
.....

ESTA É UMA VERSÃO DO AUTOR E NÃO A VERSÃO FINAL PUBLICADA

CONSULTE POR FAVOR A VERSÃO FINAL PUBLICADA EM
<http://ler.letras.up.pt/uploads/ficheiros/15450.pdf>

**MATERIAIS GEOLÓGICOS E RADIAÇÃO GAMA EXTERNA / GEOLOGIC MATERIALS
AND EXTERNAL GAMMA RADIATION**

Alves, C.

Lab2PT (unidade de investigação da Fundação para a Ciência e a Tecnologia,
UID/AUR/04509/2013) e Departamento de Ciências da Terra, Escola de Ciências, Universidade
do Minho

Email: casaix@dct.uminho.pt

Sanjurjo-Sánchez, J.

Universidade de A. Corunha, Espanha

Lima, M.

Escola de Ciências, Universidade do Minho

Dias, F.

Escola de Ciências, Universidade do Minho

Resumo

A diretiva 2013/59/EURATOM pretende fixar normas de segurança para a exposição a radiações ionizantes (como a radiação gama), incluindo a regulação da comercialização de materiais de construção, podendo ter efeitos restritivos no aproveitamento económico destes. Esta diretiva define um limite para a contribuição dos materiais de construção (incluindo os materiais geológicos) para a radiação gama externa (contribuição avaliada por um índice baseado em estimativas das concentrações de átomos que emitem radiação gama). São revistos os fatores que influenciam a contribuição dos materiais geológicos para a radiação gama externa de espaços interiores, em termos gerais e no caso de estudo de um granito alterado. Os resultados são confrontados com os critérios da diretiva referida, concluindo-se que a mesma poderá ser excessivamente restritiva para os usos atualmente mais comuns da pedra natural (utilização parcial de revestimentos finos). Em situações envolvendo uma maior aplicação de material (e.g. algumas construções históricas), a perigosidade de atingir níveis de radiação acima do valor de referência indicado na diretiva é maior mas é necessário considerar fatores como o tempo de exposição e o uso de revestimentos com nível de radiação inferior ao do material considerado (com implicações em termos de valorização de materiais e opções construtivas).

Abstract

The directive 2013/59 / EURATOM intends to establish safety standards for exposure to ionizing radiation (such as gamma radiation), including the regulation of building materials trade (it could, hence, have restrictive effects on the economic exploitation of this materials). This directive sets a limit on the contribution of building materials (including geological materials) for external gamma radiation (contribution assessed by an index based on quantitative estimations of atoms that emit gamma radiation). The factors that influence the contribution of geological materials for

external gamma radiation in interior spaces are reviewed for the general case and for the case of a weathered granite from Braga. Results are compared with the criteria of the considered directive, concluding that this directive could be excessively restrictive for the currently most common uses of natural stone (partial cladding). In situations involving the use of larger amounts of stone (e.g. some historical buildings), the hazard of reaching a radiation level above the reference level proposed in the directive are higher but one needs to consider factors such as exposure time and the use of coatings with radiation level lower than that of the considered material (this could have implications in terms of materials valorisation and constructive options).

Palavras chave: granitos, dose efetiva, pedra natural

1. Introdução – A problemática

Existem vários processos radioativos naturais que emitem radiações (com origem no espaço exterior e nos constituintes do planeta). O assunto merece alguma atenção do ponto de vista da saúde pública uma vez que existe pelo menos a possibilidade dessa radiação contribuir para o desenvolvimento de problemas oncológicos (UNSCEAR 1998).

Entre essas fontes naturais estão incluídos os materiais geológicos (por exemplo, as rochas graníticas) pela presença nos mesmos de elementos químicos radioativos. Nesse sentido existem propostas sobre formas de avaliar os riscos radiológicos associados com os mesmos. Estes materiais são utilizados desde tempos antigos e estão presentes em construções antigas e recentes pelo que são considerados na avaliação da exposição a radiação das pessoas em locais de habitação e trabalho (MOHARRAM et al., 2012). As restrições associadas com a preocupação da saúde pública podem ter, por outro lado, consequências na exploração e exportação de matérias-primas com importância económica. Por exemplo, a exportação de granitos em Portugal no recente período de assistência financeira externa (2011-2014) correspondeu, de acordo com os dados recolhidos em www.dgeg.pt, a um montante de 343 milhões de euros.

