Materiais radioativos de ocorrência natural em materiais de construção - potenciais fontes geológicas e risco radiológico ao ambiente construído

Naturally occurring radioactive materials in construction materials - potential geological sources and radiological risk for the built environment

Gustavo Filemon Costa Lima
Departamento de Geologia - Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | gustavo.lima@ufop.edu.br

Marcio Mateus Pimenta
Departamento de Engenharia de Transportes – Centro Federal de Educação Tecnológica | Belo Horizonte, Minas Gerais | marciomateus@cefetmg.br

Augusto Cesar da Silva Bezerra
Departamento de Engenharia de Transportes – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | augustobezerra@cefetmg.br

Luis Felipe Lara
Departamento de Engenharia Civil – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | luislara@cefetmg.br

Resumo

Materiais radioativos de ocorrência natural (NORM) são representados pelos radionuclídeos U-238; Th-232; K-40 e sua prole radiogênica e são verdadeiros riscos ao ambiente construído se não forem devidamente monitorados. NORM estão presentes em diversas matrizes geológicas podendo inclusive serem concentrados/diluídos por processos tecnológicos industriais, como no caso da construção civil. Torna-se frequente, tanto para as novas como nas clássicas tecnologias construtivas, a incorporação de minerais e fragmentos de rocha para aferir desejáveis características ao produto final (e.g. obras de cantaria, argamassa e concreto, bem como alguns geopolímeros). Um fator crítico, e corriqueiramente ignorado, é que as ocorrências de NORM nestes insumos geológicos incorporados podem carrear um risco radiológico para a construção civil e o pouco referencial teórico sobre o tema corrobora para o problema. Do exposto, este trabalho revisa as potenciais fontes geológicas de NORM para os materiais de construção, bem como discute respectivas implicações para o ambiente construído.

Palavras-chave: NORM; Materiais Radioativos de Ocorrência Natural; Minerais radioativos; Construção civil; Ambiente construído

ABSTRACT

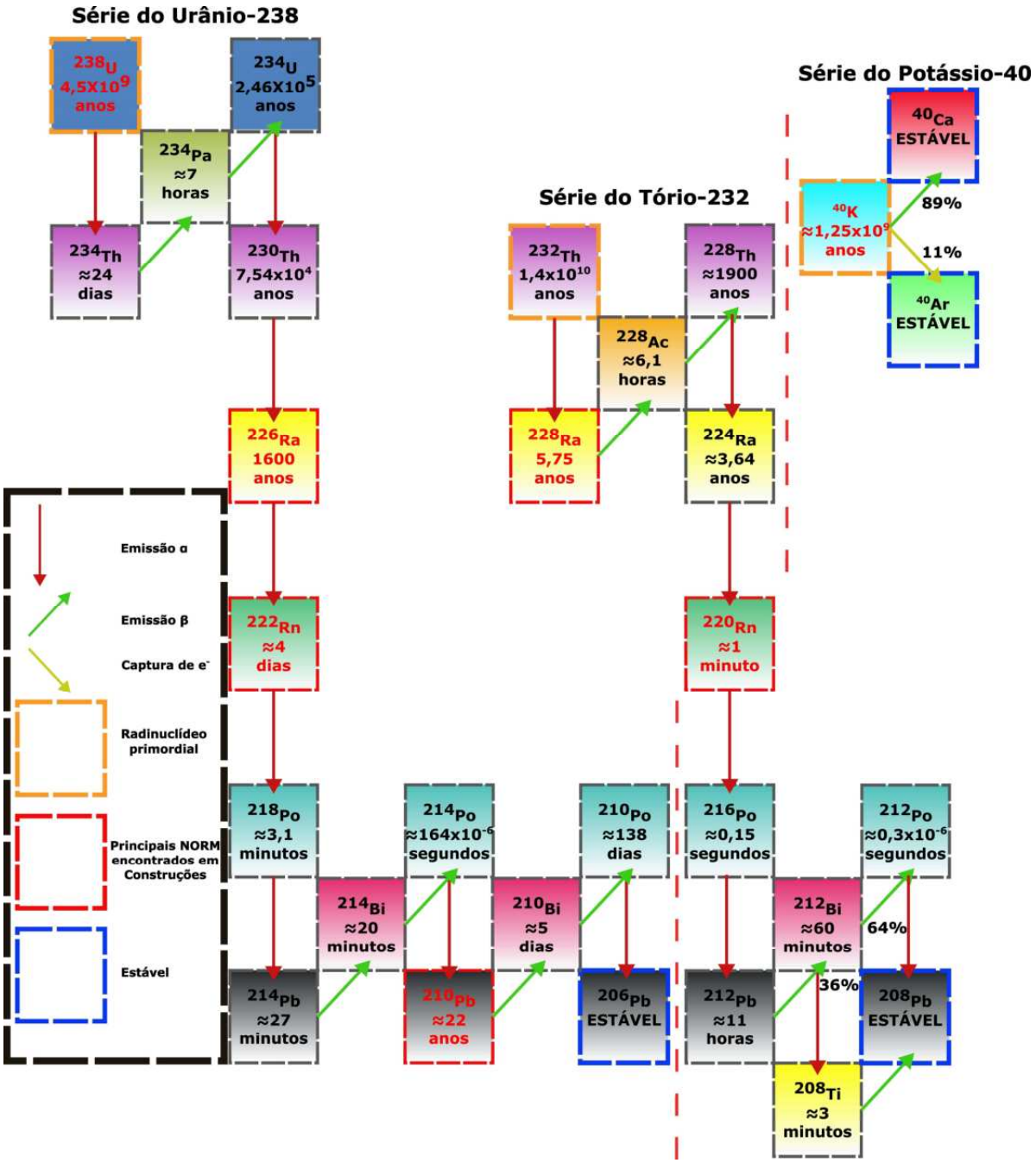
Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM), primarily represented by the radionuclides U-238, Th-232, K-40, and their radiogenic progeny, pose significant risks to the built environment if not properly monitored. NORM are present in various geological matrices and may be either concentrated or diluted through industrial technological processes, such as those employed in the construction industry. The incorporation of minerals and rock fragments to achieve desirable properties in final construction products such as masonry buildings, mortar, concrete, and certain geopolymers, is common practice in both traditional and modern construction technologies. A critical yet often overlooked factor is that the presence of NORM in these geological materials may introduce radiological risks to the construction sector. The scarcity of theoretical frameworks addressing this issue further exacerbates the problem. In this context, the present study reviews the potential geological sources of NORM in construction materials and discusses their respective implications for the built environment.

