

Versão de autor (C. Alves) -
não é a versão final publicada.

A versão final pode ser encontrada em:

<https://ch.guimaraes.pt/minutes/2chi>

This is an author version (C. Alves) and
not the final published version.

The final published version is available at:

<https://ch.guimaraes.pt/minutes/2chi>

PERIGOSIDADE RADIOLÓGICA NA CIDADE DO PRESENTE: A
CONTRIBUIÇÃO DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO PARA A DOSE
EXTERNA RESULTANTE DA RADIAÇÃO GAMA

P. Pereira¹, J. Sanjurjo-Sánchez², C. Alves³

¹ Aluna do Mestrado em Geociências, Departamento de Ciências da Terra/Escola de Ciências da Universidade do Minho, Braga, Portugal, pereirasofiapaula@gmail.com

² Instituto Universitario de Xeoloxía “Isidro Parga Pondal”, Universidade da Corunha, A Corunha, Espanha, jsanjurjo@udc.es

³ LandS/Lab2PT - Laboratório de Paisagens, Património e Território (FCT UID/AUR/04509/2013; FEDER COMPETE POCI-01-0145-FEDER-007528) e Departamento de Ciências da Terra/Escola de Ciências, Universidade do Minho, Braga, Portugal, casaix@dct.uminho.pt

ABSTRACT

A radioatividade associada com os materiais de construção (pela presença de átomos radioativos) é um dos potenciais riscos que podem afetar as pessoas que ocupam espaços construídos com esses materiais, quer pela via da inalação quer pela via da dose externa associada com a radiação gama. Nesta comunicação pretendemos fazer uma revisão de informações existentes sobre a contribuição de materiais de construção para a dose externa resultante da radiação gama, considerando sobretudo os materiais geológicos (mas as considerações apresentadas estendem-se aos materiais de construção em geral), nomeadamente no contexto das características da cidade do presente. É na cidade do presente que vamos ter uma maior diversidade de estruturas, que vão ter uma perigosidade radiológica variável em função dos materiais utilizados e da tipologia de construção. A diversidade dos materiais encontrados pode ir muito além dos limites regionais e podem existir materiais com níveis muito superiores aos dos materiais locais, em proporções e geometrias muito diversas. O processo de envelhecimento das populações na cidade do presente pode, também, implicar maiores tempos de permanência em espaços interiores, aumentando a dose associada com a radiação gama externa.

INTRODUÇÃO

A radioatividade é uma das preocupações da sociedade atual, sublinhada na altura em que esta comunicação está a ser escrita pelos testes nucleares da República Popular Democrática da Coreia, a nível mundial, e, em Portugal, pela extensão do tempo de vida de uma central de energia nuclear espanhola próxima da fronteira. Mas os processos radioativos podem estar presentes em outras fontes, como, por exemplo, os corpos geológicos dos terrenos circundantes e os materiais preparados a partir dos mesmos; processos radioativos associados com certos átomos (isótopos radioativos), nomeadamente os dos elementos químicos urânio, tório e potássio¹. O decaimento radioativo de isótopos dos elementos referidos pode afetar os seres humanos por via externa (chamada radiação gama) ou por via interna, através da entrada de partículas ou

¹ Explicações bastante desenvolvidas em Língua Portuguesa sobre os conceitos relacionados com radioatividade podem ser encontrados em Cabral (2011).

gases (com especial destaque para o radão resultante do decaimento radioativo do urânio²). Dada a importante preocupação pela saúde na cidade do presente, este é um assunto que poderá ganhar relevância.

A presente comunicação versará sobre a contribuição dos materiais de construção para a radiação gama externa³ recebida pelos moradores das cidades atuais, considerando as diferentes variáveis que afetam essa contribuição, nomeadamente no contexto das características da cidade do presente. A discussão será centrada nos materiais geológicos mas as considerações apresentadas são extensíveis a outros materiais, como betão ou materiais cerâmicos que apresentam isótopos radioativos.

AValiação DA DOSE EFETIVA RESULTANTE DA RADIAÇÃO GAMA EXTERNA

A contribuição dos materiais de construção para a exposição da população à radiação gama externa pode ser avaliada através da dose efetiva, habitualmente expressa, neste contexto, em mSv (milisievert), que esta relacionada com a energia resultante do decaimento radioativo que afeta o organismo, cuja avaliação requer o conhecimento de características dos materiais como a concentrações de isótopos radioativos em estes (nomeadamente isótopos dos elementos químicos urânio, tório e potássio) e a sua massa volúmica, assim como das condições de aplicação (extensão de aplicação dos materiais e características geométricas do espaço) e do tempo de exposição a esses materiais (uma extensa discussão de todos estes efeitos e dos modelos para a sua avaliação pode ser encontrada em Markkanen, 1995). A maior parte dos guias de avaliação existentes referem-se à situação de utilização dos materiais no interior das habitações ainda que existem alguns exemplos relativos ao exterior (Markkanen, 1995). Em geral será no interior das habitações que o risco radiológico associado com a radiação gama externa será mais elevada mas isso pode inverter-se quando os materiais

² A questão do radão não será discutida em pormenor mas o leitor interessado pode encontrar diversa bibliografia sobre o assunto; podemos referir como exemplo para o território português o trabalho de Neves & Pereira (2011).