A identificação de fatores que aumentam o risco de ocorrência de cancro é um assunto polémico, especialmente quando baseado em estudos epidemiológicos observacionais onde vários fatores podem sobrepor-se. Podemos recordar o caso do tabaco onde no espaço de algumas décadas passamos da quase ausência de restrições às restrições à inalação passiva. Podemos também referir o exemplo recente (outubro de 2015) das preocupações com o consumo de carnes processadas (este exemplo será particularmente interessante para a problemática aqui considerada uma vez que existe preocupação com os efeitos destes produtos e com as consequências dessa preocupação nas atividades económicas).

Em relação ao tema dos efeitos da radioatividade, no passado foi defendido, por exemplo, que as águas radioativas poderiam ter propriedades terapêuticas. Em Portugal há o exemplo da construção de um grande hotel associado com termas de águas com elevados níveis de radioatividade (águas de radium). Uma reportagem sobre este hotel pode ser vista, ainda em dezembro de 2015, em <http://sicnoticias.sapo.pt/programas/abandonados/2014-12-21-Regresso-as-Termas-de-Radium>). Nesta reportagem, a Prof.^a Sandra Soares defende, em relação as águas consideradas, que "não temos dados científicos que comprovem a relação entre ingerir a água e o aparecimento de uma doença".

Podem ser encontradas, ainda hoje, referências sobre os possíveis efeitos benéficos do radão, gás radioativo natural (ver por exemplo, ZDROJEWICZ e STRZELCZYK 2006) e existem trabalhos sobre radiação e hormese, defendendo os efeitos benéficos da exposição a baixas doses de radioatividade (ver, por exemplo, CALABRESE et al. 2015). Refira-se, também, que de acordo com o Prof. Sobrinho Simões (SOBRINHO SIMÕES 2014) não existe evidência suficiente para afirmar a carcinogenicidade de fontes de radiação como a dos minerais do solo.

Como é visível, a relação entre radioatividade e problemas de saúde pode ser polémica para exposições prolongadas a níveis relativamente baixos. CLARKE (1999) afirma mesmo que a evidência epidemiológica será sempre limitada para doses baixas.

Mas essa problemática não será considerada aqui (este trabalho não pretende discutir aspetos epidemiológicos). Assim sendo, iremos admitir o nível de referência indicado pelo Conselho da União Europeia na diretiva 2013/59/EURATOM e discutir a relação desse nível com as características dos materiais geológicos e da sua aplicação em obra.

Os corpos geológicos podem contribuir de diferentes formas para os riscos radiológicos, pelas emanções de gás radioativo ou influenciando a radioatividade das águas subterrâneas. Mas, neste trabalho, a discussão incidirá exclusivamente sobre a contribuição dos materiais geológicos para a radiação gama externa (no sentido de externa ao organismo), nomeadamente sobre a contribuição em excesso em relação ao fundo natural de uma região (uma vez que os habitantes da região estarão sempre expostos a essa radiação de fundo).

Neste texto será discutida a relação entre a contribuição dos materiais de construção para a dose de radiação gama externa e, entre outros fatores, a quantidade de material utilizada. Nesse sentido será conveniente destacar algumas diferenças, em termos de utilização dos materiais geológicos, entre as construções recentes e as construções antigas. Nas construções antigas é frequente encontrar a utilização de rochas sob a forma de blocos com dimensão significativa, nas paredes, no pavimento, nos elementos decorativos e até (situação menos comum) na cobertura. Em muitas situações a pedra está à vista ou coberta por um revestimento muito fino. Já nas construções recentes a maior parte das aplicações consiste em revestimentos com espessuras na ordem de poucos centímetros, frequentemente numa área restrita (existem todavia construções, nomeadamente casas mas não só, onde são utilizados blocos de maior espessura e sem qualquer revestimento).

As questões apresentadas serão discutidas, essencialmente, na perspetiva de utilização de materiais de construção em novas obras mas também podem ter relevância para edificações antigas onde são encontradas situações de aplicações dos materiais em grande volume (que, como iremos ver, implicam uma maior contribuição para a dose de radiação gama externa).

2. Radioatividade, dose absorvida, dose efetiva

Pretende-se apresentar aqui alguns conceitos de base que, esperamos, permitirão a leitura do resto deste texto e de alguns documentos relevantes, como a diretiva 2013/59/EURATOM. O leitor interessado poderá encontrar informações adicionais em CABRAL (2011).

Como referido na introdução, este texto incide sobre a contribuição dos materiais geológicos para a dose gama externa e não serão consideradas contribuições destes materiais para a dose interna (no interior do organismo por via de líquidos, gases ou poeiras).