Keywords: NORM; Naturally Occuring Radioactive Materials; Radioactive minerals; civil construction; build environment

1 INTRODUÇÃO

Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (NORM) são radionuclídeos naturais da crosta terrestre (e.g. solos e rochas) que, em certas concentrações, expõem biota e humanos à radiação. A definição de NORM muitas vezes se estende aos radionuclídeos que foram concentrados em algum material devido a processos tecnológicos industriais (recebendo, em algumas literaturas, a alcunha de "TENORM") (e.g. Afifi, El *et al.*, 2006; Doyi *et al.*, 2016; Michalik *et al.*, 2023). Devido a sua maior abundância natural, os principais NORM contribuintes para altos valores de exposição à radiação são U-238; Th-232; K-40 e alguns nuclídeos de suas respectivas proles radioativas (**Figura 1**). Observa-se que cada radionuclídeo apresenta um respectivo tempo de meia vida, além de emissões radioativas características na forma de partículas α, β e γ.

Figura 1 Série de decaimento do Urânio-238, Tório-232 e K-40. Os NORM mais críticos no que concerne o risco radiológico nos materiais de construção estão destacados em vermelho



Fonte: Autores

Existem variados tipos de exposição a NORM, como por exemplo: exposição ao NORM do ambiente natural (solos, rochas e afins); NORM através da ingestão ou inalação (águas e atmosfera), NORM advindos do ambiente construído (*living* e *working environment*), além da radiação cósmica (Michalik et al., 2023). Especialmente no caso ambiente construído, o risco de exposição aos radionuclídos é crítico, uma vez que um indivíduo passa, em média, 80% de seu tempo diário dentro de construções (Kovler *et al.*, 2002). A presença dos NORM no ambiente construído, sob certas circunstâncias, pode representar um risco de exposição radiológica a trabalhadores, locais públicos, biota e sistemas ambientais (Michalik *et al.*, 2023). Muito deste risco é vinculado a exposição à radiação ionizante e a presença dos isótopos de Radônio, sendo esse danoso ao trato respiratório devido sua alta volatilidade e curto tempo de meia vida (Madruga *et al.*, 2019). Portanto, compreender as fontes de radionuclídeo para os materiais de construção é fundamental para garantir a sustentabilidade da construção civil, numa perspectiva radiológica.

