



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIA
FACULDADE DE GEOLOGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**A ECONOMIA MINERAL DE TERRAS RARAS: O CENÁRIO
MUNDIAL E NACIONAL PARA O NEODÍMIO.**

Apresentado por:

LARISSA DE ABREU LIMA

Orientador Prof. Dr. Estanislau Luczynski

**BELÉM, PA
JUNHO DE 2021**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIA
FACULDADE DE GEOLOGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**A ECONOMIA MINERAL DE TERRAS RARAS: O CENÁRIO
MUNDIAL E NACIONAL PARA O NEODÍMIO.**

Apresentado por:

LARISSA DE ABREU LIMA

Orientador Prof. Dr. Estanislau Luczynski

**BELÉM, PA
JUNHO DE 2021**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

- L732e Lima, Larissa de Abreu
A economia mineral de terras raras: o cenário mundial e nacional para o neodímio / Larissa de Abreu Lima. — 2021.
xii,45 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Estanislau Luczynski
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, 2021.
1. Terras Raras. 2. Neodímio. 3. Ímãs permanentes. 4. Reciclagem. 5. Neodímio-Ferro-Boro. I. Título.

CDD 553



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIA
FACULDADE DE GEOLOGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**A ECONOMIA MINERAL DE TERRAS RARAS: O CENÁRIO
MUNDIAL E NACIONAL PARA O NEODÍMIO.**

Apresentado por:

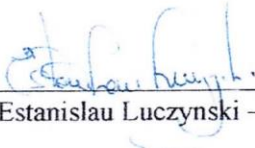
LARISSA DE ABREU LIMA

**Como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia,
área de concentração Economia Mineral, linha de pesquisa em Geologia.**


Data da defesa: 18/06/2021

Conceito: Excelente

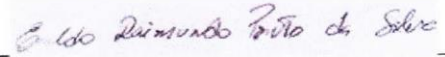
Banca Examinadora



Prof. Dr. Estanislau Luczynski – Orientador
(UFPA)



Prof. Dr. Raimundo Nonato do E. Santo dos Santos – Membro
interno
(UFPA)



Prof. – Dr. Evaldo Raimundo Pinto da Silva – Membro interno
(UFPA)

Dedico este trabalho a Deus, e a toda minha família, especialmente minha mãe, minha irmã, minha cunhada e minha tia pela ajuda fundamental para seguir em frente no mundo dos estudos e na vida acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre me deu forças e coragem pra vencer esta etapa da minha vida, à minha mãe Valéria e ao meu pai Rodolfo (em memória), por terem me dado o amor incondicional e terem fornecido o subsídio para o meu desenvolvimento pessoal e profissional. À minha irmã Etienne, por sempre me apoiar e me ajudar em todos os momentos. À minha cunhada Nayana que mesmo chegando recente na família, espalhou alegria nos meus momentos difíceis. À minha tia Conceição, por sempre me incentivar e ajudar em todos os sentidos ao longo da vida e pelos ensinamentos acabou se tornando minha segunda mãe e ao meu tio Augusto por todo amor e por todos os ensinamentos.

Agradeço à Universidade Federal do Pará (UFPA) por me acolher duas vezes na graduação, tanto na Química Bacharelado, quanto na Geologia. Ao Instituto de Geociências e à Faculdade de Geologia (Fageo) por disponibilizar o que há de melhor em corpo docente, com mestres e doutores, ótima estrutura física e o apoio financeiro fundamental às atividades de campo, políticas que só uma universidade pública pode oferecer gratuitamente aos seus alunos.

Ao Dr. Estanislau Luczynski, meu orientador, por ter acreditado no meu projeto, pela oportunidade de poder acrescentar informações na área de Economia Mineral. Pelos ensinamentos em sala de aula e pela oportunidade de crescer como pessoa. Obrigado por não ter medido esforços nas correções e por ter me ajudado durante a pandemia. À banca examinadora, pela contribuição para o aperfeiçoamento deste trabalho. À biblioteca do instituto de geociências, pelas correções e todo auxílio prestado.

Aos meus amigos, pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas. Com vocês, tudo se tornou mais leve e mais produtivo. O meu muito obrigado por cada conselho e por cada puxão de orelha, em especial as minhas amigas do reggae e da química.