Podemos começar por recordar que todos os materiais são compostos por átomos de elementos químicos. Estes átomos são formados por partículas subatómicas. Para efeitos deste texto bastará referir, entre essas partículas subatómicas, os prótons e os neutrões. Os átomos de um determinado elemento químico têm todos o mesmo número de prótons mas podem ter um número variável de neutrões, definindo assim distintos isótopos para um mesmo elemento químico. A indicação de um determinado isótopo costuma ser feita com o símbolo do elemento químico antecedido por um coeficiente superior com a soma dos prótons e neutrões do isótopo. Por exemplo, ^{40}K representa um isótopo do elemento químico potássio que apresenta um número de prótons mais neutrões igual a 40. Certos átomos apresentam radioatividade (isótopos radioativos), transformando-se espontaneamente noutros átomos (decaimento radioativo), podendo emitir, entre outras partículas, fótons também referidos como raios gama (radiação gama).

A radioatividade pode ser, conseqüentemente, caracterizada em termos de transformações (decaimentos) por unidade de tempo e a unidade do sistema internacional atualmente utilizada é o becquerel (1 transformação por segundo, representado por Bq). Obviamente que a radioatividade manifestada por uma substância vai depender da abundância dos átomos que podem sofrer decaimento radioativo pelo que pode determinar-se a atividade específica, por unidade de massa, que representa uma medida da concentração de um isótopo radioativo (a unidade no sistema internacional é o becquerel por quilograma, representado como Bq/kg). Para isso é necessário determinar, em detectores apropriados, contagens por unidade de tempo dos fótons. Os fótons emitidos pelo decaimento radioativo podem ter energia variável (em função do isótopo), o que será interessante neste contexto por permitir a identificação do isótopo que os emite e por ter implicações para o efeito da deposição do fóton na matéria. Essa atividade específica pode ser determinada por diversos procedimentos laboratoriais (revistos em LIMA et al. 2015a). A radiação gama pode ainda ser avaliada por medições de campo e, por estudo do intervalo de energias dos fótons, é possível estimar as proporções entre diferentes isótopos.

Certos isótopos radioativos transformam-se em outros isótopos radioativos, definindo-se assim séries de decaimento que continua até atingir um átomo que é estável (isto é, não sofre decaimento radioativo). Em certas condições (ver CABRAL 2011) pode estabelecer-se um equilíbrio entre os diferentes isótopos e é possível estimar as atividades específicas dos diferentes isótopos de uma série a partir da estimativa da atividade específica de um deles (que será considerado representativo da série). Em geral assume-se que isso acontece com as séries do urânio (principalmente ^{238}U) e do tório (^{232}Th) apresentadas na tabela I (séries com interesse para a avaliação da contribuição dos materiais de construção para a radiação gama externa). Para avaliar os efeitos da radiação gama transforma-se a atividade específica em dose absorvida e esta é transformada em dose efetiva. Os valores de atividade específica podem ser convertidos em dose absorvida por unidade de massa da entidade afetada (a unidade no sistema internacional é o gray, representado por Gy) por unidade de tempo, considerando a energia dos fótons e a configuração geométrica das fontes de emissão em relação à entidade em consideração (massa das fontes de emissão, distância, etc.). Esta dose absorvida pode ter efeitos diferentes em diferentes órgãos de um organismo e isso é tido em consideração na transformação da dose absorvida em dose efetiva (cuja unidade é o sievert, representado por Sv) que é calculada para um determinado intervalo temporal (habitualmente um ano) em função de uma previsão para o tempo de exposição nesse intervalo de tempo (normalmente uma pessoa não passa todo um ano no mesmo sítio). A transformação de dose absorvida em dose efetiva é obtida multiplicando por um valor que habitualmente é considerado igual a 0,7 (MARKKANEN 1995).

Tabela I – Séries de decaimento do ^{232}Th e do ^{238}U (a: ano, d: dia, h: hora, min: minuto, s: segundo, ns: nanosegundo).

| Isótopo | Modo de decaimento | Período de | Isótopo | Modo de decaimento | Período de |
|-------------------|--------------------|--------------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|
| ^{232}Th | | 1,405•10 ¹⁰ a | ^{238}U | | 4,468•10 ⁹ a |
| ^{228}Ra | - | 5,75 a | ^{234}Th | - | 24,10 d |
| ^{228}Ac | - | 6,25 h | ^{234}Pa | - | 6,70 h |
| ^{228}Th | | 1,9116 a | ^{234}U | | 245500 a |
| ^{224}Ra | | 3,6319 d | ^{230}Th | | 75380 a |
| ^{220}Rn | | 55,6 s | ^{226}Ra | | 1602 a |
| ^{216}Po | | 0,145 s | ^{222}Rn | | 3,8235 d |

