicas se producirá, con carácter general, por la cubierta del edificio, con independencia del tipo de combustible y del aparato que se utilice, de acuerdo con la reglamentación específica sobre instalaciones térmicas.*

Según esta exigencia, los contaminantes contemplados proceden del hábitat interior sin tener en cuenta la inmisión de agentes externos. Dentro de estos agentes externos, que pueden proceder de la contaminación del aire exterior o provenir de aguas de suministro, nos encontramos con el gas radón que principalmente proviene del terreno de asiento del edificio.

Falta por el momento, que se introduzcan en el CTE, provisiones normativas que contemplen la exigencia de prevención frente a la inmisión de gas radón.

2. Recomendaciones de niveles de concentración de radón

Con el objetivo de introducir un apartado referente a la protección frente a gas radón en dicho Código, se podría expresar la exigencia de la siguiente manera:

El diseño, la construcción, y en su caso la rehabilitación del edificio, se llevará a cabo de manera que se asegure que los ocupantes no estén expuestos a concentraciones de radón que pudieran implicar un riesgo para la salud.

Como referencia, los niveles de concentración de gas radón recomendados serían los contemplados en la Recomendación de la Comisión Europea de 21 de febrero de 1990 (90/143/Euratom), en la que se establecen dos niveles:

- 200 Bq/m³ como *nivel de diseño* (objetivo a cumplir) para edificios de nueva construcción. Se recomienda

tomar las medidas necesarias, para que, aplicadas al diseño del edificio y una vez construido éste, los niveles de radón no superen dicho valor.

- 400 Bq/m³ como *nivel de actuación* en edificios existentes. Si los niveles de concentración medidos en un edificio existente superan este valor, se recomienda introducir medidas correctoras con el fin de reducir la concentración.

3. La actuación en la edificación

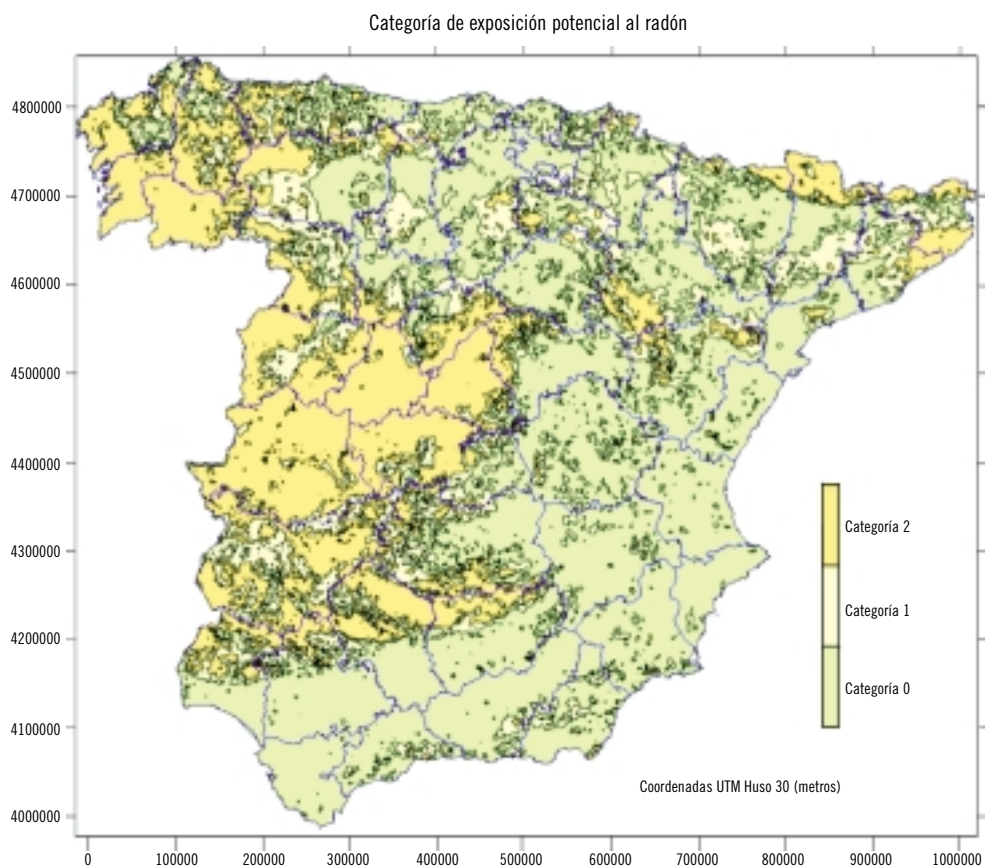
Dar cumplimiento a una exigencia del CTE, como podría ser la expresada en el punto anterior, implica se-

guir un procedimiento de evaluación del riesgo que conlleve una serie de intervenciones en los edificios en función de su tipología constructiva y del nivel de radón al que podrían estar expuestos.

Existe un mapa peninsular de categorías de exposición potencial al radón en los edificios elaborado por el Consejo de Seguridad Nuclear. Este mapa deriva del mapa de radiación gamma natural, Marna, y establece tres niveles de exposición potencial asociados a la naturaleza del terreno.

Donde: categoría 0 (riesgo bajo), categoría 1 (riesgo medio) y categoría 2 (riesgo alto).

Figura 2.1. Mapa de categorías de exposición potencial al radón en el interior de edificaciones. Consejo de Seguridad Nuclear



No obstante, la responsabilidad de la decisión de edificar en un determinado lugar conlleva el tomar determinadas prevenciones respecto a la posible existencia real de radón en el solar, mediante mediciones *in situ*. Se trataría de establecer un procedimiento de medidas de concentración en el interior del terreno que, junto con datos de la permeabilidad, sirvieran de referencia para poder tomar la decisión sobre el tipo de solución constructiva adecuada desde el comienzo del proyecto arquitectónico.

A través de medidas de radón y permeabilidad en el terreno, se podrían establecer tres categorías de exposición potencial al radón en los mismos términos que los que presenta el mapa de categorías de exposición potencial de radón.

Para ello, y a modo de ejemplo, puede ser útil el criterio de clasificación del terreno que ha desarrollado la Republica Checa y que se muestra en la tabla siguiente¹:

Tabla 2.1. La tabla muestra la exposición potencial al radón en un solar concreto a partir de los datos de concentraciones de radón en profundidad y permeabilidad del terreno

Exposición potencial al radón	Concentración de ²²² Rn Bq/m ³ (en terreno)		
	Permeabilidad (*) baja	Permeabilidad (*) media	Permeabilidad (*) alta
Baja	<30.000	<20.000	<10.000
Media	30.000 –100.000	20.000-70.000	10.000-30.000
Alta	>100.000	>70.000	>30.000

Donde:

(*) Permeabilidad intrínseca del terreno:

Permeabilidad baja: $< 4 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$

Permeabilidad media: $4 \cdot 10^{-13} - 4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$

Permeabilidad alta: $> 4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$

A nivel normativo, dentro del ámbito del CTE, se podría pensar en un diagrama de toma de decisiones que partiera de una categoría de riesgo, entendida como una exposición potencial al radón, determinada siempre por medidas realizadas *in situ*, tanto para la con-

centración de radón en terreno como para la permeabilidad del mismo, y de esta manera obtener un nivel de exposición al radón propio del solar de construcción.

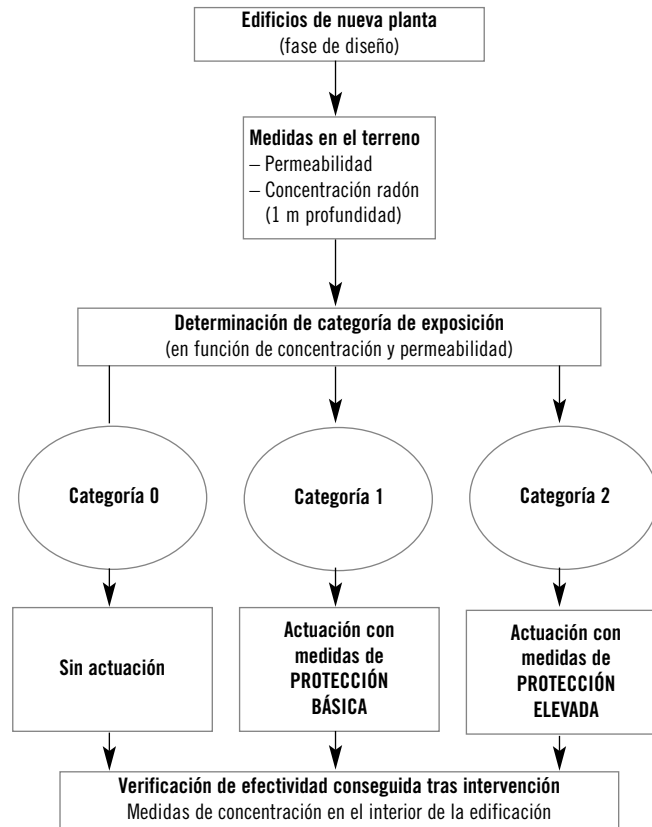
Este tipo de medidas podrían englobarse dentro del estudio previo del terreno (estudios geotécnicos, estudios topográficos, etc.), constituyendo parte de la documentación preparatoria de un proyecto arquitectónico.

En este sentido, y tras el conocimiento adquirido en estos últimos años, tanto en el registro de concentraciones *in situ*, como en la aplicación de soluciones constructivas para frenar la inmisión de radón, se podría plantear el diagrama de actuación de la figura 2.2.

Este diagrama conduce a la elección de una medida de protección adecuada a la categoría de exposición al radón propia del solar de construcción.

¹ Neznal M. *et al.* (2004): The new method for assessing the radon risk of building sites. *Czech. Geol. Survey Special Papers*, 47 pp., CGS Prague.

Figura 2.2. Actuaciones de protección derivadas de la categoría de exposición potencial al radón determinada para el solar de construcción



4. Posibles medidas de protección en función de la categoría de exposición al radón

Las medidas de protección frente a la inmisión de gas radón, que están siendo actualmente usadas en diferentes países, tratan de frenar la entrada de radón mediante la aplicación de diferentes técnicas constructivas.

La gran mayoría de estas técnicas basan su funcionamiento en dos estrategias de actuación diferentes, que pueden ser ejecutadas de forma conjunta para conseguir mayor eficacia.

Sistemas de barreras antiradón:

Estrategias de estanquidad frente al gas mediante la aplicación de barreras impermeables al radón en los elementos constructivos que conforman la envolvente del edificio y que están en contacto con el terreno.

Sistemas de extracción o presurización:

Estos sistemas basan su funcionamiento en la extracción del gas del terreno circundante a la edificación, y evacuarlo a la atmósfera para impedir que penetre en el edificio, o bien invertir el sistema e impulsar aire bajo la vivienda creando un bulbo de sobrepresión que desvíe el flujo del gas. La figura muestra un ejemplo del sistema de extracción.

A raíz de los resultados obtenidos de la aplicación de las distintas técnicas de protección en viviendas con presencia de radón, se ha podido estudiar la efectividad de las mismas en relación a su capacidad para atenuar la entrada de radón, y de esta manera, poder aconsejar unas medidas de actuación u otras, en función de la categoría de exposición al radón del terreno de que se trate.

En este sentido, algunas entidades como el BRE (Building Research Establishment) en el Reino Unido, o el Centro Científico y Técnico de la Construcción (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, CSTB) en Francia, entre otras, han publicado documentos en los que se muestran cuadros comparativos de efectividades para clasificar las distintas soluciones de protección.

No obstante, la eficacia de las técnicas no puede ser garantizada en todos los casos, ya que la singularidad de cada edificio en cuanto a tipología constructiva, geometría, volumetría, o los materiales empleados, requiere que se realicen estudios pormenorizados enfocados al ajuste de los parámetros fundamentales de

cada técnica. Dada la gran cantidad de soluciones posibles en el diseño de un edificio, deberá ser el proyectista el que integre la solución de protección frente a radón en el diseño general del edificio, y el que adapte o adecue los distintos parámetros de la misma para que la efectividad alcance el objetivo de diseño.

A continuación, se muestra un repertorio de técnicas posibles para cada categoría de exposición al radón según la aplicación del diagrama de la figura 2.2. Las técnicas mostradas deben ser entendidas como principios básicos o líneas generales de actuación, que requerirán ser estudiadas y ajustadas para cada caso particular.

Figura 2.3. Esquema gráfico de un sistema de barrera colocado bajo la solera y por el exterior del muro de contención de sótano de una vivienda

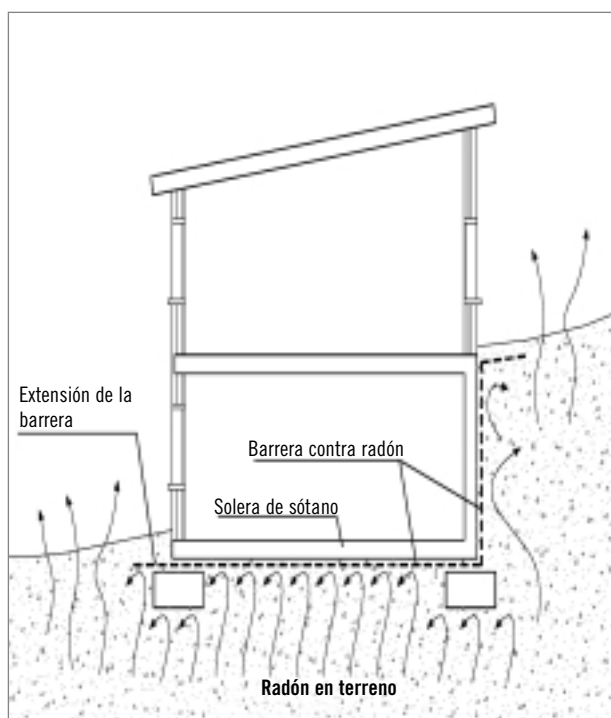
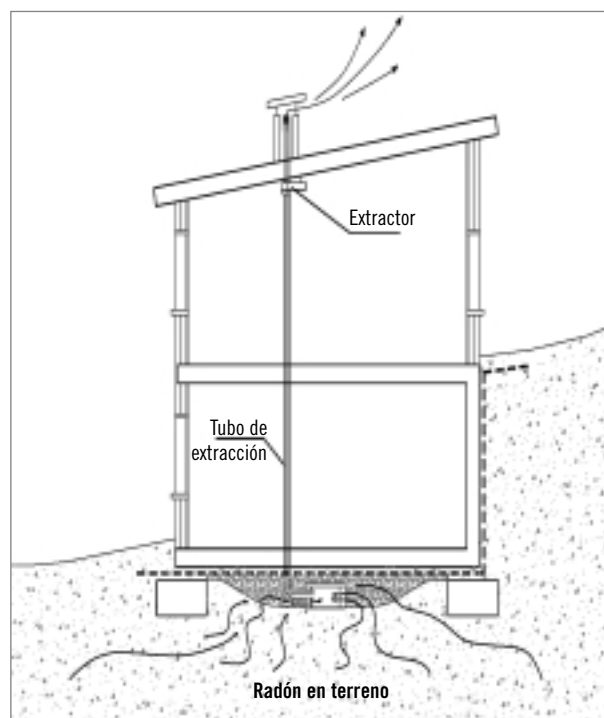


Figura 2.4. Esquema gráfico de un sistema de extracción por arqueta captadora bajo solera



Categoría 0: sin actuación

La categoría 0 comprende zonas de baja exhalación de radón, bien por la escasa actividad de radón en el terreno, bien por una baja permeabilidad del mismo o bien por la combinación de ambas. Cuando, tras la aplicación del cuadro de categorías de exposición (tabla 2.1), en el que se deben tener los datos de permeabilidad y concentración de radón en terreno, se obtenga esta clasificación, se entiende que la cantidad de radón que alcanza la superficie es baja y que por tanto no es necesario prever técnicas de protección en el proyecto arquitectónico.

Categoría 1: protección básica

En esta categoría, la exhalación de radón es superior y se aconseja la incorporación en el proyecto de

alguna de las técnicas que han demostrado una protección básica.

La experiencia en el estudio de efectividades permite situar algunas medidas de protección como posibles soluciones para esta categoría. No obstante, y como se ha dicho anteriormente, el grado alcanzado en la efectividad de la medida dependerá de varios factores que se deberán tener en cuenta a la hora de ajustar la solución y realizar un diseño detallado de la misma. Algunos de los aspectos a considerar son la superficie de planta a proteger, la tipología constructiva en cuanto a geometría, volumetría y estructura, los materiales de construcción empleados, etc.

A continuación se muestran algunas de las medidas habitualmente usadas para esta categoría, normalmente sistemas pasivos en los que no se requiere un aporte extra de energía tras su instalación:

Figura 2.5. Fotografía del proceso de ejecución de un sistema de barrera colocado en el basamento de una edificación en construcción (The Radon Barrier Company Ltd. Irlanda)



a) Sistemas de barreras antiradón

La función de estas barreras es evitar que el gas radón, procedente del terreno, penetre al interior de las edificaciones. Por tal motivo se deben colocar en todo muro, forjado o solera que esté en contacto con el terreno y deben cubrir la totalidad del área de contacto.

La forma de aplicación y sellados dependen del material empleado. Deberán seguirse las pautas del suministrador en cuanto a la puesta en obra, para evitar fisuras o puntos de fuga en las uniones de la membrana y conseguir la estanquidad necesaria que asegure la eficacia.

La situación de la membrana puede ser por la cara exterior del elemento a proteger, solera o muro, o por la cara interior. Si bien en ambos casos la membrana funcionará correctamente como barrera contra el paso del radón, si la colocamos por la cara exterior del elemento la podremos usar a su vez como barrera impermeabilizante. En cualquier caso, la membrana debe protegerse mediante interposición de capas separadoras (antipunzonantes) para evitar fisuras.

En el apartado 5 se detallan aspectos que deben considerarse para conseguir una correcta aplicación del sistema.

Figura 2.6. Esquema sobre la situación de la barrera, sobre la cara interior o por la cara exterior, en una solera de sótano

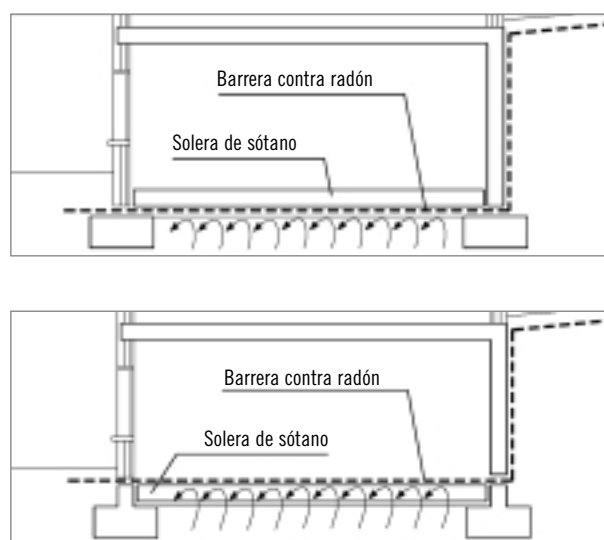
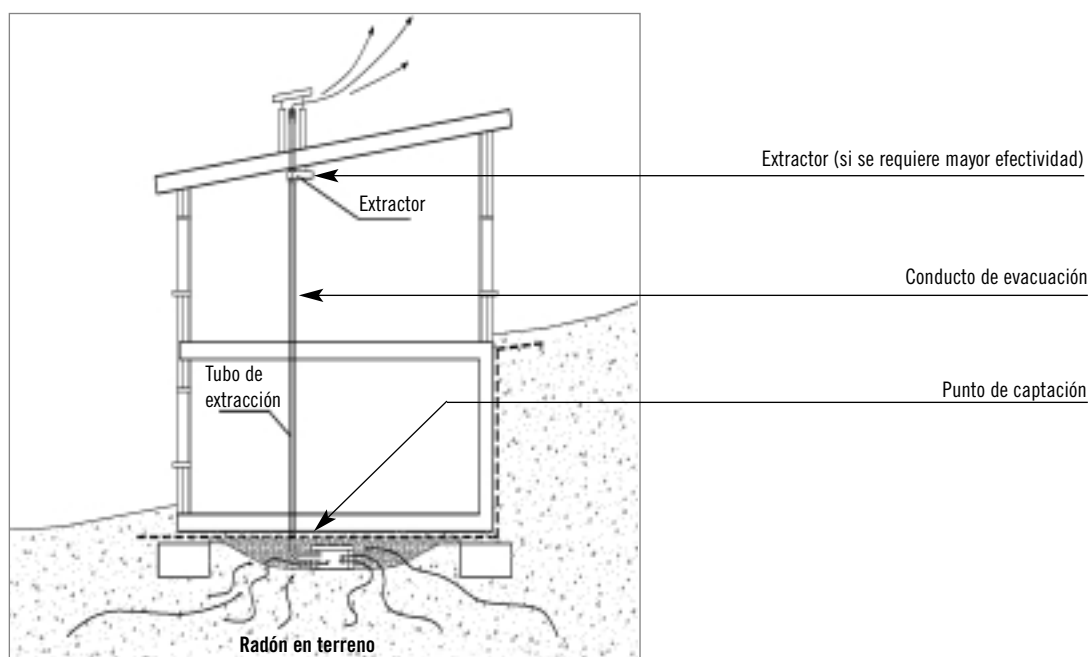


Figura 2.7. Esquema de elementos que componen un sistema de extracción



b) Sistemas de extracción natural

Estos sistemas se basan en extraer el aire con contenido de radón que se encuentra en el terreno sobre el que se apoya la vivienda, y expulsarlo al exterior, evitando en parte, que pasen al interior de los edificios.