Agradeço a todos que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho, de forma direta ou indiretamente. O meu muito obrigado.

“Se os árabes têm petróleo, a China tem terras raras”.

(Deng Xiaoping)

RESUMO

Os Terras Raras fazem parte de um grupo de elementos químicos que envolvem todos os elementos do grupo dos lantanídeos, além do ítrio e escândio. As propriedades químicas e físicas das Terras Raras realizam uma função fundamental na indústria de produtos de alta tecnologia, tornando a disponibilidade destes elementos de extrema importância para o avanço tecnológico, ligados à economia do país. Os Terras Raras são encontradas na monazita, na bastnasita, na xenotima e nas argilas de adsorção iônica. De acordo com a ocorrência de contração lantanídica, os Terras Raras possuem grande semelhança química e física, ocasionando dificuldade de separação e obtenção dos elementos lantanídeos na forma individual. A China se tornou a maior produtora de terras raras nas últimas décadas, chegando a atingir 97% da produção mundial. Muitos países pararam de produzir e ficaram dependentes da exportação chinesa. O Brasil mostra-se em níveis internacionais com um território rico desses elementos, expondo quantidades abundantes em reservas minerais em varias regiões do país. Porém, nota-se a falta de investimento na separação/purificação de elementos terras raras no país. O avanço de novas tecnologias auxilia no desenvolvimento de técnicas laboratoriais para exploração da cadeia mineralógica produtiva. O Brasil apresenta pouco conhecimento aplicado aos terras raras, fazendo com que não seja destaque para a exploração, separação e produção deste segmento. Um dos grandes desafios da cadeia produtiva de Terras Raras é a busca por novos métodos de extração economicamente viáveis e sem prejuízos ao meio ambiente. Esta revisão bibliográfica pretende abordar os aspectos mineralógicos e químicos do elemento neodímio no âmbito terras raras e discutir os desafios tecnológicos existentes nos processos de extração deste elemento, com foco no uso de tecnologias verdes para comporem a cadeia produtiva de Terras Raras.

Palavras – chave: Terras raras; Neodímio; ímãs permanentes; reciclagem.

ABSTRACT

Rare Earths are part of a group of chemical elements that involve all elements of the group of lanthanides, in addition to yttrium and scandium. The chemical and physical properties of Rare Earths play a fundamental role in the industry of high-tech products, making the availability of these elements of extreme importance for technological advancement, linked to the country's economy. Rare Earths are found in monazite, bastnasite, xenotime and ionic adsorption clays. According to the occurrence of lanthanide contraction, the Rare Lands have great chemical and physical similarity, causing difficulty in separating and obtaining the lanthanide elements in individual form. China has become the largest producer of rare earths in recent decades, reaching 97% of world production. Many countries stopped producing and became dependent on Chinese exports. Brazil shows itself at international levels with a territory rich in these elements, exposing abundant amounts in mineral reserves in various regions of the country. However, there is a lack of investment in the separation / purification of rare earth elements in the country. The advancement of new technologies assists in the development of laboratory techniques for exploring the mineralogical production chain. Brazil has little knowledge applied to rare earths, making it not worth mentioning for the exploration, separation and production of this segment. One of the great challenges of the Rare Lands production chain is the search for new economically viable extraction methods that do not harm the environment. This bibliographic review intends to address the mineralogical and chemical aspects of the neodymium element in the context of rare earths and discuss the technological challenges that exist in the extraction processes of this element, focusing on the use of green technologies to compose the Rare Earth production chain.

