Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte I. Radiación externa: índice de riesgo radiactivo.

Beatriz Piedecausa García. *Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Universidad de Alicante.*

Servando Chinchón Payá. *Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Universidad de Alicante.*

Miguel Angel Morales Recio. *Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).*

Miguel Angel Sanjuán Barbudo. *Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).*

El presente artículo analiza aspectos relacionados con el concepto de radiactividad natural, profundizando en los tipos de radiactividad existente en los materiales naturales radiactivos NORM ("Naturally Occurring Radioactive Materials") utilizados en la construcción, así como sus fuentes e influencias. Este es un artículo que se presenta como la primera parte de un trabajo sobre la radiactividad natural de los materiales de construcción, cuya segunda parte hace referencia a la radiación interna debida al gas radón emitido de manera natural por dichos materiales y se publica por los mismos autores, en esta misma revista.

Se aborda la necesidad de establecer criterios de control en este tipo de materiales y se analiza el establecimiento de diferentes índices de riesgo según los distintos países. Al mismo tiempo, se realiza un recorrido por el marco normativo, tanto internacional como nacional, relativo a estos materiales NORM.

El presente trabajo es parte de la tesis doctoral de la primera autora del mismo, Beatriz Piedecausa García, a quien el resto de autores agradece su esfuerzo para preparar el texto que ahora se publica y la autorización y las facilidades ofrecidas para acceder a su trabajo.

1. La radiactividad y sus fuentes

1.1 Tipos de radiaciones

Se considera radiación a toda energía que se propaga en forma de ondas electromagnéticas como en el caso de la luz, los rayos X o los rayos infrarrojos (radiaciones electromagnéticas) o en forma de partículas a través del espacio o de un medio material como en el caso de partículas α, β, protones o neutrones (radiaciones corpusculares). Se considera radiactividad a la capacidad de algunas sustancias de transformar sus partículas inestables en otras más estables, emitiendo radiaciones y liberando energía. Las formas más frecuentes de desintegración son la emisión de partículas α, β y de radiación γ.

NOTA Aunque la propuesta de los autores de este artículo era publicarlo en este número por motivos editoriales se publicará en dos partes.

Las radiaciones se pueden clasificar en diversos grupos, destacando la distinción entre radiaciones ionizantes / radiaciones no ionizantes y entre radiaciones naturales / radiaciones artificiales.

- Las radiaciones ionizantes son cualquier radiación electromagnética o corpuscular que al interaccionar con la materia produce la ionización de sus átomos, es decir, origina partículas con carga (iones); radiaciones que poseen la energía suficiente como para modificar la estructura atómica del material con el que interaccionan, pudiendo provocar reacciones, cambios químicos o incluso genéticos en las células. Contrariamente, las radiaciones no ionizantes son aquellas que carecen de tal capacidad y se clasifican a su vez en campos electromagnéticos y radiaciones ópticas (como en el caso de las ondas de radio/televisión o la luz visible).

- Las radiaciones naturales son aquellas que proceden de fuentes de radiación natural como las presentes en el aire (^{222}Rn, ^{14}C), la corteza terrestre (^{226}Ra), el espacio (radiación cósmica), los alimentos (^{24}Na, ^{238}U) o incluso en el interior del cuerpo humano (^{40}K). Por otra parte, las radiaciones artificiales son aquellas que proceden de fuentes que han sido creadas por el hombre para ser empleadas en aplicaciones médicas, industriales o en investigación.

Por tanto, debido a que el propio entorno genera radiaciones de un modo natural, los seres humanos están expuestos a ellas de forma continuada. Las radiaciones ionizantes se pueden subdividir principalmente en (véase la Figura 1):

- Radiación Alfa: es la emisión de partículas alfa (núcleos de Helio formados por dos protones y dos neutrones) que, pese a poseer mucha intensidad energética, tienen una limitada capacidad de penetración en la materia, pudiendo penetrar sólo unos centímetros en el aire y que no consiguen atravesar la piel o el papel.
  Esta radiación transmuta el núcleo emisor en otro elemento químico con dos protones menos, es decir,

desplazándose dos lugares hacia la izquierda en la tabla periódica y cambiando su número másico en 4 unidades y su número atómico en 2.

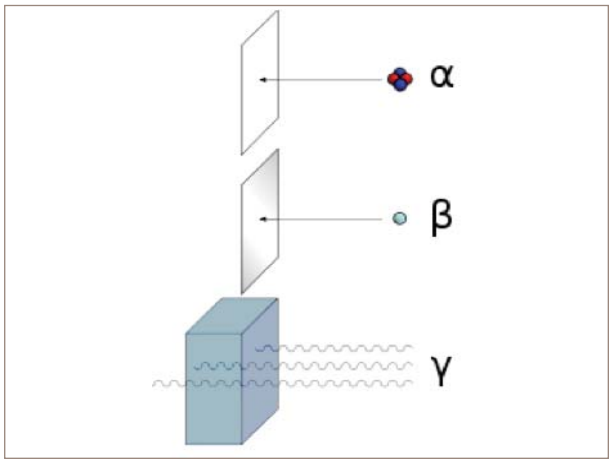
- Radiación Beta: es la emisión de partículas beta, es decir, electrones o positrones de alta energía emitidos por ciertos isótopos. Prácticamente todos los elementos de la tabla periódica tienen isótopos emisores de radiación beta, la cual resulta más penetrante pero menos intensa que la radiación alfa, con un alcance de unos metros en el aire; asimismo, es capaz de penetrar la piel humana y traspasar una hoja de papel aunque incapaz de penetrar en una lámina de aluminio.

  A diferencia de las partículas alfa, las partículas beta no son monoenergéticas, sino que son emitidas con un espectro continuo de energía. Esta emisión también transmuta el elemento químico creando otro con un protón más, por lo que se desplaza un lugar a la derecha en la tabla periódica.

- Radiación Gamma: es la emisión de un fotón y no conlleva la transmutación del elemento sino un reajuste de los protones o neutrones del núcleo pasando a un estado más estable y de menor energía.

  Esta radiación normalmente acompaña a los procesos alfa y beta, con un alcance de unos centenares de metros en el aire y con la capacidad de traspasar el cuerpo humano e incluso varios centímetros el plomo, siendo posible detener su avance con un bloque de hormigón de suficiente grosor.

Figura 1. Poder de penetración de los distintos tipos de radiación ionizante. Una partícula alfa no es capaz de penetrar una lámina de papel, una beta no puede penetrar una lámina de metal y una gamma es capaz de penetrar incluso en grandes espesores de metal. (Fuente: elaboración propia).



Finalmente, a nivel general cabe destacar que los principales elementos radiactivos terrestres no presentan un riesgo importante cuando se encuentran en su estado sólido, puesto que las radiaciones alfa y beta apenas penetran unos micrómetros en la piel humana y son de baja intensidad. Sin embargo, los isótopos radiactivos gaseosos son menos controlables ya que pueden penetrar en el organismo de los seres vivos y generar descendientes que sí son peligrosos radiactivamente hablando. Este es el caso del Radón (^{222}Rn) y de ahí el interés de su estudio en la segunda parte de este artículo, publicada por los mismos autores en esta misma revista.

1.2 Definiciones, Magnitudes y Unidades de medida

Un gran número de definiciones son utilizadas en relación con las radiaciones ionizantes. A continuación están descritas aquellas que presentan un especial interés.

- Exposición externa/interna. Exposición del organismo de los seres vivos a fuentes exteriores o incorporadas en él.
- Irradiación. Transferencia de energía de un material radiactivo a otro material, sin que sea necesario un contacto físico entre ambos.
- Isótopo. Núcleidos con el mismo número de protones y distinto número de neutrones.
- Sustancia radiactiva. Sustancia que contiene uno o más radionucleidos y cuya actividad o concentración no puede considerarse despreciable desde el punto de vista de la protección radiológica.

Respecto a las magnitudes más usuales, cabe destacar:

- Actividad (A). Es el número medio de desintegraciones nucleares que se producen por segundo. Su unidad es el becquerelio (Bq).
- Concentración. Ya sea de un material o de un gas son las desintegraciones por segundo y por unidad de masa o de volumen, respectivamente.
  - Bq/kg si hablamos de la concentración de actividad alfa, beta o gamma de un material sólido. (^{40}K, ^{226}Ra y ^{232}Th).
  - Bq/m^3 si hablamos de la concentración de actividad de un material en aire o en agua como por ejemplo la concentración del radón en aire (^{222}Rn).
  - Bq(EER)/m^3 si hablamos de la concentración de los descendientes del radón. Las siglas EER corresponden a Equilibrio Equivalente de Radón.

  En el sistema Cegesimal la unidad de concentración es el picocurio. Actualmente, es más usual utilizar las unidades del sistema internacional donde, por ejemplo, un picocurio por litro de aire (pCi/l) equivale a 37 Bq/m^3.
- Coeficiente de emanación del radón (ε). Es la fracción de radón que se materializa como gas en los poros de un material.
- Dosis absorbida (D). Es la cantidad de energía cedida por la radiación ionizante a la unidad de masa de material irradiado. Su unidad es el Gray (Gy), es decir julios/kilogramo. La unidad en el sistema Cegesimal es el Rad, con una equivalencia de 100 rad = 1 Gray.
- Dosis absorbida en un órgano o tejido (DT). Es el cociente entre la energía total comunicada a un órgano o tejido (T) y la masa de dicho órgano o tejido.
- Factor de ponderación de la radiación (WR). Factor adimensional que se utiliza para ponderar la dosis absorbida en un tejido u órgano. Por ejemplo, el factor para los rayos gamma, rayos X y partículas beta es 1, mientras que para las partícu-

las alfa es 20, lo que muestra que tienen una capacidad 20 veces mayor de producir daño biológico. (Véase Tabla 1).

Tabla 1. Valores del factor de ponderación de la radiación W_R. (Fuente: NTP 614: Radiaciones ionizantes. Normas de protección. Notas Técnicas de Prevención).

TIPO Y RANGO DE ENERGÍA	WR
Fotones, todas las energías	1
Electrones y muones, todas las energías	1
Neutrones	5-20
Protones	5
Partículas alfa	20

- Dosis equivalente (H_T). Es la cantidad obtenida multiplicando la dosis absorbida (D) por un factor de ponderación del daño biológico de los tejidos (W_R) en función de las diferentes radiaciones ionizantes. Su unidad es el Sievert (Sv).
- Dosis efectiva (E). Es la cantidad obtenida multiplicando las dosis equivalentes para los distintos tejidos y órganos por el factor (W_T) correspondiente a cada uno de ellos y sumando los productos. La unidad para la dosis efectiva es el Sievert (Sv). En el caso del radón y sus descendientes la dosis efectiva se suele expresar en mSv/año, resultado de la media de la concentración de actividad del radón en Bq/m^3 durante un año.
- Periodo de semidesintegración (T). Es el tiempo necesario (T) para que la actividad de un radionucleido se reduzca a la mitad, es decir, para que la mitad de los átomos desaparezcan de la muestra.
- Tasa de exhalación. Cantidad de gas exhalado por la superficie del material desde los poros. Su unidad es el Bq·m^{-2}·h^{-1}.

Por otra parte, también es importante destacar que las unidades más utilizadas son:

- Bequerelio (Bq). Es la unidad de actividad y es igual a una desintegración nuclear o transformación por segundo. La unidad en el sistema Cegesimal es el Curio (Ci) que equivale a 3,7x10^{10} Bq.
- Gray (Gy). Denominación de la unidad de dosis absorbida. Un gray es igual a un julio por kilogramo de masa y equivale a 100 rads en el sistema Cegesimal. 1Gy=1 J/kg.
- Sievert (Sv). Unidad de dosis efectiva y dosis equivalente. Un Sievert es igual a un julio por kilogramo, aunque al ser una unidad muy elevada para su uso en protección radiológica normalmente se utilizan el milisievert (mSv=10-3 Sv) y el microsievert (µSv=10-6 Sv). El Sievert (Sv) equivale a 100 rems en el sistema Cegesimal. Por tanto, 1 Sv=1 J/kg.

2. La radiactividad y los materiales de construcción

Muchos de los materiales de construcción más utilizados en arquitectura o ingeniería pueden contener, en mayor o menor proporción, elementos naturales radiactivos al derivar de rocas o terrenos con presencia de radionucleidos de las series del uranio (^{238}U) y el torio (^{232}Th) o del isótopo radiactivo del potasio (^{40}K) principalmente (véase Tabla 6). A este respecto, cabe destacar que en la serie del uranio, el segmento de la cadena de desintegración a partir del radio (^{226}Ra) es radiológicamente el más importante y por ello a menudo se hace referencia al radio en vez de al uranio como elemento principal a controlar radiactivamente en estos casos.

Por tanto, muchos minerales procesados industrialmente son ricos en radionucleidos pertenecientes a las cadenas de desintegración de los citados elementos, pudiendo generar niveles radiactivos elevados también en sus propios flujos de residuos o en sus subproductos. Y es por ello que en la Directiva 96/29/Euratom del Consejo de la UE de 13 de mayo de 1996 por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes se destacan, entre las actividades identificadas como potencialmente preocupantes, aquellas que se realizan con sustancias que bien contengan radionucleidos naturales o bien conduzcan a su generación en la producción de residuos, causando un aumento significativo de la exposición a la que se ven sometidos tanto los trabajadores como la población en general.