³ O leitor interessado poderá encontrar estudos gerais da radiação gama externa para Portugal em Amaral (2000), com comparação com a Geologia regional, e em Amaral et al. (1992), com comparação de medições no interior e no exterior de edificações.

utilizados na construção tiverem valores de concentração dos isótopos radioativos menores que os dos corpos geológicos exteriores e esses materiais exercerem um efeito de proteção contra a radiação do exterior.

O valor de 1 mSv por ano é frequentemente referido (como é o caso da diretiva 2013/59/EURATOM do Conselho da União Europeia, CUE, 2014) como valor de referência para a contribuição que os materiais de construção dão para a dose efetiva anual de radiação gama externa em excesso da radiação gama externa de fundo a que os seres humanos estão expostos no exterior na ausência desses materiais (mas esta radiação de fundo no exterior, relacionada com as características do terreno, pode mostrar importantes variações - ver discussão em Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017).

Como foi referido acima, a dose efetiva vai depender doutras variáveis para além da presença dos isótopos radioativos, nomeadamente em termos da forma como os materiais são aplicados. Todavia, em termos de avaliação da contribuição dos materiais geológicos, uma das formas de avaliação (adotada em CUE, 2014; anexo VIII) consiste em calcular um "índice de concentração de atividade" a partir de concentrações dos isótopos radioativos. A expressão desse índice pode ter diferentes expressões e valores de referência em função das condições de aplicação e de massa volúmica consideradas (vários exemplos podem ser encontrados em, entre outros, Markkanen, 1995; Lima, 2014; Lima et al., 2015). Nesta comunicação considera-se a expressão que é referida na diretiva 2013/59/EURATOM, para o interior das habitações, que é também a utilizada por outros documentos que serão aqui citados, como um documento da Comissão Europeia (CE, 1999) e o estudo de Markkanen (1995).

Habitualmente são definidos valores de referência para este índice de concentração de atividade, valores que podem ser utilizados para avaliar a potencialidade destes materiais excederem uma contribuição para a dose efetiva igual a 1 mSv. A diretiva 2013/59/EURATOM considera que um valor para este índice igual a 1 "pode ser utilizado como uma ferramenta de rastreio restritiva para a identificação de materiais" (que podem exceder o limite referido), isto para os materiais que vão ser comercializados. Ainda que isso seja discutido mais adiante nesta comunicação, será conveniente salientar desde já que o valor de referência indicado para o índice de concentração de atividade corresponde a condições específicas de geometria do espaço interior (forma e tamanho), massa de material aplicado (massa volúmica dos materiais e

espessura dos elementos) e de tempo de exposição. Ainda que isso não seja discutido na diretiva 2013/59/EURATOM, a comparação da expressão do índice e seu valor de referência referidos neste documento com as condições descritas em CE (1999) indicam que os mesmos correspondem a uma situação de extensa aplicação (vinte centímetros de espessura em todas as superfícies do espaço) de materiais com uma massa volúmica igual a 2350 kg/m^3 num espaço com dimensões 4 m x 5 m x 2,8 m (sem janelas nem portas) e para um tempo de exposição igual a 7000 horas por ano.

Neste contexto, será interessante referir que o documento da Comissão Europeia acima citado (CE, 1999) admite vários possíveis valores de referência para este índice, em função da extensão da utilização dos materiais e dos limites considerados para a contribuição dos materiais de construção para radiação gama em excesso da radiação de fundo, e que vão desde 0,5 (valor mais restritivo) para materiais aplicados em grandes quantidades e para um valor de referência para a contribuição dos materiais igual a 0,3 mSv, até 6 (menos restritiva) para aplicações reduzidas dos materiais (por exemplos revestimentos pouco espessos) e para um valor de referência, para a contribuição dos materiais, igual a 1 mSv. Existem também propostas de expressão deste índice para as exposições no exterior (Markkanen, 1995).

O índice de concentração de atividade, sendo um interessante parâmetro para comparar materiais, apresenta algumas limitações na avaliação da dose efetiva (como é referido no final do anexo VIII da diretiva 2013/59/EURATOM) resultantes das variações das condições de exposição em relação às condições utilizadas para derivar a expressão do índice e o valor de referência para o mesmo. Uma outra forma de avaliar a contribuição dos materiais de construção para a radiação gama externa consiste em multiplicar as concentrações dos isótopos radioativos por valores, que serão designados como fatores de conversão (são propostos diferentes fatores de conversão para os elementos químicos considerados⁴), que estão relacionados com a massa volúmica dos materiais e com as condições em que os materiais são utilizados (revisões de valores propostos podem ser encontradas, por exemplo, em Markkanen, 1995; Lima, 2014; Lima et al., 2015). O resultado da aplicação desses fatores de conversão é, subsequentemente, multiplicado pelo tempo e por uma constante relacionada com a interação entre a radiação gama externas e os organismos vivos. Desta forma é possível

⁴ Exemplos dos cálculos de dose efetiva com base nestes fatores de conversão podem ser encontrados em Markkanen (1995).

avaliar o potencial impacto de um determinado material em função da sua utilização. A obtenção desses fatores de conversão pode ser feita por via numérica utilizando programas informáticos apropriados (ver, por exemplo, Markkanen, 1995) que requerem a caracterização detalhada da distribuição das fontes de emissão de radiação gama. Um procedimento mais expedito consiste em comparar fatores de conversão calculados para diferentes tipos de condições padrão.

