

Avaliação da segurança radiológica: Exploração de depósitos minerais (minas) versus massas minerais (pedreiras)

Radiation safety assessment: Exploration of mineral deposits (mines) versus mineral masses (quarries)

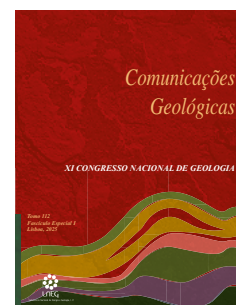
M. J. Trindade^{1*}, M. Malta¹, J. O. Martins¹

DOI: <https://doi.org/10.34637/x8rn-sd45>

Recebido em 26/07/2023 / Aceite em 15/01/2024

Publicado online em abril de 2025

© 2025 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP



Artigo original
Original article

Resumo: No âmbito do regime jurídico da proteção radiológica, a indústria extrativa deve realizar uma avaliação de segurança radiológica (ASR) para determinar se a atividade origina um incremento da exposição dos trabalhadores ou do público às radiações ionizantes que não possa ser ignorado do ponto de vista da proteção radiológica. A exploração de depósitos minerais (minas) exige maior intervenção humana do que a exploração de massas minerais (pedreiras) devido à necessidade de extração dos metais ou minerais de interesse económico. As atividades industriais de beneficição do minério alteram as condições ambientais e consequentemente as propriedades físico-químicas dos radionuclídeos, podendo levar à sua mobilização seletiva e a um enriquecimento da concentração de radionuclídeos nos produtos ou resíduos gerados. No caso das pedreiras, em que a massa mineral é usada na forma em que é extraída, não ocorre esse enriquecimento e o risco radiológico é menor. Por esse motivo, foi adotada uma abordagem graduada da ASR nas pedreiras que presume a apresentação à APA de uma ASR simplificada e, apenas nos casos em o risco radiológico associado o justifica, será solicitada uma ASR completa.

Palavras-chave: Avaliação de segurança radiológica, atividade mineira, indústria NORM, exploração de pedreiras, proteção radiológica.

Resumo: Under the legal framework for radiation protection, the extractive industry must carry out a radiological safety assessment (RSA) to evaluate whether the activity leads to an increase in the exposure of workers or the public to ionizing radiation that cannot be ignored from the radiological protection point of view. The exploitation of mineral deposits (mines) requires a higher level of human intervention than quarrying due to the need to extract metals or minerals of economic interest. The industrial activities of ore processing change the environmental conditions and consequently the physicochemical properties of radionuclides, and may lead to their selective mobilization and an enrichment of the radionuclide concentration in the generated products or residues. In the case of quarrying, where the mineral mass is used in the form in which it is extracted, there is no such enrichment and the radiological risk is lower. For this reason, a graded approach to RSA for quarries has been adopted, with a simplified RSA being presented to APA and, only in cases where the associated radiological risk justifies it, will a full RSA be requested.

Keywords: radiation safety assessment, mining activity, NORM industry, quarrying, radiation protection.

1. Introdução

Os radionuclídeos que estavam presentes aquando da formação da Terra são designados por radionuclídeos primordiais. Estes radionuclídeos, que incluem as séries de decaimento do urânio (U-238) e do tório (Th-232), bem como o isótopo radioativo do potássio (K-40), encontram-se em todas as rochas e solos, originando um fundo radiológico natural que depende das condições geológicas locais. Determinadas formações geológicas, como minérios e rochas graníticas, podem apresentar concentrações elevadas de urânio ou tório.

A exploração dos recursos geológicos e a utilização industrial destes materiais radioativos de origem natural, habitualmente designados NORM (do inglês *Naturally Occurring Radioactive Materials*), pode ter efeitos negativos no ambiente e na saúde devido à exposição à radiação ionizante emitida pelos materiais, levando a questões no contexto da proteção radiológica.

O impacto humano da alteração dos materiais geológicos do seu estado natural pode limitar-se ao aumento da disponibilidade dos NORM na biosfera ou conduzir à geração de produtos, subprodutos ou resíduos enriquecidos em radionuclídeos naturais quando comparado com o teor natural dos solos (IAEA, 2003). Tal enriquecimento pode ocorrer em algumas indústrias que processam rochas e matérias-primas minerais em que, por alteração das condições físico-químicas do meio, alguns radionuclídeos são preferencialmente mobilizados e podem acumular-se em partes do fluxo de material.