Para la extracción es necesario un punto de captación de radón en el terreno conectado a un conducto de evacuación hacia el exterior que funciona por tiro natural. En este tipo de medidas, la evacuación del radón hacia el exterior se produce por procesos naturales debido al gradiente de presiones que se establece entre los poros del terreno y la atmósfera, sin embargo, el sistema permite la incorporación de un extractor mecánico que fuerce el tiro de expulsión y así, conseguir efectividades superiores de reducción de radón. En ese caso, el sistema pasaría a formar parte de las soluciones de protección elevada.

En este tipo de soluciones, la permeabilidad del terreno jugará un papel fundamental en el funcionamiento. Para conseguir mejores efectividades esta debe ser alta para que el radón pueda desplazarse entre los poros del terreno y alcanzar el punto de captación. Si el terreno no presentase esta cualidad, puede remediarse realizando un relleno con grava bajo el piso de asiento del edificio.

Los elementos fundamentales que conforman este sistema son:

Punto de captación

Un punto de captación no es más que un espacio ubicado bajo la vivienda y que por su configuración permite el paso de gases del terreno a su interior. A él acomete un tubo de extracción por el que se evacuarán los gases al exterior.

Pueden ser puntos de captación arquetas permeables enterradas bajo la vivienda que permitan el paso de radón a su interior; cámaras de forjado sanitario a la que acomete el tubo de expulsión, o simplemente una excavación libre bajo la solera de sótano en donde se inserta el tubo.

Conducto de evacuación

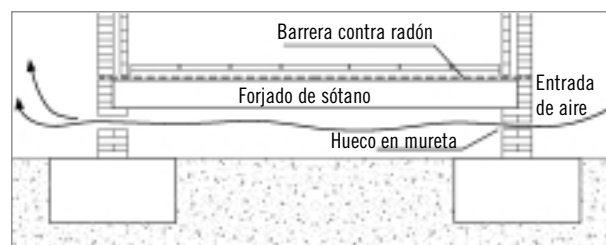
El conducto de evacuación se encarga de conducir los gases desde la captación hasta el exterior del edificio. Lo comúnmente usado para estos propósitos es una tubería plástica de diámetro comprendido entre 110-125 mm, aunque éste puede variar en función del cálculo de necesidades para la cantidad de radón detectada, la permeabilidad del terreno, y los puntos de captación a cubrir.

Lo más efectivo suele ser conducir el tubo de extracción en vertical hasta la cubierta porque de esta manera se incrementa el tiro natural por diferencia de presiones debido a la altura, pero puede hacerse horizontal hasta el exterior de la vivienda atravesando los muros. Esta opción será válida siempre y cuando se produzca un tiro natural.

Esta última opción es adecuada para edificios contruidos con cámara de aire bajo forjado sanitario ya que practicando perforaciones en los muretes del mismo se puede inducir una corriente de ventilación que elimine el radón acumulado. Esta práctica constructiva posee la ventaja de proteger el edificio contra la humedad y contra el radón (ver figura 2.8).

Esta solución aparece referenciada en las Normas do Hábitat Galego² como sistema de protección frente a radón en viviendas de nueva ejecución, dentro del territorio gallego.

Figura 2.8. Ventilación de cámara de forjado sanitario



² Consellería de Vivenda e Solo, Galicia 2008. Decreto 262/2007, de 20 de diciembre por el que aprueban las Normas do Hábitat Galego. DOGA nº 12, 17 de enero de 2008, p. 1.110-1.150.

Todos estos sistemas de extracción pueden mejorarse en cuanto a la efectividad, incorporando un extractor mecánico que fuerce el tiro para conseguir evacuar mayor cantidad de radón. De esta manera el sistema consigue una protección elevada y es considerado apto para su aplicación en la categoría 2 de exposición al radón.

El uso de este tipo de soluciones está cada vez más extendido ya que posee la ventaja de aumentar su capacidad de reducción de radón instalando un extractor. Resulta útil en casos en los que, al verificar la concentración de radón en el edificio construido con un sistema de extracción natural, las concentraciones resultantes no fueran las esperadas.

En el apartado 5 se detallan más aspectos sobre estos sistemas y sus posibles variantes.

Categoría 2: protección elevada

En esta categoría, la exhalación de radón es la más alta, y por tanto se aconsejan soluciones de alta efectividad.

Las soluciones que suelen emplearse para esta categoría suelen ser del tipo de extracción o presurización, en las que se hace uso de extractores mecánicos. Para conseguir mayor efectividad se suelen complementar con sistemas de barreras antiradón.

Por el uso de aparatos eléctricos, estas soluciones requieren aporte de energía para su puesta en marcha y un mantenimiento para su correcto funcionamiento.

Este aspecto resulta de suma importancia, ya que si se confía a un extractor la evacuación del radón, y éste dejase de funcionar, las concentraciones se elevarían y no serían detectables hasta que se realizasen nuevos registros de radón. El riesgo en este caso sería muy

elevado al tratarse de zonas de categoría máxima de exposición al radón. Para evitar problemas es recomendable el uso de alarmas de aviso en caso de fallo del extractor o de suministro de energía.

Los sistemas que se muestran a continuación son habituales para aplicaciones de protección elevada:

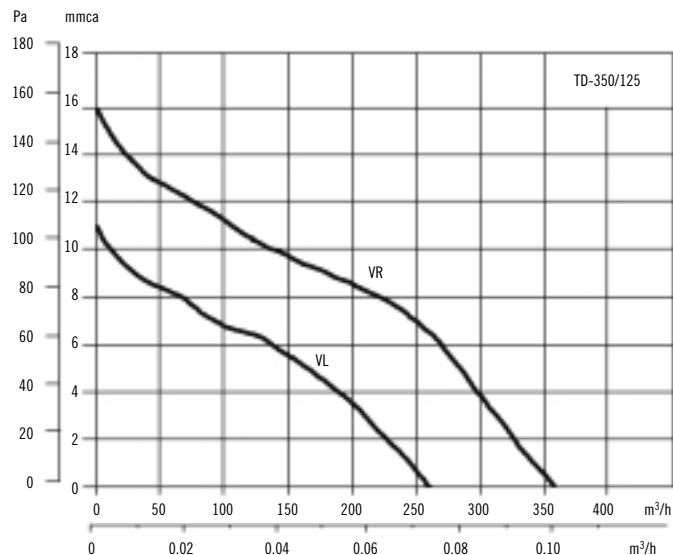
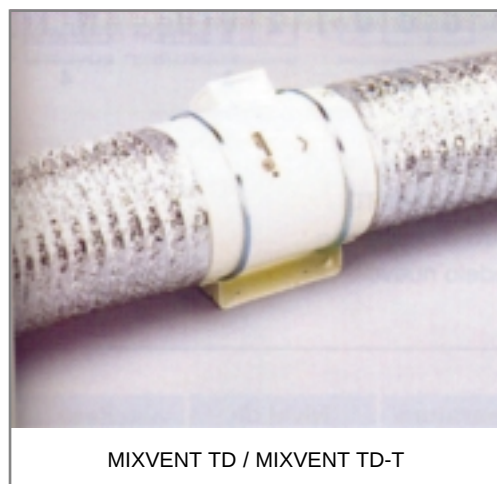
a) Sistemas de extracción forzada

El funcionamiento es el mismo que el descrito para la categoría 1, con la salvedad de la incorporación de un extractor para forzar el tiro de evacuación. La succión que genera, en el punto de captación, es mayor y constante, y el radón es evacuado a la atmósfera en mayor cantidad que en una extracción de tiro natural.

Las potencias de extractores suelen estar comprendidas en el rango de 50-100 W para un radio de cobertura de terreno de 15 m desde el punto de captación, aunque pueden aumentarse para conseguir abarcar mayor cantidad de terreno y así, ajustarse a la superficie de planta de edificio que se necesite proteger. No obstante, estas precisiones se deben realizar para cada caso concreto considerando los siguientes aspectos:

- Permeabilidad del terreno. Es posible que para casos de permeabilidad baja, se necesiten potencias de extracción superiores para captar el radón del terreno.
- Concentración de radón en terreno. Cuanta más concentración se detecte, mayor será la potencia requerida.
- Puntos de captación. Si se instalan varios puntos de captación bajo la vivienda, es recomendable elevar la potencia hasta dar cobertura a todos ellos. Lo mismo ocurre para casos en los que se desee cubrir mayor superficie de terreno.

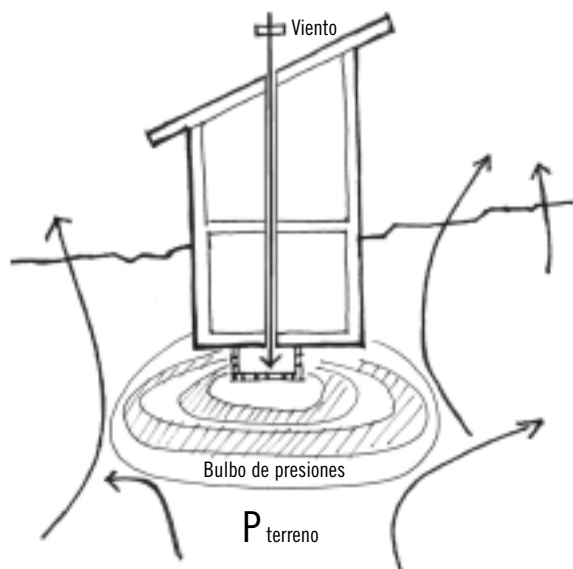
Figura 2.9. Ejemplo de extractor helico-centrífugo colocado en el conducto de evacuación. El gráfico muestra las curvas de presión generadas en función del caudal para un modelo con 56 W de potencia



b) Sistemas de presurización

Este tipo de soluciones basan su funcionamiento en invertir el flujo de aire del extractor para insuflarlo en el punto de captación. De esta manera lo que se crea en la arqueta no es una depresión que capte el gas

Figura 2.10. Esquema de funcionamiento de un sistema de presurización



del terreno y lo expulse fuera, sino un bulbo de presiones positivas a su alrededor que obliga al gas a recorrer otros caminos para alcanzar la atmósfera.

c) Sistemas de ventilación de cámara de forjado sanitario

Desde un punto de vista arquitectónico, en ocasiones se prefiere realizar un forjado sanitario (forjado de planta baja elevado sobre el terreno) en lugar de apoyar una solera de hormigón directamente sobre el terreno con el fin de solucionar, entre otras cosas, problemas de infiltración de humedad.

Esta cámara de aire funciona como un espacio de captación de radón, que puede ventilarse a través de los muretes de apoyo, para evacuar el gas hacia el exterior. Para casos de categoría 2 de exposición al radón, es recomendable procurar una ventilación forzada de este espacio, permitiendo la entrada de aire nuevo desde los muretes opuestos al de extracción.

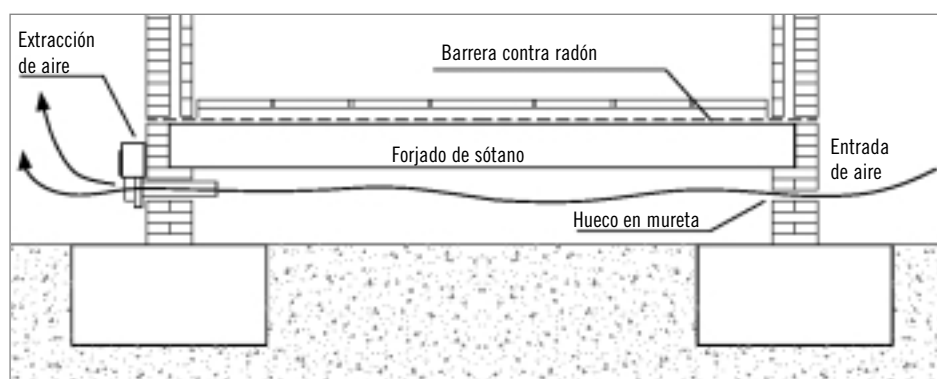
d) Complemento a los sistemas de extracción forzada con barreras antiradón

Se trata de usar conjuntamente los sistemas de extracción forzada con los sistemas de barreras frente a

radón en los elementos de cerramiento que estén en contacto con el terreno. De esta manera se consigue

una protección extra aconsejada para situaciones de alta concentración de radón.

Figura 2.11. Ventilación forzada de la cámara de forjado sanitario



5. Consideraciones particulares sobre la ejecución y diseño de las soluciones de protección. Tratamiento de puntos conflictivos

Como se desprende de las investigaciones, la efectividad de los sistemas que se han mostrado depende enormemente de la buena ejecución de los mismos y de una serie de particularidades que se han de tener en cuenta.

5.1. Tipos de barreras antiradón y materiales empleados

La característica fundamental que deben cumplir las barreras es ser impermeables frente al paso del radón. Esto es relativamente fácil de conseguir con diferentes materiales, ya que dependerá básicamente del espesor del mismo para un material dado. Pero es más complicado conseguir esta estanquidad cuando sometemos a la barrera a diferentes procesos de puesta en obra y a futuros movimientos diferenciales de las estructuras soporte.

La lámina, cuando se coloca sobre el terreno, deberá soportar el peso de la losa de solera y no punzonarse con las irregularidades de la misma y del propio terreno. Por otro lado, cuando se coloca encima de la

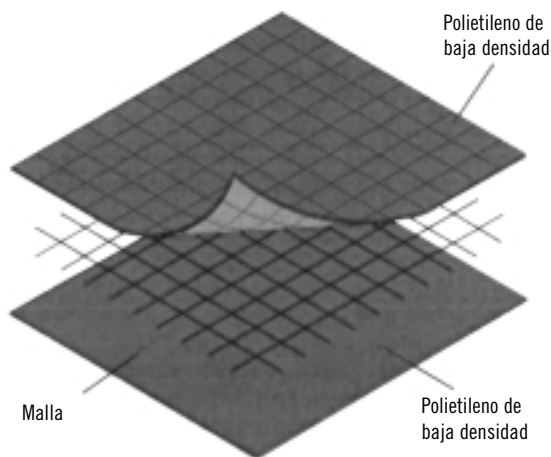
solera también deberá resistir el peso del solado y no punzonarse con la capa superior de la solera. También deben ser resistentes al paso de personal de la obra durante su colocación y durante el proceso constructivo de las fases siguientes, solado, vertido de morteros, etc.

Aparte de la impermeabilidad, se les exigirá altas resistencias al punzonamiento, al desgarró, y a la tracción, para evitar fisuras durante la ejecución y la vida útil de la membrana. La elongación también es importante para absorber dilataciones del soporte y no fisurarse. Por otro lado, es frecuente el uso de fieltros separadores para desligar la membrana barrera del soporte donde esté instalada y absorber las irregularidades.

Normalmente estas características se consiguen mediante la adición de capas a la membrana y el aumento del grosor de la misma. Las mallas incorporadas a las láminas aumentan las resistencias mecánicas, mientras que las láminas de aluminio incorporadas entre las capas de la membrana le confieren mayor resistencia al paso de radón.

Los materiales empleados son diversos. A continuación figuran algunos ejemplos usados actualmente en otros países:

Figura 2.12. Ejemplo de una membrana multicapa de la empresa Monarflex. Reino Unido



Láminas de polietileno:

Este material es adecuado por ser completamente barrera de vapor y evitar por tanto el paso del aire. Aún así, cuando se emplea polietileno de baja densidad, aparecen diversas capas de refuerzo, como mallas de poliéster, fibra de vidrio o polietileno de alta densidad.

- Láminas de polietileno de baja densidad reforzadas con malla de poliéster y lámina de aluminio.
- Láminas de polietileno de baja densidad con incorporación de malla de polietileno de alta densidad.
- Lámina de polietileno de baja densidad aditivada con flexibilizantes.

Láminas bituminosas:

Este tipo de lámina cumple con la resistencia al paso del gas, pero son muy dúctiles y sus resistencias mecánicas son escasas. Es común encontrarlas con refuerzos de mallas.

Láminas de cauchos:

Se encuentran cauchos reforzados con láminas de aluminio. Estos sistemas son muy flexibles y duraderos, aunque suponen un mayor coste económico.

Láminas de PVC:

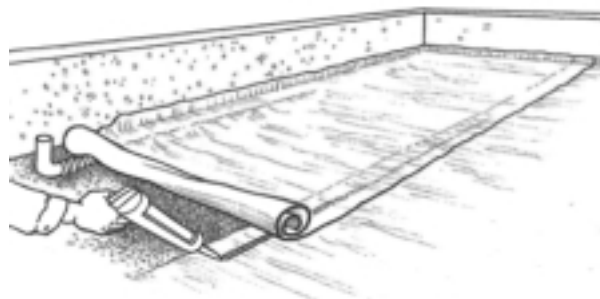
El problema fundamental del PVC radica en su rigidez. Para conseguir mayor flexibilidad se introducen plastificantes como aditivos en su masa polimérica. Estos plastificantes tienden, con el paso del tiempo, a escapar de la cadena polimérica y por tanto a rigidizar la membrana que podrá partirse o fisurarse.

Sistemas líquidos:

Estos sistemas se conforman por aplicación en líquido, que al catalizar, configuran una membrana continua con ausencia de solapes como ocurre en el resto de láminas comercializadas en rollo. Ello supone una ventaja al eliminar el punto conflictivo que implica el sellado de dos bandas consecutivas. Se pueden encontrar sistemas en base a poliuretanos, acrílicos, etc., muy similares a los usados para impermeabilizar frente al agua. En algunas ocasiones, la aplicación se realiza con la incorporación de algún tipo de malla de refuerzo para aumentar las resistencias mecánicas.

En cuanto a la forma de aplicación, se encuentran sistemas que hacen uso de rodillo y brocha, y sistemas que requieren una máquina para proyectar el material sobre la superficie a tratar, lo que facilita la tarea para grandes superficies.

Figura 2.13. Tratamiento de solapes con adhesivos³



³ EPA (Environmental Protection Agency). *Building Radon Out*. USA 2001.

5.2. Sobre la ejecución de la barrera

Hay que prestar especial atención a las uniones entre láminas y realizar correctamente, y según las especificaciones del fabricante, los solapes entre bandas.

Se debe conseguir una estanquidad total en todo elemento que esté en contacto con el terreno. Para ello es preciso prolongar la barrera hasta sobrepasar los muros de cerramiento teniendo en cuenta que se deben mantener las juntas de dilatación. Éstas se resuelven con mecanismos similares a los usados en láminas impermeabilizantes.