Nas secções seguintes iremos discutir em termos gerais os efeitos das variações dos diferentes parâmetros que podem afetar a dose efetiva associada com os materiais de construção, discussão baseada sobretudo nos fatores de conversão apresentados em Markkanen (1995). Referências a análises mais detalhadas, e complexas, podem ser encontradas na revisão de Sanjurjo-Sánchez & Alves (2017).

TEMPO DE EXPOSIÇÃO

O fator tempo de exposição é aquele que tem uma relação mais simples (e linear) com a contribuição dos materiais para a radiação gama externa e aquele que pode, em teoria, mostrar maiores variações, desde uns segundos até as 8765,8 horas de um ano médio (admitindo que a pessoa passa todo o ano no mesmo espaço).

Assim, todas as outras condições sendo iguais, a contribuição dos materiais de construção para a dose efetiva de radiação gama externa para o valor de referência de 7000 horas de exposição⁵ é 7000 vezes superior ao valor para uma exposição de uma hora, 14000 vezes superior ao valor para meia hora de exposição e 28000 vezes superior ao valor que seria obtido com um quarto de hora de exposição.

Para efeitos comparativos, passar um ano completo no mesmo espaço corresponde a um aumento de 25% na dose efetiva resultante dos materiais em relação ao valor de referência de 7000 horas, que corresponde a uma estimativa para os países ocidentais e sobretudo na perspectiva do espaço doméstico.

CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

⁵ O tempo de exposição considerado para o valor de referência indicado na diretiva 2013/59/EURATOM para o índice de concentração de atividade.

Esta secção discutira as linhas gerais dos efeitos das características dos materiais, considerando duas vertentes: as concentrações de isótopos radioativos e a massa volúmica.

Obviamente, materiais com maiores concentrações dos elementos químicos com isótopos radioativos vão ter uma maior contribuição para a dose efetiva no espaço em que esses materiais estão aplicados. Todavia, a contribuição dos diferentes elementos químicos para a dose efetiva não é a mesma (ver revisão em Lima et al., 2015) e as variações que os elementos químicos apresentam também não é semelhante. As variações nos teores em urânio e tório podem ser muito mais significativas que as variações em potássio, uma vez que este último é um elemento presente em muitos minerais constituintes das rochas, enquanto os primeiros ocorrem em concentrações vestigiais que podem mostrar grandes variações em função de processos de concentração associados com os processos de formação das rochas e processos posteriores de alteração das mesmas. Para além dos seus efeitos na radiação gama externa, as variações nos teores em urânio merecem especial atenção pela sua possível contribuição para as emissões de radão.

Sanjurjo-Sánchez & Alves (2017) apresentam uma revisão dos valores das concentrações destes elementos químicos expressos (para permitir uma comparação entre os diferentes elementos) como índices parciais (para urânio, tório e potássio) de concentração de atividade (utilizando os mesmos princípios do índice indicado em CUE, 2014). Comparando os valores extremos apresentados na literatura revista por estes autores observa-se que a variação de valores e o valor máximo para o urânio são superiores aos do tório e estes por sua vez superiores aos do potássio.

Um ponto da revisão de Sanjurjo-Sánchez & Alves (2017) merece particular destaque, nomeadamente tendo em consideração as indicações do anexo XIII da diretiva 2013/59/EURATOM que apresenta uma lista indicativa de "materiais de construção a ter em conta devido à respetiva emissão de raios gama" e para os quais o artigo 75º desta diretiva refere que os estados membros devem assegurar a determinação do índice de concentração de atividade antes da colocação dos mesmos materiais no mercado. Esta lista indicativa refere, entre outros, os materiais de construção ou aditivos de origem ígnea, referindo exemplos de várias destas rochas. Como salientam Sanjurjo-Sánchez & Alves (2017), se bem que generalidade dos exemplos referidos

como materiais de origem ígnea nesta lista possam ter frequentemente valores elevados dos isótopos radioativos, a utilização da expressão “origem ígnea” pode ser interpretada como abrangendo rochas (nomeadamente as rochas ultramáficas e máficas) que apresentam habitualmente valores tão baixos como os de outras rochas que não constam da lista indicativa. Adicionalmente, um dos exemplos explicitamente referido nesta lista é a “lava”, que presumimos corresponder às rochas lávicas. Este termo pode também abranger rochas (e.g. basálticas) que em geral mostram valores abaixo do valor de referência considerado pela diretiva em questão, excetuando-se alguns exemplos italianos que apresentam valores claramente superiores⁶.

Em relação à mesma lista, Sanjurjo-Sánchez & Alves (2017) também destacam o caso de um tipo de rochas referido, na diretiva em análise, como “xisto-aluminoso”, que corresponde⁷ ao "alum shale", um tipo de rocha do norte da Europa enriquecido em urânio. No entanto, muitos xistos são ricos em alumínio mas, em geral, apresentam baixos valores dos isótopos radioativos, pelo que a tradução utilizada poderá tornar-se "injusta" para muitos xistos. Parece recomendável manter a expressão inglesa ou, seguindo os exemplos nas versões em Língua Francesa ou em Língua Romena desta diretiva, utilizar uma expressão como “xisto de alum”.