| | | | | |
|-------|----------|-----------|-------|-----------|
| 212Pb | - | 10,64 h | 218Po | 99.98 % |
| | - | 0.02 % | | |
| | | 3,10 min | | |
| 212Bi | - | 64.06% | | |
| | 35.94% | 60,55 min | 218At | 99.90 % |
| | - | 0.10 % | | |
| | | 1,5 s | | |
| 212Po | | 299 ns | 218Rn | |
| | | 35 ms | | |
| 208Tl | - | 3,053 min | 214Pb | - |
| | | 26,8 min | | |
| 208Pb | . | Estável | 214Bi | - 99.98 % |
| | 0.02 % | 19,9 min | | |
| | | 214Po | | 0,1643 ms |
| | | 210Tl | - | 1,30 min |
| | | 210Pb | - | 22,3 a |
| | | 210Bi | - | 99.99987% |
| | 0.00013% | 5,013 d | | |
| | | 210Po | | 138,376 d |
| | | 206Tl | - | 4,199 min |
| | | 206Pb | - | Estável |

Fonte: AITKEN (1985).

3. Avaliação da contribuição dos materiais geológicos para a radiação gama externa

Os principais elementos químicos associados com a radiação gama dos materiais geológicos são o potássio, o urânio e o tório. A presença dos diferentes átomos radioativos e dos seus átomos filhos pode ser avaliada pela contagem por unidade de tempo das partículas resultantes do decaimento radioativo. Para esse fim são adquiridos (por espectrometria, por exemplo) espectros num intervalo de energia (uma vez que as partículas dos diferentes tipos de átomos apresentam diferentes valores de energia).

No caso dos materiais de construção utilizados num determinado espaço tem sido proposta a avaliação da contribuição destes para a dose efetiva em excesso em relação à dose de fundo (no exterior sem a presença destes materiais), uma vez que os materiais de construção têm um efeito de isolamento em relação à radiação gama de fundo. Como pode ser visto em MARKKANEN (1995), a utilização de um material de construção como revestimento leva a uma diminuição da dose resultante dos materiais sobre os quais esse material é aplicado ou em relação à radiação resultante dos terrenos no exterior. Essa diminuição será mais acentuada para maiores valores de "massa específica" (MARKKANEN 1995), isto é massa por unidade de área (obtida pelo produto da massa volúmica do material utilizado como revestimento pela espessura do revestimento). Valerá a pena, a este respeito, mencionar o estudo de AMARAL (2000), baseado em medições de campo, que regista variações entre 241 nGy/h e 11 nGy/h para as taxas de dose absorvida nos solos de Portugal (curiosamente os dois extremos foram obtidos em solos derivados de rochas plutónicas) mostrando que o fundo que deverá ser considerado pode ser muito variável (dependente das características geológicas da região).

É habitual definir um nível de referência para a contribuição dos materiais para a radiação gama em excesso da contribuição de fundo (sem a presença desses materiais), nível esse que corresponde a exposições consideradas inadequadas (ver artigo 4.º da diretiva 2013/59/EURATOM). Existem várias propostas em relação ao valor de referência a considerar

(ver, por exemplo, CE 1999), que podem ser influenciadas pela geologia regional, no sentido que em existem variações entre regiões do mundo na dose resultante da contribuição de fundo (ver KOVLER 2009). A diretiva 2013/59/EURATOM considera um valor de referência para a dose efetiva anual devida aos materiais de construção igual a uma milésima parte do sievert (1 mSv/ano).

A avaliação da contribuição dos materiais de construção para a radiação gama externa deve considerar não só as características intrínsecas dos materiais (as atividades específicas dos isótopos radioativos e a massa volúmica aparente ou densidade aparente - que representa a quantidade de massa por unidade de volume) mas também das características de aplicação do material, nomeadamente a espessura e a área (que, por via da massa volúmica aparente do material, representa a massa de material e portanto as quantidades de isótopos radioativos) e a distribuição espacial da aplicação. Por exemplo, em espaços interiores, é preciso considerar a extensão da aplicação do material (paredes, pavimento, teto) e as dimensões do espaço onde os materiais estão aplicados.

Com base nas características dos materiais e das suas aplicações podem ser determinados por modelação numérica fatores de conversão da atividade específica em valores de taxa de dose absorvida (dose absorvida por unidade de tempo). Estes fatores são habitualmente utilizados para os dados de 40K, de um isótopo representativo da série de decaimento do urânio e de outro isótopo representativo da série de decaimento do tório, obtendo-se a taxa de dose absorvida pela soma das diferentes contribuições.