2. Enquadramento

O Decreto-Lei n.º 108/2018, de 3 de dezembro, estabelece o regime jurídico da proteção radiológica, transpondo a 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. No contexto dos setores industriais que envolvem NORM, como é o caso da indústria extrativa, o artigo 61.º do Decreto-Lei estabelece que os operadores devem submeter à Agência Portuguesa do Ambiente (APA), enquanto autoridade competente, uma Avaliação de Segurança Radiológica (ASR) que permita determinar se a atividade desenvolvida origina um aumento significativo da exposição dos trabalhadores ou do público às radiações ionizantes que não possa ser ignorado do ponto de vista da proteção radiológica.

A legislação que rege a exploração e aproveitamento dos recursos geológicos (Lei n.º 54/2015, de 22 de junho) inclui, no âmbito da

¹ Departamento de Emergências e Proteção Radiológica, Agência Portuguesa do Ambiente, I.P., Rua da Murgueira 9, 2610-124 Amadora, Portugal.

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

indústria extrativa, a exploração de depósitos minerais (minas) e a exploração das massas minerais (pedreiras). Os depósitos minerais são definidos como ocorrências minerais de especial interesse econômico, devido à raridade, alto valor específico ou importância na aplicação em processos industriais das substâncias nelas contidas. Por outro lado, as massas minerais incluem rochas e ocorrências minerais que não atendem às características necessárias para serem qualificadas como depósitos minerais.

Os dois segmentos da indústria extrativa apresentam características distintas, sendo associado às minas um maior risco radiológico devido aos processos industriais utilizados na extração dos metais ou minerais de valor. O sistema regulador adota uma abordagem graduada, proporcional ao nível de risco associado, justificando assim uma diferenciação na ARS entre o setor mineiro e o setor das pedreiras. Este artigo tem como objetivo explicar as razões subjacentes a essa distinção.

3. Características da exploração

3.1. Depósitos minerais

Na atividade mineira, é a beneficiação dos depósitos minerais que torna possível a extração dos metais ou minerais de valor a partir dos concentrados de minério. O processamento mineralúrgico envolve a redução do tamanho das partículas através da fragmentação e moagem, até atingir uma granulometria adequada para ser tratado por técnicas como flutuação, filtração, lixiviação, separação magnética, entre outras. No caso dos minérios metálicos, a obtenção dos metais de interesse requer um processo metalúrgico adicional que pode ser efetuado em instalações anexas à mina ou em fundições comerciais.

Os processos industriais envolvidos na beneficiação do minério podem alterar as condições ambientais e, em consequência, as propriedades físico-químicas dos radionuclídeos, perturbando o equilíbrio nas cadeias de decaimento radioativo devido à mobilização seletiva dos radionuclídeos (por exemplo, a lixiviação dos isótopos de rádio nas séries do U-238 ou do Th-232), levando à geração de produtos, subprodutos ou resíduos com concentrações de radionuclídeos significativamente aumentadas (IAEA, 2003). Essa mobilização é frequentemente originada por processos físicos ou químicos em meio húmido, como flutuação ou lixiviação, e por processos térmicos.

Diversos processos contribuem para a concentração de radionuclídeos, como a desagregação física que aumenta a dissolução e dispersão de radionuclídeos devido ao aumento das áreas de superfície, a sedimentação que acumula radionuclídeos em frações ricas em minerais pesados como o rútilo e o zircão, o fracionamento por peneiração ou flutuação que aumenta a concentração nos sedimentos finos e nas lamelas devido à adsorção preferencial sobre as argilas e frações orgânicas, e os processos de combustão que volatilizam alguns radionuclídeos, como o Pb-210 e o Po-210, e concentram outros nas cinzas, como o Ra-226 (IAEA, 2003).

Os trabalhadores das minas podem ser expostos à radiação ionizante devido à presença de NORM com concentrações significativamente elevadas de radionuclídeos. O nível de exposição depende do teor de minério, dos métodos de extração e beneficiação, do tipo de mina, bem como do tempo e distância de exposição aos NORM. As vias de exposição podem ser várias, designadamente exposição externa à radiação gama, exposição interna por inalação ou ingestão de poeiras emissoras de partículas alfa ou beta, e inalação de radão (Rn-222), particularmente nas minas subterrâneas. A avaliação da exposição baseia-se na estimativa da dose anual de radiação recebida por um indivíduo no seu posto de trabalho, resultante de todas as vias de exposição.