Según el documento "Radiation Protection 112" de la Unión Europea, la exposición a la que se ve sometido el ser humano debido al contenido radiactivo de los materiales de construcción se puede clasificar en dos tipos:

- La exposición externa está relacionada con la radiación gamma emitida por los isótopos naturales presentes en los materiales de construcción y que, en cierto modo, contribuye a incrementar el nivel de radiación existente. Según el documento "Radiation Protection 112", a nivel global cabe destacar que las concentraciones medias mundiales de uranio (^{238}U), torio (^{232}Th) y potasio (^{40}K) en la corteza terrestre son de unos 40 Bq/kg, 40 Bq/kg y 400 Bq/kg respectivamente.
  En la Tabla 2, perteneciente al documento europeo "Radiation Protection 112" se presentan cuatro ejemplos del incremento de dosis efectiva anual debido a la radiación generada por los materiales de construcción constituyentes de techos, paredes o suelos, según distintas situaciones de mayor o menor actividad radiactiva, calculados mediante un programa informático.
  Como ejemplo práctico, la normativa indica que un habitante que vive en un apartamento de bloques de hormigón con una actividad media de 40 Bq/kg, 30 Bq/kg y 400 Bq/kg para el radio (^{226}Ra), torio (^{232}Th) y potasio (^{40}K) respectivamente, recibe un incremento de dosis efectiva anual de cerca de 0,25 mSv respecto a la que se recibiría de manera natural al aire libre (fondo natural).
  Por tanto, la existencia de niveles elevados de radionucleidos naturales en los materiales de construcción puede causar un aumento de dosis efectiva anual incluso de 2 mSv por año, aunque generalmente el valor final está muy alejado de 1,1 mSv por año (correspondiente a situaciones límites) ó de 2,3 mSv (correspondiente a situaciones excepcionales).

Tabla 2. Exceso de dosis efectiva anual generada por la radiación gamma natural de los materiales de construcción en cuatro hipótesis diferentes de intensidad de actividad radioactiva. Esta dosis es el exceso con respecto al fondo medio radiactivo procedente de la corteza terrestre. Los valores de los parámetros utilizados para el cálculo de la dosis se dan en la Tabla 3 de la misma norma. (Fuente: "Radiation Protection 112. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials").

Concentración de actividad (Bq/kg)				
Radionucleidos	Material de baja actividad	Media en hormigón	Alto nivel de normalidad	Mayor concentración
^{226}Ra	10	40	100	200
^{232}Th	10	30	100	200
^{40}K	300	400	1000	1500

Exceso de dosis anual				
Estructuras en el edificio que causan la irradiación	Material de baja actividad	Media en hormigón	Alto nivel de normalidad	Mayor concentración
Suelos, techos y paredes (todas las estructuras)	menos que la dosis de fondo	0,25 mSv	1,1 mSv	2,3 mSv
Suelos y paredes (p.ej. techo de madera)	menos que la dosis de fondo	0,10 mSv	0,74 mSv	1,6 mSv
Suelos únicamente (p.ej. casa de madera con suelos de hormigón)	menos que la dosis de fondo	menos que la dosis de fondo	0,11 mSv	0,41 mSv

- La exposición interna está relacionada con la inhalación de los gases radón (^{222}Rn), junto con sus descendientes de corta duración, y el torón (^{220}Rn), exhalados desde los materiales de construcción. El radón es parte de la serie del uranio (^{238}U) y el torón es parte de la serie del torio (^{232}Th) estando presentes ambos, en mayor o menor medida, en los distintos materiales utilizados en la construcción. También es importante comentar que, debido a que el radón es un gas inerte, por lo general sólo una fracción del radón producido en los intersticios del material consigue llegar a la superficie y entra a formar parte del aire existente en los ambientes habitables; moviéndose más libremente en los materiales más porosos o fragmentados.

  A nivel global, la aportación a la concentración media de radón en interiores debida a los materiales de construcción se encuentra entre los 10-20 Bq/m^3, aunque en casos excepcionales pudiera llevar a valores ciertamente considerables. Por tanto, a pesar de que la fuente más importante de radón en ambientes interiores es el propio terreno donde se ubica, en algunos casos también los materiales de construcción pueden convertirse en materiales que aportan cierta concentración. Este caso puede ocurrir en las estancias ubicadas en los niveles altos de las construcciones ya que, al encontrarse más alejadas del aporte generado por el propio terreno natural, la concentración existente en el espacio estará más influida por el aporte proveniente de los materiales constructivos utilizados que por el propio terreno.

  Por último, cabe destacar que los materiales de construcción son la fuente más importante de torón en los espacios interiores, siempre teniendo en cuenta que la concentración de torón suele ser más bien baja y está relacionada con la existencia de altas concentraciones de torio en el propio material, situación que se produce en casos muy concretos y puntuales.

Así, el empleo en construcción de materiales naturales y subproductos de procesos industriales que contienen algunos de los radionucleidos citados anteriormente es bastante habitual y, por tanto, se hace preciso un control que decida sobre la aceptabilidad de dichos materiales y prevenga de posibles emisiones de radiación en los ambientes interiores habitables. Por tanto, es necesario establecer una limitación a nivel de diseño en las nuevas construcciones debido a que muchos de los materiales de construcción generan un ligero aporte de radón actuando en ciertos casos como fuentes significativas del aumento de su concentración en los ambientes interiores.

De este modo, tras la publicación de Directivas Europeas al respecto y las recomendaciones generales de distintos documentos no normativos, algunos estados europeos ya han establecido normas específicas sobre el contenido radiactivo de sus materiales de construcción, trasponiendo las directrices generales en reglamentos específicos nacionales tal y como se comentada en los apartados siguientes.

2.1 Criterios de control

La finalidad del establecimiento de controles sobre el contenido radiactivo de los materiales de construcción es evaluar el cumplimiento de la limitación de la exposición humana a niveles elevados de radiación, verificando que se mantienen unas dosis bajas; así, en toda evaluación de impacto radiológico es fundamental tener en cuenta el principio Alara ("as low as reasonably achievable"-tan bajas como sea razonablemente factible teniendo en cuenta factores sanitarios, económicos y sociales).

Debido a que todos los materiales de construcción emiten radiaciones en mayor o menor medida (existiendo pequeñas emisiones de este tipo en todas partes), los controles deben circunscribirse a aquellos elementos que están por encima de los niveles típicos de exposición y sus variaciones más habituales; facilitando o restringiendo el uso de ciertos materiales en la construcción con las importantes consecuencias económicas, ambientales y sociales que esta medida supondría tanto a nivel local como a nivel nacional.

Desde el punto de vista de protección radiológica dentro de la Unión Europea, según el documento "Radiation Protection 112" las dosis derivadas de la emisión de rayos gamma por los materiales de construcción deben ser inferiores a 1 mSv/año, limitándose adicionalmente la concentración de ^{226}Ra en los materiales hasta niveles que normalmente no puedan dar lugar a una concentración de radón en interiores superior al nivel de diseño de 200 Bq/m^3 propuesto en la Recomendación 90/143/Euratom de la Comisión de la UE de 21 de febrero de 1990 relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios; siendo, en la construcción actual, muy excepcionales los casos en los que se sobrepasa el valor de 1 mSv/año.

Al respecto, la Directiva 89/106/CEE del Consejo Europeo de la UE sobre productos de construcción declara en 1989 que "*la obra de construcción debe proyectarse y construirse de tal manera que no sea una amenaza para la higiene o la salud de los ocupantes o vecinos, en particular, como resultado de [...] la presencia de partículas o gases peligrosos en el aire [o] la emisión de radiaciones peligrosas [...].*" De este modo, y a pesar de que la Directiva no sugiera límites concretos de radiactividad, no existe duda de que tanto los radionucleidos presentes en los materiales de construcción como el gas radón originado por ellos están englobados en esta definición y, por tanto, se hacen necesarios controles con el fin de verificar la restricción de las dosis individuales más altas.

Según el documento "Radiation Protection 112", los controles sobre la radiactividad de los materiales de construcción se pueden basar en dos tipos de criterios radiológicos:

a) Criterio de dosis
Los controles se basan en datos de dosis efectivas teniendo en cuenta la generalidad de las circunstancias nacionales. Dentro de la Unión Europea, las aportaciones a las dosis superiores a 1 mSv/año se deben tomar en cuenta desde el punto de vista de protección radiológica y se recomienda que los controles se basen en rangos de dosis entre 0,3 a 1 mSv/año.

b) Nivel de exención
Los materiales de construcción europeos quedan exentos de todas las restricciones y controles relacionados con su radiactividad si el exceso de radiación gamma procedente de ellos aumenta la dosis efectiva anual de un usuario por debajo de 0,3 mSv/año; incremento de dosis que debe ser calculado restando la dosis efectiva recibida al aire libre (fondo natural) y que se estima en 50 nGy/h para los países de la Unión Europea.

Es necesario comentar que deben considerarse por separado las limitaciones para el radón y el torón exhalado de los materiales de construcción cuando evaluaciones previas muestren que el material puede ser una importante fuente de radón o torón en los espacios interiores y se sepa que, restringiendo esa fuente, se limita la exposición de una manera efectiva. Así, se permitirá la entrada de estos materiales en el mercado (incluidos los de importación y exportación en la UE) y su utilización para la construcción, sin restricción alguna con relación a su contenido radiactivo.

Por tanto, la evaluación del impacto radiológico de los materiales de construcción comprende el análisis de las vías de exposición, potenciales o existentes, tanto para el hombre como para el medio ambiente (plantas, animales, terrenos, aguas, etc.) y debe ser discutido con detenimiento. Además, también es importante tener en cuenta que en otras ocasiones los subproductos industriales se utilizan como materiales de construcción en sí mismos o se incorporan a otros elementos, haciéndose imprescindible la medida de la concentración de actividad en el producto final y el contenido radiactivo de todos sus componentes.

Finalmente, es necesario destacar que las medidas de las concentraciones de actividad en los materiales de construcción deben hacerse con un equipo adecuado, de calidad y calibrado de un modo fiable. Si el valor de referencia del índice de riesgo radiactivo (del que se hablará más detenidamente en el apartado siguiente) es superado, deberán realizarse evaluaciones adecuadas para la estimación de dosis. En dichas evaluaciones, el productor o distribuidor será el responsable de asegurar y demostrar que un material puesto en el mercado cumple con los requisitos radiológicos establecidos por los Estados miembros.

Por último, cabe remarcar que las medidas in situ del contenido radiactivo de materiales dudosos en edificaciones existentes son necesarias sólo en los casos en que exista una razón específica para dudar sobre la superación de las dosis máximas permitidas. Como referencia, el documento europeo "Radiation Protection 112" recoge la siguiente Tabla 3 en la que se muestra la probabilidad de encontrar valores altos de radiactividad en varios materiales de construcción comúnmente utilizados, como pueden ser el hormigón en masa, el hormigón ligero, ladrillos de termoarcilla, ladrillos de arena/cal, piedras naturales aplicadas en edificación y paneles o bloques de yeso.

De este modo, se indica que los materiales que pueden contener en su composición otros con capacidad radioactiva, deben comprobar que no generan una dosis efectiva superior a 0,3 mSv/año ya que, en caso contrario pueden, en función de su uso en la construcción, dar lugar a dosis superiores a 1 mSv/año, lo que actualmente resulta excepcional.

2.2 Índice de Riesgo Radiactivo (I)

En 1999, el documento de la Unión Europea "Radiation Protection 112: Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials", propuso el cálculo de

Tabla 3. Posibilidad de sobrepasar los 0,3 mSv ó 1 mSv debido al uso de ciertos materiales de construcción. (Fuente: "Radiation Protection 112. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials").

Material de construcción	Exposición por encima de 0,3 mSv/circunstancias o explicación	Exposición por encima de 1 mSv/circunstancias o explicación
Hormigón	POSIBLE / casi en cualquier lugar donde se utilizan cantidades masivas	POSIBLE / si se utilizan cantidades masivas y el hormigón contiene cantidades elevadas de escoria de alto horno, cenizas volantes o arena natural o de roca rica en radionucleidos naturales
Hormigón aireado y ligero	POSIBLE / si se utiliza escoria de alto horno, ceniza volante o materiales ricos en radionucleidos naturales	NO PROBABLE / se utiliza sólo en las paredes
Ladrillos de arcilla	POSIBLE / si se utiliza arcilla rica en radionucleidos naturales	NO PROBABLE / se emplea sólo en las paredes
Ladrillos de cal	NO PROBABLE / concentración de actividad baja, uso limitado (sólo en paredes)	NO PROBABLE / concentración de actividad baja, uso limitado (sólo en paredes)
Piedra natural	NO PROBABLE / uso superficial o de otro tipo en una cantidad menor POSIBLE / si se usa en cantidades masivas	NO PROBABLE / uso superficial o de otro tipo con un uso menor POSIBLE / si se utiliza en cantidades volumétricas
Placas o bloques de yeso	NO PROBABLE / yeso natural POSIBLE / si se emplean subproductos de yeso ricos en radio	NO PROBABLE / uso superficial o sólo en las paredes

un índice (I) para limitar las concentraciones de actividad de los radionucleidos naturales presentes en los materiales de construcción, sólo teniendo en cuenta la radiación gamma emitida por ellos.