Vários fatores de conversão de atividade específica em taxa de dose absorvida têm sido sugeridos (ver revisão em LIMA et al. 2015a). Estes fatores são, geralmente, algo semelhantes para os isótopos representativos das séries do urânio e do tório (mas sempre superiores para a série de decaimento do tório, entre 7% e 42% superior) e substancialmente menores para o 40K (entre 10% e 5% dos valores dos outros). Na Figura 1 apresentam-se os valores dos fatores de conversão de atividade específica em taxa de dose absorvida indicados em CE (1999) para um espaço interior com 4 m x 5 m x 2.8 m (espaço frequentemente considerado como "espaço padrão" ou "standard room") de acordo com diferentes situações de extensão de aplicação dos materiais. É visível que o valor do fator de conversão (e consequentemente da taxa de dose absorvida correspondente a um determinado valor de atividade específica) vai aumentando com o aumento da extensão da aplicação do material.

Figura 1 – Fatores de conversão dos valores de atividade específica em valores de taxa de dose absorvida propostos em CE (1999) para um espaço interior com 4 m x 5 m x 2.8 m em função da extensão da utilização do material.

MARKKANEN (1995) apresenta fatores de conversão dos valores de atividade específica em valores de taxa de dose absorvida calculados para um espaço interior com dimensões 12 m x 7 m x 2.8 m em função do valor de "massa específica" (em quilograma por metro quadrado) que é obtido multiplicando a massa volúmica pela espessura. Admitindo que os materiais são aplicados em todas as superfícies de um espaço interior, os valores obtidos para os fatores mais elevados indicados para este espaço são ligeiramente superiores (no máximo 7%) aos valores dos fatores indicados pelo mesmo autor para um espaço com dimensões 5 m x 4 m x 2,8 m (o tal "espaço padrão"). Uma análise mais detalhada do efeito das dimensões e outras características do espaço considerado pode ser encontrada em RISICA et al. (2001).

A Figura 2 mostra a variação dos fatores de conversão calculados por MARKKANEN (1995) para o 40K num espaço interior com dimensões 12 m x 7 m x 2.8 m e admitindo que o material é

utilizado para revestir todas as superfícies (paredes, teto e muro). Para um material específico (com um determinado valor de massa volúmica), esta variação corresponde à variação da espessura do material. É visível que o valor do fator de conversão (e consequentemente o valor da taxa de dose absorvida para um determinado valor de atividade específica) aumenta com o aumento da espessura, mas esse aumento é menos acentuado para espessuras maiores.

Figura 2 – Variação com a "massa específica" (produto da massa volúmica pela espessura) dos valores dos fatores de conversão (de atividade específica em taxa de dose absorvida) para o 40K propostos em MARKKANEN (19995) para um espaço interior com 12 m x 7 m x 2.8 m (admitindo que o material é aplicado em todas as superfícies do espaço interior).

Para obter a dose efetiva anual num determinado local multiplica-se a taxa da dose absorvida por um fator de conversão e pelo tempo de exposição nesse local. Assim sendo, a dose efetiva por período de tempo num determinado local é diretamente proporcional ao tempo despendido no local nesse período de tempo (habitualmente considera-se o número de horas por ano para estimar a dose efetiva anual). Uma vez que pretende avaliar-se a contribuição em excesso dos materiais é necessário subtrair a dose de fundo, isto é, a dose sem a presença dos materiais de construção.

Uma forma alternativa de avaliar a potencial contribuição dos materiais de construção para a radiação gama externa em excesso é o cálculo de um índice de atividade. Para tal dividem-se por determinados fatores as atividades específicas dos isótopos considerados (40K, um isótopo representativo da série de decaimento do urânio e um outro isótopo representativo da série de decaimento do tório). Os fatores de divisão são diferentes para os diferentes isótopos e correspondem (ver MARKKANEN 1995) ao valor de atividade específica que (para esse isótopo) seria suficiente para causar uma determinada dose efetiva anual. Em LIMA et al. (2015a) é apresentada uma revisão de diversos fatores que têm sido sugeridos. Refira-se, sumariamente, que os valores para o 40K são substancialmente superiores aos valores indicados para os isótopos representativos das séries de decaimento do urânio e do tório. A diretiva 2013/59/EURATOM indica que o valor unitário para o índice de atividade apresentado nessa diretiva pode servir para avaliar o nível de referência da contribuição em excesso dos materiais de construção para a radiação gama externa (uma dose efetiva anual igual a 1 mSv) e, desta forma, ser utilizado como "ferramenta de rastreio restritiva". Esta mesma diretiva menciona que "O cálculo da dose deve ter em conta outros fatores como a densidade, a espessura do material, bem como fatores relacionados com o tipo de edifício e a utilização prevista do material (a granel ou superficial)". Podem utilizar-se diferentes valores de referência para o índice quando pretendemos limites mais baixos (ou mais altos) de dose efetiva anual. Assim, por exemplo, o documento CE (1999), que utiliza valores de denominador, iguais aos valores da diretiva 2013/59/EURATOM, define valores de referência para este índice de atividade de acordo com dois possíveis valores de dose efetiva anual (0,3 mSv e 1 mSv). Este documento também define diferentes valores de referência em função da extensão da utilização dos materiais (ver Figura 3). Assim, para utilizações limitadas como revestimentos superfícies, o valor de referência é 2 (para uma dose efetiva inferior ou igual a 0,3 mSv por ano) ou 6 (para uma dose efetiva inferior ou igual a 1 mSv por ano). O tempo de exposição é um dos fatores envolvidos da obtenção da expressão do índice (e dos seus níveis de referência). MARKKANEN (1995) refere um tempo de 1600 horas por ano no local de trabalho e de 7000 horas por ano para o tempo na habitação pessoal (valor de tempo também considerado em CE 1999). Para 365 dias, este valor de tempo corresponderia a, em