Si durante la puesta en obra se produjese algún daño en la lámina, se remachará con fragmentos de lámina.

El apoyo de la lámina debe ser sobre una superficie limpia y estable. Si se coloca sobre el forjado o solera, es aconsejable hacerlo sobre una capa de mortero de regularización. Si se coloca sobre el terreno, se recomienda extender una capa de 5 cm de arena y una membrana de tipo fieltro antiraíces para posteriormente apoyar la barrera contra radón.

5.3. Tratamiento de juntas de estructura, soleras y forjados

Como en cualquier sistema constructivo, debe existir compatibilidad de movimientos entre los diferentes materiales, y si por las circunstancias que fueran esto no es posible, se deberán buscar las soluciones adecuadas para permitir que estos movimientos no afecten negativamente a los componentes de los subsistemas.

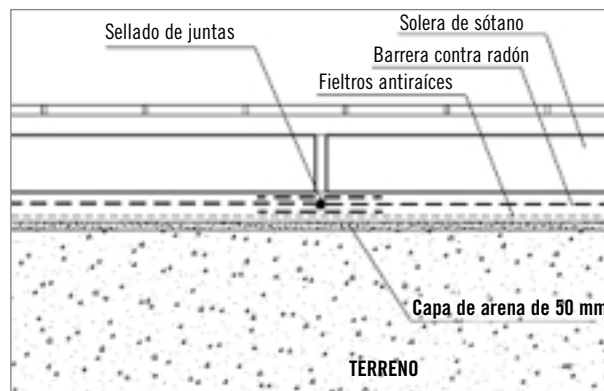
El tratamiento de juntas de dilatación, o juntas estructurales es una práctica habitual en la construcción y consiste en desligar los materiales para independizar movimientos. En sistemas de impermeabilización tanto en cubiertas como en muros de sótano o soleras, se suelen usar juntas elásticas, sellado con masillas elásticas, refuerzo de las membranas de impermeabilización, etc.

En membranas que actúan como barreras contra el gas radón se deberá actuar de la misma forma y desligar los movimientos de los soportes de la membrana para evitar que ésta llegue a romperse. La diferencia entre

el tratamiento que se da a los sistemas de impermeabilización y los de protección frente al gas radón estriba únicamente en el extremado cuidado con el que se ha de actuar en estos últimos por tratarse de un gas y no de un líquido, y que cualquier fisura, por pequeña que sea, puede constituir una vía de entrada del gas.

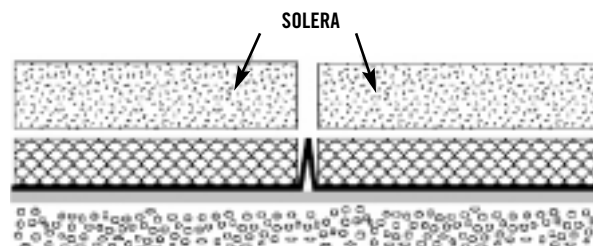
En la siguiente figura se muestra un ejemplo de cómo tratar una junta de dilatación de una solera de sótano bajo la cual se ha instalado una barrera protectora frente al gas.

Figura 2.14. Tratamiento de junta mediante la superposición de capas de membrana que permiten la absorción del movimiento por dilatación de la solera



En la siguiente figura se ve otra posible solución que consiste en plegar la membrana en la zona de la junta para dejar una pequeña holgura en ella y que los movimientos que se produzcan no lleguen a romperla.

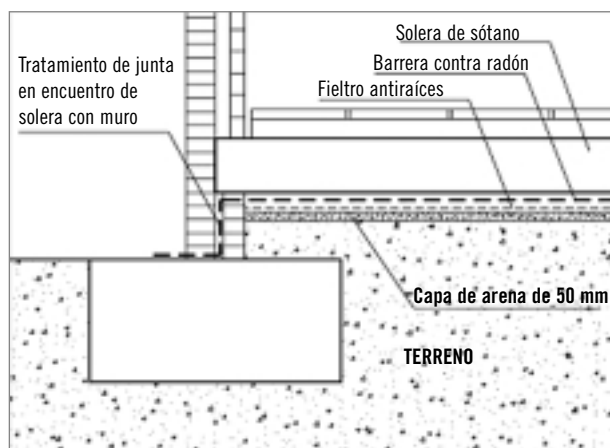
Figura 2.15. Plegado de la membrana en las juntas⁴



⁴ Dura Skrim 15 WW Radon Resisting Membrans. Raven Industries. USA.

Otra junta aparece en el encuentro de soleras con muros perimetrales. La figura 2.16 muestra una posible solución constructiva de este encuentro.

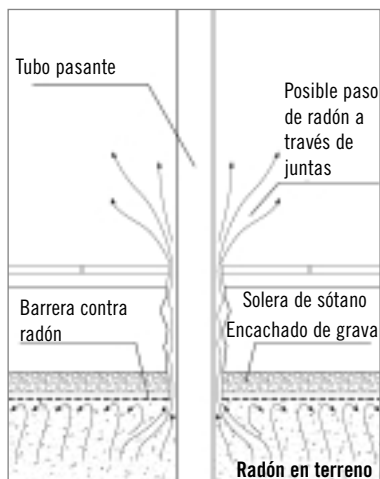
Figura 2.16. Ejemplo de tratamiento de encuentros entre cerramientos y soleras



5.4. Paso de conductos a través de la barrera

Es habitual que la red vertical de saneamiento de un edificio perfora la solera o forjado de sótano para conectarse a la distribución horizontal que se suele dejar oculta bajo la vivienda. En esta operación se debe atravesar la lámina de protección y, si no se resuelve de un modo correcto, es posible que pierda eficacia por fugas.

Figura 2.17. Pérdida de estanquidad por paso de conductos



Aunque se pueden usar sistemas tradicionales de sellado como masillas, morteros poliméricos, o membranas solapadas, lo más aconsejable es usar piezas prefabricadas que garanticen una unión limpia del tubo pasante y la membrana.

Figura 2.18. Piezas de sellado para paso de conductos. Ejemplo de la empresa Monarflex, Reino Unido

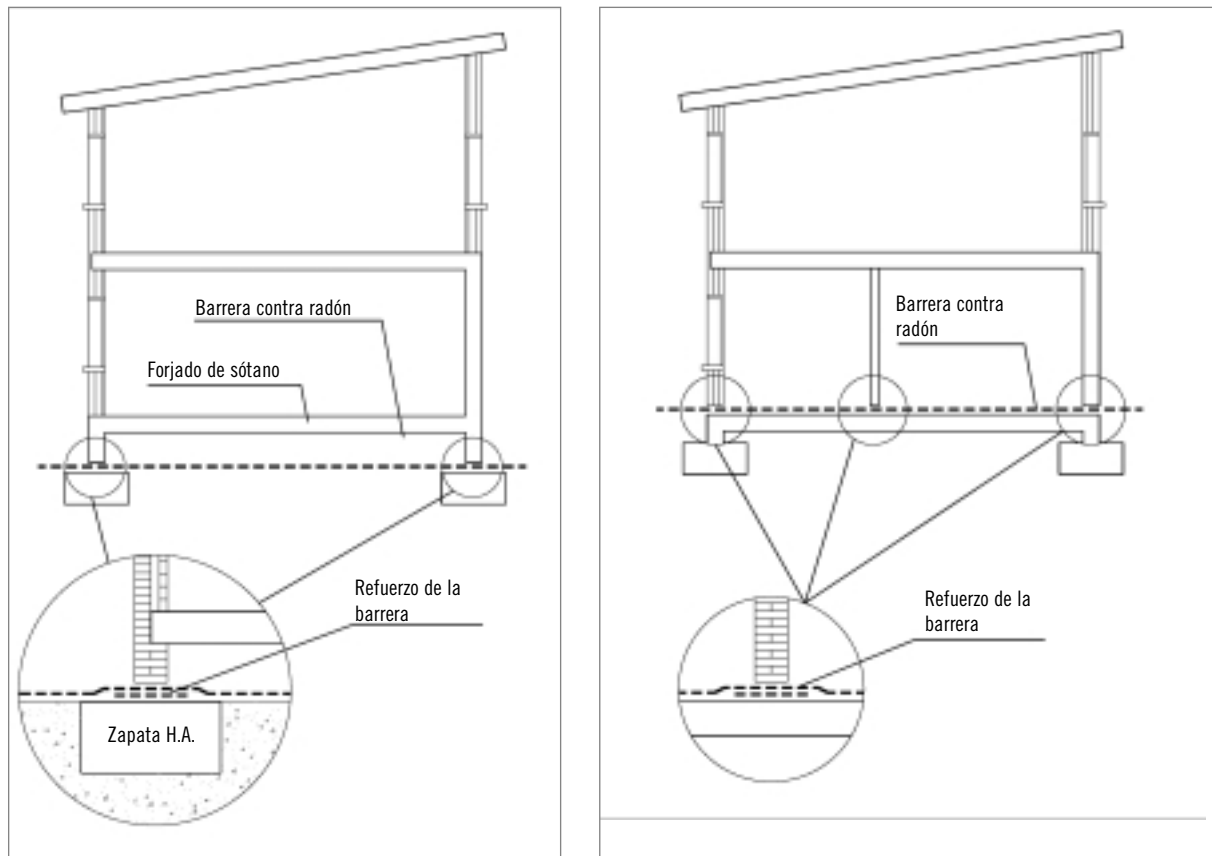


5.5. Refuerzos en barreras

La membrana es un elemento con resistencias limitadas. Un poro en la misma, provocado por una puesta en obra incorrecta, o por un exceso de cargas en la lámina, es un camino para la entrada de radón. Por tal motivo, cualquier punto en donde se prevean cargas extra a la membrana, deberá tenerse en cuenta y reforzarse con más capas u otros materiales.

En la siguiente figura se muestran ejemplos de refuerzos de puntos de sobre carga:

Figura 2.19. Ejemplos de refuerzo de membrana en apoyos de muros y tabiques



5.6. Fisuras en solera

Para evitar las posibles fisuras que puedan aparecer en el hormigón, se recomienda el uso de hormigones bien dosificados y aditivados, para garantizar un fraguado sin fisuras.

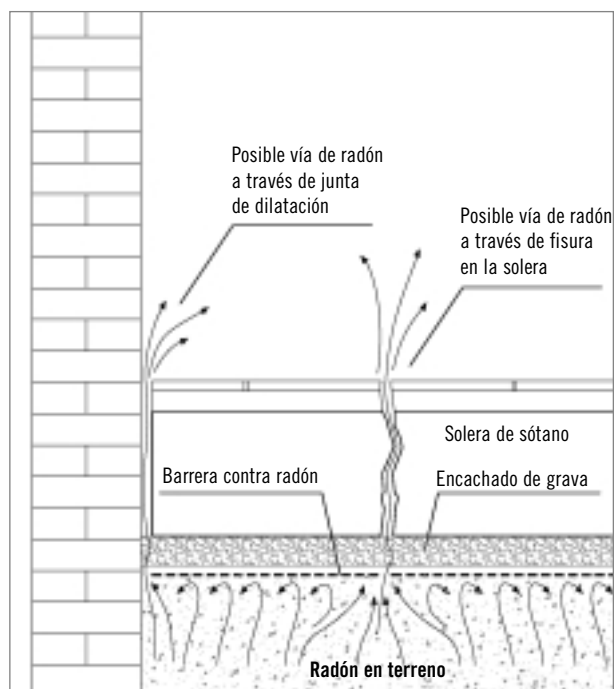


Figura 2.20. Una fisuración de la solera de hormigón crea una vía preferente para el paso del gas

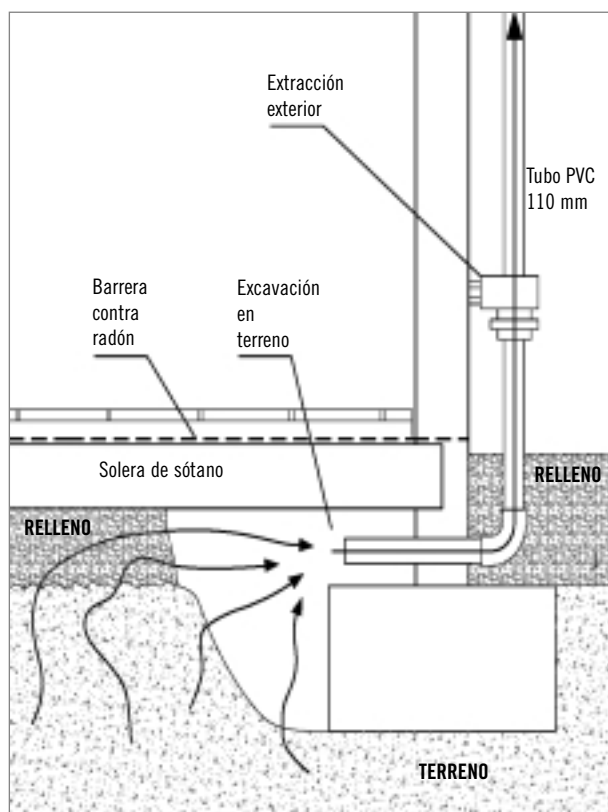
5.7. Puntos de captación en sistemas extracción

Normalmente se usan unas arquetas parecidas a las de las redes de saneamiento, con la salvedad de que la interfaz con el terreno debe ser porosa para permitir el paso del gas al interior.

Si se utilizan barreras para complementar el sistema, su instalación es siempre bajo la misma y se puede hacer de diversas formas. A continuación se muestran unos ejemplos de los sistemas que actualmente se están utilizando.

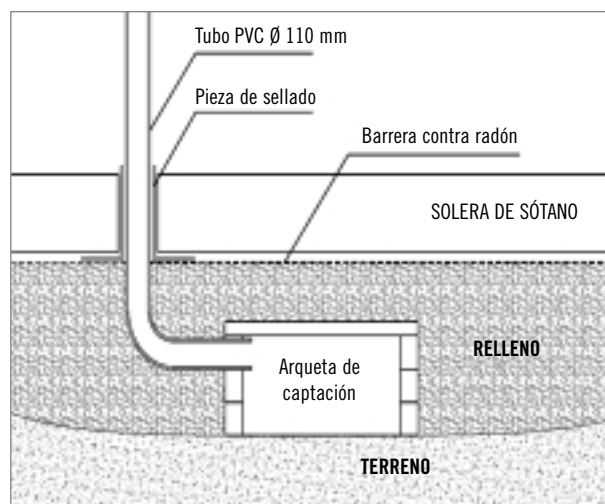
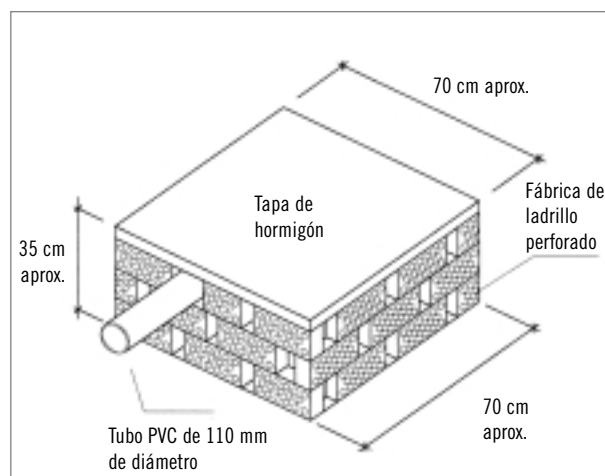
- El más simple de todos ellos consiste en dejar una oquedad en el terreno bajo la barrera, desde la cual un tubo de evacuación extraerá el gas. En este caso se debe evitar la posible inundación de la excavación y se debe mantener su volumen hueco evitando desprendimientos.

Figura 2.21. Punto de captación realizado mediante excavación



- Mediante la instalación de una arqueta de captación hecha *in situ*. Ésta debe tener orificios en las paredes para permitir la entrada de gases, por lo que se suele realizar con ladrillo perforado colocado en sentido transversal

Figura 2.22. Modelo de arqueta de captación hecha *in situ* con ladrillo perforado



- Aparte de estos sistemas de fabricación *in situ* con elementos convencionales, existen empresas en el mercado que han desarrollado multitud de elementos prefabricados que actúan como puntos de captación del gas.

Figura 2.23. Ejemplo de modelo de arqueta prefabricada de la empresa Wavin Ireland (Limited Balbriggan Co. Dublín)



- Existen otros sistemas de extracción algo más sofisticados que se han desarrollado últimamente:

Figura 2.24. Sistema de captación basado en un suelo flotante realizado con paneles de poliestireno expandido con tallas en su base que permiten el paso del aire entre los surcos. Aerobord Ltd. (Askeaton, Co. Limerick)

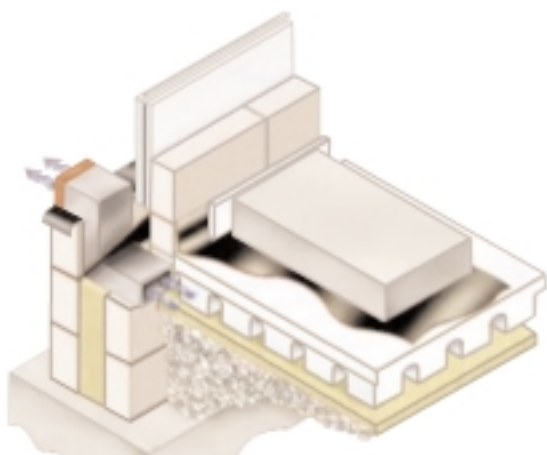
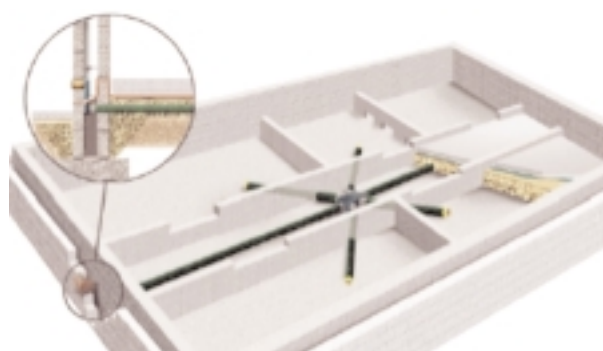
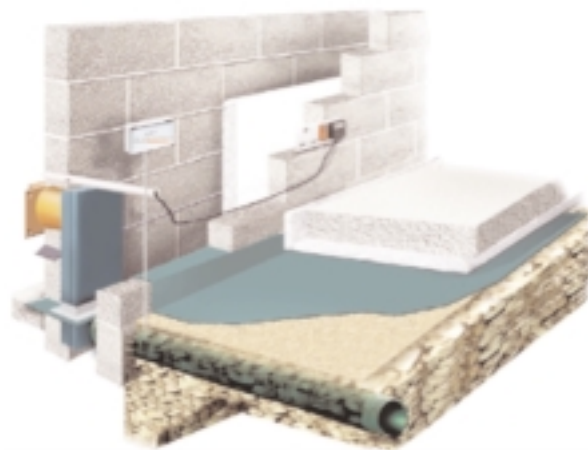


Figura 2.25. Sistema de captación que basa su funcionamiento en una serie de tubos perforados y enterrados bajo la vivienda, similares a los usados como tuberías de drenaje, que se conectan a un extractor. Rad Safe Supplies Ltd.