Keywords: Rare earth elements; Neodymium; permanent magnets; recycling.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1 - Posição dos ETR na tabela periódica de acordo com a IUPAC	1
Figura 2 - Estimativas das principais reservas de TR ao redor do mundo e respectivas porcentagens em termos do total mundial (132.000.000 ton)	6
Figura 3 - Percentuais de produção de TR por diferentes países.....	8
Figura 4 - Produção mundial de Terras Raras ao longo dos anos	8
Figura 5 - Produção de ETR em 2018 (dados em toneladas)	12
Figura 6 - Processos de recuperação da bastnasita	13
Figura 7 - Separação dos ETR a partir da bastnasita.....	15
Quadro 1 - Principais aplicações por elementos de Terra Rara.....	17
Figura 8 - Esquema resumido do processo de produção do ímã Nd-Fe-B	20
Figura 9 - Produção e previsão de produção global de ímãs a base de Nd-Fe-B	22
Figura 10 - Esquema de obtenção de ímãs a base de TR evidenciando as possíveis rotas de reciclagem.....	24
Figura 11 - Mapa do Brasil com as principais ocorrências de ETR.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do neodímio.	5
Tabela 2 - Proporção de óxidos do elemento neodímio (%).	16
Tabela 3 - Composição dos ímãs.	19
Tabela 4 - Produção mundial de ímãs permanentes em 2016.	21
Tabela 5 - Demanda mundial em 2015.	29
Tabela 6 - Distribuição de OTR nos principais depósitos de ETR chineses.	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAI - Argilas de Adsorção Iônica
CBMM – Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Dy – Disprósio
EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
ETRs – Elementos Terras Raras
ETRP – Elementos Terras Raras Pesados
EU – União Europeia
EUA – United States of America
INB – Indústrias Nucleares do Brasil
IUPAC – Union of Pure and Applied Chemistry
MIIT – Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação
Nd – Neodímio
NdFeB - Neodímio-Ferro-Boro
OTRs – Óxidos de Terra Raras
SmCo - Samário-Cobalto
TRs – Terras Raras
USGS – United States Geological Survey

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
EPÍGRAFE	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ix
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
2.1 OBJETIVO GERAL	4
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	4
3 NEODÍMIO	5
3.1 POTENCIAL DE PRODUÇÃO E RESERVAS	5
3.2 MINERAIS DE OCORRÊNCIA.....	8
3.3 PRODUÇÃO	10
3.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO.....	12
3.5 APLICAÇÕES.....	15
3.6 ÍMÃS DE NEODÍMIO-FERRO-BORO	18
3.6.1 Características	18
3.6.2 Processo de produção	19
3.7 RECICLAGEM	22
3.8 IMPACTOS AMBIENTAIS DA EXPLORAÇÃO.....	25
4 COMPORTAMENTO DO MERCADO MUNDIAL	28
4.1 A CHINA E A CONQUISTA DO MONOPÓLIO.....	31
5 CENÁRIO NACIONAL	35
6 CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS	40

Os Terras Raras exercem um papel importante na indústria de produtos de alta tecnologia devido as suas propriedades químicas e físicas sendo utilizados em uma variedade de aplicações tecnológicas e estando intimamente ligadas à economia do país. A necessidade por TRs vem se acentuando devido ao crescimento na demanda dos metais e óxidos para aplicações em alta tecnologia e aproveitamento das propriedades químicas, catalíticas, magnéticas, óticas e elétricas, além de aplicações em setores tradicionais como o de petróleo, têxteis, agricultura e metalúrgico. Os TRs se tornaram imprescindíveis para a indústria de alta tecnologia como carros híbridos, turbinas eólicas, telefone celular, ímãs permanentes, televisores de tela plana, lâmpadas fluorescentes compactas, lentes de alta refração, catalisadores de gases de escapamento, dentre outros.

Quanto aos Terras Raras, o presente projeto visa estudar o Neodímio que representa o segundo elemento Terra Rara com maior ocorrência na crosta terrestre, perdendo apenas para o Cério. Ambos são obtidos por um processo de troca iônica da areia monazítica, e através da eletrólise dos seus haletos. Uma das utilizações mais importantes é na construção dos ímãs, usados em diversos produtos como turbinas eólicas, motores elétricos, geradores e computadores. Os ímãs de neodímio são três vezes mais potentes que os ímãs comuns, e são considerados mais baratos de produzir, no entanto tornou-se um produto quase que cativo da China, pois ela concentra as maiores reservas globais de TRs. O Brasil tem dado passos importantes para nacionalizar a produção dos ímãs de neodímio e tornar-se, no futuro, um competidor internacional de peso em relação à obtenção do elemento Neodímio, porém há dificuldades, tais como: limitações nas técnicas, investimento de capital elevado, associação com elementos radioativos, falta de previsão do mercado e dados confiáveis dos preços.

No cenário mundial, a China tem se destacado na produção de Terras Raras e de ímãs feitos a partir delas, devido à grande concentração desses elementos em seu território e ao grande consumo interno de mais de 70% dos produtos com base TRs, além de contar com uma cadeia de abastecimentos com custos abaixo dos valores de mercado. Assim, ao invés de simplesmente exportar a matéria-prima, o país adota uma postura de desenvolvimento e fortalecimento de sua indústria de alta tecnologia (TSE 2011).