média, 19 horas em casa por dia (poderá ser, geralmente, excessivo para países do sul da Europa). O valor de referência do índice também já incorpora a subtração de um determinado valor de radiação de fundo. Por exemplo MARKKANEN (1995), que utiliza os mesmos valores que são referidos na diretiva 2013/59/EURATOM, utilizou na derivação da expressão do índice de atividade uma taxa de dose absorvida calculada a partir dos valores médios da crosta terrestre e que corresponderia a uma dose efetiva anual por volta de 1/3 de mSv (admitindo um fator de conversão de dose absorvida em dose efetiva igual a 0,7 e as 7000 horas de exposição por ano).

Figura 3 – Valores limites para o índice de atividade previstos em CE (1999) para dois níveis de referência da dose efetiva anual e para diferentes tipos de extensão da aplicação dos materiais.

4. Caso de estudo

Seguidamente serão discutidos alguns dados obtidos num produto de alteração de um granito do distrito de Braga (determinações laboratoriais), com os quais será possível determinar o índice de atividade e simular a dose efetiva resultante da sua utilização como material de construção (conforme o modelo de aplicação).

LIMA et al. (2015b) apresentam resultados de índice de atividade em amostras de granito com diferentes graus de alteração que variam entre 1,10 e 1,90 (com base em análises laboratoriais). Numa perspetiva conservadora, iremos considerar aqui o resultado mais elevado, ainda que este corresponda a um material muito alterado (não seria utilizado em novas construções mas poderá ser encontrado em construções antigas).

Com os valores de atividade específica para este granito muito alterado foram calculados os valores de dose efetiva anual para os diferentes cenários de extensão de utilização dos materiais de construção considerados em CE (1999) para um espaço interior padrão. Os resultados apresentados na Figura 4 mostram que valor de referência de 1 mSv por ano será ultrapassado nos cenários em que o material considerado é utilizado com 20 cm de espessura em todas as superfícies ou em todas menos o teto. Mas isso não acontece nas situações em que o material é utilizado apenas no pavimento ou quando é utilizado com uma espessura de 3 cm.

Figura 4 – Dose efetiva anual que seria obtida para a amostra de LIMA et al. (2015b) com o valor mais elevado de índice de atividade de acordo com os fatores de conversão (de atividade específica em taxa de dose absorvida) propostos em CE (1999) e admitindo um fator de conversão de dose absorvida em dose efetiva igual a 0,7 e um número de horas de exposição anual igual a 7000 horas.

Outra forma de avaliação da perigosidade em termos de radiação gama consiste em projetar a variação da dose efetiva com a espessura, utilizando os fatores de conversão indicados em MARKKANEN (1995) para diferentes cenários de extensão de utilização num espaço interior com dimensões 12 m x 7 m x 2,8 m. Para um material com um determinado valor de massa volúmica, o valor de espessura correspondente a um determinado fator de conversão é determinado dividindo os valores de massa específica indicados em MARKKANEN (1995) pelo valor da massa volúmica. Nesta análise considerou-se um valor de 2670 kg/m³ para a massa volúmica do material, valor que, num granito alterado, pode ser considerado conservador para a avaliação da radiação gama (no sentido em que o granito alterado terá garantidamente um valor de massa volúmica inferior e, conseqüentemente, o valor de dose será necessariamente inferior). Na Figura 5 apresentam-se três gráficos correspondentes a: a) aplicação do material em todas as

