



## MINERADORAS E METALURGIAS NORM

Vanderlei Vilaça de Moura, Claúbia Pereira

Departamento de Engenharia Nuclear - Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos, 6627, campus UFMG, CEP 31.270-901, Belo Horizonte, MG  
vandermoura@gmail.com, claubia@nuclear.ufmg.br

**Palavras-Chave:** NORM, mineradora, metalurgia, atividade específica, urânio, tório

### RESUMO

Rochas, solos e areias podem conter em sua composição radionuclídeos das séries do urânio e/ou do tório. Este material é conhecido como NORM (*naturally occurring radioactive material*). Mineradoras e metalurgias, ao processar material NORM, podem concentrar radionuclídeos em suas etapas de beneficiamento mineral com atividades específicas que chegam a ultrapassar os limites de isenção da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). Isto ocorre com diversos minerais em especial como o ácido fosfórico (produção de fertilizante), monazita (produção de monazita, silicato de zircônio, titanato de ferro e dióxido de titânio), zircônio, estanho e nióbio. Neste trabalho se faz uma revisão dos principais minerais que ocorrem no Brasil, relacionando-os com suas atividades específicas, que estão diretamente associadas à presença de U e Th.

### 1. INTRODUÇÃO

O termo material radioativo de ocorrência natural ou NORM (*naturally occurring radioactive material*) indica minerais, solos, areias, rochas, resíduos entre outros, que apresentam concentrações dos radionuclídeos das famílias do urânio e/ou tório. Estas matérias primas são utilizadas pelas indústrias, mineradoras e metalurgias para a produção de bens tais como material de construção civil (granito, britas, areias), fertilizantes (fosfatados), combustíveis (carvão mineral) e insumos (ligas metálicas, ferro-nióbio, cobre, estanho e óxidos) [1]. Deste modo, a indústria que processa ou produz NORM, em especial as mineradoras e metalurgias, criam vias de exposição mesmo não tendo como interesse a produção de concentrado de urânio [2].

Neste artigo são apresentadas algumas das principais atividades geradoras de NORM: mineradoras e/ou metalurgias de ácido fosfórico, monazita, estanho e nióbio. Estas utilizam ou processam rocha, areia, insumos, resíduos e/ou rejeitos, com atividade específica acima dos limites de isenção<sup>8</sup> propostos pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) e adotados pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) estando, assim, sujeitas a regulamentação por norma específica [3].

### 2. ÁCIDO FOSFÓRICO

Os minérios fosfatados são relativamente abundantes na crosta terrestre sendo amplamente usados, após o beneficiamento mineral e/ou hidrometalúrgico, como

<sup>8</sup> Para urânio e tório naturais o limite de isenção é de 1Bq/g [3], [4].

fertilizantes. As maiores reservas brasileiras de rocha fosfática encontram-se em Minas Gerais, Goiás, São Paulo, Santa Catarina, Ceará, Pernambuco, Bahia e Paraíba. Já as mundiais estão localizadas na China, Estados Unidos, Marrocos, Oeste do deserto do Saara, Rússia, Tunísia [4].

A mineração de fosfatos é essencial para a agricultura, pois é através dela que é produzido o ácido fosfórico - matéria prima para fertilizantes. Como resíduo/rejeito é produzido o fosfogesso que atualmente é depositado em pilhas próximos as instalações que o produzem. Estão sendo procuradas alternativas para este armazenamento, especialmente em construção civil [5].

A Fig. 1 apresenta o fluxograma genérico de produção do ácido fosfórico. A rocha fosfática apresenta concentrações das séries naturais do urânio e do tório em equilíbrio secular. Este é quebrado a na etapa de ataque ácido (lixiviação). O licor produzido concentra os isótopos de urânio; enquanto que no fosfogesso os demais radionuclídeos. Esta característica está sendo aproveitada no Projeto Santa Quitéria no Ceará. Nele, que encontra-se na etapa de licenciamento ambiental, será estabelecido um consórcio entre uma mineradora e as Indústrias Nucleares do Brasil (INB) com o objetivo de produzir fertilizante e um concentrado de urânio obtido a partir da purificação do ácido fosfórico [4].