Diante dos desafios da construção civil sustentável, existe hoje uma anseio por desenvolver tecnologias de materiais de construção através da incorporação de resíduos/rejeitos de outros ciclos produtivos (e.g. Gulghane e Khandve, 2015; Madurwar, Ralegaonkar e Mandavgane, 2013; Magalhães *et al.*, 2020; Raut, Ralegaonkar e Mandavgane, 2011; Silveira *et al.*, 2021). No entanto, a possibilidade de incorporação, ao ambiente construído, materiais geológicos ricos em NORM podem comprometer a sustentabilidade destas novas tecnologias. Casos de risco radiológico já foram registrados na Europa (Madruga *et al.*, 2019; Trevisi *et al.*, 2012); Egito (Ahmed, 2005); Israel (Kovler *et al.*, 2002) e Brasil (Araújo, 2003; Mazzilli e Saueia, 1997). Assim, este estudo revisa as fontes geológicas de NORM em materiais de construção civil e seus impactos radiológicos.

2 METODOLOGIA

O trabalho revisa os principais aspectos da geoquímica nuclear em matrizes geológicas e suas propensões a carrear radionuclídeos para o ambiente construído. Para esta revisão utilizou-se o Web of Science e o Scholar google como base de dados referenciais. Para os descritores da busca foram utilizados os termos (em português e inglês) “Radionuclídeos/NORM *and* Materiais de Construção”; “Radioatividade Natural e Engenharia Civil”; “Geologia*and*Ambiente Construído” retomando trabalhos publicados entre 2015 a 2025. Após escrutínio de título e resumo, um total de 23 artigos foram selecionados para leitura completa. Para exemplificação de caso sobre radionuclídeos em materiais geológicos/construtivos, admitiu-se a utilização de artigos fora do recorte temporal proposto.

Assim, esta revisão discorre sobre duas questões em paralelo: (1) Principais materiais geológicos com altos níveis de NORM e suas características geoquímicas e (2). Discute-se materiais de construção e casos onde NORM foram incorporados ao ambiente construído via material geológico. Por fim, foi sintetizado observações estratégicas ao se incorporar matrizes geológicas em tecnologias construtivas a fim de evitar risco radiológico ao ambiente construído.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 MATERIAIS GEOLÓGICOS E A PRESENÇA DE NORM

U-238, Th-232, K-40 (radionuclídeos primordiais) e seus respectivos filhos de decaimento ocorrem predominantemente como elementos traços nos solos e rochas (Vengosh *et al.*, 2022) e são os principais responsáveis por exposição à radiação ambiente. Entende-se que os altos níveis de NORM não são limitados a um determinado litotipo, ou seja, tanto as rochas ígneas, sedimentares, como as metamórficas podem apresentar valores elevados de radionuclídeos (Atwood, 2012). Assim, a ocorrência de altos níveis de Tório ou Urânio estão atrelados mais a fatores geoquímicos, mineralógicos e petrogenéticos do que necessariamente restritos a um tipo de rocha, embora alguns minerais tem como característica típica a presença dos NORM (Cuney, 2009). A radioatividade em um substrato rochoso correlacionado a sua gênese é denominado “radioatividade singenética” e fatores como pH, Eh, estado de oxidação e composição do melt explicam a gênese de NORM-minerais (Landais, 1996; Sanjurjo-Sánchez e Alves, 2017).

U e Th são classificados como elementos litófilos pela classificação de Goldschmidt (Goldschmidt, 1923), ou seja, são elementos com tendência a se associar a silicatos formadores de rocha. A ocorrência geológica dos nuclídeos primordiais é normalmente associada a outros elementos da sua prole radioativa (Ra, Rn, Po, Bi and Pb) e a transição elementar dentro da cadeia de decaimento implica em diferentes comportamentos