No seguimento desta questão relacionada com o impacto da terminologia dos materiais, valerá a pena destacar um outro ponto da análise de Sanjurjo-Sánchez & Alves (2017). O termo granito é utilizado em termos comerciais de uma forma bastante solta⁸, incluindo outras rochas que não se enquadram na definição petrológica moderna de granito⁹. No contexto do risco associado com a radiação gama externa esta questão é particularmente relevante, uma vez que várias rochas ígneas que habitualmente apresentam baixos valores dos isótopos radioativos (rochas ultramáficas e máficas¹⁰) são designadas comercialmente como granitos, o que poderá revelar-se, em função da

⁶ Ver discussão em Sanjurjo-Sánchez & Alves (2017)

⁷ Como mostra a comparação com as versões desta diretiva noutras línguas.

⁸ Ver, por exemplo um documento da *Canada Border Services Agency* (CBSA 2015).

⁹ O leitor interessado nos critérios de classificação petrológicas das rochas ígneas pode consultar, por exemplo, Galopim de Carvalho (2002), para referir um exemplo em Língua Portuguesa, ou Gillespie & Styles (1999), para referir um exemplo facilmente acessível *online*.

preocupação com a radiação gama externa, penalizador para a comercialização desses materiais.

Mas também será necessário ter em consideração a questão da variabilidade dentro do mesmo "tipo" de rocha, que no caso dos materiais geológicos pode ser afetada por diversos processos de formação das rochas e processos de alteração posteriores. Por exemplo, o resultado mais elevado encontrado por Sanjurjo-Sánchez & Alves (2017) corresponde a um resultado publicado por Bavarnegin et al. (2013), para o qual foi calculado um índice de concentração de atividade igual a 288. Mas o conjunto de amostras "locais" analisados por estes autores (Bavarnegin et al., 2013) inclui amostras para as quais seriam calculados valores de índice de concentração de atividade claramente inferiores ao valor de referência para este índice. Num exemplo português, o estudo de Pereira et al. (2010) mostra um enorme aumento dos valores de urânio (com implicações na radiação gama externa e nas emissões de radão) associado com falhas (superfícies de rotura com movimento) nos granitos. Vários estudos têm sugerido (ver, por exemplo, Dias et al. 2016) que as medições de campo poderão ser úteis na avaliação da perigosidade de campo das rochas, pelo menos numa perspectiva comparativa, isto é para identificar materiais com valores mais elevados.

Para além das pedras, outros materiais de construção contribuem para a radiação gama externa, seja porque incorporam fragmentos de corpos geológicos, seja porque têm componentes obtidas a partir dos materiais geológicos. Como referem Sanjurjo-Sanchez & Alves (2017), as práticas de reciclagem de resíduos podem promover um incremento da perigosidade radiológica quando esses resíduos forem enriquecidos em isótopos radioativos. A lista indicativa do anexo XIII da diretiva 2013/59/EURATOM refere vários exemplos que ilustram esta questão. Revisões de valores de índice de concentração de atividade em outros materiais podem ser encontradas, por exemplo, em Kovler (2012) e Trevisi (2012)

Seguidamente será discutido o efeito da variação da massa volúmica dos materiais. Markkanen (1995) apresenta vários fatores de conversão que permitem comparar, para determinadas condições de aplicação dos materiais, a contribuição do efeito massa de material aplicado por unidade de área, massa essa que depende da

¹⁰ Termos relacionados com a classificação rochas ígneas; recomendam-se as mesmas referências da nota anterior.

espessura do material e da massa volúmica do mesmo¹¹. Assim sendo, para uma determinada espessura, iremos avaliar os efeitos da variação da massa volúmica nos fatores de conversão apresentados por Markkanen, (1995).

A revisão de valores de massa volúmica de rochas apresentada em Kobranova (1986) mostra valores entre próximos de 0,5 g/cm³ e algo acima de 4 g/cm³ mas a generalidade das rochas habitualmente utilizadas nas estruturas apresenta uma variação menor. Considerando uma variação entre 1,5 g/cm³ e 3,0 g/cm³ (de forma a incluir algumas rochas vulcânicas mais porosas e com menor massa volúmica), esta variação teria um efeito na dose efetiva próxima de duas vezes ou inferior, em função da posição do elemento arquitetónico onde os materiais estão aplicados (ver secção seguinte) e da espessura (uma vez que para espessuras maiores o próprio material promove um efeito de atenuação).

A questão da variabilidade da massa volúmica pode afetar outros materiais para além da pedra, existindo, nomeadamente, materiais com massas volúmicas significativamente inferiores ao valor considerado na derivação do valor de referência do índice de concentração de atividade (Nuccetelli et al. 2015).

CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO

Nesta secção consideram-se questões ligadas com opções construtivas, nomeadamente em termos de extensão e distribuição dos materiais, uma vez que a contribuição dos materiais para a radiação gama externa depende da quantidade do material aplicado mas também da posição deste (incluindo-se aqui a questão das características geométricas do espaço em análise), dado que a distância entre o organismo e o material influencia o impacto da radiação gama externa. O exemplo mais completo que foi encontrado é o de Markkanen (1995) que calcula fatores de conversão para cada superfície de um espaço interior com forma de paralelepípedo e com dimensões 12 m x 7 m x 2,8 m, ou seja com um maior volume, mas a mesma altura, que o espaço considerado na derivação da expressão do índice de concentração de atividades referido pela diretiva 2013/59/EURATOM. A observação dos fatores de conversão

¹¹ Este autor apresenta fatores para diferentes valores da “massa específica”, em quilogramas por unidade de área, que é calculada pelo produto da espessura pela massa volúmica.

referidos mostra que, para um espaço com estas características geométricas, os materiais do teto ou do pavimento assumem uma maior relevância em termos de dose efetiva que os das paredes, uma vez que os fatores de conversão para uma destas superfícies horizontais (teto ou pavimento) são superiores aos fatores de conversão resultantes das quatro paredes juntas (superfícies verticais). Isto resulta de, para esta geometria de espaço, a distância de uma pessoa no centro do espaço em relação às superfícies horizontais ser inferior à distância, dessa mesma pessoa, em relação às superfícies verticais.

