

# ESTUDO DE MÉTODOS DE CONCENTRAÇÃO DE MINERAIS PORTADORES DE ELEMENTOS TERRAS RARAS PESADOS

## STUDY OF THE CONCENTRATION METHODS OF HEAVY RARE EARTH ELEMENTS BEARING MINERALS

**Rafael Santos Monteiro**

Aluno de Graduação da Química Industrial 4º período, UFRJ  
Período PIBITI/CETEM: Agosto de 2018 a Julho de 2019  
rsmonteiro@eq.ufrj.br

**Elves Matiolo**

Orientador, Engenheiro de Minas, D.Sc.  
ematiolo@cetem.gov.br

**Paul Juárez Soto**

Co-orientador, Engenheiro de Materiais, M.Sc.  
pauljuarez@hotmail.com

### RESUMO

A rota de beneficiamento comumente usada no mundo para o processamento de minerais portadores de terras raras apresenta um caminho genérico a se seguir quando se deseja concentrar minerais como Monazita e Xenotímio, porém é uma rota complexa que necessita de várias etapas para tal. Este trabalho teve como objetivo, propor uma rota mais simples e analisar se, ao diminuir o número de etapas de separação e adicionar uma etapa de flotação, a concentração é relevante. Sendo utilizados os métodos de separação gravítica, separação magnética e separação eletrostática como preparação destes minerais para uma futura flotação. Apesar de o método ser usado para terras raras leves e pesadas, o foco foi nas ditas como pesadas, representadas pelo Xenotímio e Gagarinita. O ganho em teor após concentração foi considerável, não apenas para os óxidos de terras raras, mas também para outros minerais presentes que apresentam valor econômico, como Cassiterita, Pirocloro e Zircão.

**Palavras chave:** terras raras, métodos de concentração, xenotímio e gagarinita.

### ABSTRACT

A commonly used processing route in the world for the beneficiation of rare earth bearing minerals depicts a generic path to follow when concentrating minerals such as monazite and xenotime, but it is a complex route that requires several steps to do so. The objective of this work is to propose a more straightforward path and to analyze if concentration could be relevant by decreasing the number of separation steps and adding a flotation step in the process. Gravity separation, magnetic separation, and electrostatic separation methods are used as the preparation step for future flotation of these minerals. Although the proposed process is used for light and heavy rare earths, the focus is on the so-called heavy, represented by xenotime and gagarinite. The gain in content after the concentration was considerable, not only for rare earth oxides but also for other minerals that present economic value, such as cassiterite, pyrochlore, and zircon.

**Keywords:** rare earths, concentration methods, xenotime and gagarinite.

## 1. INTRODUÇÃO

O grupo dos elementos terras raras (ETR) é composto, de acordo com a classificação da IUPAC, por 17 metais, sendo eles Y, Sc e os lantanídeos (La até Lu) (CONNELLY, 2005). Essas terras raras são elementos que integram componentes críticos de muitos dos nossos dispositivos tecnológicos e eletrônicos do dia a dia, como smartphones, computadores, automóveis, dentre outros (ELSNER, 2010). Os elementos ditos como terras raras pesadas (ETRP) são um grupo composto pelos elementos de Tb a Lu, acrescidos do Y, além da ocorrência delas ser menor na natureza do que as das leves, mas com maior valor econômico (GONÇALVES, 2013).

As reservas globais de ETR em 2018 são dadas como 120 milhões de toneladas de óxidos de terras raras (OTR). Destas reservas, 44 milhões de toneladas pertencem à China (37%) e 22 milhões de toneladas são brasileiras (19%) (USGS, 2019). Até 2008, as reservas globais eram de 88 milhões de toneladas (USGS, 2009), de modo que as reservas de hoje são o resultado de recentes sucessos exploratórios, como Araxá da CBMM em 2014.

Tendo em vista o potencial brasileiro neste mercado, há a necessidade de simplificar e reduzir custos do processo de beneficiamento desses OTR's, sem perder rendimento suficiente para tornar o processo inviável. Portanto, neste trabalho, usou-se uma rota similar a descrita por (HEDRICK e CASTOR, 1992) para extração de Monazita e Xenotímio. Esta rota consiste na separação de elementos de terras raras oriundos de areias monazíticas a partir de técnicas gravíticas, magnéticas e eletrostáticas (HEDRICK, 2006).

A partir desta rota, foi desenvolvida uma rota mais simples, com um número menor de operações e realizada em escala piloto, buscando obter recuperações suficientemente viáveis para os OTR's pesados. Consistindo em uma etapa de separação gravítica, na qual são separados os minérios de maior massa específica utilizando apenas a gravidade e a força centrípeta para determinar o deslocamento dos minérios (MICHAUD, 2016).