En diferentes normas y publicaciones, este índice es identificado con distintos nombres como pueden ser `índice de riesgo radiactivo´, `índice de actividad´, `índice de actividad radiactiva´, `índice de concentración de actividad´, `índice gamma´, `índice de radiación gamma´ o `índice de actividad gamma´, entre otros.

El citado documento "Radiation Protection 112" proporciona una tabla de valores límite para este índice en función del criterio de dosis aprobado y el uso previsto del material (estructural o de acabado). A nivel general, muchos países europeos y no europeos han tomado algunas decisiones con respecto a estos límites máximos, expresados normalmente por medio de una suma (o índice) que habitualmente debe ser inferior o igual a 1. Término, usualmente llamado "índice de riesgo radiactivo (I)", que considera las concentraciones de radio (^{226}Ra), torio (^{232}Th) y potasio (^{40}K) existentes en el material de construcción, respondiendo a una expresión genérica de tipo:

$$I = A(^{226}Ra)/I(^{226}Ra) + A(^{232}Th)/I(^{232}Th) + A(^{40}K)/I(^{40}K),$$

donde

A (x) = actividad radiactiva medida en el propio material (Bq/kg).
I (x) = parámetros fijos (Bq/kg).

Los valores de I(x) para cada uno de los tres términos varían en función de los distintos países debido a los diferentes niveles de concentración de radionucleidos existentes según los materiales más utilizados en cada país y las consecuencias socioeconómicas del uso o prohibición de los mismos.

Tabla 4. Valores del índice de riesgo radiactivo (I) en Bq/kg, en países europeos.

PAÍS EUROPEO	I_{Ra-226} (Bq/kg)	I_{Th-232} (Bq/kg)	I_{K-40} (Bq/kg)	BIBLIOGRAFÍA
Austria	1000	670	10.000	Onorm, 1995.
Dinamarca	300	200	3.000	Mustonen et al. 1997.
Finlandia	300	200	3.000	Markkanen. 1995/Mustonen et al. 1997.
Luxemburgo	350	250	5.000	Mustonen et al. 1997/Risica, 1998.
Noruega*	300	200	3.000	Risica, 1998.
Polonia	370	233	3.700	Chen et al. 1996.
Suecia**	(1.000)	(700)	(10.000)	Risica, 1998.
Hungría	185	259	4.810	Chen et al. 1996.
Yugoslavia	400	300	5.000	Pavlovic et al. 1996.

* En Noruega hay otro límite de 300 Bq/kg de ^{226}Ra de materiales tales como arena, gravas, etc, que se usan al aire libre para el drenaje alrededor de los edificios.
** En Suecia el Reglamento tenía otro límite de 200 Bq/kg para ^{226}Ra. Sin embargo, el reglamento sobre los materiales de construcción dejó de estar vigente en 1994 (por esta razón, los valores están entre paréntesis). El constructor elige el material pero es el responsable de asegurar que la concentración final de radón en interiores no exceda de 200 Bq/m^3 y la dosis debido a la radiación gamma sea <0,5 mSv/h.

Tabla 5. Valores del índice de riesgo radiactivo (I) en Bq/kg, en países no europeos.

PAÍS NO EUROPEO	I_{Ra-226} (Bq/kg)	I_{Th-232} (Bq/kg)	I_{K-40} (Bq/kg)	BIBLIOGRAFÍA
Brasil	370	259	4.810	Venturini et al. 1997.
China	350	260	4.000	Chen et al. 1996.
Israel	198	243	4.500	Nisnevich et al. 1997.
URRS	370	260	4.810	Chen et al. 1996.

En las tablas 4 y 5, se muestran los distintos coeficientes para el parámetro I(x) usados por países europeos y no europeos según los datos aportados por Risica, S. (1998) y Risica, S. et al. (1999).

2.3 Materiales NORM ("Naturally Occurring Radioactive Materials") utilizados en construcción

Se denominan Materiales Radiactivos de Origen Natural (en inglés NORM: "Naturally Occurring Radioactive Materials") a aquellos materiales que emiten radiaciones de forma natural. Estos materiales contienen niveles significativos de radionucleidos naturales que durante la industrialización son extraídos y procesados, haciéndose imprescindible establecer unos controles de su influencia y actividad, ya que el procesamiento posterior de dichos materiales puede incluso hacer aumentar la concentración radiactiva que tenían inicialmente. De este modo, es posible que los productos derivados y los productos finales del proceso industrial lleguen a aumentar los niveles de exposición a la que se ven sometida tanto los trabajadores como los usuarios.

La fuente más importante de actividad en los materiales NORM se debe a la presencia de los isótopos producto del decaimiento en las series del uranio y del torio, tal y como se ha comentado anteriormente. Este tipo de elementos radiactivos se encuentran en las corrientes de residuos generados en distintas industrias como por ejemplo las de producción de metales, barros o escorias; y a pesar de que el contenido de los radionucleidos en estos materiales puede ser relativamente pequeño, en algunos ambientes de trabajo pueden dar lugar a aportes considerables en las dosis de radiación de los propios trabajadores pertenecientes a estas industrias.

Según los datos recogidos en distintas normativas, los materiales NORM se pueden dividir en dos grandes grupos:

a) Los materiales naturales:

- Esquistos.
- Materiales de construcción y adiciones naturales de origen ígneo como son:
  - Granito.
  - Gneis.
  - Pórfidos.
  - Sienita.
  - Basalto.
  - Toba.
  - Puzolana.
  - Lava.

b) Los materiales que incorporan residuos procedentes de las industrias de transformación natural:

- Cenizas volantes.
- Yeso fosfatado.
- Escoria de fósforo.
- Escoria de estaño.
- Escoria de cobre.
- Fango o lodo rojo (residuo de la producción de aluminio).
- Residuos de la producción del acero.

De modo que, tanto ciertos subproductos industriales como algunos de los residuos generados en otros procesos que se utilizan como materias primas en la industria de la construcción, podrían contener materiales NORM que lleguen a plantear un problema radiológico. Tal es el caso de las cenizas volantes procedentes de la combustión de carbón utilizadas en la producción de hormigón y en la fabricación de ladrillos; los fosfoyesos de la industria del fosfato que se utilizan como un sustituto del yeso natural en la fabricación de placas de yeso (actualmente se está cuestionando su utilización por su contenido de ^{226}Ra) y las cenizas de fondo procedentes de la combustión del carbón o las escorias del horno de fundición de metales que se utilizan como árido en la construcción de carreteras. Estos son materiales que pueden contener altas concentraciones de uranio (^{238}U), torio (^{232}Th) o su progenie radiactiva, además de potasio (^{40}K).

Por último, es necesario tener en cuenta que algunos de los materiales de construcción comúnmente utilizados también pueden liberar radón, como es el caso de las escorias de alto horno, las cenizas volantes, las piedras naturales como el granito o la pizarra, los ladrillos, el cemento portland, la arena, la grava, el yeso natural y, en niveles mínimos, la madera. Productos que pudieran, como ciertos ladrillos y hormigones, generar concentraciones elevadas de radón ambiental si los materiales base de los que están compuestos se hubieran extraído de zonas con alta radiación natural, como es el caso de algunas tobas volcánicas o puzolanas.

3. Marco normativo relativo a materiales NORM

3.1 Legislación respecto a NORM en el mundo

3.1.1 Estados Unidos

Desde mediados de los años 70, la EPA ("Environmental Protection Agency") ha llevado a cabo varios estudios con los que se puede determinar el riesgo para la salud y el medio ambiente

debido a las radiaciones provenientes de los materiales NORM generados en diversas industrias.

Para la evaluación de dichos riesgos, se ha considerado una estrategia principal con cuatro objetivos que intentan abordar el problema:

- El estudio de las industrias generadoras de materiales NORM, determinando la composición de sus residuos y el riesgo asociado.
- La identificación y estudio de los procesos donde están presentes los materiales NORM, alcanzando una visión nacional del problema, teniendo en cuenta la ubicación de los residuos, la composición de los mismos y el riesgo asociado.
- La propuesta y el desarrollo de guías para controlar, de una forma segura y práctica, las exposiciones generadas por los residuos NORM con contenidos radiactivos.
- El trabajo conjunto con otras organizaciones que estén tratando el problema de los materiales NORM, incluyendo agencias estatales y federales, grupos ambientales e industriales y organizaciones internacionales.

Muchos Estados norteamericanos consideran que los materiales NORM deben tener regulaciones específicas, considerando a las normativas estatales como regulaciones propias que alcanzan tanto al material, como al equipamiento o al terreno que haya sido contaminado con sustancias radiactivas.

Así, Louisiana fue el primer Estado que desarrolló un programa regulatorio para NORM ("Louisiana Department of Environmental Quality 1992"), obligando a que los operadores que manipularan o poseyeran materiales NORM con una presencia radiactiva por encima de ciertos valores debieran solicitar una licencia de operación específica.

3.1.2 Canadá

Las guías "Canadian Guidelines for the Mmanagement of Naturally Occurring Radioactive Materials" (NORM) se basan en las procedimientos recomendados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y por la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear (CNSC).

Su principio básico es considerar que los trabajadores y la población en general están expuestos a fuentes adicionales de radiación debido a actividades relacionadas con los materiales NORM y sostienen que los mismos principios de protección a la radiación que se aplican a las actividades nucleares deberían aplicarse a las actividades NORM.

De este modo, en las industrias se establece un programa de utilización y manipulación de los materiales NORM que los clasifica en base a la dosis máxima anual recibida tanto para la población en general como para los trabajadores.

Los límites que se aplican en el trabajo para los NORM se consideran en función de la tasa de exposición, de la concentración de radón y del límite anual de incorporación (ALI), que es la cantidad de material radiactivo que un trabajador puede ingerir o inhalar cada año, pudiendo implicar protección respiratoria y/o limitación del tiempo de exposición.

Finalmente, cabe destacar que respecto a la utilización y manipulación de los materiales NORM, las guías recomiendan que un material conteniendo NORM pueda ser reciclado y empleado sin restricciones radiológicas cuando la dosis asociada no sea mayor a 0,3 mSv/año. Estos valores son denominados límites derivados de liberación incondicional.

3.2 Legislación respecto a NORM en Europa

3.2.1 Unión Europea

En la actualidad, existen grupos de trabajo elaborando informes con relación a los materiales de construcción NORM con el fin de generar regulaciones globales consensuadas por los distintos países europeos. Hasta que esto ocurra, a nivel de la Unión Europea existen en la actualidad distintas normativas relacionadas con los materiales radiactivos naturales NORM utilizados en el campo de la construcción como son:

a) **Directiva 89/106/CEE del Consejo de 21 de diciembre de 1988. Relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los estados miembros sobre los productos de construcción, 1989.**

En su apartado 3 `Higiene, Salud y Medioambiente´ indica la necesidad de proyectar y construir sin amenaza para la salud de los ocupantes como consecuencia de partículas o gases peligrosos y la emisión de radiaciones peligrosas.

Plantea que el medioambiente interior debe ser saludable y se tendrán en cuenta como contaminantes el radón y las sustancias radiactivas que emitan radiaciones gamma; aunque por el momento este requerimiento legislativo no se ha puesto en práctica en nuestro país a la hora de la construcción de nuevos edificios.

Respecto a la limitación de los niveles de radiación de los materiales de construcción, únicamente realizaba una somera referencia a la "*presencia de partículas o gases peligrosos en el aire*", sin mayores precisiones a nivel comunitario.

b) **Radiation Protection 112. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials, 1999.**

El presente documento establece un criterio de control de la dosis generada por la radiación gamma emitida por los materiales de construcción de entre 0,3-1 mSv/año por encima de la dosis de fondo, es decir, de aquella que existe al aire libre.

- Las dosis que excedan más de 1mSv/año sólo pueden ser aceptadas en casos excepcionales donde los materiales son usados localmente.

Tabla 6. Concentración típica y máxima de actividad en los materiales de construcción y subproductos industriales más comúnmente utilizados como materiales de construcción en la Unión Europea. Las concentraciones típicas son las medias nacionales ponderadas en la población de los diferentes Estados miembros. Las concentraciones máximas son los valores máximos de referencia. (Fuente: UE. "Radiation Protection 112. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials").

MATERIAL	Valores normales de concentración de actividad (Bq/kg)			Valores máximos de concentración de actividad (Bq/kg)		
Materiales de construcción comunes	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)
Hormigón	40	30	400	240	190	1.600
Hormigón aireado ligero	60	40	430	2.600	190	1.600
Ladrillos de arcilla roja	50	50	670	200	200	2.000
Ladrillos de limos/arenas	10	10	330	25	30	700
Piedra natural	60	60	640	500	310	4.000
Yeso natural	10	10	80	70	100	200
Fosfoyesos	390	20	60	1.100	160	300
Escorias de alto horno	270	70	240	2.100	340	1.000
Cenizas volantes procedente de la combustión del carbón	180	100	650	1.110	300	1.500

- Se establece un nivel de exención si las radiaciones gamma derivan hacia una dosis anual máxima de 0,3mSv/año.
- Se sugiere un índice de medida de la actividad radiactiva para la identificación de aquellos materiales que es necesario controlar.

Según esta normativa las concentraciones medias mundiales de radio, torio y potasio en la corteza terrestre son de unos 40 Bq/kg, 40 Bq/kg y 400 Bq/kg, respectivamente, y en ella se resumen una serie de valores de concentración típica y máxima de actividad para distintos materiales de construcción utilizados en la Unión Europea según la Tabla 6.