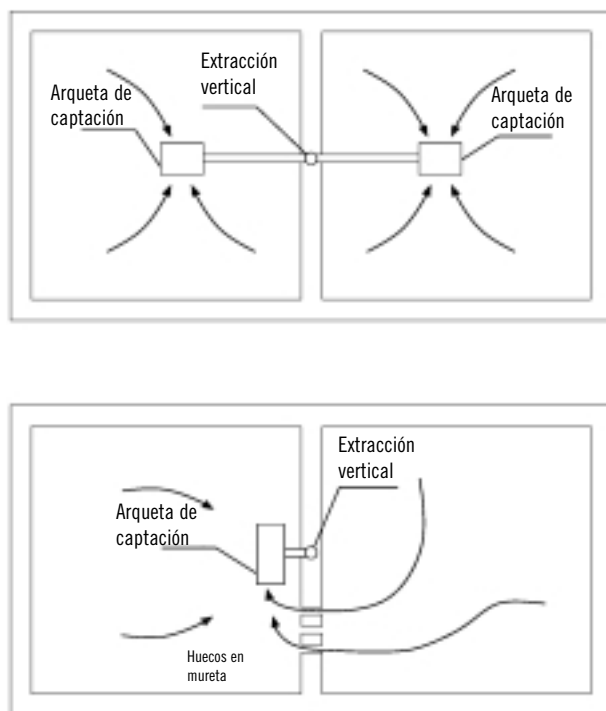


5.8. Situación de los puntos de captación

Para tener la planta del edificio cubierta con los sistemas de extracción, es recomendable colocar los puntos de captación de tal manera, que los radios de acción de los mismos, cubran la superficie de planta en su totalidad. La cantidad de captadores y su colocación dependerá de la permeabilidad del terreno, de la superficie de planta, y de la solución de tiro, natural o forzado.

Un único extractor puede dar servicio a más de un captador. La siguiente figura muestra un ejemplo de situación de varios captadores para una única extracción vertical.

Figura 2.26. Posibles soluciones de unión de puntos de captación para una misma tubería de *extracción*



En determinadas situaciones de permeabilidad alta del terreno, se puede situar un punto de captación enterrado por el exterior del edificio y lo más cercano a él. De esta manera, si la permeabilidad del terreno lo permite, la extracción desde ese punto puede llegar a abarcar la totalidad de la planta sin que tenga que estar situado justo debajo. En estos casos también influirá la mayor potencia de un extractor. Esta técnica se usa habitualmente en viviendas construidas en las que intervenir por el interior implicaría ejecutar obra en la propia vivienda.

En un sentido más amplio, puede usarse un extractor de gran potencia que cubra un área de terreno suficientemente grande como para solucionar la protección de varias viviendas. Lógicamente, esta solución podrá usarse siempre y cuando las permeabilidades sean altas y las potencias de extracción altas. No obstante conviene hacer cálculos, mediante

sistemas de flujos, para averiguar qué superficie puede cubrirse con un extractor de gran potencia colocado en un punto de captación.

Figura 2.27. Un ejemplo de cómo un punto de captación puede dar servicio a varias viviendas cubriendo una gran superficie de succión. Estos cálculos pueden realizarse con programas de análisis de fluidos



5.9. Sobre la ventilación de una vivienda

Al ventilar una vivienda es previsible una reducción de radón al intercambiar aire con el exterior que presenta menos concentración que el aire del interior. Al introducir aire desde el exterior, las condiciones térmicas interiores no quedarán aseguradas y será necesario recurrir a equipos de calor o frío que supondrán un mayor gasto energético. Por este motivo, la ventilación no es una técnica recomendable en situaciones en las que el intercambio de aire con el exterior suponga una merma de las condiciones térmicas.

Por otro lado, si únicamente se expulsa aire de la vivienda, o si la inmisión de aire nuevo procedente del exterior es insuficiente comparado con la expulsión, puede generarse una depresión interior que potencie una succión de radón proveniente del terreno y por tanto aumentar los niveles de concentración interior.

LA EXPERIENCIA ADQUIRIDA EN LAS SOLUCIONES
CONTRA LA INMISIÓN DE RADÓN



3

El conocer de primera mano lo que ya han sido experiencias contrastadas en otros países determinó el planteamiento de un estudio experimental con el fin de abordar la protección frente a la inmisión de gas radón con tipologías, materiales, y técnicas constructivas propias de la construcción actual en España.

Como base de partida para la investigación se tuvo en cuenta la simplicidad de las técnicas constructivas, con utilización de materiales básicos y, fundamentalmente, una elección de terreno con altas concentraciones de radón para evaluar los límites en la efectividad de las técnicas.

A continuación se resume el trabajo que se realizó. Constituye un avance en los conocimientos sobre las técnicas de protección frente al gas radón y puede ser la base de posteriores estudios, y una aportación técnica a tener en cuenta en la elaboración de una propuesta normativa.

1. Planteamiento de un proyecto experimental

El proyecto tuvo por título el *Estudio de la viabilidad y efectividad de las acciones de remedio ante la presencia de gas radón en edificios existentes* y fue subvencionado por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

El fin perseguido fue el de constituir una base técnica, con una experiencia real de aplicación de técnicas constructivas destinadas a frenar la inmisión de gas radón, para dar apoyo al documento de soluciones constructivas mostrado en el apartado anterior.

Para ello, se consideró estudiar el comportamiento del gas radón en el interior de un módulo real de vivienda construido con las características tipológicas propias de España, y ensayar posteriormente los diferentes sistemas de protección frente a la entrada de radón. Esto supuso la realización de las siguientes tareas:

- Actualización del estado bibliográfico referente a técnicas de protección frente a la entrada de gas radón en edificios existentes. Este apartado es el primer paso y base para la comprensión de los fundamentos de las técnicas de protección y para el diseño con materiales propios del país.

- Elección de una zona con altas tasas de exhalación de radón en terreno donde construir el módulo para poder estudiar, entre otras, las soluciones correctoras con mayor efectividad.
- Diseñar un módulo real que reproduzca las características tipológicas de una vivienda unifamiliar con dos alturas y parte semienterrada.
- Construir el módulo con técnicas y materiales propios del lugar.
- Estudiar las concentraciones de radón registradas en los diferentes espacios del interior del módulo y correlacionarlas con las variables meteorológicas.
- Intervenir en el módulo para introducir las distintas soluciones correctoras con el fin de disminuir las concentraciones iniciales.
- Estudiar en cada fase las concentraciones registradas y analizarlas en función de las variables meteorológicas cuando proceda.
- Analizar la efectividad de cada solución correctora y la viabilidad de introducir dichas medidas en un módulo de vivienda ya construido.

El proyecto, subvencionado por el Consejo de Seguridad Nuclear, fue desarrollado entre los años 2005 y 2006.

El equipo investigador estuvo compuesto por personal del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC) y por personal de la Cátedra de Física Médica de la Universidad de Cantabria.

A continuación se detallan las distintas fases que se desarrollaron.

1.1. Elección de la ubicación

Para la elección del lugar donde ubicar el módulo se siguieron los siguientes criterios:

- La alta presencia de radón registrada en la zona. Ello nos permitiría plantearnos situaciones de alto riesgo y plantear soluciones de alta efectividad.

- Facilidad de construcción y consulta de datos climáticos en una estación meteorológica cercana.

A través de los mapas de radón (Consejo de Seguridad Nuclear) se observó que, la región oeste de la provincia de Salamanca, poseía unos niveles altos de exhalación de radón en el terreno que coincidía con los registros que se tenían de concentración de radón en algunas viviendas en dicha zona.

Para la elección concreta del lugar se contó con la ayuda de Enusa (Industrias Avanzadas, S.A.) que disponía de una mina de extracción de mineral de uranio, junto con una fábrica de concentrados de uranio (actualmente en proceso de desmantelación), cercana a la población de Ciudad Rodrigo, en un lugar en el que predominaba la alta exhalación de radón. La disponibilidad de Enusa en aportar el terreno para la cons-

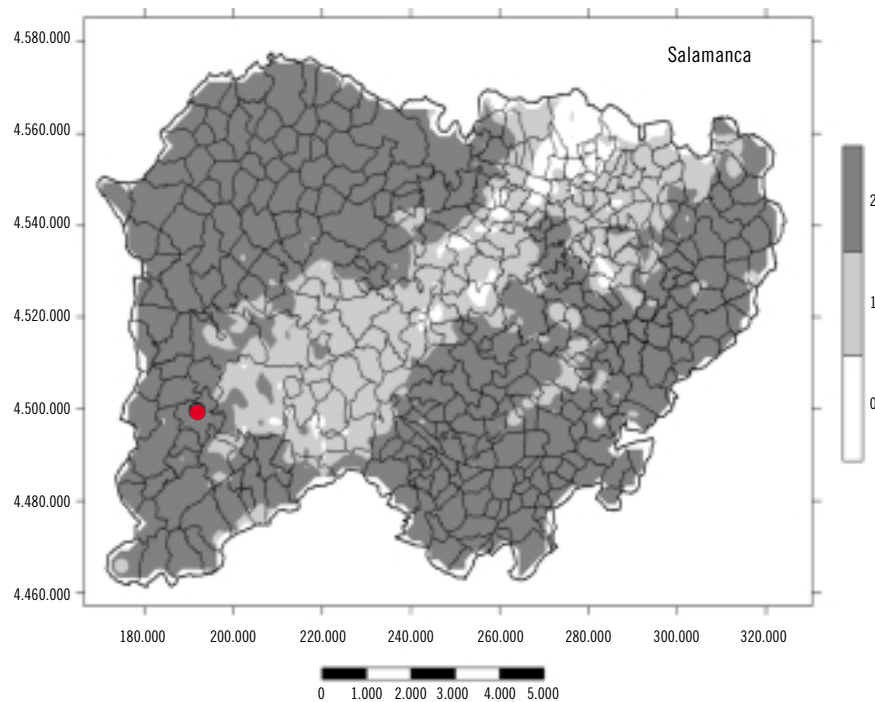
trucción del prototipo de vivienda determinó la elección final de la ubicación.

Tras la elección del lugar apropiado para la construcción del módulo se procedió a realizar una caracterización radiológica del suelo, que consistió básicamente en:

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

A continuación se presentan los principales resultados de los estudios realizados por el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Cátedra de Física Médica de la Universidad de Cantabria:

Figura 3.1. Situación final del modulo experimental en las instalaciones de Enusa, Ciudad Rodrigo, Salamanca



a) Determinación de la concentración de elementos radiactivos en suelo

Se recogieron muestras de suelo, todas ellas representativas del entorno próximo al módulo. Se realizó un análisis por espectrometría gamma al conjunto de muestras, siguiendo los protocolos establecidos por el laboratorio.

De los resultados destaca la elevada concentración de radio (^{226}Ra) comparado con un suelo normal, lo que confirmó la alta exhalación de radón (^{222}Rn) en dicha zona.

b) Evaluación de la concentración de radón en profundidad

Mediante el empleo de una sonda, células de centelleo y equipo contador, se determinó la concentración de radón a un metro de profundidad en la zona de construcción del prototipo de vivienda. 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, si bien es de destacar la gran variabilidad encontrada que oscila entre 70.000 Bq/m³ y 500.000 Bq/m³.

c) Estudio granulométrico del suelo y permeabilidad

Para disponer de una información global del terreno se llevó a cabo un análisis granulométrico del que se obtuvo una permeabilidad media para el suelo de 10⁻¹² m².

Este dato, junto con la concentración de radón en terreno, clasificaba la zona como de alto riesgo según la tabla 2.1 del presente documento.

1.2. Diseño y construcción de un módulo representativo de una edificación habitual en España

El diseño del módulo experimental desarrollado refleja las características básicas de una construcción de vivienda unifamiliar en un entorno rural, con una superficie de planta de 25 m² (5 x 5 m), con una parte enterrada bajo rasante y una planta sobre la superficie

del terreno. De esta manera se pudo ensayar el movimiento del radón tanto en la parte enterrada, con los muros de sótano y solera, como en la parte sobre rasante considerada habitable. El espacio de sótano pudo ser también considerado como cámara de un forjado sanitario.

El sistema constructivo y el diseño del módulo fueron pensados para reproducir las condiciones más desfavorables respecto a la protección frente al radón. Los materiales empleados fueron convencionales y los sistemas constructivos habituales:

- La *excavación* de planta de semisótano alcanza una profundidad de 1,30 metros para la base de la solera. Esta profundidad fue necesaria para estar en condiciones de medir la entrada de radón a través de los muros de sótano.
- El *muro de sótano* se realizó con ladrillo de un pie de espesor (24 cm).
- Las *dos plantas*, sótano y primera, estaban aisladas mediante una puerta de acceso al sótano que permitía reproducir el tránsito de una planta a otra en una vivienda tipo, o la cámara de un forjado sanitario según la solución de protección que se estuviese probando.
- El *cerramiento exterior* se componía de doble hoja de ladrillo con cámara de aire. De esta manera existe una posible vía de entrada del radón a través de dicha cámara.
- La *solera de sótano*, piso, se realizó con un espesor de 20 cm de hormigón armado sobre un encachado de grava de 15 cm.
- La *cubierta* se diseñó plana y con acceso desde el exterior con el fin de poder instalar los extractores de expulsión de aire para las soluciones de arquetas enterradas.

A continuación se muestran los planos y fotografías del módulo construido.

Figura 3.2. Planos de planta del modulo experimental

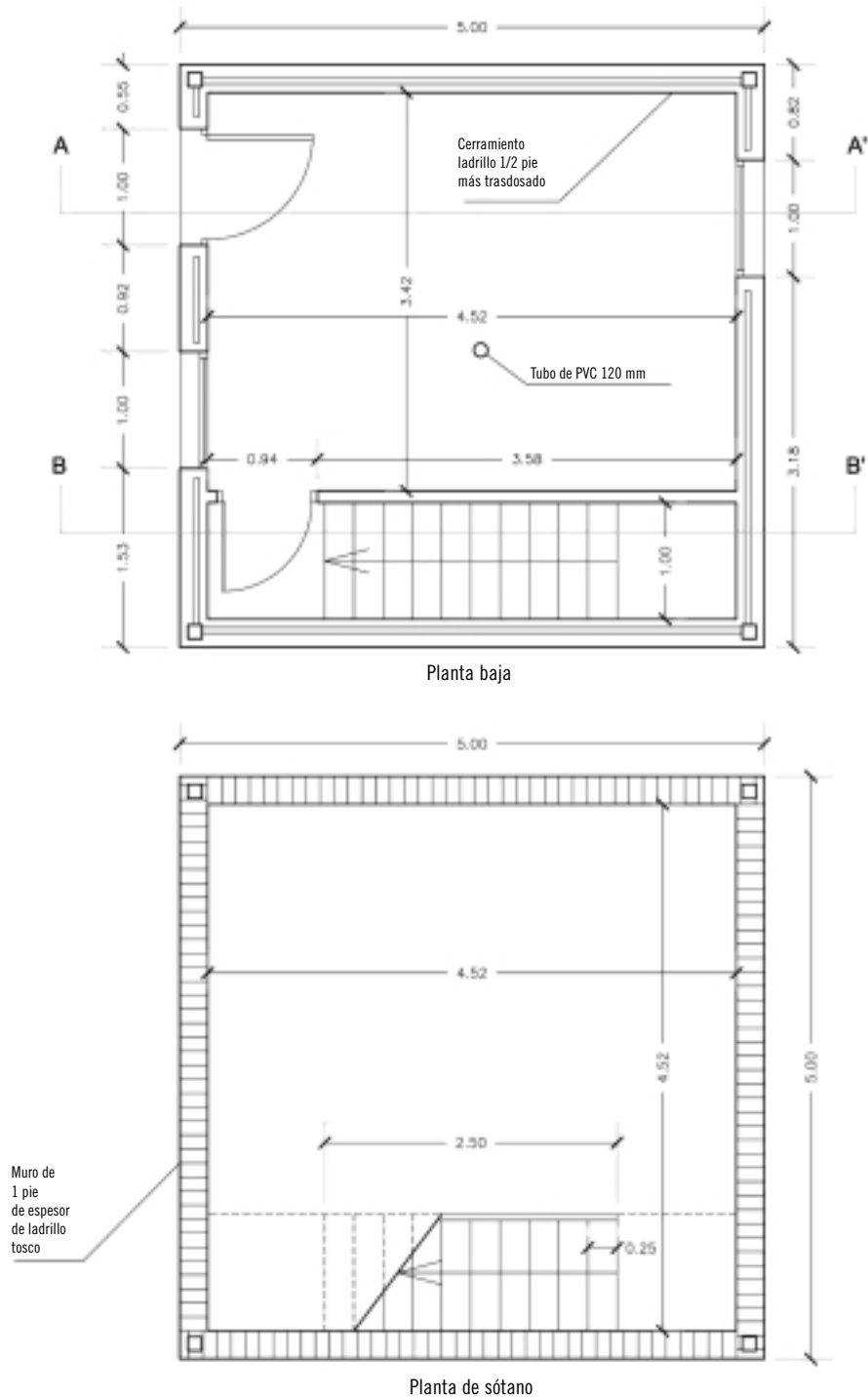


Figura 3.3. Plano de sección constructiva del modulo experimental

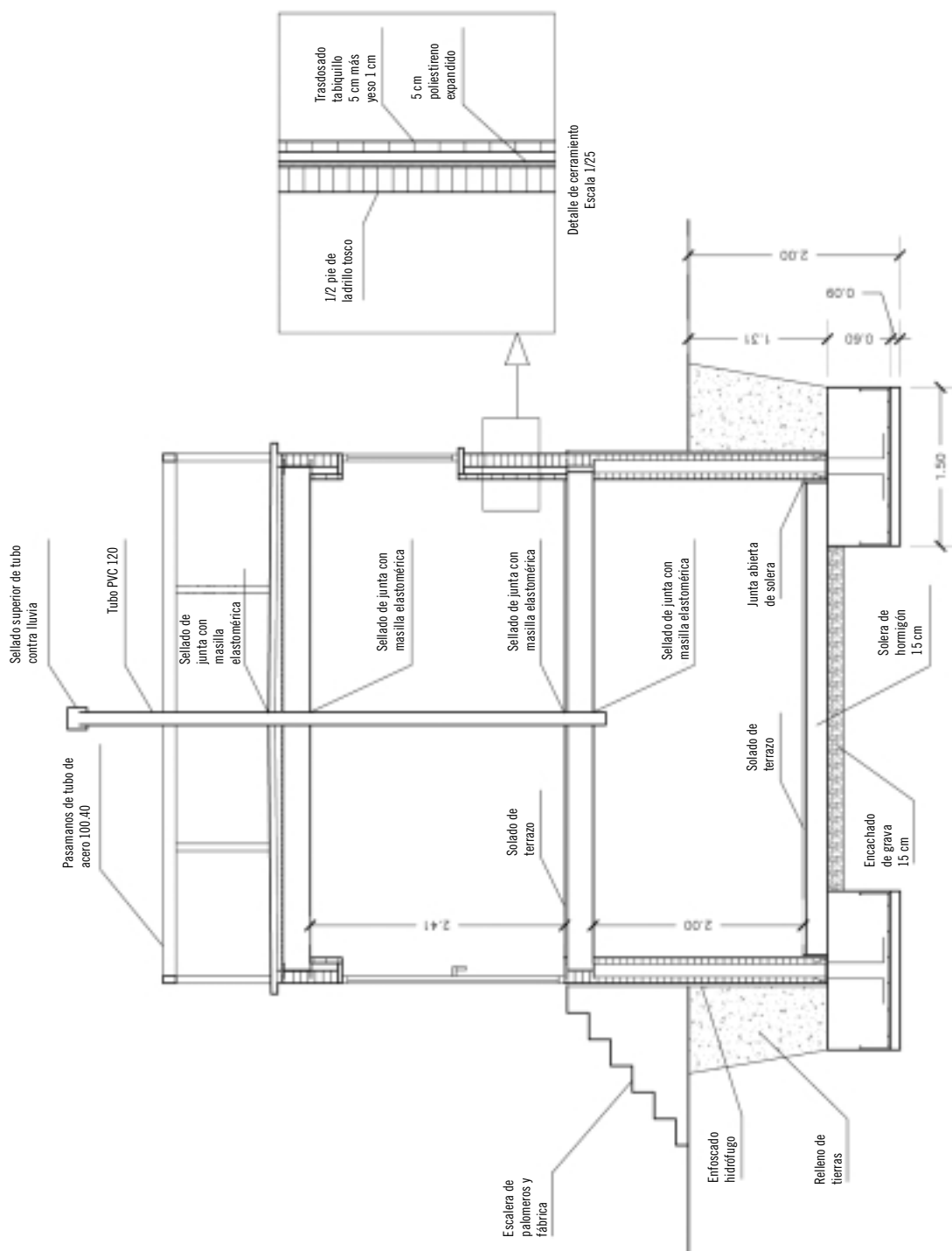


Figura 3.4. Fotografía de la excavación con los muros de sótano



Figura 3.5. Fotografía del módulo terminado



1.3. Dispositivos de medición empleados

En el interior del módulo se instalaron los equipos de medida necesarios para el registro de las concentraciones de radón interior, así como sondas de temperatura y presión.