Destaca-se que a atividade mineira resulta na extração de uma

fração valiosa do minério, deixando o restante como resíduo. Embora alguns resíduos, como o estéril, não apresentem concentrações de atividade elevadas, são geralmente produzidos em grandes quantidades, aumentando a disponibilidade de radionuclídeos na biosfera e, conseqüentemente, o potencial de exposição aumenta. Assim, a gestão eficiente e segura dos resíduos NORM é essencial para evitar a contaminação de vastas áreas e proteger o público da exposição.

3.2. Massas minerais

Nas pedreiras, ocorre a extração de calcários, granitos e outros materiais para fins ornamentais ou industriais. A extração de rochas ornamentais envolve o corte em blocos, seguido da transformação em chapas e, posteriormente, em ladrilhos de formatos variados para uso na construção civil, como revestimento de paredes, pavimentos e outros fins. Por sua vez, os agregados naturais são utilizados principalmente na construção civil, obras públicas e projetos de engenharia, tanto como carga sólida quanto como matéria-prima para a fabricação de betões e outros produtos da construção.

As massas minerais são utilizadas na forma em que são extraídas das pedreiras, sujeitas apenas a processos físicos durante a extração e transformação da pedra. Embora a intervenção humana nas pedreiras não aumente necessariamente a concentração de radionuclídeos nos NORM gerados, ainda pode ser uma preocupação devido ao aumento do potencial de exposição, resultante da modificação dos materiais do seu estado natural e da produção de grandes volumes de resíduos mais acessíveis para gerar exposição. Portanto, é importante avaliar a exposição dos trabalhadores e da população vizinha das pedreiras.

O nível de exposição a radiações ionizantes nas pedreiras depende, em grande medida, das características radiológicas da rocha a extrair. Vários estudos (Fallatah e Khattab, 2023; Turhan, 2010) indicam que a radiação gama emitida pelos calcários é baixa, sugerindo que a exposição à radiação ionizante dos trabalhadores numa pedreira de calcário não é significativa, enquanto nas rochas graníticas, as concentrações de radionuclídeos naturais são mais elevadas, por vezes significativas, podendo resultar em exposição à radiação acima do limite estabelecido para membros do público (1 mSv/ano, de acordo com o Decreto-Lei n.º 108/2018). Além dos granitos, outros materiais naturais, como diversas rochas ígneas, xistos e pozolanas, podem apresentar níveis de radioatividade que suscitam preocupação radiológica, e seu impacto na exposição precisa ser avaliado.

4. Procedimento administrativo com vista à proteção radiológica

4.1. Depósitos minerais

Em virtude do maior risco radiológico associado às minas, conforme mencionado anteriormente, os operadores devem apresentar uma avaliação de segurança radiológica (ASR) à APA que incida sobre a exposição dos trabalhadores e do público e que considere as vias de exposição interna e externa, bem como os resíduos resultantes da atividade mineira.

Com base na análise da ASR, a APA determina o regime de controlo regulatório a ser aplicado ou a sua isenção. O procedimento a ser seguido pelo setor mineiro está delineado de forma esquemática na Figura 1.

4.2. Massas minerais

O risco radiológico associado à exploração de pedreiras é considerado menor, principalmente devido à ausência de processos de beneficiação.