Además, sugiere un índice de riesgo radiactivo para identificar los materiales que han de ser considerados como emisores radiactivos, debido a que más de un radionucleido presente en ellos contribuye a aumentar la dosis efectiva recibida en función de sus formas de uso y de las cantidades en que se utiliza como material constructivo en un edificio.

El citado índice de riesgo radiactivo (I) se establece en función de un criterio de dosis según la siguiente expresión:

$$I = \frac{C_{Ra}}{300\ Bq\ kg^{-1}} + \frac{C_{Th}}{200\ Bq\ kg^{-1}} + \frac{C_K}{3.000\ Bq\ kg^{-1}}$$

donde C_{Ra}, C_{Th}, C_K son las concentraciones de Radio (^{226}Ra), Torio (^{232}Th), y Potasio (^{40}K), respectivamente, en Bq/kg presentes en el material de construcción.

Índice que no podrá superar los valores recogidos en la Tabla 7, dependiendo del criterio de dosis, la forma y la cantidad en la que el material de construcción es utilizado en un edificio.

Tabla 7. Valores del índice de concentración de actividad según la dosis efectiva sea de 0,3 mSv/año o de 1 mSv/año. (Fuente: UE. "Radiation Protection 112. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials").

CRITERIO DE DOSIS	0.3 mSv/año	1 mSv/año
Materiales utilizados en cantidades masivas (por ejemplo: hormigón).	I≤0,5	I≤1
Materiales de uso superficial y otros empleados en cantidades discretas (por ejemplo: azulejos, tableros).	I≤2	I≤6

Obsérvese que, empleando los valores de las concentraciones de actividad típicas del hormigón de la Tabla 6, se obtiene un valor para el índice de riesgo radiactivo I=0,41<0,5. Por tanto, la dosis generada por el hormigón convencional por encima de la dosis de fondo, calculada según el anexo II del documento "Radiation Protection 112", presenta un valor de 0,25 mSv/año. Lo que determina que el hormigón convencional está exento de controles de radioactividad.

La normativa advierte que el índice de riesgo radiactivo (I) se debe utilizar sólo como herramienta de detección e identificación de materiales que podrían ser motivo de preocupación, considerando que cualquier decisión real sobre la restricción de uso de un material debe basarse en una evaluación de las dosis generadas por cada uno de los elementos por separado. Dicha evaluación debe basarse en aquellos escenarios donde el material se utiliza de una manera habitual, debiendo evitarse escenarios teóricos.

Finalmente, según los cálculos del anexo I de la citada norma, se puede establecer que si se considera una dosis de fondo media de 50 nGy/h al aire libre en Europa:

- Los factores correspondientes a un criterio de dosis de 0,3 mSv/año son 121 Bq/kg, 101 Bq/kg y 1.390 Bq/kg, respectivamente, para el radio, torio y potasio presentes en el material de construcción.
- Los factores correspondientes a un criterio de dosis con el valor límite 1 mSv/año son 276 Bq/kg, 231 Bq/kg y 3.176 Bq/kg, respectivamente, para el radio, torio y potasio.

Por otra parte, si se considera una dosis de fondo media de 70 nGy/h al aire libre en Europa y no cambiando el plateamiento anterior:

- Los factores correspondientes a un criterio de dosis de 0,3 mSv/año son 510 Bq/kg, 437 Bq/kg y 6.378 Bq/kg, respectivamente, para el radio, torio y potasio presentes en el material de construcción.
- Los factores correspondientes a un criterio de dosis con el valor límite 1 mSv/año son 1.701 Bq/kg, 1.458 Bq/kg y 21.259 Bq/kg, respectivamente, para el radio, torio y potasio.

c) **Draft European Basic Safety Standards Directive. Versión 24 febrero 2010.**

El borrador se encuentra en proceso de elaboración en la Unión Europea y sigue proponiendo la utilización de un índice de riesgo radiactivo (I) para determinar la radiación gamma emitida por los materiales de construcción como una herramienta de detección e identificación de materiales radiactivos.

Determina si éstos han de estar exentos de control o si deben estar sujetos a ciertas restricciones, teniendo en cuenta que existen unos niveles naturales usualmente en los materiales. Para ello, plantea la misma fórmula que en la normativa anterior "Radiation Protection 112" para el cálculo del índice como medio de identificación de los distintos materiales de construcción, que tiene en cuenta las concentraciones de los radionucleidos primordiales Radio (^{226}Ra), Torio (^{232}Th) (o su descendiente ^{224}Ra) y Potasio (^{40}K).

Además, establece distintos anexos en los que se contemplan distintas disposiciones relacionadas con los materiales NORM:

- Anexo 8. Relación de sectores industriales afectados por NORM.
- Anexo 9. Criterios de exención.
- Anexo 14. Relación indicativa de los tipos de materiales de construcción considerados para las medidas de control en relación con su radiación gamma emitida.
- Anexo 15. Definición y uso del índice de riesgo radiactivo (I) emitido por los materiales de construcción.

d) **"Radiation Protection 122. Practical use of the concepts of clearance and exemption. Part II. Application of the concepts of exemption and clearance to natural radiation sources", 2002.**

Establece las industrias que deben ser motivo de control respecto a sus emisiones radiactivas indicando los radionucleidos dominantes y las concentraciones habituales. Además propone un criterio de exención en función de las dosis efectivas anuales máximas.

Presenta una guía para los Estados miembros sobre cómo aplicar los conceptos de informe, autorización, niveles de exención y acreditación en actividades laborales donde la presencia de fuentes de radiación natural lleven a un incremento significativo de la exposición de trabajadores y la población en general en industrias en las que el material no sea usado por sus propiedades físiles o radiactivas.

Con respecto al control de la exposición de los trabajadores, la Unión Europea llevó a cabo un proyecto para afrontar el problema estableciendo niveles de referencia para la regulación de las industrias involucradas. Este estudio se llevó a cabo junto con el NRBP ("National Radiological Protection Board") y el CEPN ("Centre d'Etude sur l'Evaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire") dando como resultado la elaboración de los documentos "Radiation Protection 95 Reference levels for workplaces processing materials with enhanced levels of naturally-occurring radionuclides" y "Radiation Protection 107, Establishment of reference levels for regulatory control of workplaces where materials are processed which contain enhanced levels of naturally-occurring radionuclides".

e) **"Radiation Protection 135. Effluent and dose control from European Union NORM industries: Assessment of current situation and proposal for a harmonized Community approach", 2003.**

Estudia del marco reglamentario en los países miembros con respecto a los materiales NORM y propone niveles de evaluación en GBq/año para los vertidos NORM al mar, aire o ríos y la evaluación de los niveles correspondientes a los criterios de dosis de 10, 100 y 300 µSv.

Dentro de los países europeos diferencia 3 grupos con relación a la normativa existente respecto a las industrias NORM:

- Categoría 1. Se han identificado las industrias y existe legislación al respecto, como es el caso de países como Alemania, Finlandia, Grecia, Holanda, Luxemburgo y Reino Unido.
- Categoría 2. La identificación de las industrias y la legislación está aún incompleta, como es el caso de países como Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Francia, Irlanda, Italia y Suecia.
- Categoría 3. No se ha iniciado la identificación de industrias y la legislación está incompleta, como es el caso de Portugal.

3.2.2 Normativas propias de cada país europeo

Con el fin de limitar el uso de materiales de construcción con significativas concentraciones de radionucleidos, muchos países han emitido disposiciones legislativas propias para gestionarlos y controlarlos. En general, estas regulaciones hacen uso de un

índice de riesgo radiactivo (I), tal y como se ha comentado previamente, que en muchos casos debe ser igual o menor que 1.

Para el cálculo del índice anterior, los coeficientes para el Radio (^{226}Ra), Torio (^{232}Th) y Potasio (^{40}K) son distintos según cada país debido a varias razones:

- El valor de dosis efectiva desde el que derivan y el modelo de habitáculo utilizado para su determinación no son siempre los mismos.
- En ciertas regulaciones como la de Finlandia, la tasa de dosis absorbida en el aire exterior promediada en todo el país se sustrae de la tasa de dosis absorbida en el aire en el interior, antes de que la dosis efectiva y el coeficiente correspondiente a cada uno de los radionucleidos sean calculados; mientras que en otros países no se hace dicha sustracción.
- Los diferentes niveles de actividad en los materiales típicos de cada país y las consecuencias socio-económicas de la prohibición de su uso o comercialización también pueden ser considerados, influyendo en las propias normativas.

De este modo, a partir de las normativas europeas a nivel general, ciertos países han creado regulaciones nacionales propias con respecto a los NORM empleados como materiales de construcción. Valores que se recogen en la Tabla 8.

Finalmente, cabe destacar que en 1975 Suecia tomó la decisión de prohibir el hormigón ligero con esquistos (un material de origen natural) teniendo en cuenta que era muy peligroso, mientras que Bélgica y otros países hicieron lo propio prohibiendo el fosfoyeso, un subproducto industrial.

3.3 Legislación con respecto a NORM en España

Las desaparecidas Normas Básicas de la Edificación recogían los aspectos técnicos y constructivos puntuales a resolver en las construcciones españolas. Normativas que con la aparición del Código Técnico de la Edificación (CTE) se agrupan de forma sistematizada basándose en las distintas prestaciones a cumplir por los nuevos edificios.

Con objeto de incluir dentro del Código Técnico de la Edificación (CTE) un apartado relativo a la protección de las construcciones frente al radón, análogo a los ya existentes en los códigos de edificación de otros países, se creó un grupo de trabajo formado por personal del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc) y el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

Entre los temas desarrollados dentro de dicho grupo, se llevó a cabo una clasificación del territorio peninsular en cuanto a la potencialidad de exposición al radón en el interior de las edificaciones. Esta clasificación se realizó en distintos niveles, uno específico del terreno existente en la zona donde se pretendía edificar y uno que dividía el territorio peninsular en distintas zonas de riesgo. Adicionalmente se trataron temas como la presencia y contenido de un apartado genérico de protección al radón, la propuesta de un valor de concentración de radón máximo a nivel de diseño para las nuevas construcciones y dos protocolos, uno de medida de la concentración de radón en el interior del terreno y otro para comprobar las concentraciones de este isótopo en las viviendas construidas, además de una serie de soluciones constructivas a incorporar en los nuevos edificios con el fin de mitigar o en ciertos casos evitar las elevadas concentraciones de radón en espacios interiores.

Los temas indicados formaron parte de un documento recopilatorio titulado Protección al radón en edificios de nueva construcción en el ámbito del Código Técnico de la Edificación (CTE) que fue valorado favorablemente por el Pleno del CSN el 5 de febrero de 2003 pero, sin embargo, el CTE se aprueba sin incluir un apartado relativo a la protección frente al ^{222}Rn y sus descendientes en el interior de las edificaciones a pesar de haberse considerado su introducción dentro de los requisitos de habitabilidad, de forma análoga a los ya existentes en otros países.

Tras la aprobación del Código Técnico de la Edificación (CTE) en 2006, éste se presenta como el nuevo marco normativo que identifica, ordena y completa la reglamentación técnica existente en España y establece las exigencias que deben cumplir los edificios, en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad establecidos en la Ley 38/1999 de Ordenación de la Edificación (LOE).

El valor que ha sido incluido para nuevas viviendas y edificios dentro de la propuesta de criterios de protección radiológica a la radiación natural aprobada por el Pleno del CSN el 31 de octubre de 2007 es el de valor límite de concentración de ^{222}Rn en diseño indicado por la Comisión en su Recomendación 90/143/Euratom de 200 Bq/m^3, precisándose que este valor no debería rebasarse en las dependencias habitadas.

Finalmente, con respecto a los materiales NORM es importante destacar que a pesar de que la legislación española ha desarrollado el Real Decreto 1630/92 Disposiciones para la libre circulación de productos de construcción y el Real Decreto 1328/1995, de 28 de julio, por el que se modifican, en aplicación de la Directiva 93/68/CEE las disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, aprobadas por el Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre, en los años 1992 y 1995 respectivamente, la realidad es que, hasta el momento, no han tenido un adecuado reflejo ni desarrollo práctico en posteriores normativas técnicas sobre edificación ni sobre sus aplicaciones.

3.3.1 Legislación Española

- **Real Decreto 1630/92 Disposiciones para la libre circulación de productos de construcción. 1992**
  - Según el apartado 3 `Higiene, Salud y Medio Ambiente Anexo I Requisitos Esenciales´: Las obras deberán proyectarse y construirse de forma que no supongan una amenaza para la higiene o para la salud de los ocupantes o vecinos, en particular como consecuencia de cualquiera de las siguientes circunstancias:

    a) Fugas de gas tóxico.
    b) Presencia de partículas o gases peligrosos en el aire.

Tabla 8. Regulaciones nacionales propias con respecto a los NORM empleados como materiales de construcción.