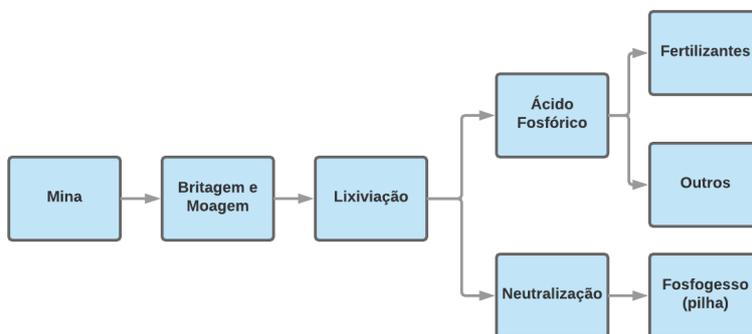


Fig. 14. Fluxograma simplificado da produção de ácido fosfórico.

Na Tab. 1 encontra-se a distribuição típica da atividade específica e da concentração dos radionuclídeos na rocha fosfática (mina), no ácido fosfórico e no fosfogesso [1].

Tab. 16. Distribuição típica da atividade específica e da concentração de radionuclídeos na produção de ácido fosfórico.

| Radionuclídeo | Rocha fosfática       |     | Ácido fosfórico (%) | Fosfogesso (%) |
|---------------|-----------------------|-----|---------------------|----------------|
|               | (Bq g <sup>-1</sup> ) | (%) |                     |                |
| U-238         | 0,4 a 4               | 100 | 90                  | 10             |
| Ra-226        | 0,4 a 4               | 100 | 10                  | 90             |
| Pb-210        | 0,4 a 4               | 100 | 0                   | 100            |
| Th-232        | ~ 3                   | 100 | 20                  | 80             |
| Ra-228        | ~ 3                   | 100 | 10                  | 90             |

### 3. MONAZITA

É fato conhecido que as areias monazíticas das praias no norte do Rio de Janeiro até o sul da Bahia, com destaque para a região de Guarapari-ES, são radioativas. Este material é uma mistura de quatro minerais principais: ilmenita (minério de titânio), zirconita (minério de zircônio), rútilo (minério de titânio) e monazita (minério de terras raras com ocorrência de tório e urânio) [6].

Atualmente, as areias monazíticas são beneficiadas por um processo iniciado por uma etapa gravimétrica (passagem de polpa por espirais) e, após secagem da polpa, por uma etapa de separação eletrostática e seguida de uma separação magnética. O objetivo é a obtenção de silicato de zircônio, titanato de ferro e dióxido de titânio para a produção de tintas e cerâmicas. A monazita é estocada. A Fig. 2 apresenta o fluxograma simplificado do processamento [7].

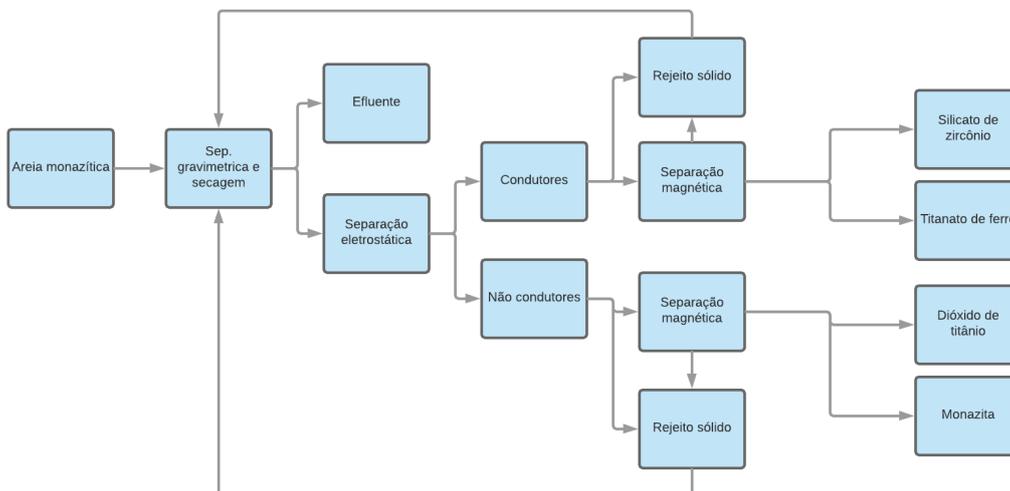


Fig. 15. Fluxograma simplificado do processamento de areia monazítica.

A distribuição de radionuclídeos é apresentada na Tab. 2. Ocorre concentração de urânio e tório com os metais pesados devido ao processo gravimétrico. Os efluentes líquidos arrastam preferencialmente os radionuclídeos solúveis em água (Ra-226, Ra-228; Pb-210; Rn-222, Rn-220) [1].