Em seguida, a separação magnética na qual os principais parâmetros são a intensidade do campo magnético aplicado e a susceptibilidade magnética das partículas atraídas (OBERTEUFFER, 1974), que ao conhecer o valor de susceptibilidade para os minérios de interesse, facilitou a separação frente aos minerais de ganga.

Por fim, a separação eletrostática, que se baseia em que todo mineral possui um determinado grau de condutividade. Dessa forma, um processo de separação eletrostática usará, como princípio, a diferença entre a condutividade elétrica ou cargas superficiais existentes nas diversas espécies mineralógicas a serem separadas (VENKATRAMAN et al., 2006). Todas as operações até aqui tiveram como objetivo diminuir a quantidade de minerais de ganga, tornando possível uma posterior flotação dos portadores de terras raras de interesse.

## 2. OBJETIVO

A pesquisa teve como objetivo elucidar e apresentar dados sobre o processamento de minerais portadores de terras raras pesados obtidos a partir da adaptação de uma rota tecnológica geral, utilizando separação gravítica, magnética e eletrostática.

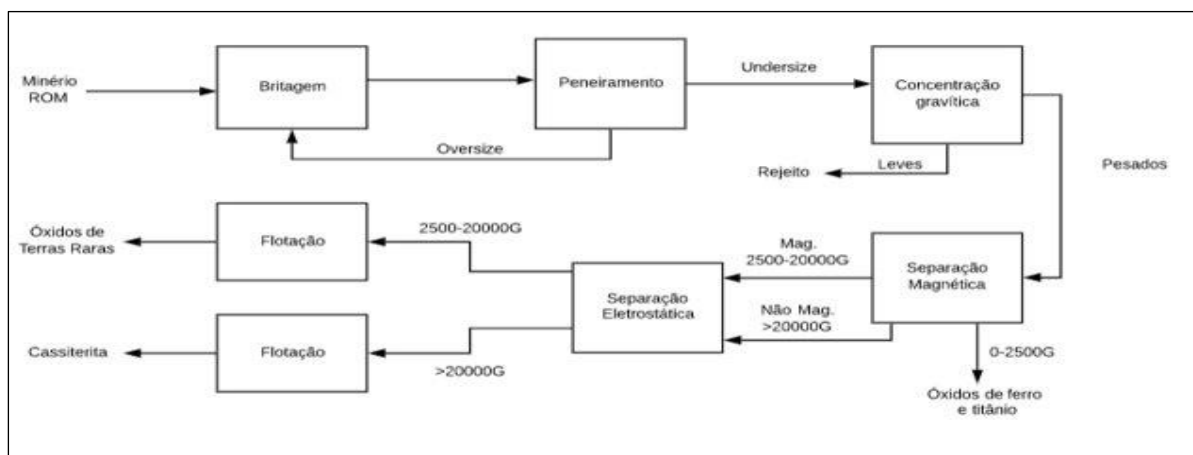
## 3. METODOLOGIA

Uma amostra inicial ROM, com  $P_{80}$  de 900  $\mu\text{m}$ , contendo uma massa de 210 kg foi dividida em 7 frações iguais, cada fração foi levada para um tanque agitador em que houve a homogeneização em forma de polpa. Posteriormente a polpa foi conduzida à uma separação gravítica em um sistema de espirais montado na usina piloto do CETEM/RJ. Os pesados provenientes da espiral foram filtrados à vácuo e uma alíquota foi encaminhada para análise em Difratômetro de raio X (DRX), já os leves seguiram como rejeito.

Após a separação em espiral, obteve-se cerca de 25 kg da amostra de pesados, que foram separados de acordo com sua susceptibilidade ao campo magnético em uma série de quatro separadores magnéticos de tambor via seca modelo HFRE-Ø12×12, separando a amostra em: 1.500G, 2.500G, 6.000G e

7.500G de intensidade e o não magnético restante foi levado em seguida para um separador magnético do tipo RE-ROLL de alto campo para separar nas intensidades de 20.000G e >20.000G. Sendo todos os testes realizados na INBRAS - Diadema (SP).

Posteriormente, frações magnéticas acima de 2500G foram encaminhadas a um separador eletrostático com tensão de 20.000 Volts modelo ES-14/01S, utilizado também no INBRAS/SP, sendo feito um pré-tratamento antes da entrada da amostra no equipamento, esse tratamento consiste na secagem da amostra à 80°C por 40 minutos, auxiliando a estática do método. O separador eletrostático dividiu cada fração entre condutor, misto e não-condutor. Em seguida todos os produtos obtidos nessa etapa foram levados para análise em espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). A Figura 1 apresenta o Diagrama de blocos do processo de concentração, preparando a amostra para posterior flotação.