Markkanen (1995) avalia também o efeito dos materiais de revestimentos superficiais sobre a radiação do substrato (revestido por esses materiais superficiais), admitindo para o substrato uma espessura de 20 cm. No caso dos valores mais elevados de massa por unidade de área para o revestimento, os fatores de conversão para o substrato são reduzidos para 17% ou menos do valor desses mesmos fatores de conversão (substrato) sem revestimento. De salientar ainda que, neste caso extremo, os valores dos fatores de conversão associados com o substrato correspondem também a 17% ou menos dos valores dos fatores de conversão para o revestimento. No caso da menor quantidade de revestimento diferente de zero considerada por Markkanen (1995), os fatores de conversão para o revestimento correspondem a 15% ou menos dos fatores de conversão do substrato. Todas estas variações são mais acentuadas para as superfícies horizontais do espaço do que para as superfícies verticais do mesmo. No seguimento desta discussão do efeito do revestimento, será também interessante considerar o efeito dos processos erosivos que muitas vezes afetam os rebocos das paredes. Se o substrato tiver um nível de isótopos radioativos significativamente superior ao do revestimento erodido, o processo de erosão vai promover um aumento da dose efetiva associada com a radiação gama externa.

Para ilustrar esta análise (e a semelhança de outros exemplos anteriores em Lima, 2015 e em Lima et al. 2014), foram calculados os tempos de exposição necessários para atingir uma dose efetiva igual a 1 mSv para quatro materiais selecionados a partir da revisão de Sanjurjo-Sánchez & Alves (2017), de forma a representar diferentes níveis de perigosidade radiológica: três granitos e o resultado mais elevado encontrado por estes autores e que na publicação original era descrita como "local stone". Os níveis de

isótopos radioativos são representados pelos valores de índice de concentração de atividade calculados para as composições apresentadas nas referências indicadas.

Admitindo, para os quatro materiais considerados, um valor igual a $2,73 \text{ g/cm}^3$ para a massa volúmica do material, que é valor médio indicado em Olhoeft and Johnson (1989) para as rochas em geral, são utilizados os fatores de conversão referidos em Markkanen (1995) que correspondem a duas espessuras diferentes: dois centímetros (revestimentos finos) e dois decímetros (o limite, para esta massa volúmica, para os fatores de conversão apresentados em Markkanen, 1995; existe um efeito de atenuação com o aumento da espessura). Definiram-se dois casos de tipologia de aplicação para cada material: C1) todas as superfícies do espaço (quatro paredes, pavimento e teto) são revestidos por esse material com espessura igual a dois decímetros e o substrato sob esse revestimento é do mesmo material¹²; C2) só o pavimento apresenta o material considerado com um revestimento igual a dois centímetros. Neste último caso estão a ignorar-se as contribuições das outras superfícies do espaço e do substrato sob o revestimento, o que pode não ter grande importância se os outros materiais presentes tiverem baixos níveis de isótopos radioativos, como é o caso de algumas das rochas revistas por Sanjurjo-Sánchez & Alves (2017) que apresentam um índice de concentração de atividade igual a 0,1 (dez vezes inferior ao valor de referência para este índice). Poderá argumentar-se que a análise neste último caso é incompleta mas pensamos que ela sublinha a importância das opções construtivas.

Os valores de tempo de exposição calculados são apresentados na tabela 1. Estes valores foram calculados sem a correção da remoção da radiação gama de fundo, pelo que podem ser considerados conservadores, no sentido em que o tempo de exposição necessário terá que ser algo superior se for incluída a correção da remoção da radiação gama externa de fundo. Esse efeito será relevante sobretudo para o caso da rocha com o valor de índice mais baixo e também para o caso de aplicação superficial da rocha com o segundo valor mais baixo do índice; para os outros casos considerados os valores de fundo habitualmente usados (ver discussão em Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017) terão pouco impacto nos tempos calculados.

¹² Os fatores apresentados em Markkanen (1995) foram calculados para um betão com uma massa volúmica igual a $2,35 \text{ g/cm}^3$ pelo que para a massa volúmica indicada para o granito os valores dos fatores deveriam ser algo superiores (não muito diferentes de 13%).

Tabela 1. Tempo de exposição (em horas) necessário para atingir uma dose efetiva de 1 mSv de radiação gama externa a partir do material considerado (valores sem correção pela radiação gama de fundo). *I*: índice de concentração de atividade (valores calculados em Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2017). C1: o material indicado está presente num revestimento com dois decímetros de espessura em todas as superfícies do espaço (quatro paredes, teto e pavimento), sendo o substrato sob esse revestimento do mesmo material. C2: o material indicado está aplicado como um revestimento de dois centímetros e unicamente no pavimento (este caso ignora as contribuições dos outros materiais que estão sob o revestimento e que estão aplicados nas outras superfícies do espaço).