O Brasil por ser considerado a segunda maior reserva mundial de elementos Terras Raras (Balaram 2019) pode vir a se tornar um concorrente de peso da China, caso consiga ofertar um produto final a preços competitivos em relação aos que são praticados pela China. Com esse objetivo, em 2015 foi celebrada uma parceria de pesquisa com a Alemanha a respeito de Terras Raras e outros metais críticos, o que abre caminhos para incentivar o desenvolvimento tecnológico necessário e concretizar o objetivo nacional de agregar valor ao

minério nacional e aprimorar tecnologias competitivas e sustentáveis. Um dos projetos em execução é o “super ímã verde” para a geração de energia eólica com base em preceitos ambientais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a participação e importância do Neodímio no âmbito dos elementos terras raras em suas diferentes aplicações na indústria e economia mundial.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- a) Identificar as reservas e projetos de exploração de Neodímio no Brasil e no Mundo.
- b) Discutir a participação do Brasil como produtor de Neodímio.
- c) Analisar a política econômica nacional do Neodímio e o comportamento do mercado mundial, em termos de oferta, preço e novas reservas, inseridos numa política nacional de TRs.
- d) Avaliar o processo produtivo do Neodímio e os impactos socioambientais.

3 NEODÍMIO

O Neodímio é considerado um elemento químico de transição interna, situado na família dos lantanídeos, no sexto período da tabela periódica, é um metal componente dos chamados de terras raras e que apresenta características similares a do praseodímio. No entanto, já foi confundido com o praseodímio, pois ambos ocorrem ao didímio, que é um mineral encontrado na monazita e bastnasita. Em sua forma metálica apresenta aspecto prateado brilhoso, porém reage instantaneamente com o oxigênio atmosférico, gerando óxido de neodímio.

O elemento Neodímio foi descoberto quando ocorreu a extração do didímio no qual se observou que se tratava de dois elementos químicos. Somente no ano de 1885, o químico austríaco Welsbach, após observar que os sais dos dois elementos apresentavam cores distintas descobriu o praseodímio e conseqüentemente o Neodímio por meio de análises espectroscópicas. O nome do elemento foi criado das palavras gregas “*neos*” que significa novo e “*dimyos*” que significa gêmeos por apresentar características semelhantes à do neodímio e estarem presentes em um mesmo minério. Na natureza, o neodímio não ocorre no estado elementar e nem individualmente, apenas combinado com os outros elementos terras raras (Munchen 2016). Na tabela 1 observa-se as propriedades do Neodímio.

Tabela 1 - Propriedades do neodímio.

	Neodímio
Símbolo	Nd
Nº. Atômico	60
Massa Atômica (g/mol)	144,24
Densidade (g/cm³)*	7,008
Temp. Fusão (°C)	1021
Temp. Ebulição (°C)	3068

Fonte: Adaptada de Gupta & Krishnamurthy (2005). * a 24 °C

3.1 POTENCIAL DE PRODUÇÃO E RESERVAS

Os elementos terras-raras (ETR) geralmente ocorrem associados a outros, tais como tório, urânio, ferro, nióbio, estanho, dentre outros. Podem ser produzidos como coprodutos ou subprodutos e chegam a concentrações que variam de 10 a 300 ppm. Os elementos considerados mais leves, como lantânio, cério, praseodímio e neodímio, são encontrados com maior facilidade e em maiores concentrações. No entanto, os TRs leves representam mais de

80% do total de terras-raras presentes dos depósitos. Já os elementos mais pesados, que vão do gadolínio ao lutécio, e o ítrio são considerados raros devido a dificuldade da sua separação (já que ocorrem em vários minérios de composições distintas), são menos abundantes e conseqüentemente mais demandados. Estima-se que existam em torno mais de duzentas fases minerais que apresentam em sua composição algum percentual de TRs, porém apenas alguns indicam concentrações relevantes para justificar sua exploração. Dentre eles, podem ser citadas a monazita, a bastnasita, a xenotima, e as argilas de adsorção iônica (AAI) (McLellan *et al.* 2014, Zhang *et al.* 2015). Dos minerais portadores de TRs, a monazita e a bastnasita são conhecidas fontes de TRs leves, enquanto que a xenotima e as AAI são as principais fontes de TRs pesadas (Santos & Ribeiro 2014, Ramalho *et al.* 2016).