geoquímicos (e.g. susceptibilidades a dissolução, intemperismo e erosão). U e Th podem também se associar a matéria orgânica (comportamento biófilo), explicando, por exemplo, a relação entre NORM e rochas sedimentares geradoras de óleo e gás (Cooper, 2005; Labrincha *et al.*, 2017; Lopes, Silva e Lopes, 2023). Apesar da pluralidade de ocorrências geogênicas do U e Th, substratos como folhelhos negros (*black-shale*), rochas ígneas (com composição granítica) e alguns arenitos tendem a denotar maior conteúdo e NORM e, por conseguinte, maior risco radiológico potencial para os materiais de construção. A presença de apatitas ou outros minerais fosfatados podem também apresentar alto conteúdo em NORM, explicando, por exemplo, o risco radiológico do aproveitamento de resíduos da indústria de fertilizantes (Mazzilli e Saueia, 1997; Santos e Silva, Da, 2019). Granitos, por sua vez, tendem a apresentar conteúdo em NORM associado a minerais acessórios como apatita, titanita, allanita, dentre outros. A caracterização mineralógica e petrográfica é estratégica para a aplicação de matrizes geológicas em seus diversos fins. Assim, identificação de minerais fosfatados, zircões ou minerais ricos em terras-raras podem ser um primeiro sinal sobre a possível presença de NORM em materiais geológicos.

Potássio é o sétimo elemento mais abundante na crosta terrestre e compõe quimicamente os minerais félsicos e silicatos formadores de rocha (e.g. feldspatos, moscovitas e argilominerais). Embora comum, somente uma pequena parcela deste montante corresponde ao isótopo K-40 (abundância natural de 0,012%) (Atwood, 2012). Apesar de deter uma série de decaimento mais curta, a presença de K-40 é altamente associada a exposição de radiação gamma e, portanto, precisa ser considerado em avaliação radiológica de materiais geológicos (Sanjurjo-Sánchez e Alves, 2017).

3.2 RISCO RADIOLÓGICO DE MATRIZES GEOLÓGICAS EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Os materiais geológicos ricos em radionuclídeos podem ser aplicados na construção civil tanto como a pedra natural (e.g. obras de cantaria), como em material granular (agregados minerais) (Neves, Godefroid e Cândido, 2011; Sanjurjo-Sánchez e Alves, 2017). Outra forma de entrada de radionuclídeos ao ambiente construído é através da incorporação de resíduos minerais industriais (ricos em TENORM) nos materiais de construção (Labrincha *et al.*, 2017; Trevisi *et al.*, 2012). Em casos onde a indústria geradora do resíduo incorporado tem natureza nuclear, é de se esperar que o risco radiológico seja contabilizado (e.g. Usinas nucleares, mineração de Urânio e Tório) (e.g. Landa, 2004). Em outros casos, a indústria não é necessariamente de natureza nuclear, mas ainda lida com minerais com alto conteúdo de NORM e, portanto, precisa ser avaliado quanto a seu risco radiológico (e.g. Óleo e gás e produção de fertilizantes) (e.g. Cuccia e Godoy, 2021; De-Paula Costa *et al.*, 2018). O **Quadro 1** mostra diferentes contextos em que significativos níveis de NORM ou de exposição radioativa foram detectados na construção civil.

Quadro 1 Registros de materiais de construção ricos em NORM com matrizes minerais ou residuais em sua composição

Materiais geológicos ou de construção	Local	Variação do conteúdo em NORM (Bq/kg)	Referências
Cimento Portland	Brasil, Austrália	^{226}Ra = 7~180; ^{232}Th = 7~240; ^{40}K = 24~850	(Narloch *et al.*, 2019);(Cooper, 2005)
Granitos	Egito, Brasil	^{226}Ra = 80~330; ^{232}Th = 100~140; ^{40}K = 250~1300	(Ahmed, 2005);(Anjos *et al.*, 2005)
Fosfogesso	Europa; Brasil;	^{226}Ra = 28~673; ^{232}Th = 16~150; ^{40}K = <27~60	(Kovler, 2012);(Mazzilli e Saueia, 1997)
Gipsita	Europa	^{226}Ra = 10; ^{232}Th = 10; ^{40}K = 80	(Kovler, 2012)
Escória de alto forno	Europa	^{226}Ra = 270; ^{232}Th = 70; ^{40}K = 140	(Kovler, 2012)
Lama Vermelha	China, Austrália	^{226}Ra = 239~425; ^{232}Th = 369~1000; ^{40}K = 160~583	(Gu, Wang e Liu, 2012);(Cooper, 2005)