Tab. 17. Atividade específica no processamento da areia monazítica.

| Material                                   | U-238 | Th-232 | Material                               | U-238 | Th-232 |
|--|-------|--------|--|-------|--------|
| Areia monazítica (Bq g <sup>-1</sup> )     | 0,099 | 0,52   | Monazita (Bq g <sup>-1</sup> )         | 7,3   | 44,5   |
| Silicato de zircônio (Bq g <sup>-1</sup> ) | 2,3   | 0,5    | Rejeitos sólidos (Bq g <sup>-1</sup> ) | 1,3   | 2,0    |
| Titanato de ferro (Bq g <sup>-1</sup> )    | 0,13  | 0,62   | Efluente líquido (Bq.l <sup>-1</sup> ) | 0,1   | 0,1    |
| Dióxido de titânio (Bq g <sup>-1</sup> )   | 1,2   | 1,6    |  |       |        |

#### 4. ZIRCÔNIO

O zircônio é utilizado na metalurgia do aço, em catalizadores, em reatores nucleares e na indústria de tintas [8]. No Brasil, os depósitos são encontrados no Amazonas, Rio de Janeiro, Minas Gerais, São Paulo, Paraíba, Rio Grande do Sul, Tocantins e Bahia [9]. O óxido de zircônio é obtido através do processamento da zirconita, em geral associada ao estanho ou nióbio, ou da areia monazítica, conforme o item 3. Nos dois casos, ocorre mineralização de urânio e de tório ao mineral [10]. Quando extraído de areias monazíticas o fluxograma de produção é similar ao da Fig. 2. Já quando o óxido de zircônio está associado ao estanho e/ou ao nióbio, passa por processos de britagem, moagem, separação gravimétrica e eletromagnética, conforme a Fig. 3. A atividade específica é, em geral, similar a encontrada nos produtos e resíduos da Tab. 2 [1].

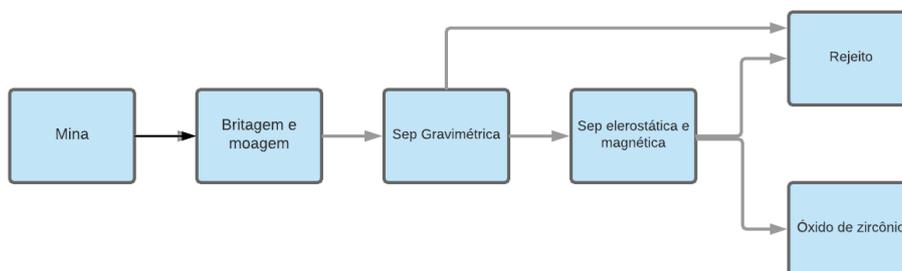


Fig. 16. Fluxograma simplificado da produção de óxido de zircônio.

Um cuidado adicional deve ser tomado em relação ao óxido zircônio. Ele pode tornar-se sério problema ambiental e ocupacional, quando seu destino é a indústria cerâmica ou de pigmentos, já que o óxido é inserido em fornos com temperaturas superiores a 1000°C. Assim, tanto o Pb-210 quanto o Po-210, radionuclídeos das séries do urânio, são volatilizados podendo ser dispersos pelo meio ambiente [1].

#### 5. ESTANHO

O estanho é um metal utilizado em ligas com zinco, chumbo e aço para evitar a corrosão; para a fabricação de telhas, correntes, âncoras e recipientes para conservação de alimentos (folha de flandres) e como insumo para a fabricação de soldas industriais e de equipamentos eletrônicos. As reservas brasileiras de estanho correspondem a cerca de 9% do total mundial e localizam-se no Amazonas, Minas Gerais, Rondônia, Mato Grosso, Pará e Tocantins [9].

O principal minério de estanho é a cassiterita que é formada por processos magmáticos e é muitas vezes associadas a elementos de terras raras, zircônio, nióbio e radionuclídeos das series naturais do urânio e do tório [11]. Quando em depósitos primários (na rocha), o processamento da cassiterita está descrito na Fig. 4. A rocha é britada, moída e passa por processo gravimétrico. Posteriormente, é realizada a separação eletrostática e manética seguida de flotação (processo de separação de partículas sólidas pela suspensão em um líquido). O concentrado é beneficiado metalurgicamente para a produção de

estanho. Quando em depósitos secundários (aluvião) é dispensada a britagem seguindo os demais passos da Fig. 4 [1].