Os principais depósitos de bastnasita estão situados na China e nos Estados Unidos, o que gera uma concentração de terras-raras. Já a monazita corresponde a segunda maior concentração de TRs, com seus principais depósitos localizados na África do Sul, China, Austrália, Brasil, Índia e Malásia. Por outro lado, a xenotima é encontrada nos Estados Unidos, Madagascar, Noruega e Brasil, e por fim as argilas de adsorção iônica condutora de Terras Raras que são consideradas as principais fontes de elementos TR pesados estão situadas principalmente na China. Todavia, existem diversas preocupações quanto à monazita, devido a sua associação com minerais radioativos como o urânio e tório, o que torna os custos de armazenamento elevados, devido a isso, países como os EUA não consideram a monazita como fonte de terras raras (Humphries 2011).

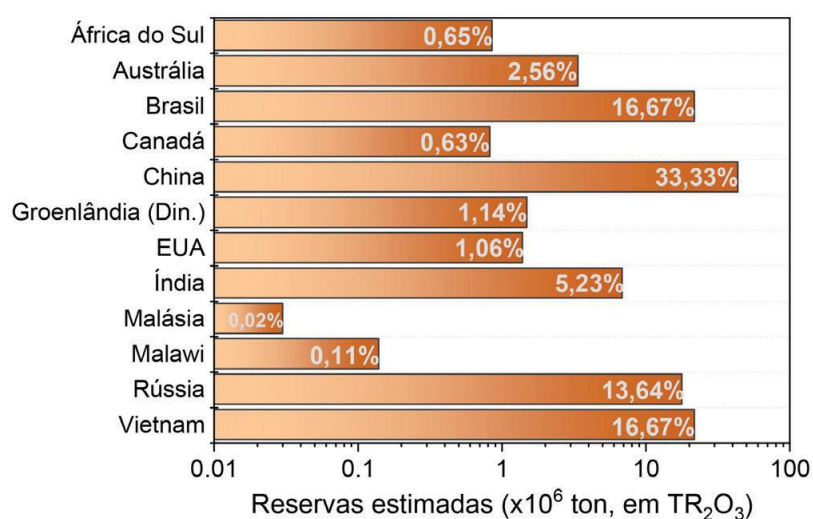


Figura 2 - Estimativas das principais reservas de TR ao redor do mundo e respectivas porcentagens em termos do total mundial (132.000.000 ton).

Fonte: (Balaram 2019).

Atualmente, existem mais de 100 milhões de toneladas de reservas de óxidos de Terras Raras distribuídas em 30 países (USGS 2015). Entretanto, a China é responsável pela produção de 90% das matérias-primas que contém os elementos TRs e 85% dos óxidos de TRs (OTRs), o que equivaleu à produção de 122.220 toneladas de OTRs em 2016. O restante da produção global de TRs é distribuído entre Austrália (10%), Malásia, Brasil, Índia, Rússia e Vietnã (Zhou *et al.* 2017). No entanto, a taxa de crescimento anual na demanda global de TRs tende aumentar gradativamente devido ao desenvolvimento de novas tecnologias que impulsionam o mercado de energia renovável.

Ainda a respeito da China, existem depósitos de alto teor de Terras-Raras em Bayan Obo, na Mongólia Interior, onde ocorre grande parte da produção, e outros depósitos de baixo teor no Sul da China, que são a principal fonte de elementos TRs pesados (Mariano 2010). No restante do mundo, há outras áreas consideradas atrativas para o desenvolvimento da produção que incluem o lago Thor, no Canadá; Karonga, no Burundi; e Wigu Hill, no sudoeste da Tanzânia.