PAÍS	NORMATIVA	NIVELES DE REFERENCIA Bq/kg
Alemania	"Nuclear Law". 2000. "Radiation Protection Ordinance". 2001.	^{226}Ra en equilibrio 200
Austria	"Radiation Protection Act". 2002. "Radiation Protection Ordinance". 2005	$C_{40K}/10.000 + C_{226Ra}/1000 \times (1+0,15\ \varepsilon\ \rho\ d) + C_{232Th}/600 < 1$ donde ε = emanación de energía; ρ = densidad de muros; d = espesor de la pared
Bélgica	"Royal Decree 20 of July 2001"	
Dinamarca	"Radiation Law nº 369". 1991. "Order nº 192". 2002.	
Eslovaquia		^{226}Ra + ^{232}Th 1.25 + ^{40}K 0,086 < 370
Eslovenia		Ind. Gamma: ^{226}Ra /400 + ^{232}Th /300 + ^{40}K /5000+ + Cartif./4.000 <1
España	Real Decreto 783/2001 Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes. 2001.	<1 mSv/a $I = C_{40K}/3.000 + C_{226Ra}/300 + C_{232Th}/200 < 1$
Finlandia	"Radiation Act 529/1991" modificado por 1142/1998 "Radiation Decree 1512/1991" modificado por 1142/1998.	
Francia	"Ordinance nº 2001-270". 2001. "Decree nº 2002-460". 2001.	
Grecia.	"Radiation Protection Regulations". "Joint Ministerial Order nº 1014 (ΦΟΡ) 94". 2001.	
Holanda	"Royal Decision of 16 July 2001" (BS).	
Irlanda	"Radiological Protection Act". 1991. "Ionising Radiation Order". 2000.	
Italia	"Legislative Decree nº 230". 1995. "Legislative Decree nº241". 2000. "Legislative Decree nº257". 2001.	
Letonia		Interior de viviendas: (^{226}Ra + ^{232}Th)/170 <1 ^{40}K<1.500 Exterior de viviendas, industrias, calles (^{226}Ra + ^{232}Th)/250<1 ^{40}K<2.000 Exterior de Industrias, carreteras (^{226}Ra + ^{232}Th)/300<1 ^{40}K<2.500
Lituania		Materiales de construcción I= ^{226}Ra /300 + ^{232}Th /200 + ^{40}K /3.000<1 Materiales en calles y carreteras I= ^{226}Ra /700 + ^{232}Th /500 + ^{40}K /8.000<1
Luxemburgo	"Regulations of the Grand Duchy". 2000.	^{226}Ra = 350 ^{232}Th= 250 ^{40}K= 5.000
Noruega		I= ^{226}Ra /300 + ^{232}Th /200 + ^{40}K /3.000<1 ^{226}Ra< 200
Polonia		I= ^{226}Ra. 0,0027 + ^{232}Th 0,0043 + ^{40}K 0.0027<1 ^{226}Ra<185
Portugal	"Decree nº 165/2002".	
Reino Unido	"Radioactive Substance Act". 1993. "Ionising Radiation Regulations 1999". "Management of Health and Safety at Work Regulations 1999".	
República Checa		$I = C_{40K}/3.000 + C_{226Ra}/300 + C_{232Th}/200<0,5$ (Usados en gran cantidad) o 1 (Usados en menor cantidad) o 2 (Usados en muy poca cantidad)
Rusia		Edificios nuevos: Aeff = ^{226}Ra + 1.25 ^{232}Th + ^{40}K Aeff= 370 Construcciones industriales y carreteras de ciudades : Aeff= 740
Suecia	"Radiation Protection Act (1988/293)". "Radiation Protection Ordinance (1988/293)" modificado el 1 Septiembre 2001.	$I = C_{40K}/3000 + C_{226Ra}/300 + C_{232Th}/200<2$

c) Emisión de radiaciones peligrosas.
d) Contaminación o envenenamiento del agua o del suelo.
e) Defectos de evacuación de aguas residuales, humos y residuos sólidos o líquidos.
f) Presencia de humedad en partes de la obra o en superficies interiores de la misma.

- **Real Decreto 1328/1995, de 28 de julio, por el que se modifican, en aplicación de la Directiva 93/68/CEE las disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, aprobadas por el Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre. 1995**
  - No modifica el apartado anterior.

4. Índices de riesgo radiactivo en el hormigón según distintos estudios

Los valores de los índices de riesgo radiactivo (I) del hormigón en las distintas publicaciones consultadas se basan fundamentalmente en dos normativas de referencia, cada una con unas fórmulas de cálculo diferentes:

- La fórmula de la "Nuclear Energy Agency + Organisation for Economic Co-operation and Development" según la publicación:
  - NEA-OCED. "Exposures to Radiation from Natural Radioactivity in Building Materials". Nuclear Energy Agency Experts Group. Paris. 1979.

$$I = C_{Ra\text{-}226}/150Bq.kg^{-1} + C_{Th\text{-}232}/100Bq.kg^{-1} + C_{K\text{-}40}/1.500Bq.kg^{-1}$$

- La fórmula de la "European Comission" según la publicación:
  - UE. "Radiation Protection 112. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials". European Comission 1999.

$$I = C_{Ra\text{-}226}/300Bq.kg^{-1} + C_{Th\text{-}232}/200Bq.kg^{-1} + C_{K\text{-}40}/3.000Bq.kg^{-1}$$

A continuación se indican los valores de los índices de riesgo radiactivo (I) del hormigón recogidos en varias publicaciones y según una de las dos fórmulas anteriores.

a) Datos del índice de riesgo radiactivo para el hormigón (I hormigón) aportados por el artículo de Trevisi, R. et al. (2008).

- El índice I de riesgo radiactivo para el hormigón se ha calculado como valor promedio de la presencia de ^{226}Ra, ^{232}Th y ^{40}K, existiendo una alta variabilidad de I_{max} e I_{min} para cada de material en el mismo país.
- Los datos están calculados conforme con el documento "Radiation Protection 112.Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials" como $I = C_{Ra\text{-}226}/300Bq.kg^{-1} + C_{Th\text{-}232}/ 200Bq.kg^{-1} + C_{K\text{-}40}/3.000Bq.kg^{-1}$.
- Los valores más altos de I_{max} de hormigones en Suecia se deben probablemente al uso de esquistos. En el hormigón danés algunas muestras también proceden de Suecia y contienen los citados esquistos.
- A excepción de Suecia, no existe una I_{media} mayor que 1, lo que significa que el objetivo de no superar el 1 mSv/año es posible, mientras que el de no exceder los 0,3 mSv/año se presenta más difícil de alcanzar ya que únicamente la mitad de los casos ha dado una I_{media} menor que 0,5.
- Como conclusión, parece posible a nivel europeo la elección de un criterio de dosis en el rango de 0,3-1 mSv/año.

En la Tabla 9 se muestran los datos del índice de riesgo radiactivo para el hormigón según la citada publicación.

Tabla 9. Índice I de riesgo radiactivo para el hormigón calculado como valor promedio de ^{226}Ra, ^{232}Th y ^{40}K para el hormigón. Los valores de I>1 se muestran en negrita, los menores de 0,5 en cursiva, siendo N el número de muestras. (Fuente: Trevisi, R. et al. (2008)).

PAÍS	$I_{hormigón}$	$N_{número\ de\ muestras}$
Austria	*0,17*	1
Bélgica	-	8
Bulgaria	*0,35*	2
Rep. Checa	*0,40*	491
Dinamarca	0,85	121
Finlandia	0,57	294
Alemania	0,67	75
Grecia	*0,19*	49
Hungría	*0,28*	97
Irlanda	*0,23*	8
Italia	*0,26*	20
Lituania	*0,33*	1
Luxemburgo	0,80	2
Holanda	*0,36*	55
Polonia	0,97	678
Portugal	0,54	11
Rumanía	0,67	133
Eslovaquia	*0,38*	41
Eslovenia	0,56	3
España	-	-
Suecia	**1,32**	458
Reino Unido	0,54	17

b) Datos del índice de riesgo radiactivo para el hormigón (I hormigón) aportados por distintas publicaciones.

En la Tabla 10 se muestran los datos del índice de riesgo radiactivo para el hormigón según las distintas publicaciones.

Tabla 10. Índice I de riesgo radiactivo para el hormigón ($I_{hormigón}$) aportados por distintas publicaciones.

MATERIAL	$I_{hormigón}$	PAÍS	BIBLIOGRAFÍA	NORMATIVA DE REFERENCIA
Hormigón	0,24	Israel	Lavi, N. et al. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Hormigón	0,23	Camerún	Ngachin, M. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Hormigón	0,15±0,12	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Hormigón	0,33±0,04	Lituania	Pilkyte, L. et al. 2006.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Hormigón	0,27	Italia	Righi, S.; Bruzzi, L. 2006.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Hormigón	0,2	Finlandia, Dinamarca, Noruega	Risica, S. et al. 1999.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Hormigón	0,90±0,07	Bangladesh	Mantazul, I. et al. 1998.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Hormigón	1,07	China	Tso, M.W. et al. 1996.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Hormigón	0,27	España	Quindós, L. et al. 1988.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Hormigón ligero (gas)	0,28±0,05	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Hormigón celular	1,73	Turquía	Baykara, O. et al. 2011.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Bloque de hormigón	0,98±0,31	Malasia	Yasir, M.S.et al. 2007.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Bloque de hormigón	0,39	Nigeria	Ademola, J.A. et al. 2005.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Bloque hueco de hormigón ligero	0,11	Israel	Lavi, N. et al. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Hormigón con adición de escoria de fósforo	2,03	Países Bajos	Van der Graaf, e.r. et al. 2005.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Hormigón con árido sintérico	0,44	China	Yu, K.N. et al. 2000.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Hormigón con árido de poliestireno	0,16	China	Yu, K.N. et al. 2000.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Hormigón reforzado con fibras	0,33	EE.UU.	Brounstein, R.A. et al. 2004.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Hormigón celular curado en autoclave (adición de cal)	0,18	China	Yu, K.N. et al. 2000.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Hormigón celular curado en autoclave (adición de cenizas volantes)	0,86	China	Yu, K.N. et al. 2000.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)

5. Índices de riesgo radiactivo en diversos materiales de construcción

Los valores de los índices de riesgo radiactivo (I) de los materiales que componen el hormigón en las distintas publicaciones consultadas se basan fundamentalmente en dos normativas de referencia, cada una con unas fórmulas de cálculo diferentes:

- La fórmula de la "Nuclear Energy Agency + Organisation for Economic Co-operation and Development" según la publicación:
  - NEA-OCED. "Exposures to Radiation from Natural Radioactivity in Building Materials". Nuclear Energy Agency Experts Group. Paris. 1979.

$$I = C_{Ra\text{-}226}/150Bq.kg^{-1} + C_{Th\text{-}232}/100Bq.kg^{-1} + C_{K\text{-}40}/1.500Bq.kg^{-1}$$

- La fórmula de la "European Comission" según la publicación:
  - UE. "Radiation Protection 112. Radiological protection principles concerning the natural radioac-

tivity of buildings materials". European Comission 1999.

$$I = C_{Ra\text{-}226}/300Bq.kg^{-1} + C_{Th\text{-}232}/200Bq.kg^{-1} + C_{K\text{-}40}/3.000Bq.kg^{-1}$$

A continuación se indican los valores de los índices de riesgo radiactivo en los materiales que componen el hormigón recogidos en varias publicaciones y según una de las dos fórmulas anteriores.

5.1 Cemento

a) Datos del índice de riesgo radiactivo para el cemento (I cemento) aportados por el artículo de Trevisi, R. et al. (2008).

- El índice I de riesgo radiactivo para el cemento se ha calculado como valor promedio de la presencia de ^{226}Ra, ^{232}Th y ^{40}K, existiendo una alta variabilidad de Imax e Imin para cada de material en el mismo país.
- Los datos están calculados según el documento "Radiation Protection 112. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials" como $I = C_{Ra\text{-}226}/300Bq.kg^{-1} + C_{Th\text{-}232}/ 200Bq.kg^{-1} + C_{K\text{-}40}/3.000Bq.kg^{-1}$
- No existe una Imedia mayor que 1, lo que significa que el objetivo de no superar el 1 mSv/año parece posible, mientras que el de no exceder los 0,3 mSv/año se presenta más difícil de alcanzar ya que existen casos con una Imedia mayor que 0,5.
- Como conclusión, parece posible a nivel europeo la elección de un criterio de dosis en el rango de 0,3-1 mSv/año.

Tabla 11. Índice I de riesgo radiactivo para el cemento calculado como valor promedio de ^{226}Ra, ^{232}Th y ^{40}K para el cemento. Los valores de I>1 se muestran en negrita, los menores de 0,5 en cursiva, siendo N el número de muestras. (Fuente: Trevisi, R. et al., (2008)).

PAÍS	$I_{cemento}$	$N_{número\ de\ muestras}$
Austria	*0,23*	18
Bélgica	-	22
Bulgaria	*0,25*	1
Rep. Checa	*0,33*	496
Dinamarca	*0,16*	6
Finlandia	*0,32*	11
Alemania	0,71	23
Grecia	*0,48*	117
Hungría	*0,28*	400
Irlanda	*0,30*	3
Italia	0,57	200
Lituania	-	-
Luxemburgo	-	-
Holanda	0,62	17
Polonia	0,69	344
Portugal	*0,32*	7
Rumanía	*0,39*	55
Eslovaquia	*0,28*	6
Eslovenia	-	-
España	*0,45*	2
Suecia	0,52	26
Reino Unido	*0,22*	6

b) Datos del índice de riesgo radiactivo para el cemento (I cemento) aportados por el artículo de Turham, S. (2008).