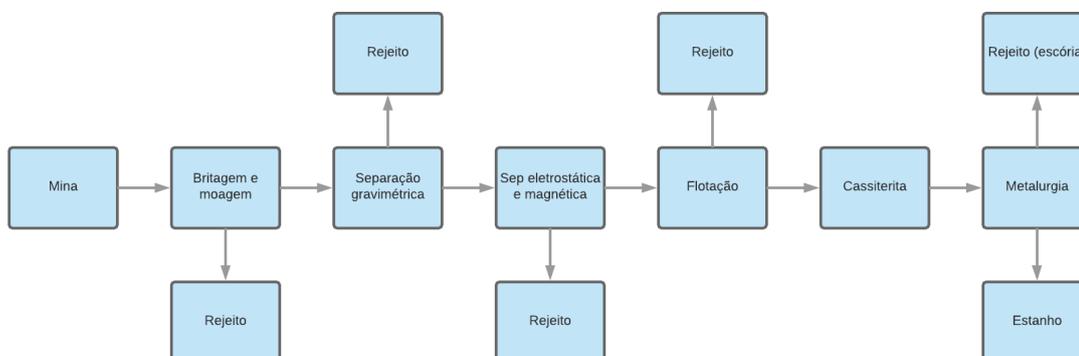


Fig. 17. Fluxograma simplificado da produção de estanho metálico.

A Tab. 3 apresenta a distribuição da atividade específica dos radionuclídeos na rocha, na cassiterita e nos rejeitos elétrico, eletromagnético e metalúrgico (escória). Como não existe legislação específica no Brasil sobre armazenamento de resíduos/rejeitos NORM, estes materiais são depositados em trincheiras ou em pilhas (CNEN, 2016).

Tab. 18. Atividade específica da rocha, cassiterita e rejeitos sólidos.

| Material         | Urânio (Bq g <sup>-1</sup> ) | Tório (Bq g <sup>-1</sup> ) | Ra-226 (Bq g <sup>-1</sup> ) | Ra-228 (Bq g <sup>-1</sup> ) | Pb-210 (Bq g <sup>-1</sup> ) |
|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Rocha            | 0,2 - 33,0                   | 0,3 - 3,9                   | 0,2 - 33,0                   | 0,3 - 3,9                    | 0,2 - 33,0                   |
| Cassiterita      | 9,0 - 21,0                   | 15,0 - 50,0                 | 9,0 - 21,0                   | 15,0 - 50,0                  | 9,0 - 21,0                   |
| Rejeitos sólidos | 4,7 - 93,1                   | 0,7 - 60,0                  | 2,1 - 24,6                   | 0,5 - 42,6                   | 0,3 - 16,0                   |

## 8. NIÓBIO

O nióbio é utilizado em ligas metálicas e aços especiais com alta resistência térmica e mecânica utilizados como insumo principal para construção de motores de aeroplanos, na propulsão de foguetes e em vários materiais supercondutores. Outras aplicações incluem soldagem, a indústria nuclear, a eletrônica, a óptica e a produção de joias. O principal produtor mundial é o Brasil com 90% do mercado possuindo reservas nos estados do Amazonas, de Goiás e de Minas Gerais [9].

Os principais minerais de nióbio são o pirocloro e a columbita. Ambos contêm na sua composição, além do nióbio, radionuclídeos das séries naturais do urânio e do tório. Deste modo, estes minerais são materiais radioativos de ocorrência natural [7].

O processamento para a obtenção de nióbio é similar ao do estanho, conforme pode ser visualizado na Fig. 4: britagem e/ou moagem, separação gravimétrica, separação elétrica separação eletromagnética e flotação para a produção de columbita ou de pirocloro. O primeiro concentrado passa por processos metalúrgicos (redução e aluminotermia) para a produção de uma ferro-liga de nióbio que é o produto final. Já o pirocloro, que é um óxido



de nióbio, não passa por pirometalurgia. A distribuição da atividade específica pode ser observada na Tab. 4 [13].

Tab. 19. Atividade específica nas etapas de produção de nióbio.

| Material ou etapa     | U-238 (Bq g <sup>-1</sup> ) | Ra-226(Bq g <sup>-1</sup> ) | Pb-210(Bq g <sup>-1</sup> ) | Th-232(Bq g <sup>-1</sup> ) | Ra-228(Bq g <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Rocha                 | 0,9 - 4,5                   | 0,8 - 3,4                   | 1,3 - 7,8                   | 0,9 - 6,0                   | 2,0 - 5,0                   |
| Separação magnética   | 0,8 - 1,0                   | 0,3 - 0,9                   | 0,7 - 1,7                   | 0,3 - 0,8                   | 0,3 - 0,7                   |
| Flotação              | 0,7 - 5,0                   | 1,0 - 3,4                   | 2,4 - 7,5                   | 1,0 - 3,1                   | 1,0 - 1,8                   |
| Escória               | > 35                        | 5,0                         | 0,4                         | >17                         | 6,0                         |
| Produto (FeNb)        | 0,06                        | 0,04                        | -                           | 0,023                       | 0,026                       |
| Produto (óxido de Nb) | 14                          | 1,4                         | 0,7                         | 83                          | 8,9                         |