Un equipo portátil formado por un ordenador central que controlaba y almacenaba la información de los siguientes periféricos:

- Contador Ludlum con bomba de flujo de aire y célula de centelleo de Lucas modificada con sulfuro de zinc.
- Ocho sondas de temperatura.
- Cuatro sondas de diferencia de presión.

Aparte se instalaron medidores de radón en continuo portátiles:

Figura 3.6. Equipos instalados en la planta baja del módulo



- Dos equipos DOSEman de SARAD.
- Dos equipos Scout de SARAD.

Se configuraron para almacenar las concentraciones de radón durante periodos de una hora (tiempo de integración).

Durante el tiempo que duró la investigación se registraron los siguientes parámetros:

- Concentración de radón (Bq/m^3) en sótano y en planta baja, evaluadas con diferentes equipos de medida en continuo como DOSEman y Scout, así como con detectores de trazas CR-39 que proporcionan valores integrados a lo largo de periodos de tiempo mayores. Las medidas realizadas en los mismos intervalos de tiempo han resultado ser equivalentes con los diferentes métodos de medida.
- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en diversas localizaciones en el interior y exterior del módulo mediante ocho sondas controladas por el ordenador portátil.
- Diferencias de presión (Pa) entre varios puntos del módulo con cuatro sensores controlados con el mismo equipo.

Aparte de estos parámetros, la estación meteorológica de Enusa nos proporcionó los siguientes datos que fueron fundamentales para el análisis de las correlaciones entre las concentraciones de radón interior y los cambios atmosféricos.

- Velocidad media del viento (m/s).
- Velocidad máxima del viento (m/s).
- Temperatura media del aire ($^{\circ}\text{C}$).
- Temperatura máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$).
- Humedad relativa media (%).
- Presión media (mb).
- Lluvia acumulada (mm).

2. Análisis de la inmisión de radón en el módulo sin protección

El módulo construido se mantuvo cerrado durante el periodo inicial, aproximadamente cuatro meses, con el fin de estudiar el comportamiento del radón en su interior. Se trataba de una edificación construida sin

ningún tipo de medida de protección frente a la inmisión y, por tanto, cabía esperar la penetración de radón a través de su envolvente.

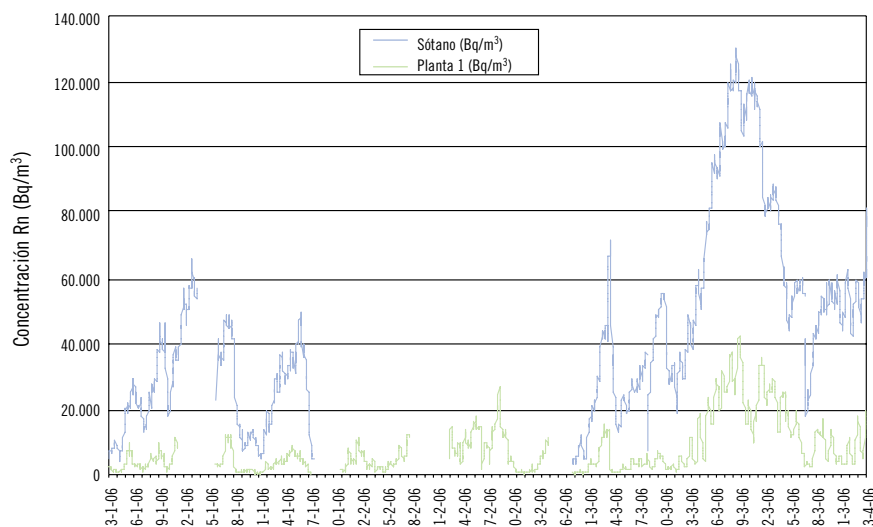
Como se ha indicado, las tasas de emanación y exhalación tienen que ver con la generación de radón y su movilidad a través de los poros del terreno, siendo factores fundamentales, la cantidad de radio en origen y la permeabilidad en el suelo. Estos aspectos se habían medido y se había obtenido una clasificación de alto riesgo de exposición al radón, por lo que era de esperar que existiese un flujo de radón hacia el interior del módulo como así demostraron las medidas

que se realizaron, obteniendo las siguientes concentraciones medias:

- Concentración promedio para planta de sótano: 39.385 Bq/m³.
- Concentración promedio para planta primera: 6.855 Bq/m³.

Por otro lado, el gradiente de presiones existente entre el terreno y el interior del módulo, determinan la variación del flujo de radón hacia el interior por convección como se puede observar en la siguiente figura:

Figura 3.7. Curvas de concentración de radón en el interior del módulo durante el periodo sin protección. Fase inicial



Este gradiente se ve alterado por los cambios en las variables atmosféricas, y fue objeto de una primera fase, analizar estos fenómenos con el fin de estudiar las correlaciones que pudiesen existir con las concentraciones de radón interior.

Para ello, durante este periodo inicial en el que el módulo no estaba protegido contra la inmisión de radón, se registraron las concentraciones de radón interior, tanto en la planta de sótano como en la planta baja, y también los distintos parámetros atmosféricos, como la temperatura, precipitaciones, viento, presión atmosférica,

que fueron proporcionados por la estación meteorológica de Enusa.

Seguidamente se exponen las principales conclusiones obtenidas del estudio de la correlación entre las concentraciones de radón y los distintos parámetros atmosféricos.

2.1. Influencia de las presiones atmosféricas

Se observa una relación inversa entre la presión atmosférica y las concentraciones de radón en el inte-

rior del módulo. Los descensos de presión provocan un incremento significativo de la concentración interior.

El mecanismo por el que se produce tal incremento podría estar relacionado con la permeabilidad del suelo. Ante un cambio en la presión atmosférica, la presión del interior del módulo se iguala de una manera casi instantánea mientras que en los poros del terreno, la presión no se igualará hasta transcurrido un tiempo que depende de la permeabilidad del mismo. Esto provocaría que, ante una caída repentina de presión atmosférica, la presión en el terreno se mantuviese en valores superiores a los del interior del módulo, favoreciendo la entrada de radón en la casa.

Durante este periodo se observó que ante una caída de presión de 3.000 Pa se producía un incremento puntual de concentración de radón de 90.000 Bq/m³, lo que supone un incremento del 225% sobre el valor promedio del periodo.

2.2. Influencia de los vientos

Las variaciones en la concentración de radón parecen estar correlacionadas positivamente con la velocidad del viento. La acción del viento sobre la concentración de radón interior tiene dos efectos opuestos. Por un lado, debido a la filtración que se produce por carpinterías de ventanas y puertas, el viento favorece un intercambio de aire entre el interior y el exterior. Este aporte de aire exterior con baja concentración de radón, daría lugar a una reducción de la misma en el interior.

Por otro lado, el viento provoca presiones y succiones en las fachadas del edificio, e induce una diferencia local de presiones entre el interior y el exterior proporcional al cuadrado de su velocidad, que favorece la entrada de radón en el recinto cerrado. En nuestro caso, este efecto tuvo mayor presencia que el de intercambio de aire. No obstante, las diferencias de presión inducidas apenas superan los 20 Pa, significativamente menores que las diferencias

observadas en la presión atmosférica (del orden de 3.000 Pa.)

2.3. Influencia de las temperaturas

El cambio de temperatura en el exterior es objeto de una modificación del gradiente de presiones entre el interior y el exterior. Este efecto se denomina *stack* (efecto chimenea) y explica, en los edificios, el movimiento de un gas por cambios de temperatura. El aire caliente que se genera en una vivienda en invierno, se expande y tiende a fugarse por chimeneas, fisuras o grietas, ventanas, etc. Ese proceso crea una ligera depresión interior que favorece la entrada de radón desde el terreno por succión.

Para el rango de datos disponibles, las diferencias de presión inducidas por cambios en las temperaturas, son pequeñas (del orden de 1 Pa) y no parecen responsables de las variaciones observadas en la concentración de radón.

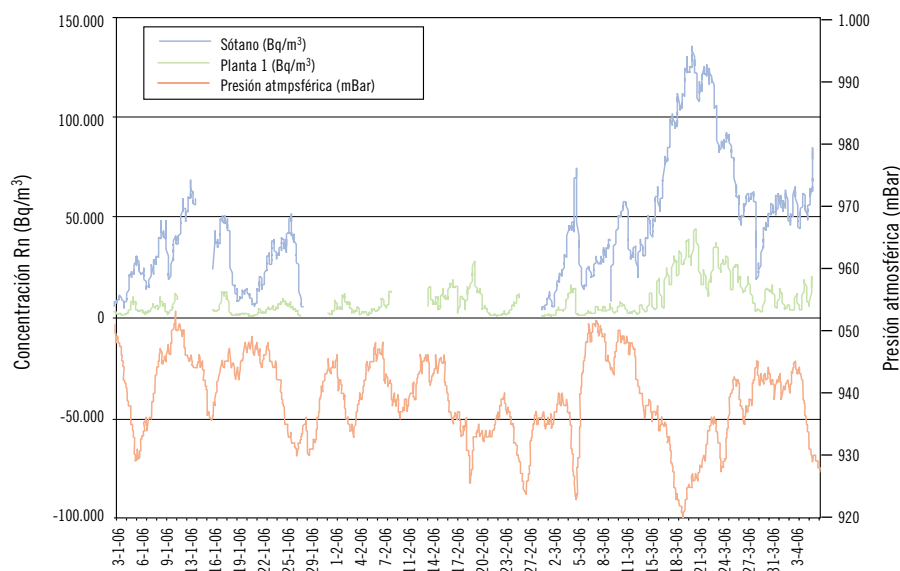
2.4. Influencia de las precipitaciones

Aún cuando los días de lluvia en la zona han sido escasos, se observa una correlación positiva entre la lluvia y el aumento de la concentración interior de radón en ambas plantas. Este efecto de la precipitación puede estar relacionado con una reducción de la permeabilidad del suelo en el entorno del módulo, que induce una salida preferente del radón por el suelo seco bajo el mismo. No obstante, y debido a las escasas precipitaciones, este fenómeno no fue relevante frente al de la presión atmosférica.

Conclusión:

Con todo, la presión atmosférica parece el parámetro determinante de las variaciones en la concentración de radón observadas en el interior del módulo cerrado. Las variaciones en la presión atmosférica fueron del orden de 3.000 Pa, superiores a las inducidas por los cambios de temperatura (3 Pa), y superiores a los provocados por el viento (30 Pa). La siguiente figura muestra la correlación de concentraciones con la presión atmosférica.

Figura 3.8. Grafica de curvas de concentración de radón contrastadas con los cambios de presión atmosférica en la que se observa como a un descenso de presión, entre los días 11 y 18 de marzo, le corresponde un aumento de concentración interior



3. Resultado de efectividades de distintas medidas correctoras

Se muestra el resultado de efectividades conseguidas por las distintas medidas correctoras, entendidas como las capacidades que poseen en cuanto a la reducción de radón interior.

Para poder realizar estos análisis, previamente se registraron las concentraciones medias de radón para el periodo inicial (módulo sin protección frente a la inmisión de gas radón), que sirvieron de base comparativa

para poder evaluar la reducción de radón que consiguieron las diferentes soluciones. Los resultados fueron los siguientes:

Posteriormente se diseñaron las distintas soluciones de protección que requerían una reinterpretación de los sistemas encontrados en la literatura para su adaptación a los materiales convencionales de España y a las tipologías constructivas propias. El estudio de estas técnicas constructivas, en experiencias internacionales, fue fundamental para entender los mecanismos por los cuales dichas soluciones reducen la concentración y cómo se pueden rediseñar para el mismo objetivo pero mediante uso de diferentes medios.

Como ya se ha indicado, estas soluciones se clasifican en dos grupos atendiendo a la base de funcionamiento. Las que interponen barreras frente al paso de radón en todo elemento del edificio que esté en contacto con el terreno (soleras, muros de sótano, etc.) y aquellas que extraen el gas del terreno antes de que éste pueda penetrar en los edificios.

Tabla 3.1. Concentración promedio de radón en las dos plantas, durante la fase sin protección

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

Para la elección de las medidas a estudiar se tuvo en cuenta que se quería probar el mayor número de ellas para contar con un abanico amplio de efectividades y que éstas no podían superponerse para no contaminar el análisis.

Atendiendo a estos criterios se eligieron las siguientes clases:

1. Sistemas de extracción del gas bajo el módulo usando arquetas de captación enterradas y conectadas a tubos de evacuación por cubierta.

Se realizaron dos arquetas distintas situadas, una bajo la solera del módulo en una localización central, y la otra enterrada por el exterior del módulo adosada a la cimentación del mismo. De esta manera se podía comparar la efectividad en función de la ubicación del punto de captación.

También se pudo estudiar la efectividad en función de si la extracción se hacía mediante tiro natural o forzado y, en este último caso, qué influencia podía tener la potencia del extractor.

2. Sistemas de ventilación del semisótano, actuando éste como cámara de forjado sanitario, con ventilación natural y con ventilación forzada. Esta propuesta se estudia para viviendas construidas con un forjado elevado sobre el terreno.
3. También, y dentro de los sistemas que hacen uso de extractores mecánicos, se invirtió el flujo para crear una sobrepresión en el terreno que desviase el gas.
4. Por último, dentro de la otra gama de soluciones, se analizó un sistema de barrera antiradón con el uso de material elastomérico de proyección *in situ*.

Contando con las variantes de cada clase, se estudiaron nueve medidas correctoras en total.

A continuación se detallan los diseños constructivos de cada una de ellas.

Tabla 3.2. Medidas correctoras probadas en el módulo

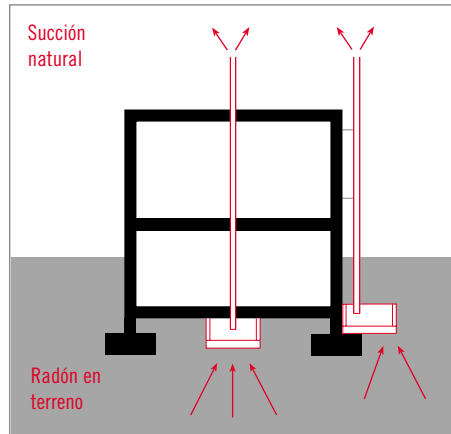
	Actuación
0	Periodo inicial Sin medidas correctoras
Medidas de extracción natural	
1	Extracción natural por dos arquetas (central y exterior)
2	Extracción natural por una arqueta (Central)
3	Extracción natural por una arqueta (Exterior)
4	Vuelta a situación inicial
Medidas de extracción forzada	
5	Extracción forzada (56 W) por una arqueta (Central)
6	Extracción forzada (80 W) por una arqueta (Central)
7	Extracción forzada (80 W) por una arqueta (Exterior)
Medidas de presurización	
8	Presurización (80 W) por una arqueta (Central)
Medidas de ventilación forjado sanitario	
9	Extracción forzada (80 W) del aire de la planta de sótano
Barrera antiradón	
10	Membrana elastomérica como barrera antiradón

3.1. Extracción natural por arqueta central y lateral

Se introdujo, bajo la solera de asiento del módulo, una arqueta enterrada con las paredes perforadas para permitir la entrada del gas a su interior. A ella se conectó un tubo de PVC de 125 mm de diámetro con salida directa a cubierta atravesando la solera, forjados y cubierta. La evacuación se realizaba por tiro natural.

Se construyó el mismo tipo de arqueta y tubo de salida, pero en este caso enterrada por el exterior del módulo. De esta manera se pudo estudiar la efectividad de la medida cuando funcionan las dos arquetas, o cada una de ellas por separado. La siguiente figura esquematiza la base de funcionamiento:

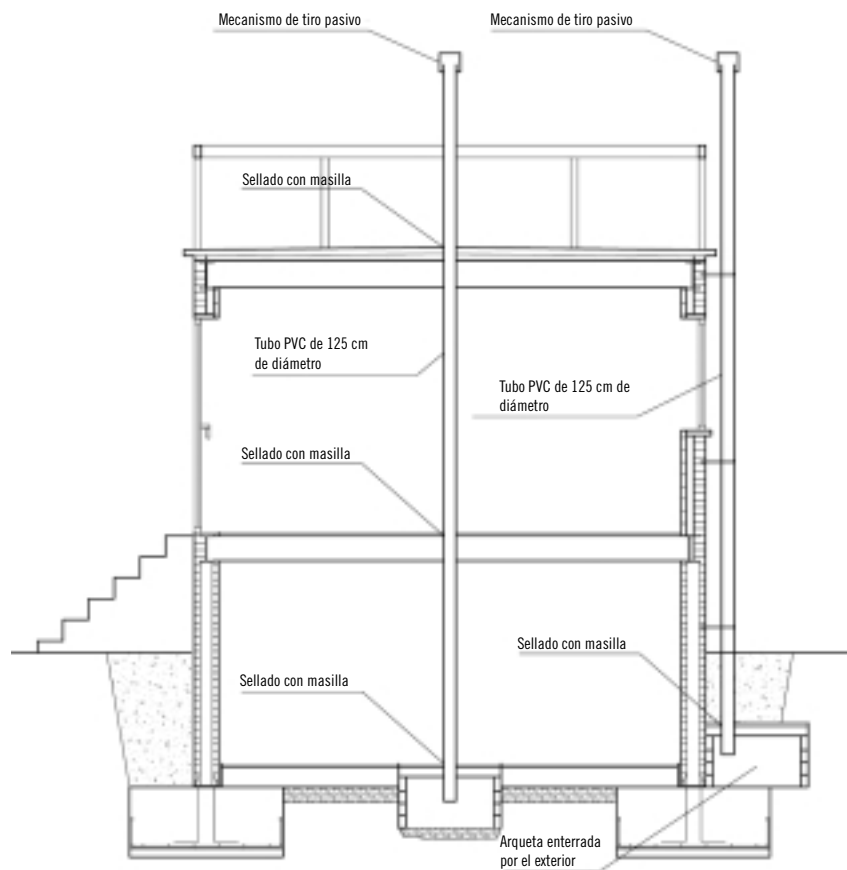
Figura 38. El tubo crea una depresión en la arqueta favorecida por el *efecto venturi* y por la diferencia de presiones generadas por el gradiente de temperatura. El radón se introduce en ella y es expulsado al exterior por la cubierta



La siguiente figura muestra la ubicación de las dos arquetas. Como se puede observar, la arqueta situada en el exterior del perímetro se encuentra fuera de la

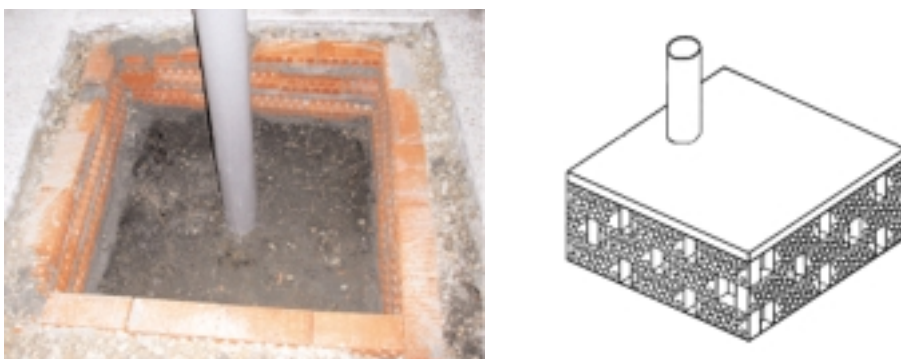
línea de cimentación, lo que causó un peor funcionamiento como se detalla mas adelante.