Sob o aspecto histórico, o Brasil ganhou destaque em 1915 quando se tornou o maior fornecedor mundial de monazita obtida das areias do litoral do norte do Rio de Janeiro até o sul da Bahia. Porém, em 1945, o primeiro lugar foi assumido pela Índia. Posteriormente, os Estados Unidos comandaram as exportações de TRs por 20 anos, sendo a extração feita em Mountain Pass, Califórnia. Na década de 80, os Estados Unidos atingiram cerca de 20 mil t/ano de OTRs. Contudo, a partir da década de 90, quando ocorreu o domínio da China, se deu o abandono da mineração de TRs pelos Estados Unidos e apenas a empresa Molycorp continuou produzindo óxidos de neodímio, praseodímio e lantânio, a partir dos estoques de Mountain Pass, para processamento por outras empresas fora do território norte-americano. Entretanto após o choque de preços imposto pela China em 2011, o cenário é de retomada da produção no Brasil e em todo o mundo (Senado Federal 2013). Recentemente o Brasil passou a ser a 2ª maior reserva mundial de TRs com a incorporação de expressivas reservas em Minas Gerais (MG) e Goiás (GO) detendo, ao final de 2012, 16% do total mundial.

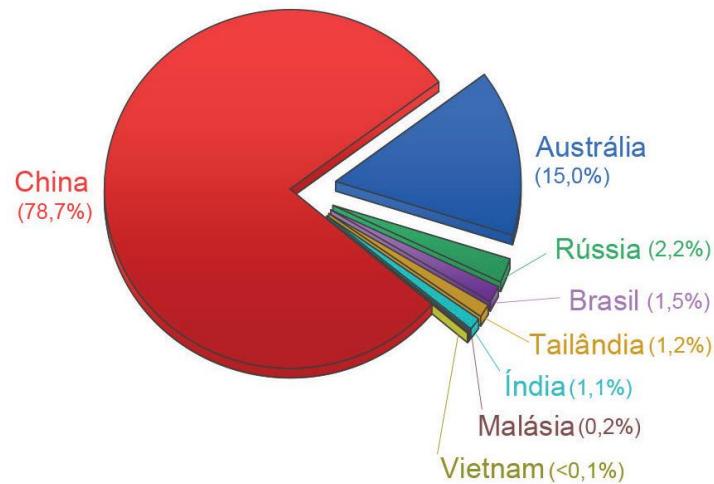


Figura 3 - Percentuais de produção de TR por diferentes países.
Fonte: (Balaram 2019).

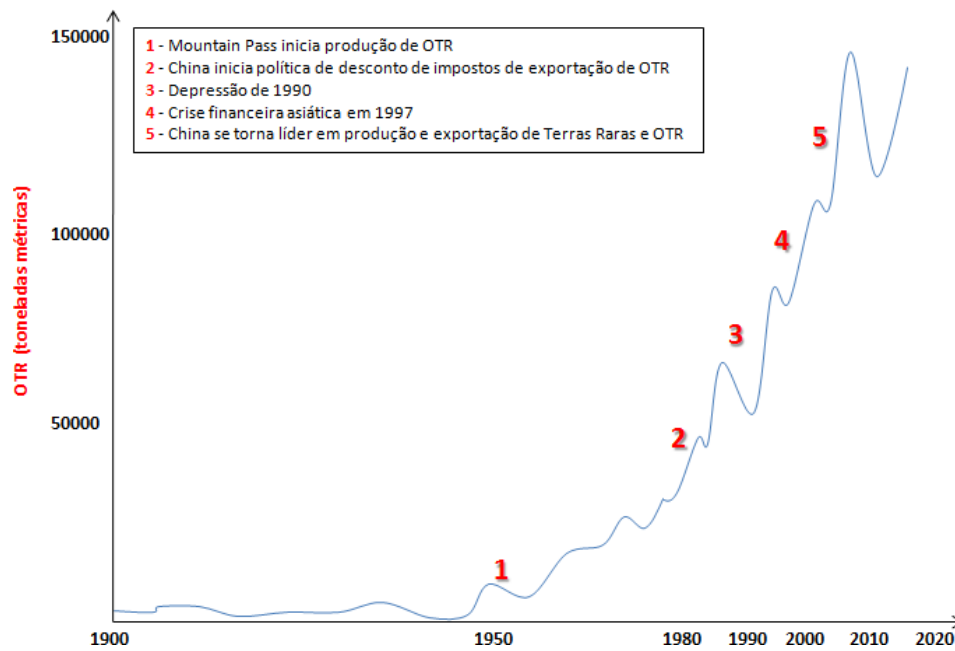


Figura 4 - Produção mundial de Terras Raras ao longo dos anos.
Fonte: (Zhou *et al.* 2017).