Referência	<i>I</i>	C1	C2
Krauskopf & Bird (1995)	1,6	3429	41892(*)
Abdurabu et al. (2016)	8,4	654	7804
El-Shershaby (2002)	94,6	50	562
Bavarnegin et al. (2013)	288	16	184

(*) Valor superior ao número de horas num ano

Como é visível pela tabela 1, para a situação C1, em que o material é aplicado em todo o espaço e com uma espessura significativa, todos os materiais atingem uma dose efetiva igual a 1 mSv para um período de tempo inferior ao de um ano e mesmo no caso do material com o valor mais baixo de índice de concentração de atividade ao fim de um tempo pouco superior a metade do tempo de referência de 7000 horas. Já o caso C2 é mais ilustrativo do impacto das variações do material. Mesmo para o granito com um valor de índice de concentração de atividade algo superior ao valor de referência igual a seis indicado em CE (1999), o tempo de exposição necessário para atingir 1 mSv é próximo de um ano e superior ao tempo de referência considerado pelo índice de concentração de atividade (mas o espaço considerado nesse documento é mais pequeno que o que foi considerado no cálculo dos fatores de conversão utilizados na preparação desta tabela). Saliente-se também que o tempo para o caso C2 (revestimento superficial só no pavimento) é sempre uma ordem de grandeza superior ao do caso C1 (blocos em todas as superfícies). Estes resultados salientam o efeito da tipologia de construção no impacto dos materiais de construção em termos de radiação gama externa. De referir

que o estudo de Lima et al. (2016) em medições de campo em espaços da cidade de Braga sugere que essas medições poderiam relacionar-se com uma tipologia hierarquizada da utilização do granito. Os resultados apresentados também ilustram a questão do risco associado com os materiais sobretudo para os dois últimos materiais.

Saliente-se por último um outro aspeto relacionado com as características do espaço. Os cálculos apresentados assumem divisões com planos uniformes e sem interrupções como janelas ou portas. A presença destas "lacunas" de material irá causar uma diminuição da dose efetiva associada com a radiação gama externa. Similarmente, se o material estiver aplicado só numa porção da superfície, o efeito em termos de radiação gama externa será inferior ao que é estimado para a ocupação completa da superfície.

ESPAÇOS EXTERIORES

Como já afirmamos acima, a maior parte das análises desenvolvidas sobre a contribuição dos materiais de construção diz respeito aos espaços interiores. Todavia, Markkanen (1995) apresenta valores para fatores de conversão que permitem calcular a dose efetiva a partir das estimativas das concentrações dos isótopos radioativos para situações de aplicação dos materiais no exterior, considerando dois casos: i) terreno com 20 m x 20 m; ii) pilha de material (com fatores de conversão para várias dimensões da pilha de material e para várias distâncias em relação a esta).

Em relação ao primeiro caso, os valores dos fatores de conversão dependerá, como no caso dos espaços interiores, da massa de material aplicado por unidade de área, *i.e.* da espessura e da massa volúmica do mesmo. Os fatores de conversão indicados por Markkanen (1995) para esta superfície exterior atingem até valores superiores aos mais elevados que são indicados pelo mesmo autor para as superfícies dos espaços interiores, mas no caso da exposição no exterior considera-se uma única superfície e, como será realçado na parte final desta secção, o tempo de exposição a um determinado material é, geralmente, muito inferior. Também à semelhança do que ocorre nos espaços interiores, os fatores de conversão apresentados por Markkanen (1995) para a exposição exterior sublinha o efeito de atenuação que o material de cobertura pode ter em relação aos

produtos por baixo dessa cobertura. Isto significa que um revestimento com um material denso e pouco radioativo pode ajudar a minimizar os riscos associados com um material com teores mais preocupantes. Assim, a situação correspondente à maior massa por unidade de área do revestimento provoca uma redução da dose efetiva para 6% do valor sem revestimento (ou inferior, dependendo da composição¹³). Uma outra solução para produtos no exterior com elevados teores de isótopos radioativos consistirá na remoção dos mesmos (ver o exemplo de Kerala, Índia, com redução para menos de 10%, referido em UNSCEAR, 1993).

Em relação ao segundo caso, Markkanen (1995) apresenta fatores de conversão para diferentes situações de quantidade do material e para as distâncias ao mesmo. Estes fatores de conversão mostram um aumento com o aumento da área exposta da pilha, mas esse aumento mostra uma atenuação para os valores mais elevados desta área de exposição e com a proximidade à pilha de material. Em relação a este último parâmetro, o aumento da distância de 1 m para 10 m corresponde a uma diminuição dos valores dos fatores de conversão para 6% ou menos¹⁴ (essa diminuição é mais acentuada para pilhas com menores dimensões). Um exemplo do efeito da variação da distância à pilha de material pode ser encontrado em Lima (2014).

Markkanen (1995) apresenta também propostas de índices de concentração de atividades para a exposição no espaço exterior, por exemplo para materiais utilizados em ruas e jardins¹⁵, que, para as mesmas concentrações de isótopos radioativos, fornece valores inferiores aos que seriam obtidos com a expressão utilizada na diretiva 2013/59/EURATOM, uma vez que considera um período de exposição muito menor (500 horas por ano).

