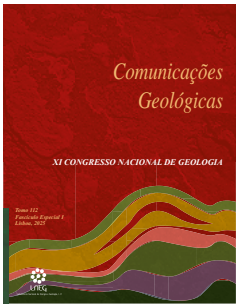
Comunicações Geológicas

Comunicações Geológicas (2025) 112, Especial I, 315-318
ISSN: 0873-948X; **e-ISSN**: 1647-581X

Materiais de construção produzidos e usados em Portugal que podem suscitar preocupação do ponto de vista da proteção radiológica

Building materials produced and used in Portugal that may raise concern from the radiological protection point of view



M. J. Trindade[1*], M. Malta[1], H. Fonseca[1], A. Santos Silva[2], D. Costa[2], F. A. Batista[2], A. Pereira[3], M. L. Dinis[4]

DOI: https://doi.org/10.34637/23t3-hx31
Recebido em 26/07/2023 / Aceite em 26/01/2024
Publicado online em abril de 2025
© 2025 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP

Artigo original
Original article

Resumo: Na construção civil, é comum a utilização de materiais geológicos, seja diretamente ou incorporados nos materiais de construção. A presença de radionuclídeos naturais nesses materiais pode resultar em exposição à radiação ionizante, seja por meio da exposição externa à radiação gama ou pela inalação do gás radão. A Agência Portuguesa do Ambiente estabelece medidas adequadas para controlar os materiais de construção, visando proteger a população contra radiações ionizantes no interior dos edifícios. Um estudo foi conduzido com o objetivo de identificar os materiais de construção produzidos e utilizados em Portugal que possam gerar preocupações radiológicas, com especial ênfase na radiação gama. Neste trabalho, apresentam-se os resultados relativos ao índice de concentração de atividade (*I*), relacionado com a dose de radiação gama proveniente dos materiais de construção, permitindo rastrear os materiais que podem fazer com que o nível de referência de dose seja excedido. O estudo destaca maior preocupação radiológica em relação aos granitos e pozolana natural, bem como alguns subprodutos e produtos industriais, como cinzas volantes, argila expandida, betão com agregado granítico e determinados pavimentos e revestimentos cerâmicos.

Palavras-chave: materiais de construção, exposição externa, índice de concentração de atividade, proteção radiológica, radiação gama**.**

Abstract: Geological materials are commonly used in construction, either directly or incorporated into building materials. The presence of natural radionuclides in these materials can lead to exposure to ionizing radiation, either through external exposure to gamma radiation or by inhalation of radon gas. The Portuguese Environment Agency establishes appropriate measures to control building materials, aiming protect the population from ionizing radiation inside buildings. A study was conducted to identify building materials produced and used in Portugal that may raise radiological concerns, with a particular focus on gamma radiation. In this work, the results related to the activity concentration index (*I*), linked to the dose of gamma radiation from building materials, are presented, allowing the screening of materials that may cause the dose reference level to be exceeded. The study highlights greater radiological concern regarding granites and natural pozzolan, as well as some by-products and industrial products, such as fly ash, expanded clay, concrete with granite aggregate, and specific ceramic floor and coatings.

Keywords: building materials, external exposure, activity concentration index, radiation protection, gamma radiation.

[1] Departamento de Emergências e Proteção Radiológica, Agência Portuguesa do Ambiente, I.P., Rua da Murgueira 9, 2610-124 Amadora, Portugal.
[2] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil 101, 1700-111 Lisboa, Portugal.
[3] Laboratório de Radioatividade Natural, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Rua Sílvio Lima, Polo II, 3030-790 Coimbra, Portugal.
[4] Centro de Recursos Naturais e Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal.

[*] Corresponding author / Autor correspondente: mjose.trindade@apambiente.pt

1. Introdução

Os radionuclídeos primordiais, como o K-40, U-238 e Th-232, com longos tempos de semi-vida, estão amplamente distribuídos em rochas e solos, variando em quantidade de acordo com a geologia de cada local. Esses materiais geológicos são comumente utilizados na construção civil, seja em forma de placas ornamentais ou revestimentos, seja como agregados para aplicações industriais, com incorporação em produtos de construção, por exemplo, betão e argamassas. A designação de NORM (do inglês *Naturally Occurring Radioactive Materials*) é atribuída aos materiais radioativos naturais que foram alterados durante sua extração para atender às necessidades humanas (IAEA, 2003).