Figura 3.10. Situación de las dos arquetas enterradas



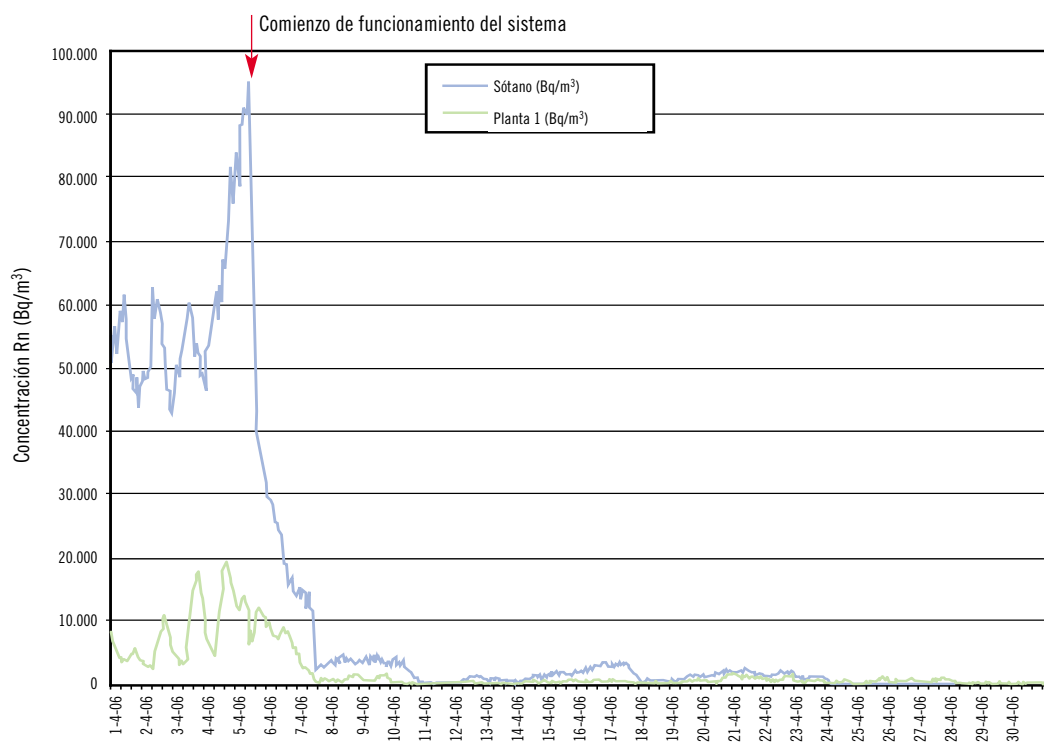
Las arquetas se construyeron con ladrillo perforado como se muestra en las figuras siguientes:

Figura 3.11. Fotografía y dibujo de la construcción de una arqueta de captación con ladrillo perforado



El gráfico siguiente muestra la reducción de radón conseguida cuando se activa el mecanismo de las dos arquetas.

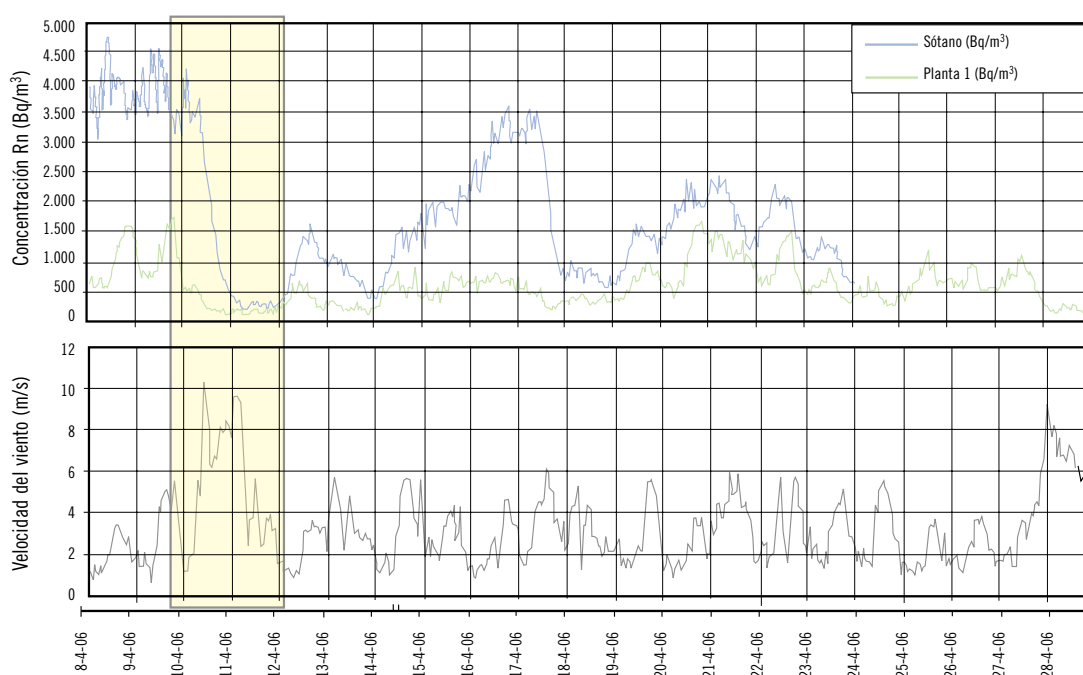
Figura 3.12. Curvas de concentración de radón cuando entra en funcionamiento la extracción natural por las dos arquetas enterradas



Se observó una clara reducción de las concentraciones en ambas plantas que se vio mejorada durante los días en que los vientos superaban velocidades de 8 m/s, lo

que confirmaba que el efecto *venturi* producido por el viento, inducía una mayor depresión en la arqueta como se muestra en la siguiente figura.

Figura 3.13. Curvas de concentración de radón contrastadas con velocidades de viento. Se aprecia una disminución en la concentración de radón cuando aumenta la velocidad del viento



Los resultados de efectividades de esta primera medida se resumen en la tabla siguiente que muestra las concentraciones iniciales, las obtenidas tras la inter-

vención y la reducción de radón conseguida por la medida correctora introducida. Esta reducción se expresa también en porcentaje sobre la inicial.

Tabla 3.3. Tabla de efectividades de reducción de la medida de extracción natural por las dos arquetas enterradas

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m³)		Reducción (Bq/m³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Extracción natural								
01-Extracción natural por arquetas central y exterior	39.385	6.855	1.704	539	37.681	6.316	96	92

3.2. Extracción natural por arqueta central

En lugar de extraer radón desde las dos arquetas, en esta medida la extracción se realizó únicamente por la arqueta central mediante tiro natural. De esta manera se estudió qué diferencias, en cuanto a efectividades, tiene la colocación de una o dos arquetas en el resultado final de concentración.

La efectividad se muestra en la tabla 3.4.

Se observó que no existía gran diferencia de efectividades comparando con la medida anterior, lo que indicaba que la arqueta central poseía una capacidad de reducción alta, y que la incorporación de otra arqueta (en este caso exterior) no mejoraba sustancialmente la efectividad de la medida.

Por otro lado, se observó también que la velocidad del viento influía positivamente en el incremento de efectividad del tiro natural.

Figura 3.14. Esquema de funcionamiento de la medida correctora de extracción natural por arqueta central

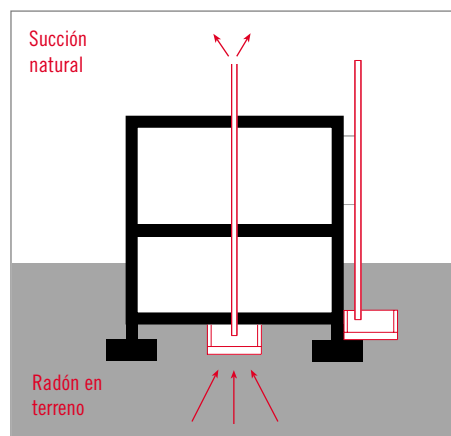


Tabla 3.4. Tabla de efectividades de reducción de la medida de extracción natural por arqueta central

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m³)		Reducción (Bq/m³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Extracción natural								
02-Extracción natural por arqueta central	39.385	6.855	1.704	539	37.681	6.316	96	92

3.3. Extracción natural por arqueta exterior

En este caso, se selló el tubo que conectaba la arqueta central y se abrió el de la exterior.

Este sistema manifestó menos efectividad que el que hacia uso de la arqueta central, alcanzando un porcentaje de reducción de 58 y 53% para sótano y planta 1 respectivamente, mientras que el que hace uso de la arqueta central había obtenido porcentajes de 96 y 91%. Este fenómeno pudo tener su explicación en la barrera que constituía la cimentación del módulo. La arqueta se encontraba enterrada por el exterior de la zapata corrida de cimentación y ésta, cercaba físicamente el espacio de terreno bajo él, generando una zona que se veía menos afectada por las succiones creadas por la arqueta. Esta situación pudo provocar que una mayor cantidad de radón penetrase en el interior del módulo en lugar de alcanzar la arqueta de captación.

Figura 3.15. Esquema de funcionamiento de la medida correctora de extracción natural por arqueta exterior

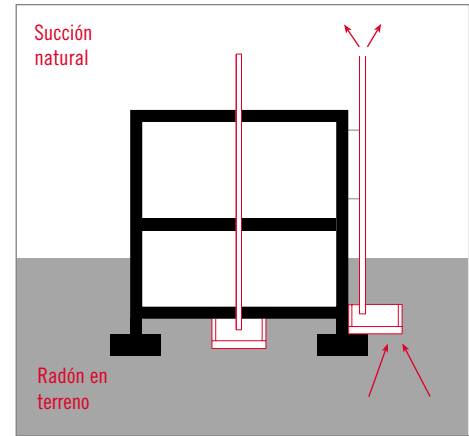


Tabla 3.5. Tabla de efectividades de reducción de la medida de extracción natural por arqueta exterior

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m ³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m ³)		Reducción (Bq/m ³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Extracción natural								
03-Extracción natural por arqueta exterior	39.385	6.855	16.607	3.213	22.778	3.642	58	53

Por otro lado, y al igual que ocurre en las medidas anteriores, el viento juega un papel importante en la extracción de radón por arquetas de captación cuando funcionan por tiro natural. A mayor velocidad de viento mayor es la succión y por tanto mayor es la reducción en la concentración interior.

Figura 3.16. La figura muestra la barrera que constituye la cimentación en cuanto al área de succión de la arqueta

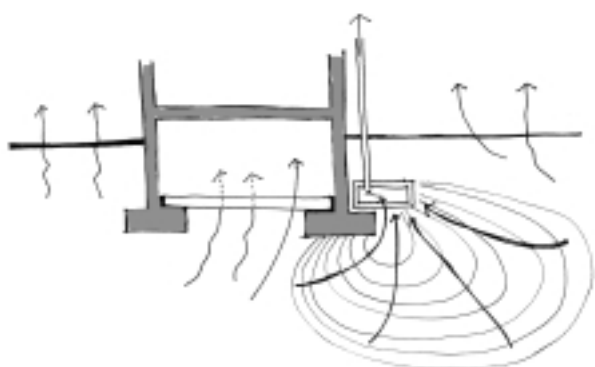


Figura 3.17. Tubo de extracción conectado a la arqueta exterior con un mecanismo de tiro pasivo conectado al extremo de expulsión



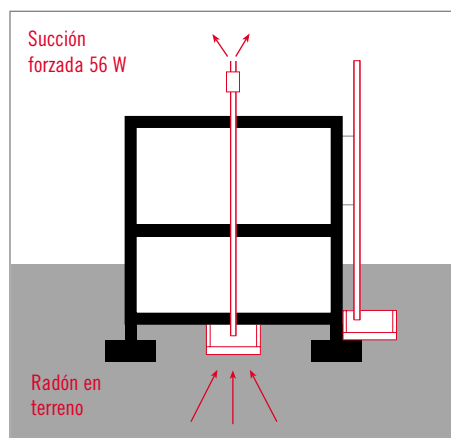
3.4. Retorno a la posición inicial sin medidas de protección

Con el fin de reproducir de nuevo las condiciones iniciales del módulo, se sellaron los tubos de evacuación para dejar el módulo sin ninguna medida de protección. Con ello se retornó a las concentraciones de radón iniciales para probar posteriormente los sistemas de extracción mecánica.

3.5. Extracción mecánica (56 W) por arqueta central

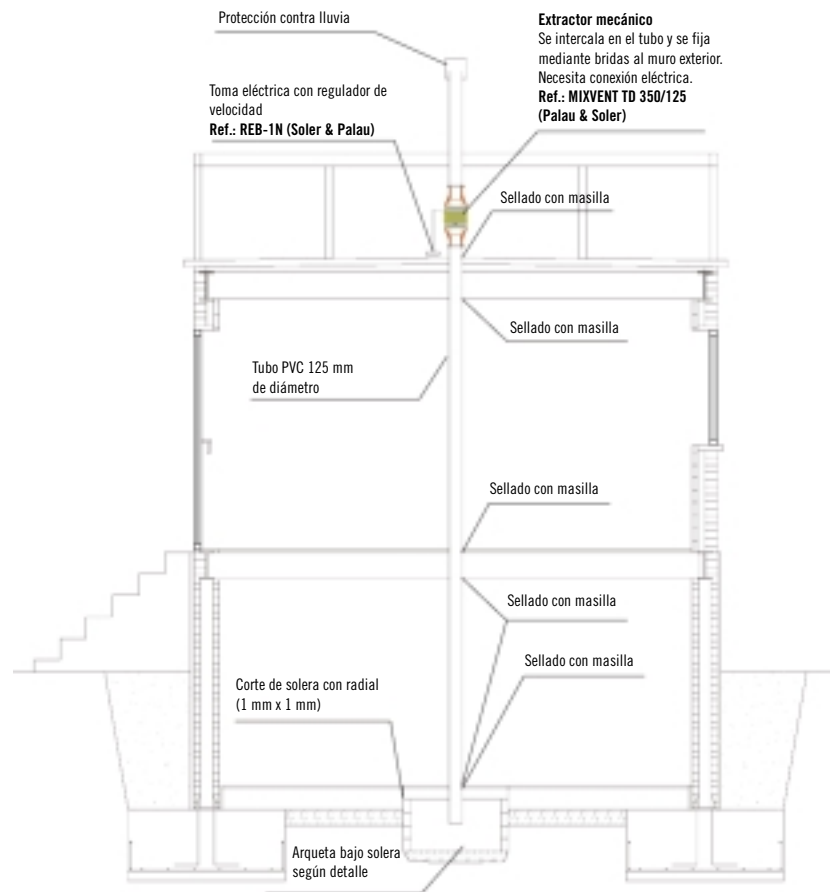
Ésta es una variante de la medida correctora n° 2 (extracción natural por arqueta central) en la que se forzó el tiro mediante un extractor mecánico de 56 W de potencia. Para ello se instaló un extractor mecánico de tipo helico-centrífugo en la boca de salida a cubierta. El diámetro de conexión era de 125 mm y generaba una depresión máxima en la arqueta central de 155 Pa, con una velocidad de 2.210 rpm, y un caudal de descarga libre de 360 m³/h.

Figura 3.18. Esquema de funcionamiento de la medida correctora de extracción forzada por arqueta central, con una potencia de 56 W



La figura siguiente muestra el diseño detallado de la medida correctora:

Figura 3.19. Sección constructiva donde figura la situación de los componentes del sistema de extracción



La efectividad que se consiguió se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.6. Tabla de efectividades de reducción de la medida de extracción forzada (56 W) por arqueta central

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m ³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m ³)		Reducción (Bq/m ³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Extracción forzada								
05-Extracción forzada (56 W) por arqueta central	39.385	6.855	409	368	38.976	6.487	99	95

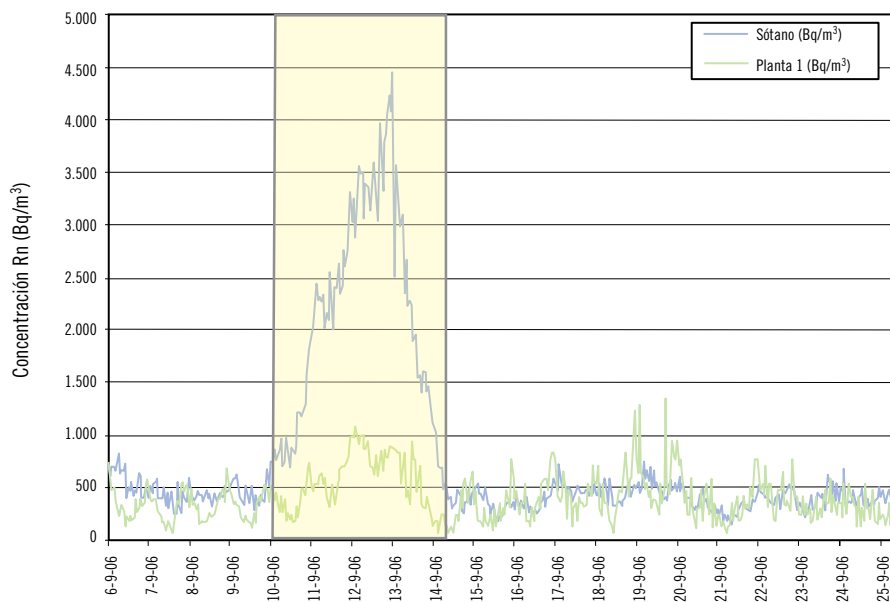
Los valores obtenidos se encuentran próximos a los 400 Bq/m³ lo que indica una alta efectividad teniendo en cuenta la situación de concentración de partida.

Un aspecto que queda patente en el análisis de las graficas, es la importancia que tiene el mantenimiento del extractor, ya que como se puede compro-

bar, en los días en los que se produjeron fallos en el suministro eléctrico, la concentración se elevó considerablemente.

Estos problemas, en los sistemas activos que necesitan energía, se pueden solucionar instalando alarmas que detecten un mal funcionamiento del ventilador.

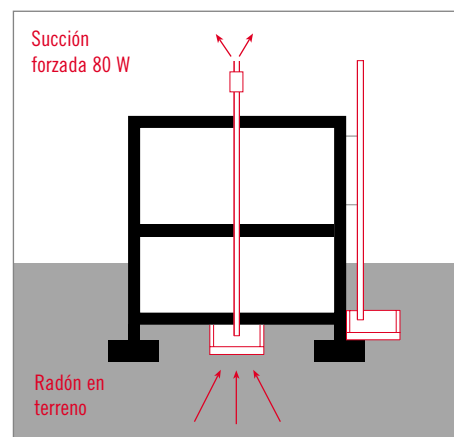
Figura 3.20. Se observa un aumento de niveles cuando falla el extractor debido a que el sistema actúa por tiro pasivo. En el momento en el que comienza de nuevo a funcionar, los niveles se reducen hasta oscilar en torno a 400 Bq/m³



3.6. Extracción mecánica (80 W) por arqueta central

La diferencia con la solución anterior estriba únicamente en la potencia del extractor mecánico que se instaló en el tubo de evacuación de la arqueta central. En este caso se colocó uno de mayor potencia (80 W), que genera una depresión máxima de 270 Pa, con una velocidad de 2.700 rpm, y un caudal de descarga libre de 907 m³/h. El objetivo era estudiar la influencia que tenía la potencia del extractor en la concentración de radón interior.

Figura 3.21. Esquema de funcionamiento de la medida correctora de extracción forzada por arqueta central, con una potencia de 80 W



Las efectividades conseguidas fueron las siguientes:

Tabla 3.7. Tabla de efectividades de reducción de la medida de extracción forzada (80 W) por arqueta central

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m ³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m ³)		Reducción (Bq/m ³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Extracción forzada								
06-Extracción forzada (80 W) por arqueta central	39.385	6.855	349	479	39.036	6.376	99	93

Se observó que las reducciones fueron similares a las obtenidas por la medida anterior en la que se hacía uso de un extractor menos potente, lo que indica que la potencia de 56 W es suficiente para la extracción en el caso concreto del módulo experimental y con las permeabilidades de terreno particulares de la zona. Sería necesario ampliar el estudio para analizar el alcance de extracción que tiene una potencia determinada para distintas permeabilidades de terreno.