Fonte: Autores

Quando se pensa em exposição radiológica advinda de materiais construtivos, dois fatores precisam ser contabilizados: A irradiação interna e externa. Irradiação interna leva em consideração a exposição à radiação por conteúdos radioativos que forem introduzidos ao corpo humano (ingestão ou inalação). No contexto de materiais de construção enriquecidos em NORM, o maior risco a irradiação interna está atrelado aos isótopos de radônio. Rn-222 e Rn-220 sendo estes gases presentes nas séries de decaimento do U e Th, respectivamente (**Figura 1**) (Araújo, 2003). Por isto, se o Rn for inalado em altas concentrações podem gerar uma condição de irradiação interna perigosa (Vogiannis e Nikolopoulos, 2015). Em concomitância, os isótopos de Rn apresentam relativo curto período de meia-vida (Rn-222 = 3,8 dias; Rn-220= 4 segundos), ou seja, uma vez dentro do corpo humano o Rn continua o processo de decaimento até virar um isótopos estáveis de Pb e emitindo radiação α, β e γ durante o processo, além de gerar acúmulo de metais pesados (Grzywa-Celińska *et al.*, 2020). A irradiação externa considera, principalmente, a exposição à radiação gamma advinda dos radionuclídeos dos minerais do solo e dos materiais de construção (Mazzilli, Máduar e Campos, de, 2011). Kovler *et al.*, (2002) esclarece que efeitos adversos a irradiação externa tendem a ser mais frequentes após longos períodos de exposição (entre 5 a 30 anos). Recomenda-se que para um ambiente radiologicamente

seguro, a dose de exposição anual não deverá exceder 1.0 milisieverts por ano para irradiação externa (mSv.y-1) (salvo específicas exceções) e 0.1 mSv.y-1 para irradiação interna, sob risco de desenvolvimento de câncer e outras patologias (ICRP, 2009; Sanjurjo-Sánchez e Alves, 2017). Uma caracterização de NORM nos materiais de construção associadas a avaliação do contexto geológico de uma construção é, portanto, fulcral para a garantia de um ambiente construído radiologicamente seguro.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho elucida os riscos da exposição radiológica no ambiente construído e como as matrizes geológicas podem atuar como uma fonte de NORM para os materiais de construção. Fica evidente a pluralidade de cenários onde radionuclídeos pode se tornar um risco ao ambiente construído. Portanto, a caracterização radiológica desde a matéria prima geológica até no produto final é uma etapa necessária para garantir a sustentabilidade dos diversos materiais de construção.

REFERÊNCIAS

AFIFI, E. M. EL *et al.* Evaluation of U, Th, K and emanated radon in some NORM and TENORM samples. **Radiation Measurements**, v. 41, n. 5, p. 627–633, 2006.

AHMED, N. K. Measurement of natural radioactivity in building materials in Qena city, Upper Egypt. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 83, n. 1, p. 91–99, jan. 2005.

ANJOS, R. M. *et al.* Natural radionuclide distribution in Brazilian commercial granites. **Radiation Measurements**, v. 39, n. 3, p. 245–253, 2005.

ARAÚJO, G. S. **Estudo dos níveis de emanação do 222RN de alguns materiais de construção civil e áreas públicas**. Tese (Universidade Federal do Rio de Janeiro). 2003.

ATWOOD, D. A. **Radionuclides in the Environment**. India: Wiley, 2012.

COOPER, M. B. Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Australian Industries - Review of Current Inventories and Future Generation EnviroRad Services Pty. Ltd. 2005.

CUCCIA, V.; GODOY, J. M. Analysis of the regulatory framework in Brazil for the management of NORM waste from oil and gas industry. p. 3–6, 2021.

CUNEY, M. The extreme diversity of uranium deposits. **Mineralium Deposita**, v. 44, n. 1, p. 3–9, 29 jan. 2009.

DE-PAULA COSTA, G. T. *et al.* Geochemical signature of NORM waste in Brazilian oil and gas industry. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 189, n. February, p. 202–206, 2018.

DOYI, I. *et al.* Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials (TENORM) in the Oil and Gas Industry : A Review. **Reviews of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 250, 2016.

GRZYWA-CELIŃSKA, A. *et al.* Radon—The Element of Risk. The Impact of Radon Exposure on Human Health. **Toxics**, v. 8, n. 4, p. 120, 14 dez. 2020.