No fabrico de produtos de construção, são ocasionalmente incorporados subprodutos industriais, como cinzas volantes de centrais termoelétricas a carvão e escórias de siderurgias, para aprimorar as propriedades do produto final (Schroeyers, 2017). Em busca da sustentabilidade ambiental, há uma crescente tendência de incorporar resíduos como substitutos parciais ou totais de matérias-primas primárias ou como combustível secundário. Dado que resíduos e subprodutos industriais geralmente apresentam concentrações mais elevadas de radionuclídeos devido aos processos industriais, é crucial garantir a sua adequação em termos da potencial contribuição para a concentração de radionuclídeos nos materiais de construção finais.

A utilização de NORM na construção pode aumentar a exposição à radiação ionizante dentro dos edifícios (IAEA, 2021, 2023). Os materiais de construção podem contribuir tanto para a exposição externa devido à radiação gama emitida pelos radionuclídeos das cadeias de U-238 e Th-232, e pelo isótopo K-40, quanto para a exposição interna por inalação de radão (Rn-222) ou torão (Rn-220), gases radioativos provenientes do decaimento do U-238 e do Th-232, respetivamente. A relevância dos materiais de construção como fonte de radiação depende das suas concentrações de radionuclídeos e de suas aplicações nos edifícios.

2. Enquadramento

A Diretiva 2013/59/Euratom, do Conselho, de 5 de dezembro de 2013, estabelece as normas de segurança para proteção contra os perigos resultantes da exposição a radiações ionizantes. Ela define uma metodologia para avaliar e limitar o conteúdo radiológico dos materiais de construção, evitando um aumento significativo do fundo radioativo natural e da dose absorvida pelos ocupantes dos edifícios. O Decreto-Lei n.º 108/2018, de 3 de dezembro, transpõe esta diretiva europeia para a legislação nacional e atribui à Agência Portuguesa do Ambiente (APA)

a responsabilidade de identificar e controlar materiais de construção que levantem preocupações de proteção radiológica.

A contribuição dos materiais de construção para a exposição externa à radiação gama é avaliada pelo índice de concentração de atividade (*I*), que considera as concentrações dos radionuclídeos primordiais Ra-226, Th-232 (ou o produto de desintegração Ra-228) e K-40. O cálculo do índice é feito pela fórmula: $I = C_{Ra\text{-}226}/300 + C_{Th\text{-}232}/200 + C_{K\text{-}40}/3000$ (anexo III do Decreto-Lei), onde C representa a concentração do isótopo no material, em Bq/kg. Esse índice é uma ferramenta de rastreio dos materiais que podem fazer exceder o nível de referência. O nível de referência aplicado à exposição externa à radiação gama emitida por materiais de construção no interior dos edifícios, que se acrescenta à exposição externa no exterior, é de 1 mSv por ano de dose efetiva (artigo 153.º do Decreto-Lei). A dose efetiva é uma medida que leva em consideração não apenas a quantidade de radiação absorvida por um tecido específico, mas também a sensibilidade dos diferentes tipos de tecidos do corpo humano à radiação.

O artigo 154.º do regime jurídico da proteção radiológica fornece uma lista indicativa de materiais de construção a considerar devido à sua emissão de raios gama. O artigo 155.º estabelece a obrigatoriedade de determinar o índice de concentração de atividade para esses materiais antes de serem colocados no mercado. A APA pode identificar outros materiais, ajustando a lista indicativa à realidade nacional. Nesse contexto, está em andamento um estudo em colaboração com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), o Laboratório de Radioatividade Natural (LRN) da Universidade de Coimbra e o Centro de Recursos Naturais e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com o objetivo de identificar materiais de construção produzidos em Portugal com matérias-primas nacionais que suscitam preocupação radiológica.

O estudo engloba as seguintes etapas: identificação dos materiais de construção que requerem avaliação da radiação gama devido à sua aplicação em edifícios nacionais, com recolha de amostras para análise laboratorial (fase 1); obtenção das concentrações de atividade dos radionuclídeos primordiais e do respetivo índice *I* para a radiação gama, identificando os materiais com maior risco radiológico (fase 2); estimativa das doses de exposição resultantes de materiais com $I > 1$, considerando várias aplicações dos materiais em edifícios (fase 3); e compilação de recomendações sobre a utilização de materiais que resultem em doses de exposição superiores a 1 mSv/ano, incluindo possíveis medidas para mitigar a exposição à radiação ionizante em edifícios onde esses materiais sejam utilizados e identificação de soluções para a utilização, mesmo que restrita, desses materiais (fase 4).