**Figura 1:** Diagrama de blocos ilustrando as etapas de concentração mineral.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A amostra ROM inicial, proveniente da mina de Pitinga, localizada em Presidente Figueiredo, Amazonas continha apenas 0.1% em teor de minerais de óxidos de terras raras pesadas (OTRP), representados pelo xenotímio, e uma parcela muito alta composta por diversos minerais de ganga que não apresentam valor econômico, segundo a análise em DRX que é mostrada na Tabela 1.

**Tabela 1:** Análise em DRX da amostra ROM.

| Mineral       | %    |
|---------------|------|
| Quartzo       | 32,0 |
| Albita        | 29,3 |
| Microclínio   | 22,0 |
| Polilitionita | 4,4  |
| Caolinita     | 1,7  |
| Hematita      | 1,0  |
| Columbita     | 0,5  |
| Cassiterita   | 0,4  |
| Zircão        | 0,4  |
| Xenotímio     | 0,1  |

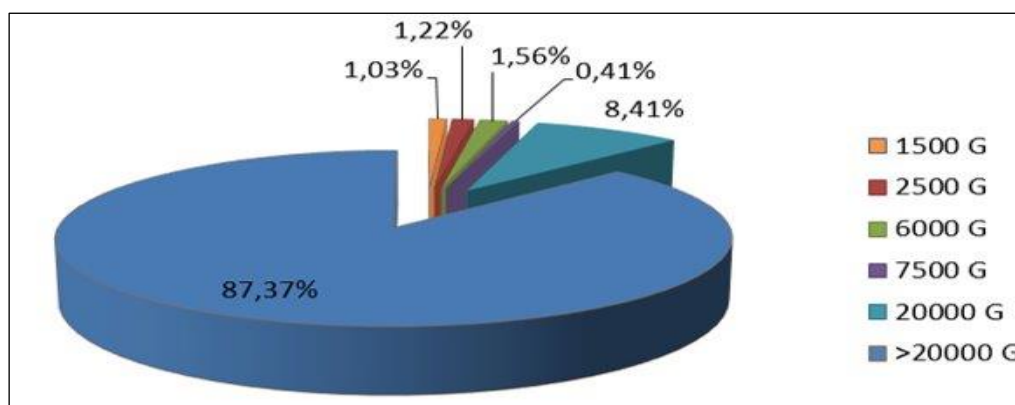
É evidente que os maiores contaminantes são os silicatos contidos nos minerais ganga, todavia minerais contendo alumínio, por exemplo, não são de interesse e a concentração em espiral servirá para removê-los. Além desses, minerais com densidade abaixo de 3,0 também são eliminados na espiral como fração leve, assim como minerais com massa específica acima desse valor puderam seguir como pesados.

A Tabela 2 apresenta as condições de operação dos separadores em espirais, quantidade que foi alimentada às espirais, e a recuperação em massa para cada ensaio. A etapa de concentração em espiral teve recuperação em massa média de 11,94%, deixando os 210 kg iniciais e chegando até um concentrado de 25kg, sendo a maior a recuperação em massa quando usadas taxas de alimentação menores. O DRX realizado após a concentração em espirais apontou a presença de 67,87% de vários silicatos, 9,20% de zirconita, 1,61% de Columbita, 1,60% de Cassiterita e 0,65% dos minerais de interesse (Xenotímio + Gagarinita) como principais minerais ainda presentes.

**Tabela 2:** Condições experimentais dos separadores em espirais.

| Ensaio                  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Alimentação (kg/min)    | 18,46 | 33,56 | 23,48 | 30,02 | 27,60 | 17,19 | 19,36 |
| % de sólidos            | 12,0  | 10,90 | 10,90 | 12,0  | 9,80  | 9,80  | 12,0  |
| Recuperação em massa(%) | 7,31  | 13,30 | 16,70 | 7,57  | 11,44 | 15,08 | 12,19 |

Ao encaminhar este pré-concentrado para a separação magnética, foi possível reclassificar os minerais segundo a susceptibilidade magnética. Minerais de alta susceptibilidade ao campo magnético, como a hematita e magnetita foram separados ao aplicar baixos campos magnéticos (1500, 2500G), enquanto que minerais não magnéticos como o quartzo foram separados em campos magnéticos maiores. A Figura 2 apresenta o quanto em massa foi recuperado para cada campo utilizado na separação magnética.



**Figura 2:** Recuperação em massa da separação magnética.

Por fim, a Tabela 3 apresenta os resultados após a separação magnética e eletrostática. O maior teor de terras raras foi concentrado na fração não condutora de 20000G e na fração não condutora >20000G. Outros óxidos como a cassiterita que possuem valor para a indústria mineral também foram concentrados, porem majoritariamente na fração condutora >20000G.