En la Tabla 12 se muestran los datos del índice de riesgo radiactivo para el cemento según la citada publicación.

c) Datos del índice de riesgo radiactivo para el cemento (I cemento) aportados por distintas publicaciones.

En la Tabla 13 se muestran los datos del índice de riesgo radiactivo para el cemento según las distintas publicaciones.

Tabla 12. Valor del índice de riesgo radiactivo para distintos tipos de cementos. (Fuente: Turhan, S. (2008)).

TIPO CEMENTO	$I_{cemento}$
CEM I portland	0,27±0,07
CEM I blanco	0,21±0,05
CEM I sulforesistente	0,20±0,04
CEM II A-M (P-L)	0,32±0,07
CEM II A-M (P-LL)	0,46±0,02
CEM II A-M (P-S)	0,32±0,05
CEM II A-M	0,33±0,14
CEM II A-LL	0,19±0,03
CEM II A-P	0,33±0,14
CEM II B-M (P-L)	0,41±0,18
CEM II B-M (P-L-S)	0,40±0,09
CEM II B-M	0,41±0,21
CEM II B-S	0,56±0,01
CEM III A	0,73±0,03
CEM III B	1,12±0,04
CEM IV A	0,24±0,06
CEM IV A-P	0,40±0,04
CEM IV B	1,12±0,04
CEM IV B-P	0,55±0,34
CEM IV B (P-V)	0,40±0,04
CEM V A	0,59±0,05
CEM V (P-S)	0,51±0,16
Media	0,35±0,19

Tabla 13. Datos del índice de riesgo radiactivo para el cemento ($I_{cemento}$) aportados por distintas publicaciones.

MATERIAL	$I_{cemento}$	PAÍS	BIBLIOGRAFÍA	NORMATIVA DE REFERENCIA
Cemento	1,02	Turquía	Baykara, O. et al. 2011.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento	0,34	Egipto	Medhat, M.E. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento	0,37	China	Lu, X. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento	0,40±0,06	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento	0,36	Sudán	Sam, A.K.; Abbas, N. 2001.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Cemento	2,46	Bangladesh	Sam, A.K.; Abbas, N. 2001.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Cemento	1,27	Malasia	Sam, A.K.; Abbas, N. 2001.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Cemento	0,84	China	Sam, A.K.; Abbas, N. 2001.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Cemento	0,51	USA	Sam, A.K.; Abbas, N. 2001.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Cemento	0,43	UK	Sam, A.K.; Abbas, N. 2001.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Cemento	0,54	Noruega	Sam, A.K.; Abbas, N. 2001.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Cemento	0,71	Finlandia	Sam, A.K.; Abbas, N. 2001.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Cemento	1,00	Suecia	Sam, A.K.; Abbas, N. 2001.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Cemento	1,51	Alemania	Sam, A.K.; Abbas, N. 2001.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Cemento	0,90	Australia	Sam, A.K.; Abbas, N. 2001.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Cemento	0,20	China	YU, K.N. et al. 2000.	UE. "Radiation Protection 1122 (1999)
Cemento	0,6	Finlandia, Dinamarca, Noruega	Risica, S. et al. 1999.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento	1,23±0,13	Bangladesh	Mantazul, I. et al. 1998.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Cemento	0,32	Yugoslavia	Popovic, D. et al. 1996.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento portland	0,36	Egipto	El-Taher, A. et al. 1996.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Clinker	0,28	Macedonia	Stojanovska, Z. et al. 2010.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Clinker	0,17	Grecia	Papaefthymiou, H. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento blanco	0,37±0,12	Turquía	Damla, N. et al. 2010.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento blanco	0,18±0,04	Grecia	Papaefthymiou, H. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento blanco	0,22±0,05	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento blanco	0,22	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento blanco	0,644±0,041	Malasia	Yasir, M.S. et al. 2007.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Cemento blanco	0,33	Egipto	El-Taher, A. et al. 1996.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM I	0,43±0,14	Turquía	Damla, N. et al. 2010.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM I	0,19	Grecia	Papaefthymiou, H. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM I	0,27	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM I	0,515±0,007	Malasia	Yasir, M.S. et al. 2007.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
CEM I 42,5R	0,176±0,011	Chipre	Michael, F. et al. 2010.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)

MATERIAL	$I_{cemento}$	PAÍS	BIBLIOGRAFÍA	NORMATIVA DE REFERENCIA
CEM I 52,5N	0,084±0,006	Chipre	Michael, F. et al. 2010.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM II	0,46±0,13	Turquía	Damla, N. et al. 2010.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM II	0,46	Grecia	Papaefthymiou, H. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM II	0,37	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM II A/L 42,5N	0,106±0,009	Chipre	Michael, F. et al. 2010.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM II A-M (L-S) 52,5	0,213±0,008	Chipre	Michael, F. et al. 2010.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM II A-P 42,5	0,206±0,011	Chipre	Michael, F. et al. 2010.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM III	0,93	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM IV	0,52±0,27	Turquía	Damla, N. et al. 2010.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM IV	0,40	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM V	0,64±0,09	Turquía	Damla, N. et al. 2010.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM V	0,56	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento sulforesistente	0,46±0,28	Turquía	Damla, N. et al. 2010.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento sulforesistente	0,22±0,03	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento sulforesistente	0,20	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento sulforesistente	0,30	Egipto	El-Taher, A. et al.1996.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento modificado	0,42	España	Gascó, C. et al. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento modificado	0,36	España	Gascó, C. et al.2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cemento Portland	0,23	España	Baró, J. et al. 1988.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM I 52.5 R	0,33	España	Chinchón-Payá, S. et al. 2011.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM II / B-L 32.5 N	0,23	España	Chinchón-Payá, S. et al. 2011.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM III / A 42.5 N/SR	0,63	España	Chinchón-Payá, S. et al. 2011.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
CEM IV/B (V) 32.5 N	0,64	España	Chinchón-Payá, S. et al. 2011.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Mortero	0,24	Italia	Righi, S.; Bruzzi, L. 2006.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Mortero	0,75±0,06	Bangladesh	Mantazul, I. et al. 1998.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Mortero de cal	0,30	Italia	Righi, S.; Bruzzi, L. 2006.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)

5.2 Arenas y gravas

En la Tabla 14 se muestran los datos del índice de riesgo radiactivo para arenas y gravas según las distintas publicaciones.

Tabla 14. Datos del índice de riesgo radiactivo para arenas y gravas ($I_{arena/grava}$) aportados por distintas publicaciones.

MATERIAL	$I_{cemento}$	PAÍS	BIBLIOGRAFÍA	NORMATIVA DE REFERENCIA
Arena	0,37	Egipto	Medhat, M.E. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Arena	0,55	China	Lu, X. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Arena	0,05±0,02	Grecia	Papaefthymiou, H. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Arena	0,42±0,15	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Arena	0,78±0,14	Malasia	Yasir, M.S.et al. 2007.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Arena	0,50	China	Yu, K.N. et al. 2000.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Arena	0,3	Finlandia, Dinamarca, Noruega	Risica, S. et al. 1999.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Arena	0,45±0,05	Bangladesh	Mantazul, I. et al. 1998.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Arena de cuarzo	0,07	España	Baró, J. et al. 1988.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Arena de río	0,55±0,19	Bangladesh	Mantazul, I. et al. 1998.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)

MATERIAL	$I_{cemento}$	PAÍS	BIBLIOGRAFÍA	NORMATIVA DE REFERENCIA
Arena de mar	0,65±0,28	Bangladesh	Mantazul, I. et al. 1998.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Grava	0,12	Egipto	Medhat, M.E. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Grava	0,2	Finlandia, Dinamarca, Noruega	Risica, S. et al. 1999.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Grava	0,87±0,15	Bangladesh	Mantazul, I. et al. 1998.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Grava	0,18	Yugoslavia	Popovic, D. et al. 1996.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)

5.3 Yesos

a) Datos del índice de riesgo radiactivo para el yeso (I yeso) aportados por el artículo de Trevisi, R. et al. (2008).

- El índice I de riesgo radiactivo para el yeso se ha calculado como valor promedio de la presencia de ^{226}Ra, ^{232}Th y ^{40}K, existiendo una alta variabilidad de Imax e Imin para cada de material en el mismo país.
- Los datos están calculados según el documento "Radiation Protection 112. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials" como $I = C_{Ra-226}/300Bq.kg^{-1} + C_{Th-232}/ 200Bq.kg^{-1} + C_{K-40}/3.000Bq.kg^{-1}$
- Los datos disponibles son mucho menores, en particular para los fosfoyesos. Como era de esperar, los valores que resultan son generalmente muy bajos para el yeso natural y muy altos para los fosfoyesos, superando en la mayoría de los casos el valor de 1 para la Imedia.

En la Tabla 15 se muestran los datos del índice de riesgo radiactivo para yesos y fosfoyesos según la citada publicación.

Tabla 15. Índice I de riesgo radiactivo para el yeso calculado como valor promedio de ^{226}Ra, ^{232}Th y ^{40}K para el yeso y el fosfoyeso. Los valores de I>1 se muestran en negrita, los menores de 0,5 en cursiva, siendo N el número de muestras. (Fuente: Trevisi, R. et al. (2008)).

PAÍS	I_{yeso}	$N^o_{muestras}$	$I_{fosfoyeso}$	$N_{número\ de\ muestras}$
Austria	-	-	-	-
Bélgica	-	18	-	30
Bulgaria	*0,07*	18	0,78	2
Rep. Checa	*0,18*	34	0,57	22
Dinamarca	*0,05*	12	-	-
Finlandia	*0,04*	1	**1,14**	17
Alemania	-	1	**1,97**	2
Grecia	*0,08*	8	**2,07**	4
Hungría	*0,06*	125	-	-
Irlanda	*0,14*	10	-	-
Italia	*0,09*	20	-	-
Lituania	-	-	-	-
Luxemburgo	-	-	-	-
Holanda	*0,08*	23	0,88	20
Polonia	*0,28*	105	1,00	28
Portugal	-	-	-	-
Rumanía	*0,27*	15	**1,94**	73
Eslovaquia	-	-	-	-
Eslovenia	-	-	**1,73**	1
España	*0,13*	1	-	-
Suecia	*0,02*	1	-	-
Reino Unido	*0,16*	73	**3,60**	91

b) Datos del índice de riesgo radiactivo para el yeso (I yeso) aportados por distintas publicaciones.

En la Tabla 16 se muestran los datos del índice de riesgo radiactivo para yesos y fosfoyesos según las distintas publicaciones.

Tabla 16. Datos del índice de riesgo radiactivo para el yeso (I_{yeso}) aportados por distintas publicaciones.

MATERIAL	I_{yeso}	PAÍS	BIBLIOGRAFÍA	NORMATIVA DE REFERENCIA
Yeso	0,44	Turquía	Baykara, O. et al. 2011.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Yeso	0,33	Egipto	Medhat, M.E. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Yeso	0,02	Grecia	Papaefthymiou, H. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Yeso	0,06	Turquía	Turhan, S. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Yeso	0,06±0,02	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Yeso	0,1	Finlandia, Dinamarca, Noruega	Risica, S. et al. 1999.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Yeso	1,99±0,19	Bangladesh	Mantazul, I. et al. 1998.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Yeso	0,41	Egipto	El-Taher, A. et al. 1996.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Fosfoyeso	0,78	España	Gascó, C. et al. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Fosfoyeso	0,6	España	Gascó, C. et al. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Fosfoyeso	1,92	Turquía	turhan, s. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)

5.4 Arcillas

En la Tabla 17 se muestran los datos del índice de riesgo radiactivo para las arcillas según las distintas publicaciones.

Tabla 17. Datos del índice de riesgo radiactivo para las arcillas ($I_{arcilla}$) aportados por distintas publicaciones.

MATERIAL	$I_{arcillas}$	PAÍS	BIBLIOGRAFÍA	NORMATIVA DE REFERENCIA
Arcilla	0,57±0,24	Turquía	Turhan, S. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Arcilla	0,51±0,26	Turquía	Turhan, S. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Arcilla	0,59	Turquía	Turhan, S. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Arcilla	0,5	Finlandia, Dinamarca, Noruega	Risica, S. et al. 1999.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Arcilla	0,50	Egipto	El-Taher, A. et al. 1996.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Arenisca	0,57	Nigeria	Joshua, E.O. et al. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Caolín	0,84±0,12	Turquía	Turhan, S. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Caolín	0,90±0,49	Turquía	Turhan, S. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Margas	0,24±0,08	Turquía	Turhan, S. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Mudstone	0,75	Nigeria	Joshua, E.O. et al. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Siltstone	0,43	Nigeria	Joshua, E.O. et al. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Piedra pómez	0,30	Turquía	Turhan, S. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Puzolana	2,1	Finlandia, Dinamarca, Noruega	Risica, S. et al. 1999.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Toba volcánica	1,27	Turquía	Turhan, S. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Toba volcánica	2,21	Italia	Righi, S.; Bruzzi, L. 2006.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Toba volcánica	3,1	Finlandia, Dinamarca, Noruega	Risica, S. et al. 1999.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)

5.5 Adiciones

En la Tabla 18 se muestran los datos del índice de riesgo radiactivo para adiciones según las distintas publicaciones.

Tabla 18. Datos del índice de riesgo radiactivo para las adiciones ($I_{adiciones}$) aportados por distintas publicaciones.