Este artigo apresenta os resultados das fases 1 e 2 do estudo, discutindo o índice de concentração de atividade obtido nos materiais de construção analisados.

3. Materiais e métodos

A identificação de materiais com risco radiológico baseou-se na revisão de estudos internacionais sobre a radioatividade natural em materiais de construção, consolidando informações sobre características radiológicas de rochosos, produtos e subprodutos industriais usados na construção a nível europeu (EC, 1999; Trevisi *et al.*, 2012, 2018; Schroeyers, 2017). Foram também obtidos dados sobre produção e consumo de materiais de construção em Portugal, como rochas, agregados, gesso, cimentos, betão, argamassas, tijolos, telhas, azulejos, entre outros (DGEG, 2021; INE, 2020, 2021). A experiência da equipa do LNEC na indústria da construção nacional e distribuição geográfica dos principais centros produtores também foi considerada.

Com base nessa informação, foi compilada uma lista de materiais de construção relevantes no mercado nacional (Santos Silva & Costa, 2022), cujo impacto na exposição externa foi considerado pertinente avaliar através da determinação do índice *I*. Diversos materiais naturais foram identificados, com ênfase em rochas graníticas ornamentais e agregados graníticos e basálticos, especialmente usados em argamassas e betões. As proveniências geográficas selecionadas foram consideradas pertinentes para o estudo. A lista inclui também diversos produtos da construção, incluindo subprodutos industriais, cimentos, argamassas, betões e produtos cerâmicos. Esta última categoria engloba materiais tanto para a construção civil, como tijolos e telhas, quanto para revestimento e pavimentação, como azulejos e porcelanatos.

A maioria das amostras recolhidas para análise é oriunda das principais proveniências sugeridas na lista, à exceção dos betões, que foram produzidos pelo LNEC a partir de dois tipos de cimentos comerciais (um cimento Portland de calcário e um cimento pozolânico com cinzas volantes) e dois tipos de agregados (um granito com concentração significativa de radionuclídeos e um calcário com baixa concentração de radionuclídeos). Isso permitiu avaliar o efeito dos diversos componentes nas emissões de radiação dos betões produzidos.

No total, 151 amostras foram ensaiadas no LRN. As concentrações de Ra-226, Th-232 e K-40 foram determinadas por espetrometria de raios gama, com um espetrómetro de alta resolução equipado com detetor HPGe.

4. Resultados e discussão

4.1. Índice de concentração de atividade dos materiais

Os resultados do índice de concentração de atividade para os diversos tipos de materiais de construção considerados, são apresentados na Tabela I e na Figura 1. Na Tabela I, os índices acima do valor de referência legal estão destacados a negrito, enquanto na Figura 1, esse valor é representado por uma linha horizontal.

Para os materiais naturais, os granitos mostram os índices mais elevados, com mais de 1 em 78% dos granitos ornamentais (sendo $I > 2$ em três amostras) e 92% dos agregados ($I > 2$ numa amostra). Embora a amostragem de outros materiais naturais tenha sido mais limitada, os resultados indicam quantidades significativas de radionuclídeos primordiais noutras rochas ígneas, como a pozolana natural e no sienito, com índices também superiores a 1. Nas rochas basálticas, tanto ornamental como agregados, observam-se baixos índices, com valores médios de 0,22 e 0,34 respetivamente, alinhando-se com resultados de vários países da União Europeia (EC, 1999). Apenas uma amostra de agregado basáltico se destaca com um índice próximo de 1, sugerindo possivelmente uma composição intermédia em vez de basalto. Quanto ao xisto, a amostragem limitada e índices elevados (embora inferiores a 1, com $I = 0{,}65$ e 0,83) indicam a necessidade de monitorização, dada a sua utilização no país. Importa notar a variabilidade significativa na radioatividade dos xistos, com índices elevados em rochas de países nórdicos (NOR, 2000). Os índices mais baixos nos materiais naturais, considerados insignificantes, foram registados nos calcários e gessos, concordando com resultados de outros estudos (EC, 1999; Trevisi *et al.*, 2018).

Em relação aos subprodutos industriais, as cinzas volantes apresentam um índice igual ou superior a 1, enquanto a cinza de fundo (depositada no fundo da câmara de combustão) possui um índice inferior a 1. A contribuição desses materiais para a dose de exposição deve ser avaliada com base na quantidade incorporada no produto de construção, sendo mais significativa em maiores teores de incorporação, como ocorre em alguns tipos de betão. No caso da escória de aciaria, seu índice é muito baixo, indicando que a eventual incorporação em materiais de construção não afetará significativamente os níveis de radioatividade.