superfícies do espaço interior; b) aplicação do material em toda a superfície das quatro paredes e do pavimento; c) aplicação limitada ao pavimento. É visível que só para a situação de aplicação em todo o espaço interior é atingida uma dose efetiva anual igual a 1 mSv para uma espessura próxima da ordem dos valores utilizados nos revestimentos atuais. No cenário de aplicação nas superfícies das 4 paredes e do pavimento só para espessuras próximas dos 8 cm seria atingido o valor de 1 mSv por ano, mas será necessário considerar o feito de "blindagem" em relação à radiação exterior, subtraindo esse valor. Para aplicações limitadas ao pavimento, não seria atingindo o valor de 1 mSv por ano (tendo, nomeadamente, em consideração a subtração da dose efetiva de fundo).

Figura 5 – Variação da dose efetiva anual (mSv/ano) em função da espessura do revestimento de material para a amostra de LIMA et al. (2015b) com o valor mais elevado de índice de atividade em três situações de extensão de aplicação do material: a) em todas as superfícies do espaço; b) nas quatro paredes e no pavimento; c) só no pavimento. Utilizaram-se os fatores propostos em MARKKANEN (1995) num espaço interior com 12 m x 7 m x 2,8 m e considerou-se uma massa volúmica igual a 2670 kg/m³.

Como referido acima, o cálculo da dose efetiva para um espaço interior precisa também de considerar o tempo de exposição nesse local ao longo do ano. Assim, para o material considerado e no pior cenário (maior taxa de dose absorvida), correspondente a uma grande espessura e aplicação em todas as superfícies do espaço interior (e sem retirar a radiação de fundo), seria necessário um tempo de exposição ligeiramente acima das 3000 horas por ano (correspondente a uma média próxima de oito horas e meia por dia no espaço considerado) para atingir um valor igual a 1 mSv.

5. Considerações finais

Pretende-se fazer nesta secção o balanço dos pontos considerados na discussão desta problemática, nomeadamente em termos do equilíbrio entre a salvaguarda da saúde pública, por um lado, e, por outro lado, a atividade económica e o usufruto das construções antigas.

As considerações apresentadas permitiram rever os principais fatores envolvidos na avaliação da contribuição em excesso (em relação ao fundo natural) para a radiação gama externa dos materiais geológicos utilizados numa determinada construção.

A discussão apresentada considerou quer o caso geral dos materiais de construção quer o caso particular de um material granítico do distrito de Braga. Ficou evidente que a avaliação da contribuição dos materiais geológicos para a dose gama externa não pode considerar unicamente características intrínsecas dos materiais (o conteúdo em elementos radioativos e a massa volúmica) mas deve ter em consideração, também, a aplicação dos materiais (extensão superficial e espessura) e o tempo de exposição aos mesmos.

Desta forma, poderão ser consideradas excessivamente restritivas, com potencial impacte em termos de comercialização dos materiais, propostas como a da diretiva 2013/59/EURATOM, baseadas no valor de um índice de atividade calculado a partir das atividades específicas dos isótopos radioativos (e sem qualquer consideração sobre a forma de aplicação dos materiais). No caso de estudo que foi considerado, um material com um índice de atividade claramente superior ao valor de referência definido na diretiva 2013/59/EURATOM, o nível de referência

para a dose efetiva indicado nesse mesmo documento só seria atingido em situações de utilização extensiva do material e com espessuras significativas. Isto deve ser comparado com os usos e costumes da atualidade em termos de utilização da pedra natural (pedras de revestimento fino e em geral numa parte da superfície interior) para os quais o valor unitário para o índice de atividade pode ser considerado, conseqüentemente, excessivamente restritivo.

Uma proposta como a apresentada em CE (1999), que considera diferentes valores de referência em função da extensão da utilização dos materiais, será, por isso, mais apropriada e adaptável ao tipo de produto de construção elaborado com o material geológico. Adicionalmente, os critérios referidos neste documento incluem a preocupação com as características do valor de radiação gama do fundo natural, tendo um limite mais restritivo para os materiais em regiões com fundo natural mais baixo.

A contribuição para a radiação gama externa poderá ser mais preocupante em edificações onde os materiais são utilizados extensivamente e com grandes espessuras, como é o caso de monumentos antigos (ou algumas opções construtivas contemporâneas relativamente raras). Todavia, há dois fatores que contribuem para reduzir o risco relacionado com a radiação gama emitida por estes materiais:

- O nível de referência é definido para um tempo de exposição (presença no espaço considerado) correspondente a perto de 19 horas por dia, o que não será comum nas construções antigas;
- A aplicação de materiais de revestimento (rebocos, materiais cerâmicos, terras) sobre as pedras tem um efeito de isolamento em relação à radiação gama emitida por estes materiais.