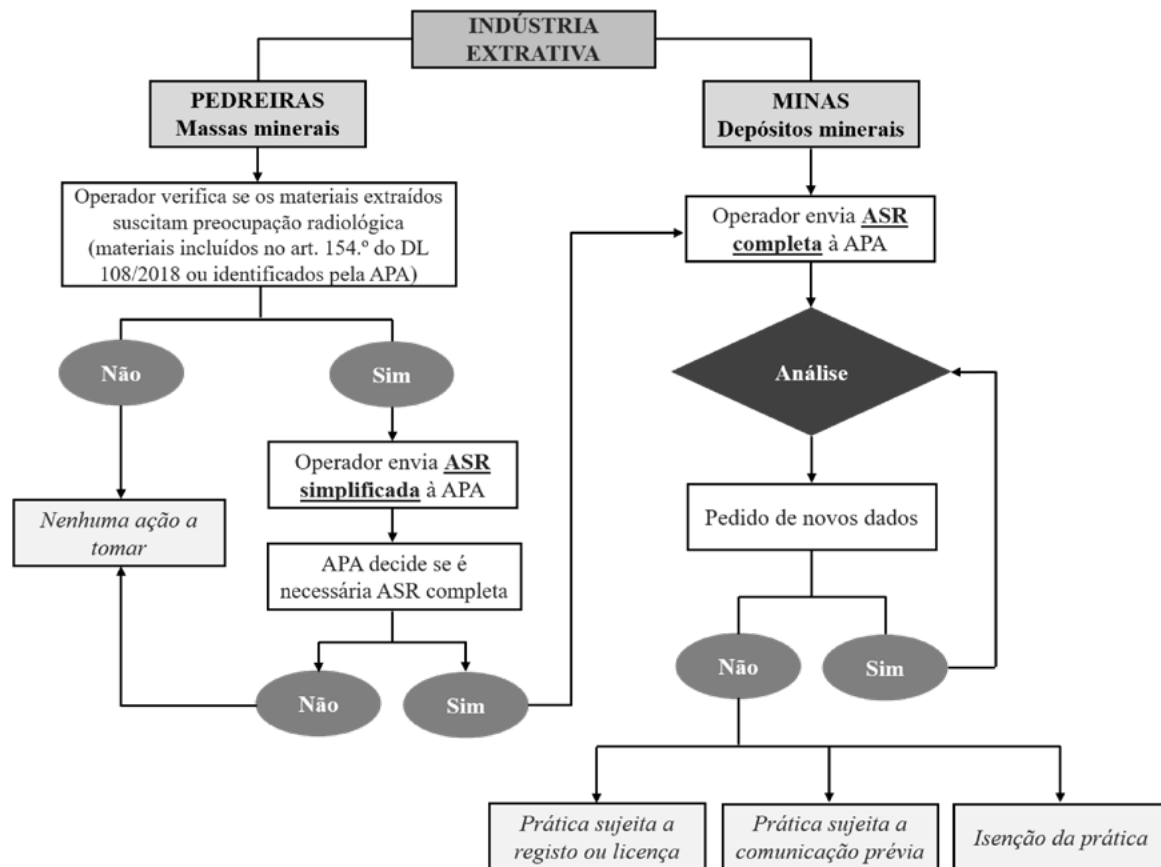


Figura 1. Procedimento administrativo para minas e pedreiras.

Figure 1. Administrative procedure for mines and quarries.

Além disso, o nível de risco está maioritariamente relacionado com as características radiológicas da matéria-prima extraída, sendo mais elevado em rochas graníticas e inferior, por exemplo, em rochas calcárias e mármore.

Dado o uso frequente das massas minerais na construção, quer diretamente como rocha ornamental quer como agregados para produção de materiais de construção, é preciso considerar o efeito da radiação gama emitida pelos radionuclídeos primordiais (U-238, Th-232 e K-40) contidos nos materiais, na exposição dos ocupantes dos edifícios. Por esse motivo, o artigo 154.º do Decreto-Lei n.º 108/2018 lista materiais naturais sujeitos a controlo antes de sua disponibilização no mercado, tais como xisto-aluminoso, rochas ígneas granitoides (granito, sienito e ortognaisse), pórfiros, tufos, pozolanas, incluindo cinzas pozzolânicas, e lava ácida.

Diante dessas características, considera-se mais apropriada a implementação de um sistema regulador baseado numa abordagem graduada para o setor das pedreiras em relação à Avaliação de Segurança Radiológica (ASR). Nesse modelo, os operadores devem verificar se a sua atividade envolve as matérias-primas identificadas no artigo 154.º do Decreto-Lei ou designadas pela autoridade competente como suscetíveis de causar preocupação do ponto de vista da proteção radiológica. Em caso afirmativo, o operador deve submeter uma ASR simplificada à APA, que, após análise, decide se os elementos fornecidos são suficientes para concluir que a atividade não apresenta riscos significativos aos trabalhadores ou ao público em geral, exigindo proteção radiológica.