Entre os produtos industriais é no betão produzido com agregado de granito rico em radionuclídeos primordiais que se observa um índice médio mais elevado, aproximando-se do valor unitário. Os materiais cerâmicos de revestimento e pavimento (como tijoleiras, ladrilhos, mosaicos e azulejos) exibem uma grande variabilidade, com mais de 20 % das amostras apresentando índices superiores a 1. Essa variação pode estar relacionada à utilização de areias com zircão, um mineral radioativo

Tabela I. Índice de concentração de atividade (I) dos materiais de construção estudados.

Table I. Activity concentration index (I) of the building materials studied.

Tipo de material	Nº de amostras	I máximo	I mínimo	I médio (desvio padrão)
MATERIAIS NATURAIS: ROCHAS ORNAMENTAIS				
Granito	32	**2,24**	0,72	**1,26** (± 0,37)
Basalto	2	0,33	0,10	
Xisto	2	0,83	0,65	
Calcário	4	0,07	0,04	0,05 (± 0,01)
Sienito	1	**1,10**		
MATERIAIS NATURAIS: AGREGADOS				
Agregado granítico	12	**2,17**	0,90	**1,34** (± 0,31)
Agregado basáltico	11	0,97	0,19	0,34 (± 0,21)
MATERIAIS NATURAIS: OUTROS				
Pozolana natural	2	**1,22**	**1,17**	
Gesso	3	0,06	0,03	0,04 (± 0,01)
SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS				
Cinzas volantes e de fundo	3	**1,18**	0,70	0,96 (± 0,20)
Escória de aciaria	1	0,07		
PRODUTOS INDUSTRIAIS				
Cimento	20	0,47	0,07	0,28 (± 0,13)
Cal hidráulica	1	0,23		
Argamassas	22	0,46	0,04	0,12 (± 0,08)
Argila expandida	1	0,90		
Materiais cerâmicos	12	0,74	0,55	0,68 (± 0,05)
Pavimentos e revestimentos	14	**1,64**	0,54	0,81 (± 0,36)
Betão c/ agregado calcário e cimento variável	4	0,13	0,08	0,11 (± 0,02)
Betão c/ agregado granítico e cimento variável	4	**1,04**	0,98	**1,01** (± 0,02)

comum em algumas cerâmicas, esmaltes e pigmentos (Selby, 2007). Embora os materiais cerâmicos para construção apresentem índices inferiores a 1 (média de 0,68), eles merecem atenção devido à possível adição de resíduos e subprodutos industriais, como as cinzas volantes, em sua produção (Çiçek e Cincin, 2015; Schroeyers, 2017). A argila expandida apresenta um índice próximo de 1, mas uma caracterização mais abrangente é necessária, pois apenas uma amostra foi estudada.

Nos demais produtos industriais, como cimentos, cal hidráulica, betões com agregado calcário e argamassas, foram obtidos valores baixos para o índice, não suscitando preocupações radiológicas. O cimento, por exemplo, apresentou um índice médio de 0,28, com o valor mais elevado (índice de 0,47) observado nos cimentos dos Açores com pozolana natural e cinzas volantes incorporadas, como já observado em trabalhos anteriores (Trevisi *et al.*, 2018; Puertas *et al.*, 2015). Nas argamassas, os índices foram baixos (média de 0,12), conforme esperado, considerando os principais materiais utilizados em sua produção, geralmente areia siliciosa e cimento ou cal, com baixas concentrações de radionuclídeos naturais.

4.2. Materiais que suscitam preocupação radiológica

Conforme mencionado anteriormente, alguns materiais estudados apresentam um índice de concentração de atividade superior a 1, indicando a possibilidade de doses de exposição à radiação gama acima do nível de referência. Para avaliar melhor a preocupação radiológica desses materiais, além do índice *I* decorrente da sua composição, é necessário considerar a forma como são usados na construção, seja como produtos finais ou como componentes destes e, neste caso, deve ser considerado um fator de diluição da radioatividade.