GU, H.; WANG, N.; LIU, S. Radiological restrictions of using red mud as building material additive. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 30, n. 9, p. 961–965, 29 set. 2012.

GULGHANE, A. A.; KHANDVE, P. V. Management for Construction Materials and Control of Construction Waste in Construction Industry: A Review. **Journal of Engineering Research and Applications**, v. 5, n. 41, p. 2248–962259, 2015.

ICRP, I. C. ON R. P. ICRP Publication 111 - Application of the Commission's recommendations to the protection of people living in long-term contaminated areas after a nuclear accident or a radiation emergency. **Annals of the ICRP**, v. 39, n. 3, p. 1–4, 7–62, jun. 2009.

KOVLER, K. *et al.* Natural radionuclides in building materials available in Israel. **Building and Environment**, v. 37, n. 5, p. 531–537, 2002.

KOVLER, K. Does the utilization of coal fly ash in concrete construction present a radiation hazard? **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 158–166, 2012.

LABRINCHA, J. *et al.* **From NORM by-products to building materials**. 2017.

LANDA, E. R. Uranium mill tailings: nuclear waste and natural laboratory for geochemical and radioecological investigations. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 77, n. 1, p. 1–27, jan. 2004.

LANDAIS, P. Organic geochemistry of sedimentary uranium ore deposits. **Ore Geology Reviews**, v. 11, n. 1–3, p. 33–51, 1996.

LOPES, A. G.; SILVA, F. C. A.; LOPES, R. T. Radiological assessment of the disposal of bulk oil NORM waste: Case study

from Brazil. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 261, n. August 2022, p. 107139, 2023.

MADRUGA, M. J. *et al.* Radiation exposure from natural radionuclides in building materials. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 185, n. 1, p. 49–57, 30 nov. 2019.

MADURWAR, M. V.; RALEGAONKAR, R. V.; MANDAVGANE, S. A. Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 872–878, 2013.

MAGALHÃES, L. F. DE *et al.* Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, 2020.

MAZZILLI, B. P.; MÁDUAR, M. F.; CAMPOS, M. P. DE. **Radioatividade no meio ambiente e avaliação de impacto radiológico ambiental**. [s.l.] Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2011.

MAZZILLI, B.; SAUEIA, C. H. R. Implicações radiológicas da utilização de fosfogesso como material de construção. **Ambiente Construido**, v. 1, n. 2, p. 17–22, 1997.

MICHALIK, B. *et al.* A methodology for the systematic identification of naturally occurring radioactive materials (NORM). **Science of the Total Environment**, v. 881, n. January, 2023.

NARLOCH, D. C. *et al.* Characterization of radionuclides present in portland cement, gypsum and phosphogypsum mortars. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 155, n. July 2018, p. 315–318, 2019.

NEVES, J. H.; GODEFROID, L. B.; CÂNDIDO, L. C. Avaliação da integridade estrutural do quartzito Itacolomi empregado em monumentos históricos de Ouro Preto sem e com colagem usando diferentes resinas. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 4, p. 493–498, dez. 2011.

RAUT, S. P.; RALEGAONKAR, R. V.; MANDAVGANE, S. A. Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 10, p. 4037–4042, 2011.

SANJURJO-SÁNCHEZ, J.; ALVES, C. Geologic materials and gamma radiation in the built environment. **Environmental Chemistry Letters**, v. 15, n. 4, p. 561–589, 30 dez. 2017.

SANTOS, N. P.; SILVA, F. C. A. DA. Panorama do risco radiológico do uso de fosfogesso como NORM no BrasilInternational Joint Conference Radio. **Anais**...Fortaleza: 2019

SILVEIRA, N. C. G. *et al.* Red mud from the aluminium industry: Production, characteristics, and alternative applications in construction materials—a review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 22, 2021.

TREVISI, R. *et al.* Natural radioactivity in building materials in the European Union: A database and an estimate of radiological significance. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 105, p. 11–20, 2012.

VENGOSH, A. *et al.* A critical review on the occurrence and distribution of the uranium- and thorium-decay nuclides and their effect on the quality of groundwater. **Science of The Total Environment**, v. 808, p. 151914, fev. 2022.

VOGIANNIS, E. G.; NIKOLOPOULOS, D. Radon Sources and Associated Risk in Terms of Exposure and Dose. **Frontiers in Public Health**, v. 2, n. JAN, p. 1–10, 5 jan. 2015.