Se a ASR simplificada indicar um maior risco radiológico, a APA

solicitará ao operador que desenvolva uma ASR mais abrangente, semelhante à requerida para o setor mineiro. O procedimento a ser seguido pelo setor das pedreiras também se encontra esquematizado na Figura 1.

A ASR simplificada deve incluir, pelo menos, as seguintes informações:

- Identificação do titular e denominação social da empresa
- Localização geográfica e enquadramento geológico;
- Definição da atividade da empresa (extração e/ou transformação);
- Identificação e descrição da matéria-prima extraída/transformada;
- Descrição das infraestruturas (pedreira e instalações anexas);
- Fluxograma e descrição dos processos produtivos;
- Volume de produção de produto acabado e semi-acabado;
- Volume e tipo de resíduos gerados e seu destino;
- Utilização prevista para o material extraído, principalmente o seu uso na construção;
- Informação sobre o índice de concentração de atividade (I) das matérias-primas. Importante notar que o artigo 155.º do Decreto-Lei 108/2018 estabelece a quantificação dos radionuclídeos primordiais K-40, Th-232 e Ra-226, bem como a obtenção dos índices I (conforme fórmula apresentada no anexo III) para os materiais listados no artigo 154.º, antes da sua colocação no mercado.

A ASR completa, além dos elementos acima referidos, deve incluir

as seguintes informações:

- a) Identificação das zonas e processos que implicam maior risco radiológico;
- b) Identificação das vias de exposição (externa e interna);
- c) Caracterização radiológica das matérias-primas, produtos e resíduos, identificando os radionuclídeos relevantes à exposição;
- d) Medições da radiação gama no ambiente dos locais de trabalho, bem como medições dos níveis de fundo para comparação;
- e) Medição do radão em espaços de trabalho fechados;
- f) Descrição dos postos de trabalho, incluindo o tempo de permanência dos trabalhadores na presença dos NORM;
- g) Cálculo da dose efetiva anual para os trabalhadores, tendo em conta as características dos postos de trabalho e as vias de exposição identificadas;
- h) Demonstração do cumprimento do limite de dose fixado para os membros do público (1 mSv/ano) e justificação para a existência ou não de trabalhadores expostos (sujeitos a uma exposição suscetível de resultar numa dose superior a 1 mSv), cuja exposição não pode ser ignorada do ponto de vista da proteção radiológica.

5. Conclusões

Em conclusão, este artigo discute a razão subjacente à abordagem reguladora diferenciada adotada nos setores das minas e das pedreiras no contexto da proteção radiológica, delineando os respetivos procedimentos administrativos.

O procedimento aplicado às minas visa regular práticas envolvendo NORM, enquanto o procedimento aplicado às pedreiras tem como objetivo identificar situações cujo risco radiológico justifica sua classificação como práticas envolvendo NORM, a serem geridas como

situações de exposição planeada, de modo semelhante à exploração mineira.

Conforme a metodologia adotada, o setor das minas deve apresentar à APA um relatório abrangente de avaliação de segurança radiológica. Já o setor das pedreiras segue um procedimento graduado. Ou seja, os operadores que exploram massas minerais com baixos níveis de radioatividade natural, como calcários e mármore, não têm obrigações perante a APA. Por outro lado, os operadores de pedreiras envolvendo matérias-primas com maiores níveis de radioatividade natural, tais como granitos e rochas semelhantes, devem apresentar uma ASR simplificada. Somente em situações indicativas de maior risco será solicitado que essa avaliação inicial seja complementada com informações adicionais, como concentrações de radionuclídeos naturais nos materiais e estimativas de doses de exposição. Isso permitirá concluir se a atividade origina ou não um aumento significativo na exposição dos trabalhadores ou do público em geral às radiações ionizantes, justificando a necessidade de proteção radiológica.

Referências

- Fallatah, O., Khattab, M. R., 2023. Evaluation of Environmental Radioactivity and Hazard Impacts Saudi Arabia Granitic Rocks Used as Building Materials. *Minerals*, **13**(2): 165. <https://doi.org/10.3390/min13020165>.
- 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.
- Turhan, S., 2010. Radioactivity levels of limestone and gypsum used as building raw materials in Turkey and estimation of exposure doses. *Radiation Protection Dosimetry*, **140** (4): 402-407.