As pozolanas naturais são frequentemente incorporadas em cimentos e argamassas para melhorar a resistência mecânica e durabilidade dos materiais produzidos, especialmente em betões (Santos Silva e Costa, 2022). Apesar de as pozolanas naturais apresentarem índices elevados, os produtos da construção que as incorporam demonstram índices variando entre 0,37 e 0,47, indicando que a radioatividade resultante não é significativa. Isso sugere que a pozolana natural pode ser utilizada em concentrações habituais sem que o nível de referência de dose seja ultrapassado. Da forma semelhante, as cinzas volantes são comumente utilizadas na produção de cimento, geralmente em percentagens entre 6 e 55 %. Os baixos índices observados na maioria dos cimentos com essa incorporação sugerem que as cinzas volantes têm um efeito pouco significativo na exposição decorrente desses cimentos. Contudo, é importante considerar que essa situação pode mudar devido à crescente tendência, em prol da sustentabilidade ambiental, de aumentar a reciclagem e substituir matérias-primas primárias por secundárias. Isso pode incluir o uso de fosfogesso (subproduto da produção de fertilizantes fosfatados) comumente com concentrações de atividade mais elevadas, em vez do gesso, que é adicionado ao cimento em até cerca de 5 %. Como o uso de subprodutos e resíduos NORM introduz quantidades aumentadas de radionuclídeos naturais no sistema, a radiação gama associada aos cimentos pode aumentar. Portanto, é importante avaliar a composição de novos cimentos que entrem no mercado.

A comparação entre o betão produzido com agregado granítico e o betão produzido com agregado calcário evidencia que o tipo de agregado é o principal contribuinte para o aumento do índice de concentração de atividade no betão, como já evidenciado observado em estudos anteriores (Botezatu *et al.*, 2002). Por sua vez, a adição de cinzas volantes tem um impacto ligeiro no aumento do índice do betão, como indicado pelas variações em torno do índice médio para ambos os tipos de betão, resultantes da utilização de cimento Portland de calcário (índice mínimo) e cimento com cinzas volantes (índice máximo). Isso ocorre porque os agregados naturais são o principal componente do betão, representando mais de 80 % do seu volume (Santos Silva e Costa, 2022; Schroeyers, 2017), enquanto a pozolana ou as cinzas volantes são usadas como componentes do cimento ou em sua substituição, estando presentes em menor quantidade e com sua radioatividade diluída. Este estudo sugere que, em Portugal, a maioria dos betões não deve teríndice superior a 1, a menos que seja utilizado um agregado granítico especialmente rico em radionuclídeos naturais durante o fabrico, ou se for adicionada uma elevada percentagem de resíduos ou subprodutos industriais em substituição de matérias-primas primárias. Deve-se estar atento a possíveis alterações na composição dos betões produzidos no país.

5. Conclusões

A avaliação do índice de concentração de atividade em materiais de construção revelou que os granitos e outras rochas ígneas de composição quartzo-feldspática, como o sienito, quando usados diretamente na construção como rochas ornamentais, são os materiais naturais que suscitam maior preocupação radiológica. Os agregados graníticos também podem ser uma fonte de preocupação ao serem incorporados na produção de betão, uma vez que constituem o principal componente e têm um impacto significativo na radioatividade do betão resultante. Recomenda-se que os produtores de betão com esses agregados realizem

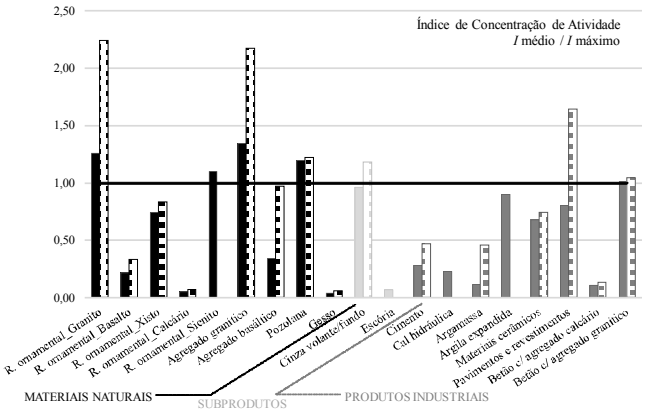


Figura 1. Índice de concentração de atividade médio e máximo nos vários tipos de materiais de construção estudados.

Figure 1. Average and maximum activity concentration index in the various types of building materials studied.

a determinação do índice de concentração de atividade. O mesmo se aplica aos materiais cerâmicos para revestimento e pavimentação que utilizam substâncias altamente radioativas, como o zircão, sendo aconselhável um controlo radiológico antes da comercialização. A argila expandida, comum na construção, também pode representar um material com risco radiológico, dependendo de estudos mais robustos que confirmem um índice próximo ou superior a 1 em materiais produzidos no país.