Este último ponto pode ter implicações interessantes em termos de opções construtivas uma vez que pode valorizar a utilização em construções antigas de revestimentos com menores valores de atividade específica, contribuindo para a redução a dose de radiação gama externa (e sendo um possível argumento de promoção desses materiais de revestimento). Mas essa problemática ficará para outras jornadas.

6. Agradecimentos

Este trabalho insere-se nas atividades do Projeto Lab2PT- Laboratório de Paisagens, Património e Território - AUR/04509 que tem o apoio financeiro da FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) e o cofinanciamento do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), ref^a POCI-01-0145-FEDER-007528, no âmbito do novo acordo de parceria PT2020 através do COMPETE 2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI).

7. Referências

- AITKEN, M. J. (1985). Thermoluminescence dating. Londres: Academic Press.
- AMARAL, E.M. (2000). Natural gamma radiation in air versus soil nature in Portugal. Proc. IRPA 10, Hiroshima, P-1a-12, Disponível em <http://www2000.irpa.net/irpa10/cdrom/00979.pdf> [Acedido em 19 de fevereiro de 2017].
- CABRAL, J. M. P. (2011). A radioactividade: contributos para a história da arte. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- CALABRESE, E. J., DHAWAN, G., KAPOOR, R., IAVICOLI, I., & CALABRESE, V. (2015). What is hormesis and its relevance to healthy aging and longevity? *Biogerontology*, 16(6), 693–707. <http://doi.org/10.1007/s10522-015-9601-0>
- CLARKE, R. (1999). Control of low-level radiation exposure: time for a change? *Journal of Radiological Protection*, 19(2), 107–115. <http://doi.org/10.1088/0952-4746/19/2/301>
- CE-Comissão Europeia (1999). Radiation Protection 112 - Radiological protection principles concerning the natural radioactivity in building materials. Luxemburgo: Comissão Europeia.
- DIRETIVA 2013/59/EURATOM (2014) Normas de segurança de base relativas à proteção contra os perigos resultantes da exposição a radiações ionizantes, e que revoga as Diretivas

89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom. Jornal oficial da União Europeia. L13/1-73.

FERREIRA, N., DIAS, G., MEIRELES, C. A. P., & SEQUEIRA BRAGA, M. A. (2000). Carta Geológica de Portugal na escala 1/50.000. Notícia Explicativa da Folha 5-D Braga. Lisboa: Instituto Geológico e Mineiro.

KOVLER, K. (2009). Radiological constraints of using building materials and industrial by-products in construction. *Construction and Building Materials*, 23(1), 246–253. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.010>

LIMA, M., ALVES, C., & SANJURJO-SÁNCHEZ, J. (2015a). Procedures for Assessment of Geologic Materials in Relation to Their Contribution to External Gamma Dose Radiation: A Review. In M. C. Wythers (Ed.), *Advances in Materials Science Research*, Volume 20. Hauppauge: Nova Science Publishers.

LIMA, M., ALVES, C., & SANJURJO-SÁNCHEZ, J. (2015b). Gamma radiation in rocks used as building materials: The braga granite (NW Portugal). *Cadernos Do Laboratorio Xeoloxico de Laxe*, 38, 79–92.

MARKKANEN, M. (1995). Radiation Dose Assessments for Materials with Elevated Natural Radioactivity. Report STUK-B-STO 32 Radiation and Nuclear Safety Authority – STU. Helsinki: Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety.

MOHARRAM, B. M., SULIMAN, M. N., ZAHRAN, N. F., SHENNAWY, S. E., & EL SAYED, A. R. (2012). External exposure doses due to gamma emitting natural radionuclides in some Egyptian building materials. *Applied Radiation and Isotopes*, 70(1), 241–248. <http://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.07.013>

RISICA, S., BOLZAN, C., & NUCCETELLI, C. (2001). Radioactivity in building materials: room model analysis and experimental methods. *Science of The Total Environment*, 272(1-3), 119–126. [http://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00675-1](http://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00675-1)

SOBRINHO SIMÕES, M. (2014). *O Cancro*. Lisboa: Fundação Francisco Manuel dos Santos.

UNSCEAR-United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (1998). *Sources, effects and risk of ionizing radiation*. Nova Iorque: Nações Unidas.

ZDROJEWICZ, Z., & STRZELCZYK, J. (2006). Radon Treatment Controversy. *Dose-Response*, 4(2), 106–118. <http://doi.org/10.2203/dose-response.05-025.Zdrojewicz>