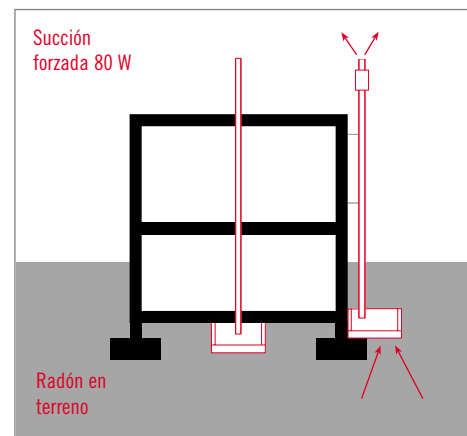
Por otro lado se observó que, en este tipo de medidas de extracción forzada en las que las succiones son mayores que en las de tiro natural, la concentración de radón interior se veía menos afectada por los cambios atmosféricos.

3.7. Extracción mecánica (80 W) por arqueta exterior

Se trasladó el extractor mecánico de 80 W a la salida del tubo que conectaba con la arqueta exterior. De

esta manera se pudieron comparar las efectividades en función de la ubicación de la arqueta.

Figura 3.22. Esquema de funcionamiento de la medida correctora de extracción forzada por arqueta exterior, con una potencia de 80 W



Se obtuvieron los siguientes datos de efectividad que figuran en la tabla 3.8:

Tabla 3.8. Tabla de efectividades de reducción de la medida de extracción forzada (80 W) por arqueta exterior

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m ³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m ³)		Reducción (Bq/m ³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Extracción forzada								
07-Extracción forzada (80 W) por arqueta exterior	39.385	6.855	327	480	39.058	6.375	99	93

Se observaron efectividades bastante superiores a las que ofrecía la misma arqueta exterior por tiro natural (nº 3), que conseguía reducciones de 58 y 53% para la planta de sótano y planta 1 respectivamente, mientras que al instalarle el extractor aumentaron hasta los 99 y 93%.

En este caso concreto, la cimentación del módulo, que constituía una barrera para la extracción por arqueta exterior en tiro natural, no pareció influir en la efectividad cuando se hizo uso de un extractor, y obtuvo efectividades muy similares a las obtenidas por extracción forzada por arqueta central. Serviría, pues, para una actuación en el edificio existente con una intervención por el exterior.

3.8. Presurización por arqueta central mediante extractor (80 W) colocado en sentido inverso

En esta medida se invirtió el funcionamiento del extractor de la solución correctora nº 6 para que en lugar de extraer aire lo introdujese, creando así una sobrepresión alrededor de la arqueta que obligase al gas a recorrer otros caminos para alcanzar la atmósfera.

Figura 3.23. Bulbo de presiones positivas bajo el módulo generado al introducir aire desde el exterior

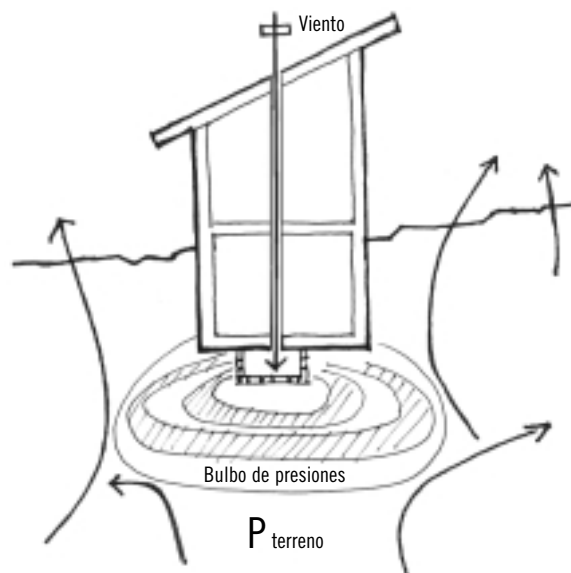
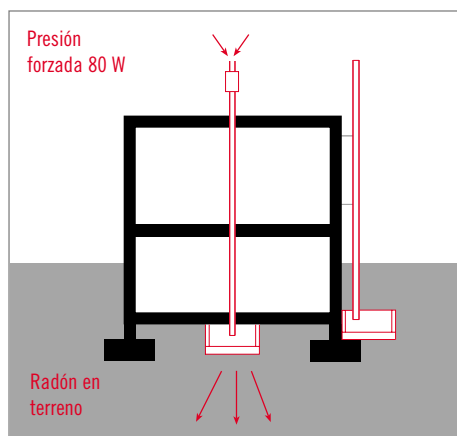


Figura 3.24. Esquema de funcionamiento de la medida correctora de presurización por arqueta central con una potencia de 80 W



Se obtuvieron los siguientes datos de efectividad:

Tabla 3.9. Tabla de efectividades de reducción de la medida de presurización por arqueta central

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m ³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m ³)		Reducción (Bq/m ³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Presurización								
08-Presurización por arqueta central (80 W)	39.385	6.855	271	388	39.114	6.467	99	94

Se trata de una de las soluciones con mayor efectividad de las que se probaron, con una reducción de radón, en ambas plantas, inferior a los 400 Bq/m³, aunque similares a las conseguidas por las medidas de extracción forzada, tanto por arqueta central como por la exterior.

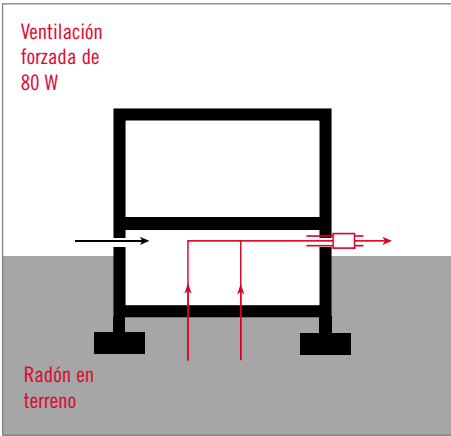
3.9. Ventilación cruzada por muros de sótano con extractor de 80 W

Un forjado sanitario se define como aquel elemento estructural de suelo que se eleva sobre el terreno y que

deja una cámara de aire bajo él. Esta práctica está muy extendida en el sector de la construcción ya que evita, entre otras cosas, humedades de capilaridad desde el terreno.

Para el caso de la protección frente al radón el uso de la cámara es idóneo si se considera como una gran arqueta de captación bajo el forjado de la planta más baja. Esta cámara actúa como un captador del gas que puede ser evacuado al exterior, bien usando tubos de conexión a cubierta, o bien practicando huecos en sus

Figura 3.25. Esquema de funcionamiento de la medida correctora de ventilación forzada de forjado sanitario



muros para inducir una corriente que conduzca el radón hacia el exterior.

Para poder reproducir las condiciones de un forjado sanitario se utilizó el espacio de semisótano como la cámara bajo el forjado y únicamente la planta alta como espacio habitable.

En los muros opuestos de esta cámara simulada (semi-sótano) se practicaron dos huecos enfrentados para producir una ventilación de este espacio. En uno de ellos se instaló un extractor mecánico de 80 W con el fin de forzar la extracción, y en el otro una rejilla de inmisión de aire.

Se obtuvieron las siguientes efectividades:

Tabla 3.10. Tabla de efectividades de reducción de la medida de extracción por cámara de forjado sanitario (en este caso el espacio de semisótano)

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m³)		Reducción (Bq/m³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Ventilación sótano								
09-Ventilación del sótano forzada	39.385	6.855	10.072	307	29.313	6.548	74	96

El cuadro de efectividades muestra una reducción alta en la planta 1, la planta habitable, y una reducción mínima en la planta de sótano, en este caso considerada como la cámara de un forjado sanitario.

Estos datos resultan lógicos ya que, al generar una extracción en la cámara (semisótano), se está creando una ligera depresión en el interior y por tanto una succión del radón procedente del terreno. Este radón no llega a alcanzar la planta 1 ya que la misma extracción lo evacua hacia el exterior.

Sin embargo, este dato revela un aspecto de las medidas de extracción que debe tenerse en cuenta a la hora

de proponer soluciones correctoras en edificios. Se suele pensar que generando una ventilación en un espacio es posible eliminar el radón, y en principio es un pensamiento bastante lógico. Pero lo que suele suceder es que la extracción de aire de un espacio interior genere una ligera depresión en dicho espacio, por la insuficiente inmisión de aire exterior, y ello conlleve a una mayor succión de radón procedente del terreno que eleve los índices de concentración. Por tal motivo se recomienda estudiar las depresiones interiores en función de las superficies de expulsión e inmisión y de las potencias de extracción.

3.10. Barrera antiradón

Esta medida es de las consideradas pasivas al no usar ningún mecanismo que necesite energía. Esta solución hace uso de una barrera que frena el paso del radón al interior. Se usó una membrana constituida por una proyección en líquido que se aplicaba sobre toda la superficie de muros y solera que estaban en contacto con el terreno. Al tratarse de un módulo que simula un edificio construido, la proyección de la membrana se realizó por las caras interiores de la solera y muros.

El material de la membrana era poliuretano de dos componentes (poliol e isocianato) con una densidad de producto aplicado de 1.000 kg/m³. La mezcla de los dos componentes se producía en la boquilla de la máquina de proyección y en contacto con el aire, la mezcla catalizaba en pocos segundos adquiriendo consistencia sólida. El resultado final de la proyección era de una membrana elastomérica continua, con cierta flexibilidad, resistente al punzonamiento y a las tracciones. El espesor de la

membrana variaba entre 3 y 5 mm según los puntos de aplicación.

Al tratarse de un sistema de proyección, no existían juntas ni solapes, constituyendo el conjunto, un elemento-barrera que cubre la totalidad de la superficie de solera y muros de sótano.

El laboratorio de la Cátedra de Física Médica de la Universidad de Medicina de Cantabria realizó los análisis de permeabilidad del material frente al paso de radón con distintos espesores, utilizando el método de las dos cámaras separadas por el material de ensayo.

Los resultados realizados a láminas Urespray F-75, con diferentes espesores, son los siguientes:

Tabla 3.11. Coeficientes de permeabilidad de membranas Urespray F-75 con diferentes espesores

Producto	Espesor (m)	Permeabilidad (m ² /s)
F-75 1,5 mm	0,0015	5,53.10 ⁻¹²
F-75 2,0 mm	0,002	6,50.10 ⁻⁹
F-75 2,3 mm	0,0023	4,22.10 ⁻⁹
F-75 3,5 mm	0,0035	1,96.10 ⁻⁹

El módulo se proyectó con un espesor medio de 3 mm por lo que la permeabilidad se encuentra en torno a 1,96.10⁻⁹ m²/s.

La fotografía siguiente muestra el proceso de proyección del material sobre la superficie de los muros y la solera.

Figura 3.26. Esquema de funcionamiento de la medida correctora de barrera antiradón

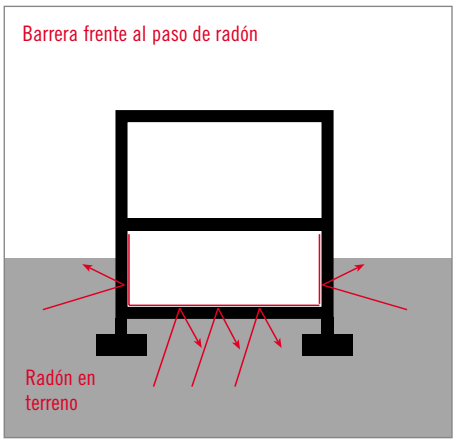


Figura 3.27. Fotografía durante el proceso de aplicación por proyección del material elastomérico



Los resultados de efectividades que se obtuvieron se muestran en la tabla 3.12.

Las efectividades fueron bastante altas, sobre todo para la planta 1, comparado con lo que se ha documentado en la literatura sobre efectividades para las medidas de barreras.

En este sentido se puede decir que, con una membrana de poliuretano de densidad 1.000 kg/m^3 aplicada en continuo se han conseguido efectividades similares a las de extracción natural por arqueta central para planta de sótano y se han mejorado para la planta 1. Es decir, de todas las medidas pasivas que se han probado, extracciones naturales por arquetas central y lateral, esta membrana ha conseguido el mejor resultado en la reducción de radón interior.

Tabla 3.12. Tabla de efectividades de reducción de la medida de barrera antiradón

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m^3)		Concentración media tras la intervención (Bq/m^3)		Reducción (Bq/m^3)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Barrera antiradón								
10-Membrana de poliuretano en sótano	39.385	6.855	1.446	434	37.939	6.421	96	94

La alta efectividad que ha conseguido esta membrana, comparada con otros sistemas de barreras antiradón que se comercializan en otros países por aplicación en bandas, puede deberse a la ausencia de juntas y solapes, y al mejor sellado de puntos conflictivos (encuentros entre paramentos, encuentros con pilares, juntas de dilatación, fisuras en solera) que consigue una aplicación en continuo ya que, en cuanto a la permeabilidad del material, la membrana aplicada posee valores que indican que es más permeable que la mayoría de las membranas que se comercializan en otros países para estos fines.

Por otro lado, y comparando de nuevo con las otras medidas pasivas de extracción natural, en ésta no

existe dependencia de los vientos para conseguir altas efectividades. Se independiza en mayor grado de las condiciones atmosféricas.

Tal y como se ha desarrollado esta medida correctora, la aplicación conlleva a una actuación en toda la superficie del espacio interior que se quiera proteger. En este sentido, la viabilidad de aplicarse en viviendas construidas implicará un revestimiento posterior de la aplicación para protegerla del uso habitual del espacio. Es importante no dañar la membrana para mantener la efectividad.

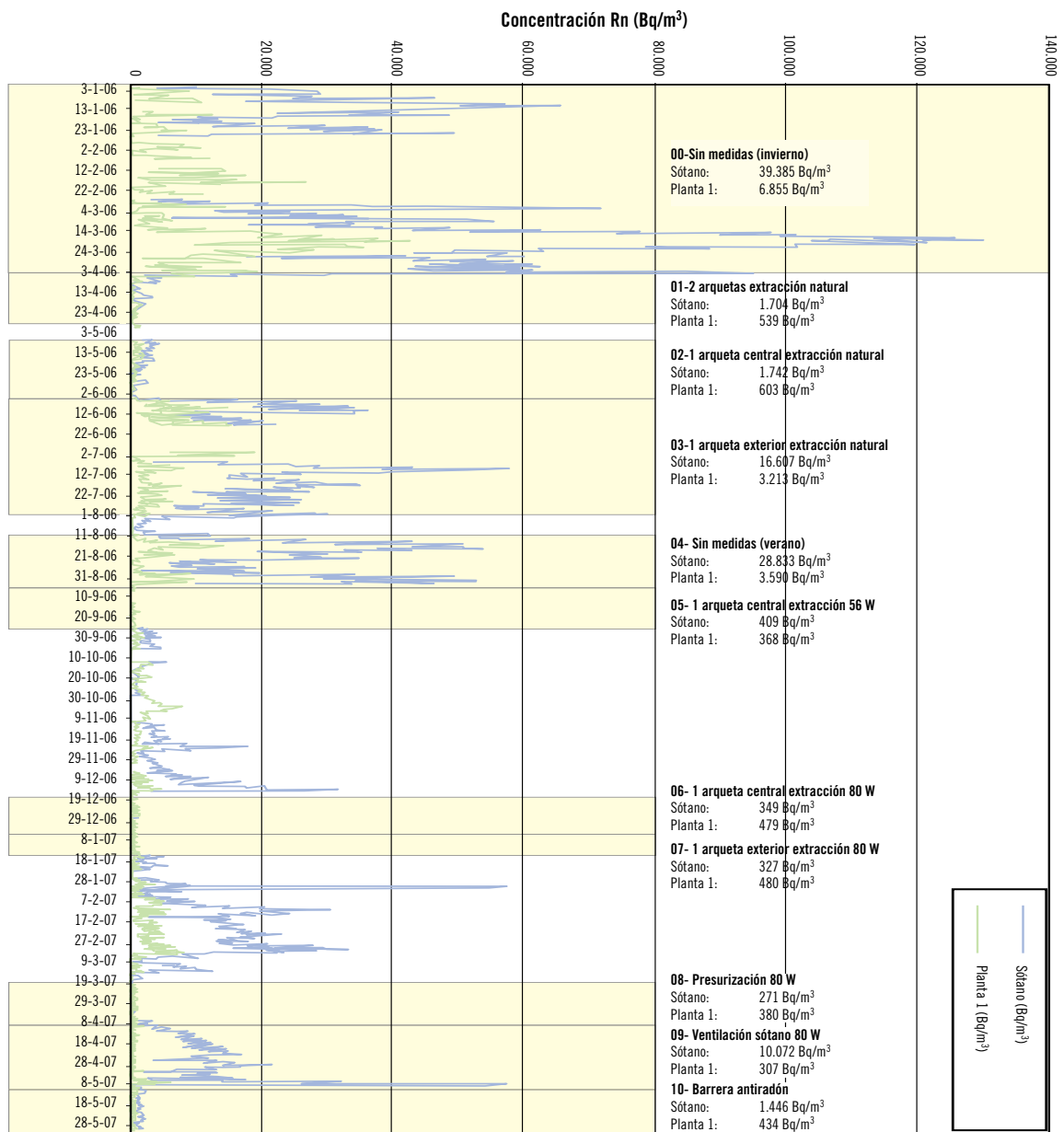
Si se tratase de actuar sobre una vivienda en fase de construcción, se podría realizar la aplicación por el ex-

terior de los muros de cerramiento de sótano. En ese caso habría que proteger la membrana mediante capas antipunzonamiento y antiraíces con el fin de evitar daños. En cuanto a realizar la aplicación sobre la superficie de terreno previa a la colocación de la solera, se debería estudiar la adherencia sobre el terreno. También puede ser necesario el vertido de un hormigón de limpieza como soporte de la membrana y la incorporación de capas separadoras que eviten el daño de la misma.

4. Análisis y resumen de efectividades

El siguiente gráfico muestra todo el periodo de registros con las fases de cada medida correctora y con los promedios de concentraciones de radón resultantes para cada planta. Los intervalos que no están marcados son periodos en los que los datos no son válidos para el cálculo, debido principalmente a fallos en el generador de suministro eléctrico.

Figura 3.28 Curvas de concentraciones de radón en cada una de las fases de prueba de las medidas correctoras



En el siguiente cuadro se muestran las reducciones de concentración de radón conseguidas por las distintas medidas de protección, expresadas tanto en Bq/m³

como en un porcentaje de reducción frente a las concentraciones iniciales.