¹³ Uma análise mais detalhada pode ser encontrada em Sanjurjo-Sánchez & Alves (2017).

¹⁴ Será conveniente salientar que Markkanen (1995) apresenta fatores para uma pilha com uma área infinita de exposição e que, para essa situação, os fatores são independentes da distância à pilha, no intervalo entre 1 m e 10 m de distância à pilha considerados por este autor.

¹⁵ Assim como propostas mais específicas para aterros e para a manipulação de cinzas de turfa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após apresentar as variáveis que influenciam a contribuição dos materiais de construção para a radiação gama externa, pretende-se, nestas considerações finais, tentar discutir uma perspectiva integrada desses efeitos, nomeadamente no contexto das condições da cidade do presente. Essas questões podem ter implicações para a gestão das estruturas existentes mas também para os projetos de novas estruturas, toda vez que a radiatividade natural de materiais de construção começa a ser regulada no âmbito dos países da União Europeia (2013/59/EURATOM)

A cidade do presente pode promover uma maior variabilidade do risco associado com a radiação gama externa ao promover a utilização de uma maior diversidade de materiais e de uma maior tipologia de opções construtivas.

A questão da seleção de materiais salienta a importância dos estudos de caracterização geológica dos materiais aplicados, não só em termos de tipos de rochas mas também em termos de reconhecimento de processos de alteração posteriores e da variabilidade dentro de um determinado tipo de rocha. Para além dos teores em isótopos radioativos, deve ter-se em atenção a questão dos valores de massa volúmica que podem diminuir (no caso das rochas mais porosas e com menores massas volúmicas) ou aumentar (no caso de rochas com maiores massa volúmicas) a perigosidade radiológica associada com um determinado conjunto de concentrações de isótopos radioativos. Mas, como salientam Sanjurjo-Sánchez & Alves (2017), os valores de massa volúmica não devem ser vistos desligados de outras características das rochas. Por exemplo, no caso das rochas ígneas, as rochas com maiores valores de massa volúmica são as rochas ditas ultramáficas que geralmente apresentam valores de isótopos radioativos muito reduzidos.

Para além da seleção dos materiais, as opções arquitetónicas afetam a perigosidade radiológica associada com a contribuição dos materiais de construção para a radiação gama externa, nomeadamente as opções relativas a dimensões, presença de portas e janelas, assim como a aplicação de revestimentos que podem ajudar a diminuir os riscos radiológicos relacionados com os materiais existentes. A questão dos revestimentos retomara o ponto do parágrafo anterior, no sentido de existir interesse em selecionar materiais com baixos teores de isótopos radioativos (como algumas rochas). Considerando esta questão (revestimentos), o estudo da radiação gama externa deverá

incidir também no sentido de identificação de contextos petrológicos correspondentes a valores baixos de isótopos radioativos.

Na medida em que a cidade do presente promova um maior tempo de exposição no mesmo espaço, aumenta a exposição aos efeitos da radiação gama desses espaços. Dois tipos de situações merecerão particular atenção em termos de exposição à radiação gama externa por causa dos longos tempos de exposição: os sem-abrigo (para os quais pode ser significativa a perigosidade radiológica nos espaços externos que habitualmente não merecem atenção) e as pessoas imobilizadas em habitações. Esta última situação merecerá particular atenção uma vez que essas pessoas podem estar expostas a várias superfícies de materiais que podem ser diversos (e apresentar diferentes teores de isótopos radioativos) e podem ser também afetados pela acumulação do radão resultante do decaimento radioativo do urânio. Estas situações (de pessoas imobilizadas) merecem, por isso, especial atenção em termos dos materiais a que as pessoas estão expostas, assim como das opções construtivas (dimensões, presença de janelas e portas).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito das atividades do Lab2PT- Laboratório de Paisagens, Património e Território (AUR/04509) financiado pela FCT através de fundos nacionais e quando aplicável do cofinanciamento do FEDER, no âmbito dos novos acordos de parceria PT2020 e COMPETE 2020 – POCI-01-0145-FEDER-007528.

O grupo de investigação CULXEO de que faz parte J. Sanjurjo-Sánchez é financiado pela Xunta de Galicia através do programa “Consolidación e estruturación de unidades de investigación competitivas — Grupo de potencial de crecimiento” (GPC2015/024).

REFERÊNCIAS

ABDURABU, W.A.; RAMLI, A.T.; SALEH, M.A.; HERYANSYAH A.; ALNHARY, A. e; FADHL S. (2016) Terrestrial gamma dose rate, radioactivity and radiological

hazards in the rocks of an elevated radiation background in Juban District, Ad Dali' Governorate, Yemen. *J Radiol* 36(1):163–177. <http://doi.org/10.1088/0952-4746/36/1/163>

AMARAL, E.M. Natural gamma radiation in air versus soil nature in Portugal. Proc. IRPA 10, Hiroshima 2000, P-1a-12, <http://www2000.irpa.net/irpa10/cdrom/00979.pdf>

AMARAL, E.M.; ALVES, J.G. e; CARREIRO, J.V.: Doses to the Portuguese Population due to Natural Gamma Radiation. *Radiation Protection Dosimetry*, 45 (1992) 1-4, 541–543. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a081599>

BAVARNEGIN, E.; FATHABADI, N.; VAHABI MOGHADDAM, M.; VASHEGHANI FARAHAN, i M.; MORADI, M. e; BABAKHANI, A. (2013) Radon exhalation rate and natural radionuclide content in building materials of high background areas of Ramsar, Iran. *J Environ Radioact* 117:36–40. <http://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.12.022>

CABRAL, J.M.P. (2011). *A Radioactividade. Contributos para a História da Arte*. Lisboa, Portugal: IST Press.