MATERIAL	$I_{adiciones}$	PAÍS	BIBLIOGRAFÍA	NORMATIVA DE REFERENCIA
Escorias de alto horno	0,88	España	Chinchón-Payá, s. et al. 2011.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Escoria de alto horno	1,36±0,81	Turquía	Turhan, S. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Escoria	1,17	Egipto	El-Taher, A. et al. 1996.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Escorias de alto horno	0,90	China	Tso, M.W. et al. 1996.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cenizas de fondo	0,92	China	Lu, X. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cenizas volantes de carbón	0,99	España	Chinchón-Payá, s. et al. 2011.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Carbón	0,16	China	Tso, M.W. et al. 1996.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cenizas volantes	1,18	Macedonia	Stojanovska, Z. et al. 2010.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cenizas volantes	1,23	China	Lu, X. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cenizas volantes	3,90	Grecia	Papaefthymiou, H. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cenizas volantes	1,49±0,52	Turquía	Turhan, S. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cenizas volantes	1,3	Finlandia, Dinamarca, Noruega	Risica, S. et al. 1999.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cenizas volantes	1,30	China	Tso, M.W. et al. 1996.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cenizas volantes Andorra	0,88	España	Baró, J. et al. 1988.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cenizas volantes Cercs	1,11	España	Baró, J. et al. 1988.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cenizas volantes Aboño	0,85	España	Baró, J. et al. 1988.	UE. "Radiation Protection 112 (1999)
Cenizas volantes Alcudia	1,41	España	Baró, J. et al. 1988.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cenizas de pirita	0,07	Turquía	Turhan, S. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Ironstone: Mineral de hierro	0,25±0,21	Turquía	Turhan, S. 2008.	UE. "Radiation Protection 112 (1999)
Ironstone: Mineral de hierro	0,40	Nigeria	Joshua, E.O. et al. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Lava	3,3	Finlandia, Dinamarca, Noruega	Risica, S. et al. 1999.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cal	0,1	Finlandia, Dinamarca, Noruega	Risica, S. et al. 1999.	UE. "Radiation Protection 112 (1999)

5.6 Piedra natural

En la Tabla 19 se muestran los datos del índice de riesgo radiactivo para varios tipos de piedra natural según las distintas publicaciones.

Tabla 19. Datos del índice de riesgo radiactivo para la piedra natural ($I_{piedra\ natural}$) aportados por distintas publicaciones.

MATERIAL	$I_{piedra\ natural}$	PAÍS	BIBLIOGRAFÍA	NORMATIVA DE REFERENCIA
Arenisca	0,56	Turquía	Baykara, O. et al. 2011.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Dolerita	0,78	Nigeria	Joshua, E.O. et al. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Esquistos	0,48	Turquía	Turhan, S. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Esquistos	0,71	Nigeria	Joshua, E.O. et al. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)

MATERIAL	$I_{piedra\ natural}$	PAÍS	BIBLIOGRAFÍA	NORMATIVA DE REFERENCIA
Gneiss	1,0	Finlandia, Dinamarca, Noruega	Risica, S. et al. 1999.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Granito	1,38	Nigeria	Joshua, E.O. et al. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Granito	0,82	Egipto	Medhat, M.E. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Granito	1,72	China	Yu, K.N. et al. 2000.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Granito	1,1	Finlandia, Dinamarca, Noruega	Risica, S. et al. 1999.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Granito	0,89	España	Baeza, A. et al. 1992.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Mármol	0,04±0,01	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Mármol	0,454±0,075	Malasia	Yasir, M.S.et al. 2007.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group2 (1979)
Polvo de mármol	0,39	Egipto	Medhat, M.E. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Polvo de mármol	0,0017±0,004	Grecia	Papaefthymiou, H. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Polvo de mármol	0,01	Turquía	Turhan, S. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Pegmatita	1,40	Nigeria	Joshua, E.O. et al. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Materiales sedimentarios	0,65	España	Baeza, A. et al. 1992.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Piedra caliza	0,22	Turquía	Baykara, O. et al. 2011.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Piedra caliza	0,65	Nigeria	Joshua, E.O. et al. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Piedra caliza	0,20	Egipto	Medhat, M.E. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Piedra caliza	0,22	China	Lu, X. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Piedra caliza	0,06±0,03	Grecia	Papaefthymiou, H. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Piedra caliza	0,12±0,09	Turquía	Turhan, S. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Piedra caliza	0,07±0,05	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Piedra caliza	0,28	Egipto	El-Taher, A. et al. 1996.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Pizarra	0,75	España	Miró, C. et al. 2010.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Pizarra	0,54	Nigeria	Joshua, E.O. et al. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Pizarra	0,48	España	Baeza, A. et al. 1992.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)

5.7 Cerámica

a) Datos del índice de riesgo radiactivo para los materiales cerámicos (I cerámica) aportados por el artículo de Trevisi, R. et al. (2008).

- El índice I de riesgo radiactivo para la cerámica se ha calculado como valor promedio de la presencia de ^{226}Ra, ^{232}Th y ^{40}K, existiendo una alta variabilidad de I_{max} e I_{min} para cada de material en el mismo país.
- Los datos están calculados según el documento "Radiation Protection 112. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials" como $I = C_{Ra-226}/300Bq.kg^{-1} + C_{Th-232}/ 200Bq.kg^{-1} + C_{K-40}/3.000Bq.kg^{-1}$
- Los valores más altos de Imáx de ladrillos en Suecia son debidos probablemente al uso de esquistos.
- La baja variabilidad y, probablemente, el alto valor de Imáx e Imín en el ladrillo de Luxemburgo se debe a la limitación de la estadística al utilizar únicamente dos muestras.
- No existe una Imedia mayor que 1, lo que significa que el objetivo de no superar el 1 mSv/año parece posible, mientras que el de no exceder los 0,3 mSv/año se presenta más difícil de alcanzar ya que existen bastantes casos con una Imedia mayor que 0,5.
- Como conclusión, parece posible a nivel europeo la elección de un criterio de dosis en el rango de 0,3-1 mSv/año.

Tabla 20. Índice I de riesgo radiactivo para la cerámica calculado como valor promedio de ^{226}Ra, ^{232}Th y ^{40}K para el cemento. Los valores de I>1 se muestran en negrita, los menores de 0,5 en cursiva, siendo N el número de muestras. (Fuente: Trevisi, R. et al. (2008)).

PAÍS	$I_{cerámica}$	$N_{número\ de\ muestras}$
Austria	0,56	32
Bélgica	-	61
Bulgaria	0,56	1

PAÍS	$I_{cerámica}$	$N_{número\ de\ muestras}$
Rep. Checa	0,60	488
Dinamarca	0,34	83
Finlandia	0,65	42
Alemania	0,55	135
Grecia	0,59	32
Hungría	0,61	176
Irlanda	0,45	14
Italia	0,49	192
Lituania	0.54	1
Luxemburgo	1.21	2
Holanda	0,50	70
Polonia	0,32	6
Portugal	0,73	10
Rumanía	0,55	75
Eslovaquia	0,62	1
Eslovenia	0,93	2
España	0,83	1
Suecia	1,27	33
Reino Unido	0,46	82

En la Tabla 20 se muestran los datos del índice de riesgo radiactivo para la cerámica según la citada publicación.

b) Datos del índice de riesgo radiactivo para los materiales cerámicos (I cerámica) aportados por distintas publicaciones.

En la Tabla 21 se muestran los datos del índice de riesgo radiactivo para materiales cerámicos según las distintas publicaciones.

6. Índices de riesgo radiactivo y su aplicación en el hormigón. Algunos datos en españa

Según los datos aportados por Chinchón-Payá, S. et al. (2011) correspondientes a hormigones de viguetas pretensadas de Cataluña y los datos aportados por Quindós, l. et al. (1988), en la Tabla 22 se muestran distintos valores para el índice de riesgo radiactivo I(x) de distintos hormigones convencionales en España.

Como ya se ha comentado anteriormente, según el documento "Radiation Protection 112", la concentración típica y máxima de actividad para el hormigón como material de construcción se recoge en la Tabla 23.

Tabla 21. Datos del índice de riesgo radiactivo para la cerámica ($I_{cerámica}$) aportados por distintas publicaciones.

MATERIAL	$I_{cerámicas}$	PAÍS	BIBLIOGRAFÍA	NORMATIVA DE REFERENCIA
Azulejo cerámico	0,78±0,16	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Azulejo cerámico	0,69±0,05	Malasia	Yasir, M.S. et al. 2007.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Azulejo cerámico	0,6	Finlandia, Dinamarca, Noruega	Risica, S. et al. 1999.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Ladrillo	0,14	Turquía	Baykara, O. et al. 2011.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Ladrillo	0,30	Egipto	Medhat, M.E. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Ladrillo	0,54 ± 0,11	Lituania	Pilkyte, L. et al. 2006.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Ladrillo	0,5	Finlandia, Dinamarca, Noruega	Risica, S. et al. 1999.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Ladrillo	0,91±0,07	Bangladesh	Mantazul, I. et al. 1998.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Ladrillo rojo	0,48±0,07	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Ladrillo rojo	0,75±0,06	Malasia	Yasir, M.S.et al. 2007.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Ladrillo blanco	0,89±0,08	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Ladrillo ligero	0,15±0,03	Turquía	Turhan, S. et al. 2008.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Cerámica	0,49	Egipto	Medhat, M.E. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)
Bloque de termoarcilla	0,85±0,16	Malasia	Yasir, M.S.et al. 2007.	NEA-OCED. "Nuclear Energy Agency Experts Group" (1979)
Bloque hueco de cerámica con cenizas volantes	0,82	Israel	Lavi, N. et al. 2009.	UE. "Radiation Protection 112" (1999)

■ *Tabla 22. Datos del índice de riesgo radiactivo para el hormigón ($I_{hormigón}$) en España aportados por distintas publicaciones.*

MATERIAL	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	$I_{hormigón\ "Rad.\ Protection\ 112"}$	BIBLIOGRAFÍA
Portland Cement Concrete Sample 1	21,4±1,3	17,8±2,0	363±10	0,28	Chinchón-Payá, s. et al. 2011.
Portland Cement Concrete Sample 2	16,4±1,2	11,3±1,8	220,6±9,9	0,17	Chinchón-Payá, s. et al. 2011.
Portland Cement Concrete Sample 3	18,4±1,1	19,9±1,9	287±8,1	0,26	Chinchón-Payá, s. et al. 2011.
Portland Cement Concrete Sample 4	28.5±1,2	21,7±2,1	261±9,8	0,29	Chinchón-Payá, s. et al. 2011.
Hormigón	29,9	31,8	203,5	0,27	Quindós, l. et al. 1988.

■ *Tabla 23. Concentración típica y máxima de actividad en algunos materiales de construcción. Las concentraciones típicas son las medias nacionales ponderadas en la población de los diferentes estados miembros. Las concentraciones máximas son los valores máximos de la referencia. (Fuente: UE. "Radiation Protection 112. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials").*

MATERIAL	Valores normales de concentración de actividad (Bq/kg)			Valores máximos de concentración de actividad (Bq/kg)		
Materiales de construcción comunes	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)
Hormigón	40	30	400	240	190	1.600
Hormigón aireado de bajo peso	60	40	430	2.600	190	1.600

De este modo, de los datos anteriormente expuestos y en lo referente al hormigón, considerando los criterios expuestos anteriormente, cabe destacar que:

- Las concentraciones de actividad medias del hormigón convencional son:

^{226}Ra=40Bq/kg ^{232}Th=30Bq/kg ^{40}K=400Bq/kg.

- El índice de riesgo radiactivo del hormigón convencional, deducido a partir de las concentraciones medias anteriores es I=0,41.

- La dosis efectiva generada por el hormigón convencional, por encima de la dosis de fondo, calculada según el anexo II de la Recomendación "Radiation Protection 112" es de 0,25 mSv/año.

- En materiales utilizados en cantidades masivas, el nivel de exención de comprobaciones de emisiones radiactivas se alcanzará en los casos siguientes:

  Si la dosis efectiva generada por el material, por encima de la dosis de fondo (aquella que existe al aire libre) es ≤0,3 mSv/año.

  Si el índice de riesgo radiactivo es I≤0,5.

- En dichos materiales el nivel aceptable con el debido control se alcanzará en los casos siguientes:

  Si la dosis efectiva generada por el material, por encima de la dosis de fondo (aquella que existe al aire libre) es ≤1 mSv/año.

  Si el índice de riesgo radiactivo del hormigón convencional es I≤1.

Según los datos disponibles del hormigón fabricado en España, los valores referenciados de (I) se encuentran entre I=0,17 e I=0,29

En consecuencia, y en términos generales, el hormigón convencional fabricado en España está exento de comprobaciones de emisiones radiactivas; no obstante, esto no implica que los fabricantes de hormigón no evalúen las concentraciones de actividad medias de dicho material cuando sea necesario y presten la necesaria atención a los distintos materiales o componentes que emplean para la producción.

7. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a D. José Luis Martín Matarranz, del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), las correcciones realizadas y el aporte de material bibliográfico al presente trabajo. Parte de la presente investigación se ha realizado gracias a una ayuda económica del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).

8. Bibliografia

Actas de las V Jornadas sobre calidad en el control de la radiactividad ambiental. Jaca, 2008.