Tabla 3.13 Tabla de efectividades de reducción de radón de cada solución correctora

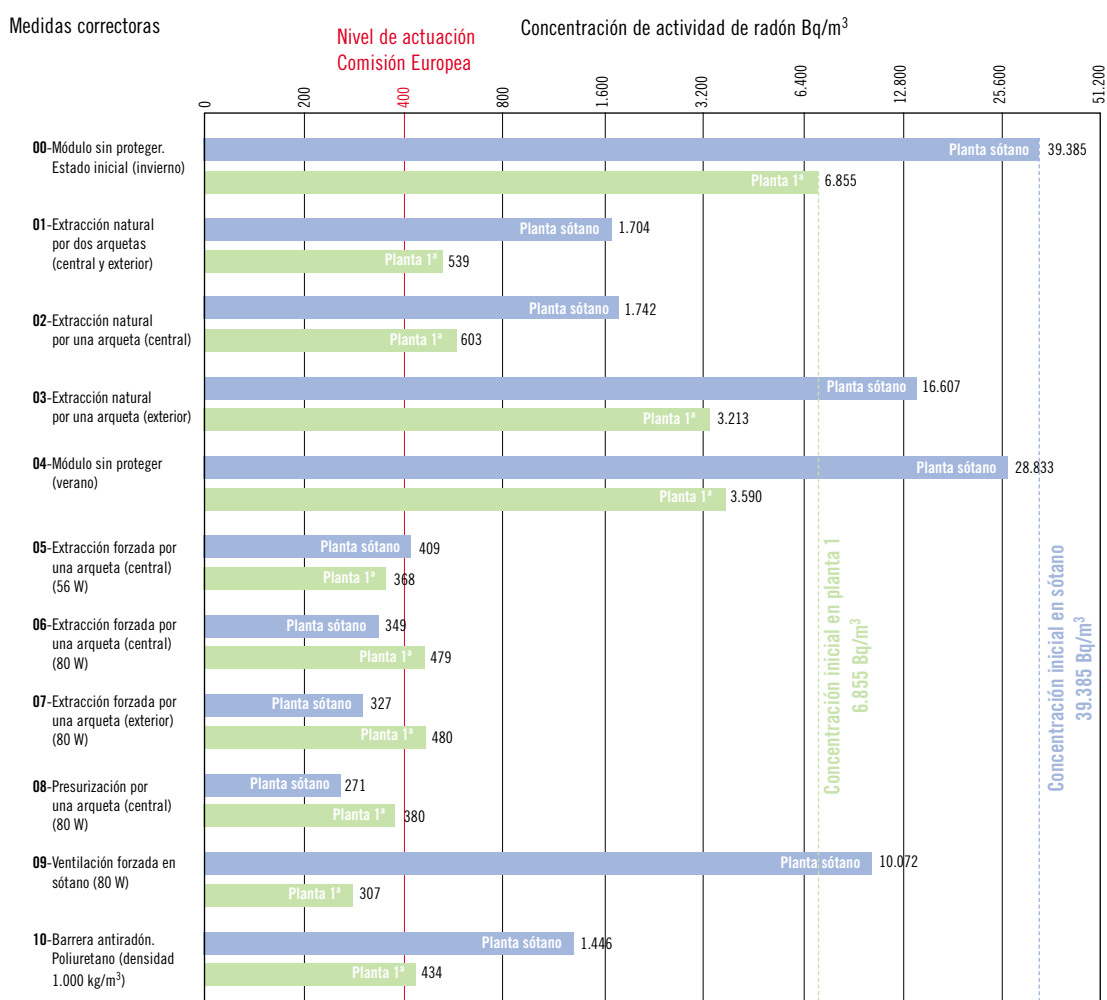
Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m ³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m ³)		Reducción (Bq/m ³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Extracción natural								
01-Extracción natural por dos arquetas (central y exterior)	39.385	6.855	1.704	539	37.681	6.316	96	92
02-Extracción natural por una arqueta (central)	39.385	6.855	1.742	603	37.643	6.252	96	91
03-Extracción natural por una arqueta (exterior)	39.385	6.855	16.607	3.213	22.778	3.642	58	53
Extracción forzada								
05-Extracción forzada por una arqueta (central) (56 W)	39.385	6.855	409	368	38.976	6.487	99	95
06-Extracción forzada por una arqueta (central) (80 W)	39.385	6.855	349	479	39.036	6.376	99	93
07-Extracción forzada por una arqueta (exterior) (80 W)	39.385	6.855	327	480	39.058	6.375	99	93
Presurización								
08-Presurización por una arqueta (central) (80 W)	39.385	6.855	271	380	39.114	6.467	99	94
Ventilación forjado sanitario								
09-Ventilación forzada en sótano (80 W)	39.385	6.855	10.072	307	29.313	6.548	74	96
Barrera frente al radón								
10-Barrera antiradón. Poliuretano (densidad 1.000 kg/m ³)	39.385	6.855	1.446	434	37.939	6.421	96	94

En todas ellas, salvo en la medida nº 3 (extracción natural por arqueta exterior), se han conseguido efecti-
vidades superiores al 90%. Aunque no se ha podido
comprobar que exista una relación lineal en la aplica-
ción de este porcentaje a otras concentraciones dife-
rentes a las de partida en este proyecto, es de esperar
que, en situaciones habituales en las que no exista una
concentración de radón tan elevada (como ha sido el
caso del terreno de la mina de uranio), sí hubiera sido
posible conseguir reducciones de radón por debajo de

los 400 o 200 Bq/m³ en la mayoría de las soluciones
probadas.

Gráficamente se presenta el siguiente diagrama de ba-
rras con los promedios de concentración tras la inter-
vención en cada una de las medidas correctoras. La lí-
nea roja indica el nivel de concentración a partir del
cual se recomienda introducir una actuación de co-
rrección para viviendas existentes según la Comisión
Europea (400 Bq/m³)¹.

Figura 3.29. Diagrama de barras, en escala logarítmica, con las concentraciones finales conseguidas por cada una de las soluciones correctoras



¹ Recomendación de la Comisión Europea de 21 de febrero de 1990 (90/143/Euratom).

La línea azul y la verde son las concentraciones iniciales tanto en planta de sótano como en planta 1ª, respectivamente.

Las medidas que mayor efectividad consiguieron fueron aquellas que hicieron uso de extractores mecánicos para forzar los tiros de las arquetas captadoras, tanto para la central como para la colocada por el exterior. Dentro de esta categoría de máxima efectividad también se encuentran las soluciones de presurización por arquetas, y de ventilación forzada de cámara de forjado sanitario (sótano en este caso).

Pero también hay que decir que, para conseguir el rendimiento previsto en este tipo de soluciones, es necesario que el extractor se mantenga en funcionamiento continuo. Si dejase de funcionar, las concentraciones se elevarían sin ser detectadas hasta que se realizasen nuevas medidas. Por este motivo, es recomendable la instalación de un sistema de alarmas que detecte fallos eléctricos o mecánicos, y un programa de mantenimiento para garantizar su funcionamiento.

En cuanto a los sistemas de extracción por tiro natural, medidas de tipo pasivo al igual que la de barrera antiradón, se comprobó que la arqueta situada de forma centrada conforme a la planta tiene una capacidad de captación mayor que la colocada por el exterior. Este comportamiento viene explicado por el obstáculo que supone la cimentación perimetral para la extracción por la arqueta exterior y que conlleva a una peor cobertura del área de asiento del edificio.

También se pudo observar que la velocidad del viento influye positivamente en la reducción de radón en este tipo de soluciones de tiro natural. En el ejemplo de la medida correctora nº 2, extracción natural por arqueta central, la concentración de radón para el periodo completo fue de 1.742 Bq/m³ para la planta de sótano y de 603 Bq/m³ para la planta 1, mientras que en los días en los que se registraron vientos de 6 a 8 km/h, las concentraciones descendieron en ambas plantas por debajo de los 300 Bq/m³.

Como ya se ha indicado, este efecto está relacionado con la mayor succión que se produce en la arqueta de-

bido al efecto *venturi* que provoca la velocidad de viento en la boca del tubo de expulsión.

La incorporación de extractores en los tubos de las arquetas (medidas 6 y 7) también aumentó la succión y supuso un incremento de efectividades. En estos casos, las dos arquetas consiguieron reducciones muy similares, llegando al 99 y 93 % para el sótano y la planta 1ª, respectivamente.

- La mejora que supuso el extractor para la arqueta central:
 - (3 %) en sótano: (de 96 a 99 %).
 - (2 %) en planta 1ª: (de 91 a 93 %).
- Mejora que supuso el extractor para la arqueta exterior:
 - (41 %) en sótano: (de 58 a 99 %).
 - (40 %) en planta 1ª: (de 53 a 93 %).

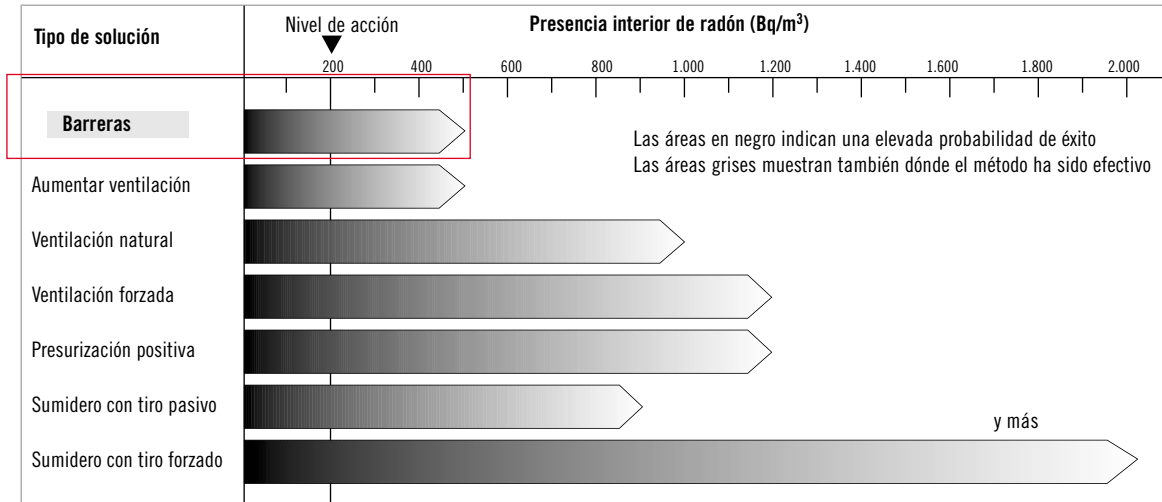
Como se puede apreciar, la mejora para la arqueta central, al colocar el extractor, fue únicamente de un 2-3 %, mientras que la misma actuación pero para la arqueta exterior supuso una mejora de un 40-41 %.

En cuanto a la medida de barrera antiradón, se consiguió una efectividad elevada en la planta 1ª, superando las previsiones que se tenían sobre la efectividad de este tipo de soluciones. Experiencias similares en otros países consideran esta propuesta como una medida pasiva, de efectividad media-baja, y únicamente recomendable para situaciones de baja concentración de radón (en torno a 500 Bq/m³) como muestra el siguiente cuadro del BRE.

Sin embargo, en nuestro caso con una concentración inicial en la planta 1ª del orden de 7.000 Bq/m³, se obtuvo una reducción cercana a la de los sistemas de extracción forzada, lo que la sitúa más próxima a la categoría de soluciones de efectividad media-alta.

El método de aplicación de esta barrera ha sido, posiblemente, el determinante del buen resultado que obtuvo el sistema en comparación con otras experiencias similares de barreras en otros países. En los documen-

Figura 3.30. Efectividades de medidas correctoras presentado por BRE (Building Research Establishment, Reino Unido)



tos consultados, las barreras se comercializan en rollos y su aplicación *in situ* requiere la realización de solapes entre las distintas bandas, para cubrir el área deseada. Además se venden piezas especiales para el remate y tratamiento de puntos conflictivos en los que se puedan producir fisuras en la barrera.

En el caso que se ensayó, con la aplicación de un sistema líquido por proyección, se eliminaron los solapes. Por otro lado, el sellado de puntos singulares quedó resuelto gracias a que, sus características de resistencias mecánicas y elongación, permitieron su uso en juntas y encuentros entre paramentos.

CONCLUSIONES Y
PERSPECTIVAS FUTURAS



4

Atendiendo a las advertencias de entidades como la Organización Mundial de la Salud¹, o la propia Comunidad Europea en su Recomendación de 21 de febrero de 1990 (90/143/Euratom), la inhalación de gas radón constituye un riesgo para la salud al estar vinculado a la generación de 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 niveles de concentración recomendados.

De las investigaciones desarrolladas, en cuanto a la capacidad que presentan las distintas medidas correctoras para atenuar la inmisión de radón, se han obtenido resultados que permiten abordar aspectos de prevención, materializados en actuaciones arquitectónicas que pueden ayudar como documentación técnica acompañando al desarrollo de la normativa de edificación correspondiente.

En términos generales, y teniendo en cuenta que se ha realizado el prototipo de edificio en un terreno con altos contenidos de radón, todas las medidas han dado como resultado descensos de la concentración, siendo de notable efectividad las de tiro forzado, la solución de presurización y la de ventilación de cámara de forjado sanitario (sótano en este caso). La solución, consistente en la incorporación de una barrera elastomérica, junto con la técnica de extracción natural por arqueta central, fueron los sistemas pasivos que obtuvieron resultados significativos aunque por debajo de los sistemas activos (extracciones forzadas y presurizaciones). La medida de arqueta exterior funcionando por tiro natural fue de eficacia reducida por lo que

sólo se aconsejaría su uso forzando el tiro con extractor mecánico, con lo que pasaría a formar parte de las medidas activas.

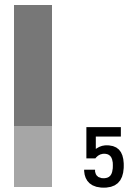
Por otra parte, parece necesario profundizar en el estudio de este tipo de actuaciones, ya que en la práctica se pueden presentar situaciones en las que sería aventurado extrapolar los resultados de esta investigación por cuanto quedan aspectos que convendría abordar en un futuro inmediato, como por ejemplo:

- Radio de efectividad de las medidas de extracción por arquetas enterradas, tanto por tiro natural como forzado, contando con distintas porosidades del terreno.
- Diámetro de la tubería de extracción en función del número de arquetas al que dé servicio.
- Posibilidades de actuación por sistemas de ventilación-drenaje.
- Control de la depresión interior en los locales para evitar que los sistemas de ventilación no provoquen succiones de radón.
- Estudio de los espesores óptimos de membranas.

A modo de epílogo cabe decir que el contenido de este documento representa un acercamiento de la aplicación de las soluciones constructivas a una tipología edificatoria cercana a la construcción habitual en el área mediterránea, con técnicas y materiales convencionales.

¹ WHO, *Handbook on Indoor Radon. A public health perspective*. World Health Organization. 2009.

REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS



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.

BARROS-DIOS, J. M.; RUANO-RAVINA, A.; CONDE RODRÍGUEZ, M.; CERDEIRA-CARAMÉS, S. "Residential radon and lung cancer". *Epidemiology*. Vol. 20 no. 1. 2009.

CHEN, C.-J.; WENG, P.-S., and CHU, T.-C. "Radon exhalation rate from various building materials". *Health Phys.* 64:613-619. 1993.

CLAVENSJÖN, BERTIL y AKERTBLOM, GUSTAV. *The Radon Book. Measures against radon*. The Swedish Council for Building Research. Suecia 1994.

COLLIGNAN, BERNARD. *Réduire la concentration en radon dans les bâtiments existants*. Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTB) Francia 1999.

Comisión de las Comunidades Europeas. Recomendación de la Comisión de 21 de febrero de 1990 relativa a la protección de la población contra peligros de una exposición al radón en el interior de edificios (90/143/Euratom). DOCE, L80, 26-28.

Comisión de las Comunidades Europeas. Recomendación 2001/928/Euratom de la Comisión, de 20 de diciembre de 2001, relativa a la protección de la población contra la exposición al radón en el agua potable – DO L 344 de 28.12.2001, p. 85.

DARBY, S.; HILL, D.; DEO, H. *et al.* "Residential radon and lung cancer - detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7,148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe, Scand". *J. Work Environ. Health* 32 (suppl. 1): 1-84 (2006).

Environmental Protection Agency (EPA). *Assessment of Risks from Radon in Homes*. EEUU 2003.

Environmental Protection Agency (EPA). *Building Radon Out*. EEUU 2001.

FONT, LLUIS; BAIXERAS, C.; JÖNSSON, G.; ENGE, W.; GHOSE, R. "Application of a radon model to explain indoor radon levels in a swedish house". *Radiation measurements* 31 pag 359-362. 1999.

Health effects of exposure to radon (BEIR VI- Committee on Health Risks of Exposure to Radon) National Research Council (1999). EEUU.

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.

ICRP (International Commission on Radiological Protection). "Protection against radon-222 at home and at work". ICRP Publication 65. Annals of ICRP. 23 (2). Pergamon Press, Oxford, 1993.

JIRÁNEK, M.; NEZNA, L. M. "Mitigation of ineffective measures against radon". *Radiation Protection Dosimetry* (2008). Vol. 130, N° 1, pp. 68-71.

NAISMITH, S. P. "The influence of House Characteristics on the effectiveness of Radon Remedial Measures". *Health Physics* Vol 75, N° 4. 1998.

NEZNAL, M. *et al.* (2004): "The new method for assessing the radon risk of building sites". *Czech. Geol. Survey Special Papers*, 47 p., CGS Prague.

Notas Técnicas de Prevención (NTP 440: Radón en ambientes interiores) Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. España.

Notas Técnicas de Prevención (NTP 533: El radón y sus efectos sobre la salud) Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. España.

QUINDÓS PONCELA, L. S. *Radón, un gas radiactivo de origen natural en su casa*. Universidad de Cantabria. Consejo de Seguridad Nuclear. 1995.

QUINDÓS, L. S.; FERNÁNDEZ, P. L.; GÓMEZ, J.; SAINZ, C.; FERNÁNDEZ, J. A.; SUAREZ, E.; MATARRANZ, J. L.; CASCÓN, M. C. "Natural gamma radiation map

(Marna) and indoor radon levels in Spain”. *Environment International* 29, 1091-1096. 2004.

ROSERENS, G. A.; JOHNER, H. U.; PILLER, G.; IMBAUMGARTEN, P. *Swiss radon handbook. Swiss Federal Office of Public Health*. Radiological Protection Division. Berna 2000.

SCIVYER, CHRIS. MCIOB. “Radon guidance on protective measures for new buildings”. *BRE Guides* (Build-

ding Research Establishment). ISBN 978-1-84806-013-5. Reino Unido 2007.

VARGAS DRECHSLER, A. y ORTEGA ARAMBURU, X. *Calidad metrológica y dosimetría del radón*. Colección Documentos I+D 12.2004. CSN.

WHO, *Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective*. World Health Organization. 2009.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	5
SUMARIO	7
1. EL RADÓN Y SU PROBLEMÁTICA EN ESPACIOS HABITADOS	9
1. Medida de la concentración de radón	10
2. Fuentes de radón	11
2.1. Terreno	11
2.2. Agua	11
2.3. Materiales de construcción	11
3. Movilidad del radón	12
4. Penetración y acumulación del radón en espacios habitados	13
2. APROXIMACIÓN A UNA PROPUESTA NORMATIVA EN ESPAÑA PARA VIVIENDAS NUEVAS ..	17
1. La salubridad en el Código Técnico de Edificios	18
2. Recomendaciones de niveles de concentración de radón	18
3. La actuación en la edificación	19
4. Posibles medidas de protección en función de la categoría de exposición al radón	21
5. Consideraciones particulares sobre la ejecución y diseño de las soluciones de protección. Tratamiento de puntos conflictivos	28
5.1. Tipos de barreras antiradón y materiales empleados	28
5.2. Sobre la ejecución de la barrera	30
5.3. Tratamiento de juntas de estructura, soleras y forjados	30
5.4. Paso de conductos a través de la barrera	31
5.5. Refuerzos en barreras	31
5.6. Fisuras en solera	32
5.7. Puntos de captación en sistemas extracción	33
5.8. Situación de los puntos de captación	34
5.9. Sobre la ventilación de una vivienda	35
3. LA EXPERIENCIA ADQUIRIDA EN LAS SOLUCIONES CONTRA LA INMISIÓN DE RADÓN ...	37
1. Planteamiento de un proyecto experimental	38
1.1. Elección de la ubicación	38
1.2. Diseño y construcción de un módulo representativo de una edificación habitual en España	40
1.3. Dispositivos de medición empleados	43

2. Análisis de la inmisión de radón en el módulo sin protección.	44
2.1. Influencia de las presiones atmosféricas.	45
2.2. Influencia de los vientos	46
2.3. Influencia de las temperaturas	46
2.4. Influencia de las precipitaciones.	46
3. Resultado de efectividades de distintas medidas correctoras.	47
3.1. Extracción natural por arqueta central y lateral	48
3.2. Extracción natural por arqueta central	52
3.3. Extracción natural por arqueta exterior.	53
3.4. Retorno a la posición inicial sin medidas de protección	54
3.5. Extracción mecánica (56 W) por arqueta central	54
3.6. Extracción mecánica (80 W) por arqueta central	56
3.7. Extracción mecánica (80 W) por arqueta exterior	57
3.8. Presurización por arqueta central mediante extractor (80 W) colocado en sentido inverso	58
3.9. Ventilación cruzada por muros de sótano con extractor de 80 W	59
3.10. Barrera antiradón	61
4. Análisis y resumen de efectividades.	63
4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS.	69
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios

Colección Informes Técnicos
24.2010