3.2 MINERAIS DE OCORRÊNCIA

Os Terras Raras não ocorrem como metais elementares nativos na natureza, mas sim como parte da química do mineral hospedeiro. Desse modo, os minerais devem ser rompidos quimicamente para que ocorra a recuperação de TRs (Gupta & Krishnamurthy 2005). Há o

registro de mais de 200 minerais com teor de óxidos de terras raras variando de 0,01% até 70%. No entanto, apesar desta grande quantidade, 95% dos elementos Terras Raras ocorrem concentrados em apenas três minerais: bastnasita, monazita e xenotímio. O elemento neodímio é identificado e explorado principalmente da bastnasita e, em pequena escala, da monazita.

A bastnasita é um mineral formado pela combinação de fluoretos e carbonatos (Rocio *et al.* 2012), com fórmula química $(TR)(CO_3)F$, no qual o elemento TR é representado por cério, lantânio, praseodímio e neodímio, com aproximadamente 70% de OTR no mineral. Sua cor é geralmente castanho claro, podendo alternar para amarelo, amarelo avermelhado e castanho avermelhado. A bastnasita ocorre em uma variedade de rochas ígneas, como carbonatitos, depósitos em veios, rochas metamórficas de contato e pegmatitos (Gupta & Krishnamurthy 2005, Vonken 2016). A quantidade de neodímio presente na bastnasita varia em função do depósito explorado. Por exemplo, a bastnasita explorada em Mountain Pass (EUA) possui 11,7% de óxido de neodímio, enquanto a bastnasita de Bayan Obo (China) possui 18,5% (USGS 2014), por não conter tório e urânio, a bastnasita substitui a monazita como fonte de ETRs leves.

Já a monazita é um ortofosfato com predomínios de TRs leves, com densidade entre 4,6 e 5,4, dureza entre 5,0 e 5,5 na escala de Mohs e apresenta lustro resinoso. Sua cor é geralmente marrom, variando de amarela a avermelhada, podendo ser esverdeada ou quase branca (Abrão 1994). A predominância de TRs leves é devido a menor temperatura de cristalização (Usepa 2012). Apresenta fórmula química $(Ce, La, Nd, Th)PO_4$, com aproximadamente 70% de OTRs, em sua composição podem ser encontrados elementos radioativos, em torno de 0,1%-30% de tório, e até 1,5% de urânio, sendo tais elementos responsáveis por determinar propriedades magnéticas, catalíticas e elétricas a alguns óxidos (Abrão 1994). Além desses elementos, ocorrem quantidades moderadas de ferro, alumínio, cálcio, magnésio, sílica, titânio e zircônio (Zini 2010). A monazita do Brasil possui em torno de 18,5% de óxido de neodímio em sua composição (Gupta & Krishnamurthy 2005). A composição média da monazita brasileira ocorre geralmente na forma de areias, incluindo quantidades variáveis de minerais acessórios como rutilo (TiO_2), ilmenita ($(Fe,Mn,Mg)TiO_3$) e zirconita ($(Zr,TR)SiO_4$), o elemento tório ocorre em porcentagens de 5% e o urânio em quantidades pequenas, podendo atingir no máximo 1,5% (Grupta & Krishnamurthy 2005).

A monazita é um dos minerais de TR mais importantes devido à sua abundância e teor. Os elementos Terras Raras são obtidos como subproduto da mineração de areias com minerais pesados (depósitos tipo placers), no qual também são comumente explorados minerais de titânio e zircônio. Devido à monazita apresentar certo grau de magnetismo, os minerais

condutores são posteriormente separados por meios magnéticos (Antoniassi 2017). Os teores de ETR encontrados na monazita oscilam de acordo com a formação do mineral, assim como os teores de tório e urânio quando encontrados. Esses elementos radioativos são capazes de indicar um desafio na exploração devido às regras do manuseio, depósito e licenciamento ambiental. Em compensação conseguem ser aproveitados e produzidos como coproduto ou subproduto, agregando mais a valor a exploração (Weber & Reisman 2012).