**Tabela 3:** Resultados do ICP-OES calculados como óxidos.

| Óxidos                         | 6000G      |         |                | 20000G     |         |                | >20000G    |         |                |
|--------------------------------|------------|---------|----------------|------------|---------|----------------|------------|---------|----------------|
|                                | Condutor % | Misto % | Não Condutor % | Condutor % | Misto % | Não Condutor % | Condutor % | Misto % | Não Condutor % |
| OTR                            | 0,29       | 0,63    | 1,17           | 0,67       | 0,77    | 2,13           | 1,11       | 1,03    | 1,22           |
| SnO <sub>2</sub>               | 0,83       | 1,06    | 0,81           | 0,61       | 0,60    | 0,66           | 3,45       | 1,35    | 1,73           |
| ZrSiO <sub>4</sub>             | 4,53       | 2,18    | 4,27           | 2,61       | 4,62    | 4,88           | 7,95       | 20,32   | 21,96          |
| Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 1,05       | 1,54    | 1,31           | 0,43       | 0,43    | 0,80           | 1,72       | 1,03    | 1,87           |

Todas as frações não condutoras resultantes de 6000G, 20000G e >20000G mostraram-se com maiores teores percentuais de óxidos de terras raras, resultado que confirma qualidades não condutoras delas quando aplicados campos eletrostáticos. O teor obtido para os óxidos de terras raras mostrou-se elevado, sendo 2.13% o valor para a fração de melhor teor (20000G não condutor), frente ao teor inicial em torno de 0,1% na amostra ROM. Isto indica uma eficiência do circuito proposto que poderia ter uma melhora se adicionados estágios de limpeza adequados. Com a técnica de flotação a se avaliar em uma etapa posterior espera-se concentrar para teores maiores e remover seletivamente o  $ZrSiO_4$ , mineral persistente na concentração de terras raras principalmente na fração acima de >20000G.

## 5. CONCLUSÕES

Através dos resultados encontrados, foi possível verificar que o método possui eficiência para a concentração destes minerais. Partindo-se de 0,1% de teor de óxidos de terras raras pesadas, foi possível chegar até 2,1% na fração com maior teor no concentrado. A separação em espirais foi essencial para retirar os minerais de ganga leves, assim como a separação magnética eliminou minerais ganga como hematita e magnetita e deslocou boa parte do zircão na fração de alto campo magnético. Por fim, a separação eletrostática permitiu que se obtivessem diferentes frações com diferentes espécies minerais da ganga, que deverão ser tratados de maneira diferente nas etapas posteriores do trabalho.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Paul Juárez e Elves Matiolo pelo apoio, ao CETEM/RJ pelo suporte e estrutura, ao INBRÁS/SP por permitir a realização de alguns testes, a CNPQ pela bolsa de incentivo e a todos que me ajudaram diretamente ou indiretamente para a realização deste trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CONNELLY, N.G. **Nomenclature of Inorganic Chemistry: IUPAC Recommendations 2005**. The Red Book. Royal Society of Chemistry, Cambridge, Inglaterra, 2005.

ELSNER, H. **Assessment Manual :Heavy Minerals of Economic Importance**. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Hannover, Alemanha, 2010, p. 218.

GONÇALVES, J. **Terras Raras**. CRQ IV Região. Ribeirão Preto, São Paulo, 2013. Disponível em: [https://www.crq4.org.br/quimicaviva\\_terrasraras](https://www.crq4.org.br/quimicaviva_terrasraras). Acesso em: 30 jun. 2019.

HEDRICK, J.B.; CASTOR, S.B. **RARE EARTHS ELEMENTS**. The U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy, Estados Unidos, 2006.

MICHAUD, L.D., **Gravity Spiral Concentrator Working Principle**. 911metallurgist. Columbia Britânica, Canadá, mar. 2016, Disponível em: <https://www.911metallurgist.com/blog/gravity-spiral-separator-working-principle#humphreys-spiral-concentrator>. Acesso em: 17 jun. 2019.

OBERTEUFFER, J. **Magnetic separation: a review of principles, devices, and applications**. IEEE Transactions on Magnetics 10 (2), p.223–238, 2019 Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1058315>. Acesso 17 jun. 2019.

USGS. **Mineral Commodity Summaries, January 2009. Rare Earths**. Department of the Interior, Washington, Estados Unidos, 2009 Disponível em: [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare\\_earths/mcs-2009-raree.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2009-raree.pdf). Acesso em: 16 jun. 2019.

USGS. **Mineral Commodity Summaries, January 2019. Rare Earths**. Department of the Interior. Washington, Estados Unidos 2019. Disponível em: [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare\\_earths/mcs-2019-raree.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2019-raree.pdf). Acesso em: 16. jun. 2019.

VENKATRAMAN, P.; KNOLL, F.S. e LAWVER, J.E. **Magnetic and electrostatic separation. In: Principles of Mineral Processing**, Eds. Fursteneau, SME Editors, 2006, p. 221-244.