Este estudo contribuiu para um conhecimento mais aprofundado dos materiais naturais e dos produtos que incorporam esses materiais, bem como subprodutos e resíduos de outras indústrias, que têm maior impacto na exposição externa da população nos espaços interiores. Com esse entendimento abrangente dos materiais de construção nacionais, será possível adotar métodos mais eficazes para proteger a população contra radiações ionizantes no interior de edifícios.

Identificaram-se materiais de construção adicionais, além dos mencionados no artigo 154.º do Decreto-Lei n.º 108/2018, como betões com agregado granítico, materiais cerâmicos para revestimentos e pavimentação contendo zircão e, possivelmente, a argila expandida, que suscitam preocupação radiológica. Dado que esses produtos podem fazer com que o nível de referência para a exposição externa à radiação gama seja excedido, deve-se avaliar a inclusão destes na lista de materiais sujeitos à determinação do índice de concentração de atividade antes de entrarem no mercado.

Referências

Botezatu, E., Iacob, O., Gradinaru, M., Miron, C., 2002. Increased indoor radiation exposure - consequences of NORMs contained in building materials. In: Peter, J., Schneider, G., Bayer, A. Trugenberger-Schnabel, A. (Eds.), Proceedings of the 5th International Conference on High levels of Natural Radiation and Radon Areas: Radiation Dose and Health Effects. Munich, 355-358.

Çiçek, T., Çinçin, Y., 2015. Use of fly ash in production of lightweight building bricks. Construction and Building Materials, **94**: 521-527.

DGEG, 2021. Dados anuais da indústria extrativa de Portugal continental (inclui setor minas e pedreiras) desagregados à substância. Consultado em: https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/geologia/dados-globais-da-industria-extractiva/producao/, a 30/06/2022.

Decreto-Lei n.º 109/2018, de 3 de dezembro, que estabelece o regime jurídico da proteção radiológica, bem como as atribuições da autoridade competente e da autoridade inspetiva para a proteção radiológica, transpondo para a ordem jurídica interna a Diretiva 2013/59/Euratom, do Conselho, de 5 de dezembro de 2013. Diário da República n.º 232/2018, Série I de 2018-12-03, 5490-5543.

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. Jornal Oficial da União Europeia, L 13, de 17.01.2014.

IAEA, 2023. Regulatory control of exposure due to radionuclides in building materials and construction materials. Safety Reports Series 117. International Atomic Energy Agency, Vienna.

IAEA, 2021. Protection against exposure due to radon indoors and gamma radiation from construction materials - Methods of prevention and mitigation. Tecdoc Series 1951. International Atomic Energy Agency, Vienna.

IAEA, 2003. Extent of Environmental Contamination by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) and Technological Options for Mitigation. Technical Reports Series 419. International Atomic Energy Agency, Vienna.

INE, 2020. Estatísticas da Produção Industrial: 2019. Instituto Nacional de Estatística, Lisboa. Consultado em https://www.ine.pt/xurl/pub/467890702, a 04/07/2022.

INE, 2021. Estatísticas da Produção Industrial: 2020. Instituto Nacional de Estatística, Lisboa. Consultado em https://www.ine.pt/xurl/pub/280812666, a 04/07/2022.

EC, 1999. Enhanced radioactivity of building materials. Radiation Protection 96. European Commission, Dictorate-General for Environment, Luxembourg.

NOR, 2000. Naturally Occurring Radioactivity in the Nordic Countries – Recommendations. The Radiation Protection Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden, ISBN 91-89230-00-0.

Puertas, F., Alonso, M.M., Torres-Carrasco, M., Rivilla, P., Gasco, C., Yagüe, L., Suárez, J.A., Navarro, N., 2015, 2015. Radiological characterization of anhydrous/hydrated cements and geopolymers. Construction and Building Materials, **101**: 1015-1112.

Santos Silva, A., Costa, D., 2022. Estudo dos materiais de construção que suscitam preocupação do ponto de vista radiológico. Relatório da primeira fase, 329/2022. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Schroeyers, W., 2017. Naturally occurring radioactive materials in construction. Integrating radiation protection in reuse (COST Action Tu1301 NORM4BUILDING). Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering.

Selby, J. H., 2007. The industrial uses of zircon and zirconia and the radiological consequences of these uses. Naturally Occurring Radioactive Material (NORM V). Proceedings of an International Symposium. IAEA, Seville, 129-139.

Trevisi, R., Leonardi, F., Risica, S., Nuccetelli, C., 2018. Updated database on natural radioactivity in building materials in Europe. Journal of Environmental Radioactivity, **187**: 90-105.

Trevisi, R., Risica, S., Alessandro, M.D., Paradiso, D., 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.