Ademola, J.A., Oguneletu, P.O., "Radionuclide content of concrete building blocks and radiation dose rates in some dwellings in Ibadan, Nigeria". Journal of Environmental Radioactivity. Nº 81, pp. 107-113, 2005.

Baeza, A.; Del Río, M.; Miró, C.; Paniagua, J.M., "Natural radioactivity in soils of the province of Cáceres (Spain)". Radiation Protection Dosimetry. Vol.45, Nº 1/4, pp. 261-263. Nuclear Technology Publishing, 1992.

Baró, J.; Sánchez, A.; Chinchón, J.S.; López-Soler, A.; Vázquez, E.; Yagüe, A., "Natural radiation in fly ashes from coal termal power stations in Spain". Cement and Concrete Research. Vol.18, pp.131-137, 1988.

Baykara, O.; Sule Karatepe, S.; Mahmut, D., "Assessments of natural radioactivity and radiological hazards in construction materials used in Elazig, Turkey". Radiation Measurements. Nº 46, pp. 153-158, 2011.

Brounstein, R.A.; Johnson, W.H., "Influence of Fiber-Reinforced Concrete on Radon Concentrations". Journal of Materials In Civil Engineering. Nov-Dic, 2004.

Canadian Norm Working Group of the Federal Provincial Territorial Radiation Protection Committee. "Canadian Guidelines for the management of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM)". First Edition. October, 2000.

Cancio, D., Radiación natural: Materiales radiactivos naturales (NORM). Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. IV Workshop Radón y Medioambiente. Suances, 2005.

Chinchón-Payá, S.; Piedecausa, B.; Hurtado, S.; Sanjuán, M.A.; Chinchón, S.: "Radiological impact of cement, concrete and admixtures in Spain". Radiation Measurements. En prensa, 2011.

CSN. Dosis de Radiación. Consejo de Seguridad Nuclear. Madrid, 2010.

Damla, N.; Cevikb, U.; Kobyab, A.I.; Celikc, A.; Celikb, N.; Van Griekend, R., "Radiation dose estimation and mass attenuation coefficients of cement samples used in Turkey". Journal of Hazardous Materials. Nº 176, pp. 644–649, 2010.

El-Taher, A.; Makhluf, S.; Nossair, A.; Abdel Halim, A.S., "Assessment of natural radioactivity levels and radiation hazards due to cement industry". Applied Radiation and Isotopes. Nº 68, pp. 169–174, 2010.

Emras Norm Working Group. Draft Modelling the transfer of radionuclides from naturally occurring radioactive material (NORM), 2007.

Gascó, C.; Álvarez, A.; Navarro, N.; Yagüe, L., Tayibi, H.; López, F.A.; López-Delgado, A.; Alguacil, F.J., "Advantages and disadvantages of using phosphogypsum as building material. Radiological aspects". 1st Spanish National Conference on Advances in Materials Recycling and Eco–Energy. Madrid, 2009.

González, C., Radiactividad natural en materiales de construcción. Universidad de Salamanca. Facultad de Ciencias. Ingeniería Geológica, 2008.

IAEA. "International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for Safety of Radiation Sources". International Atomic Energy Agency. Viena, 1994.

IAEA. "Radiation Protection against Radon in Workplaces other than Mines". Safety Report Series, nº 33. International Atomic Energy Agency. Viena, 2003.

ICRP. "Recommendations".

Joshua, E.O.; Ademola, J.A.; Akpanowo, M.A.; Oyebanjo, O.A.; Olorode, D.O., "Natural radionuclides and hazards of rock samples collected from Southeastern Nigeria". Radiation Measurements. Nº 44, pp. 401–404, 2009.

Lavi, N.; Steiner, V.; Alfassi, Z.B., "Measurement of radon emanation in construction materials". Radiation Measurements. Nº 44, pp. 396 - 400, 2009.

Ley 38/1999 de 5 de noviembre. Ordenación de la Edificación. BOE nº 266. Madrid, 1999.

López, F., Materiales radiactivos de procedencia natural en la industria minera. Un problema a futuro en una industria con gran presente. Universidad de Palermo.

Lu, X.; Zhang, X., "Radionuclide content and associated radiation hazards of building materials and by-products in Baoji, West China". Radiation Protection Dosimetry, Vol. 128, nº 4, pp. 471–476, 2008.

Mantazul, I; Chowdhury, M. N.; Alam, A.K.S.A., "Concentration of radionuclides in building and ceramic materials of Bangladesh and evaluation of radiation hazard". Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 231, nº 1-2, pp. 117-122, 1998.

Martín, J.L.: El marco legislativo y la radiación natural. Consejo de Seguridad Nuclear. IV Workshop Radón y Medioambiente. Suances, 2005.

Medhat, M.E., "Assessment of radiation hazards due to natural radioactivity in some building materials used in egyptian dwellings". Radiation Protection Dosimetry. Vol. 133, no 3, pp. 177–185, 2009.

Michael, F.; Parpottas, Y.; Tsertos, H., "Gamma radiation measurements and dose rates in commonly used building materials in

Cyprus" Radiation Protection Dosimetry. Advance Access published August 21, 2010. Pp. 1–10, 2010.

Miró, C.; Ávila, J.M.; García, M.; Pastor-Villegas, J.: "Riesgos debido a la radiactividad natural de pizarras de construcción". Información Tecnológica. Vol. 21(1), pp. 9-16, 2010.

Ngachin, M., Garavaglia, M., Giovani, C., Nourreddine, A., Kwato Njock, Mg., Scruzzi, E., Lagos, L., "^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K contents and radon exhalation rate from materials used for construction and decoration in Cameroon". Journal of Radiological Protection. Nº 28, pp. 369–378, 2008.

NTP 440: Radón en ambientes interiores. Notas Técnicas de Prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Madrid, 2003.

NTP 533: El radón y sus efectos sobre la salud. Notas Técnicas de Prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Madrid, 2003.

NTP 607: Calidad de aire interior: contaminantes químicos. Notas Técnicas de Prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Madrid, 2003.

NTP 614: Radiaciones ionizantes. Normas de protección. Notas Técnicas de Prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Madrid, 2003.

NTP 728: Exposición laboral a radiación natural. Notas Técnicas de Prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Madrid, 2003.

Papaefthymiou, H.; Gouseti, O., "Natural radioactivity and associated radiation hazards in building materials used in Peloponnese, Greece". Radiation Measurements. Nº 43, pp. 1453–1457, 2008.

Pilkyte L. ; Butkus D. ; Morkunas G., "Assessment of external dose indoors in Lithuania". Radiation Protection Dosimetry. Vol. 121, nº 2, pp. 140-147, 2006.

Popovic, D.; Djuric, G.; Todorovic, D., "Radionuclides in building materials and radon indoor concentrations". Radiation Protection Dosimetry. Vol. 63, nº 3, pp. 223-225, 1996.

"Proceedings of the V International Symposium Naturally Occurring Radioactive Material (NORM V-Sevilla 2007)". IAEA. Austria, 2008.

Quindós, L.S.; Fernández, P.L.; Soto, J.; Ródenas, C.; Gómez, J.; Arteche, J., "Natural radioactivity of cements and granites in Spain". Annales de l´Association Belge de Radioprotection. Vol 19, nº 1-2, pp. 289-298, 1994.

Quindós, L.S.; Fernández, P.L.; Soto, J., "A method for the measurement of the emanation factor for ^{222}Rn in small samples of porous materials". Radiation Protection Dosimetry. Vol. 56, nº 1-4, pp. 171-174, 1994.

Quindós, L.S.; Newton, G.J., "Estimation of indoor 222Rn from concrete". Health Physics. Vol. 56, nº 1, pp. 107-109, 1989.

quindós, l.s.; newton, g.j., "Natural radioactivity of some Spanish building materials". The Science of the Total Environment. Nº 68, pp. 181-185, 1988.

Real Decreto 1328/1995, de 28 de julio, por el que se modifican, en aplicación de la Directiva 93/68/CEE las disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, aprobadas por el Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre. Madrid, 1995.

Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. BOE nº 45. Madrid, 2003.

Real Decreto 1630/92 de 29 de diciembre por el que se dictan las disposiciones para la libre circulación de productos de construcción. BOE nº 34. Madrid, 1992.

Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. BOE nº 74 . Madrid, 2006.

Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. BOE nº 178. Madrid, 2001.

Righi, S.; Bruzzi, L., "Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings". Journal of Environmental Radioactivity. Nº 88, pp. 158-170, 2006.

Risica, S., "Legislation on radon concentration at home and at work". Radiation Protection Dosimetry, Vol. 78, no 1, pp. 15-21. Nuclear Technology Publishing, 1998.

Risica, S.; Bolzan, C.; Nuccetelli, C., "Radioactivity in building materials: experimental methods, calculations and an overview of the italian situation". Radon in the Living Environment, nº 19. Abril. Atenas, 1999.

Sam, A.K.; Abbas, N., "Assessment of radioactivity and the associated hazards in local and imported cement types used in Sudan". Radiation Protection Dosimetry. Vol. 93, nº 3, pp. 275–277, 2001.

Steger, F.; Kunsch, B.; Buchner, I.:, Önorm S 5200. "Radioactivity in building materials (a standard in Austria to limit natural radioactivity in building materials)". Radiation Protection Dosimetry, Vol. 45. nº 1/4, pp. 721-722. Nuclear Technology Publishing, 1992.

Stojanovska, Z.; Nedelkovski, D.; Ristova, M., "Natural radioactivity and human exposure by raw materials and end product from cement industry used as building materials". Radiation Measurements. Nº 45, pp. 969-972, 2010.

Trevisi, R.; D´Alessandro, M.; Nuccetelli, C.; Risica, S., "Radioactivity in building materials: a first overview of the european scenario". IRPA Conference, Buenos Aires, 2008.

Tso, M.W.; Leung, J. K.C., "Radiological Impact of Coal Ash from the Power Plants in Hong Kong". Journal of Environmental Radioactivity. Vol. 30, nº I, pp.1-14, 1996.

Turhan, S., "Assessment of the natural radioactivity and radiological hazards in Turkish cement and its raw materials". Journal of Environmental Radioactivity. Nº 99, pp. 404-414, 2008.

Turhan, S., "Radiological impacts of the usability of clay and kaolin as raw material in manufacturing of structural building materials in Turkey". Journal of Radiological Protection. Nº 29, pp. 75–83, 2009.

Turhan, S., Baykan, U.N.; Sen, K., "Measurement of the natural radioactivity in building materials used in Ankara and assessment of external doses". Journal of Radiological Protection. Nº 28, pp. 83–91, 2008.

Turhan, S.; Gürbüz, G., "Radiological significance of cement used in building construction in Turkey". Radiation Protection Dosimetry. Vol. 129, nº 4, pp. 391-396, 2008.

UE. Directiva 89/106/CEE del Consejo de 21 de diciembre de 1988 relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los estados miembros sobre los productos de construcción, 1988.

UE. Directiva 96/29/Euratom del Consejo de 13 de mayo de 1996 por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes. Diario Oficial n° L 159 de 29/06/1996.

UE. Directiva 98/83/CE del Consejo de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Diario Oficial n° L 330 de 5/12/98.

UE. "Draft European Basic Safety Standards Directive". Versión 24 febrero 2010.

UE. Recomendación 90/143/Euratom de la Comisión de 21 de febrero de 1990 relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios. Diario Oficial n° L 080 de 27/03/1990.

UE. "Radiation Protection 88. Recommendations for the implementation of Title VII of BSS concerning significant increase in exposure due to natural radiation sources", 1997.

UE. "Radiation Protection 112.Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials", 1999.

UE. "Radiation Protection 122. Practical use of the concepts of clearance and exemption. Part I (Guidance on General Clearance Levels for Practices)", 2000.

UE. "Radiation Protection 122. Practical use of the concepts of clearance and exemption. Part II. Application of the concepts of exemption and clearance to natural radiation sources)", 2002.

UE. "Radiation Protection 146. A Review of Consumer Products Containing Radioactive Substances in the European Union", 2007.

UE. "Radiation Protection 147. Guidelines for the Regulatory Control of Consumer Products Containing Radioactive Substances in the European Union", 2007.

Unscear 2006. "Report Vol. I. effects of ionizing radiation". United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Nueva York, 2008.

Unscear 2008. "Report Vol. I. sources of ionizing radiation". United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Nueva York, 2010.

Van Der Graaf, E.R.; De Meijer, R.J., "An assessment of the radiological consequences of using phosphorus slag in concrete foundation poles". Radioactivity in the Environment. Vol. 7, 2005.

WHO. "Air Quality Guidelines for Europe". WHO Regional Publications, European Series. No 91. Copenhagen, 2000.

WHO. Recomendaciones Organización Mundial de la Salud. Web: www.who.int/ionizing_radiation/env/radon/en.

Wiklund, A., "Revision of the European Basic Safety Standards with regard to NORM". EAN NORM Workshop. Dresden, 2007.

Yasir, M. S.; Majid, A. Ab.; Yahaya, R., Study of natural radionuclides and its radiation hazard index in Malaysian building materials. "Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry". Vol. 273, nº 3, pp.539–541, 2007.

Yu, K.N.; Guan, Z.J.; Cheung, T.; Cheung, T.T.K.; Lo, T.Y., Light weight concrete: ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K contents and dose reduction assessment. "Applied Radiation and Isotopes". Nº 53, pp. 975-980, 2000.