CBSA-Canada Border Services Agency (2015). Memorandum D10-17-38: administrative policy—tariff classification of marble and granite blocks and slabs. Ottawa, Canada. <http://www.cbsa-asfc.gc.ca/publications/dm-md/d10/d10-17-38-eng.pdf>

CE-Comissão Europeia (1999). Radiation protection 112—radiological protection principles concerning the natural radioactivity in building materials. Luxemburgo

CUE- Conselho da União Europeia (2014). Diretiva 2013/59/EURATOM do Conselho de 5 de dezembro de 2013 que fixa as 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* L 13/1. Disponível em (versão em Língua Portuguesa) http://www.comrsin.pt/images/DIRETIVA_2013_59_EURATOM.pdf

DIAS, F.; LIMA, M.; SANJURJO-SÁNCHEZ, J. e; ALVES, C. (2016) Análise comparativa de resultados de espectrometria gama portátil em afloramentos rochosos. Atas do II ENCONTRO GALAICO-PORTUGUÉS DE BIOMETRÍA, Santiago de Compostela 2016, pp. 245-248.

EL-SHERSHABY, A. (2002) Study of radioactivity levels in granite of Gable Gattar II in the north eastern desert of Egypt. *Appl Radiat Isot* 57(1):131–135. [http://doi.org/10.1016/S0969-8043\(02\)00067-2](http://doi.org/10.1016/S0969-8043(02)00067-2)

GALOPIM de CARVALHO, A. M. (2002). Introdução ao estudo do magmatismo e das rochas magmáticas. Lisboa, Portugal: Âncora Editora.

GILLESPIE, M.R.e; STYLES, M.T. (1999) BGS rock classification scheme: vol 1. Classification of igneous rocks. British Geological Survey Research Report 99-06. British Geological Survey, Nottingham. <http://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=7>

KRAUSKOPF, K.B. e; BIRD, D.K. (1995) Introduction to geochemistry- Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill.

KOVLER, K. (2012). Radioactive materials. Em *Toxicity of Building Materials*, F.P. Torgal, S. Jalali and A. Fucic. Cambridge, RU: Woodhead Publishing Limited.

LIMA, M.A. (2014). Perigosidade radiológica no ambiente construído : avaliação da contribuição da radiação gama dos materiais geológicos. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho. <http://hdl.handle.net/1822/34695>

LIMA, M.; SANJURJO-SÁNCHEZ, J. e; ALVES, C. (2014). Quick assessment of radioactivity levels indoor of granite historical buildings of Braga (NW Portugal). 9th International Masonry Conference 2014, Guimarães. Pub. em CD-ROM, ID1517.

LIMA, M.; ALVES, C. e; SANJURJO-SÁNCHEZ, J. (2015) Procedures for assessment of geologic materials in relation to their contribution to external gamma dose radiation: a review. In: Wythers MC (ed) *Advances in materials science research*, vol 20. Nova Science Publishers, Nova Iorque, pp. 78–93

LIMA, M.; ALVES, C. e; SANJURJO-SÁNCHEZ J (2016) Dados de espetrometria gama portátil e tipologia de espaços interiores. II Encontro Galaico-Português de Biometria, Santiago de Compostela 2016, pp 338–341

MARKKANEN, M. (1995) Radiation dose assessments for materials with elevated natural radioactivity. STUK-BSTO 32, Finnish Center for Radiation and Nuclear Safety, Helsínquia 1995.

NUCCETELLI, C.; LEONARDI F. e; TREVISI, R. (2015). A new accurate and flexible index to assess the contribution of building materials to indoor gamma exposure. *J Environ Radioact* 143:70–75. <http://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.02.011>

NEVES, L.J.P.F. e; PEREIRA, A.J.S.C. (2011). Risco ambiental associado ao gás radão: o caso do território continental português. Memórias da Academia das Ciências de Lisboa, 221 - 240. Lisboa, Portugal: Imprensa Nacional Casa da Moeda.

PEREIRA, A.J.S.C.; GODINHO, M.M. e; NEVES, L.J.P.F. (2010) On the influence of faulting on small-scale soil-gas radon variability: a case study in the Iberian Uranium Province. *J Environ Radioact* 101(10):875–882.
<http://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.05.014>

SANJURJO-SÁNCHEZ, J. e; ALVES, C. (2017). Geologic materials and gamma radiation in the built environment. *Environmental Chemistry Letters*.
<https://doi.org/10.1007/s10311-017-0643-1>

TREVISI, R.; RISICA, S.; D’ALESSANDRO, M.; PARADISO, D. e; NUCCETELLI, C. (2012). Natural radioactivity in building materials in the European Union: a database and an estimate of radiological significance. *Journal of Environmental Radioactivity*, 105, 11–20. <http://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.10.001>

UNSCEAR (1993) Ionizing radiation: sources and biological effects. United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with annexes. United Nations, New York