#### 4. CONCLUSÃO

Muitos elementos de interesse tais como o fósforo, o carvão mineral, o titânio, as terras raras, o estanho e o nióbio, encontram-se mineralizados juntamente com o urânio e/ou o tório. Apesar deste material ser classificado como radioativo de ocorrência natural, a mineradora que o processa não apresenta diferenças significativas em sua operação comparado ao de mineradoras “comuns”. O que precisa ser levado em consideração são os controles ambientais e ocupacionais relativos a radioatividade do material especialmente em relação aos resíduos e rejeitos produzidos, já que estes, em geral, concentram os radionuclídeos [2]. Assim, estes não podem ser utilizados em construção civil e nem dispostos em aterros sanitários - alternativas comuns aos resíduos de mineração [14].

Uma opção das mineradoras e metalurgias é o armazenamento dos rejeitos na própria empresa. Entretanto, esta não é viável a médio ou longo prazo devido ao elevado volume. Portanto, alternativas como a do Projeto Santa Quitéria ou a recuperação de urânio a partir de escórias e outros rejeitos tornam-se atrativas e interessantes para o material NORM [4].

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências financiadoras, CAPES, CNPq e FAPEMIG, que direta ou indiretamente contribuem para o desenvolvimento desta pesquisa.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. REIS, NORM - Guia Prático, 1ª ed., R. G. d. Reis, Ed., Rio de Janeiro: CNPQ e IRD, 2016.
- [2] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Resolução CNEN 208/16 - Norma CNEN-NN 4.01 - Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Instalações Mínero-Industriais, Rio de Janeiro: CNEN, 2016.
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources - International Basic Safety Standards, vol. 3, Viena: IAEA, 2011.



- [4] R. O. ALBUQUERQUE, Alternativas de Processo para Concentração do Minério Fósforo Uranífero de Itataia, Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica). Belo Horizonte: UFMG, 2010.
- [5] C. SAUEIA, B. MAZZILLI e D. FÁVARO, “Natural radioactivity in phosphate rock, phosphogypsum and phosphate fertilizers in Brazil,” *J. Radioanal. Nucl Chem*, vol. 264 (2), pp. 445-448, 2005.
- [6] Y. NOUAILHETAS, D. LAURIA, J. GODOY, V. REIS e R. ZENARO, “Radioecological Questions Concerning the Monazite Sand Cycle Wastes in Brazil,” *Radiation Protection in Australia*, vol. 11, pp. 177-181, abril 1993.
- [7] M. A. P. RIO, P. R. R. FERREIRA e D. C. V. P. LAURIA, “Radiological Impacts Associated with Zircon Sand Processing Plant in Brazil,” em *NORM V-5th International Symposium on NORM*, Servilha, 2007.
- [8] J. SELBY, “The Industrial Uses of Zircon and Zirconia and the Radiological Consequences of these Uses, Naturally Occurring Radioactive Material,” em *NORM V-5th International Symposium on NORM*, Viena, 2008.
- [9] DNPM, “Anuário Mineral Brasileiro,” em *Balanço Mineral Brasileiro*, vol. 34, Brasília, DNPM, 2014.
- [10] J. C. B. S. AMARAL e C. A. MORAIS, “Thorium and Uranium extraction from rare Earth elements in monazite sulfuric acid liquor through solvent extraction,” *Minerals Engineering*, 2010.
- [11] H. T. COSTI, R. M. K. BORGES e R. DALL'AGNOLL, “Depósitos de Estanho da Mina Pitinga, Estado Amazonas,” *Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia*, pp. 391-476, 2005.
- [12] CNEN, Resolução CNEN 208/16 - Norma CNEN-NN 4.01 - Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Instalações Mínero-Industriais, Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2016.
- [13] M. A. P. RIO, *Indústrias de Mineração Não Nucleares e o Aumento da Exposição à Radiação Natural*, Tese (Doutorado em Ciências). Rio de Janeiro: UERJ, 1999.
- [14] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Posição Regulatória 3.01/001 - 2011 - Critérios de exclusão, isenção e dispensa de requisitos de proteção radiológica, Rio de Janeiro: CNEN, 2011.