Do início do século XX até a década de 1960, a monazita se tornou o mineral mais explorado para obtenção de TRs, em um período que ficou conhecido como a “Era da Monazita” (USGS 2002). Todavia, a exploração de monazita em areias pesadas do litoral logo perdeu espaço e foi amenizada, devido à presença dos elementos radioativos (Zepf 2013). O período posterior a “Era da Monazita” ficou conhecido como a “Era de Mountain Pass” e permaneceu até os anos de 1980, quando os EUA se tornou o maior produtor de TR do mundo por causa da exploração do mineral de bastnasita na mina da Califórnia. Sua terceira e última fase, ficou conhecida como a “Era Chinesa”, que se iniciou na década de 1990, quando a China assumiu a colocação de maior produtor de TR do mundo, posição em que continua até os dias atuais (USGS 2002). A monazita pode ser encontrada em grandes quantidades na China, Índia, Brasil, EUA, Austrália, Malásia e África do Sul.

3.3 PRODUÇÃO

O Brasil foi o primeiro grande fornecedor dos ETR. A partir de 1886, iniciou-se a exploração das areias monazíticas, localizadas nas praias de Cumuruxatiba, Bahia para atender a demanda e continuou sendo o maior produtor mundial de ETRs até 1915 e desde então, passou a alternar essa posição com a Índia durante 45 anos. O surgimento dos EUA no comércio internacional quebra um pouco esse domínio, mas ainda assim, em 1995 o Brasil conseguiu produzir 110 toneladas de óxidos. A partir de 1960, a principal fonte de elementos terra raras era do depósito carbonatítico de Mountain Pass, EUA (Chakhmouradian & Wall 2012, p. 238 in Lima 2017). A China iniciou a produção de ETR ao final da década de 1970, e em pouco tempo se tornou líder do mercado mundial. Por outro lado, devido aos problemas ambientais referentes à deposição do rejeito (rico em tório) e a concorrência chinesa, a mina de Mountain Pass fechou em 2002. A China tornou-se, então, responsável por 95% do suprimento global de ETRs (USGS 2015), atualmente esse percentual é um pouco menor, mas a China ainda continua liderando o mercado e sua posição referente à concentração, mineração e a

cadeia produtiva dos ETR faz parte de estratégias atribuída ao líder do Partido Comunista Deng Xiaoping, que, em 1992 teria dito: “Se o Oriente Médio conta com petróleo, nós contamos com Elementos Terras Raras”. China, Estados Unidos, a antiga União Soviética, Austrália, Índia, Brasil e Malásia têm sido os principais países produtores de terras raras com a África do Sul, Canadá, Tailândia, Sri Lanka, Madagascar, e Zaire contribuindo em menores quantidades (Gupta & Krishnamurthy 2005).

O elemento neodímio, assim como os outros terras raras, apresenta uma grande variabilidade nos números de produção, principalmente porque a maior parte de sua oferta encontrar-se em solo chinês. Em 2005, os dados apontam uma produção de óxido de neodímio em 17.904 t, em 2007/2008 houve um aumento na produção atingindo 21.141 t. Já em 2010, o crescimento da produção foi de 22.256 t (Zepf 2013). Apesar da China ainda dominar o mercado, alguns países investiram consideravelmente na reabertura de suas minas adequando-se às legislações ambientais atuais.

Nos projetos atuais de TRs no Brasil, é importante destacar o pioneirismo e vanguarda da CBMM, que conta com um projeto piloto em operação. Além de ocorrências e reservas já observadas, pode-se ainda citar a possibilidade de identificar elementos de TRs como subprodutos em vários projetos em produção, através do reaproveitamento de barragens de rejeito, da reciclagem e de pilhas de estéril seletivas. Os principais projetos brasileiros em andamento são: CBMM (Araxá/MG); Serra Verde (Minaçu/GO); Pitinga/Mineração Taboca (Presidente Figueiredo/AM); Anglo American (Catalão/GO); Primestar Mineração (Projeto Morro do Ferro/MG); MbAC (ativos minerários em Araxá/MG); Placers (areia monazítica – diversos no Brasil); Seis Lagos (SGB/CPRM); Rejeitos da INB em Caldas/MG e Mineração Mata Azul (Tocantins) (Heider 2018). Muitos dos projetos para exploração e processamento destes metais em diversos países que possuem as jazidas registram dificuldades encontradas, tais como, experiência técnica limitada, investimento elevado de capital, associação com elementos radioativos, dados confiáveis dos preços e a falta de previsão do mercado.

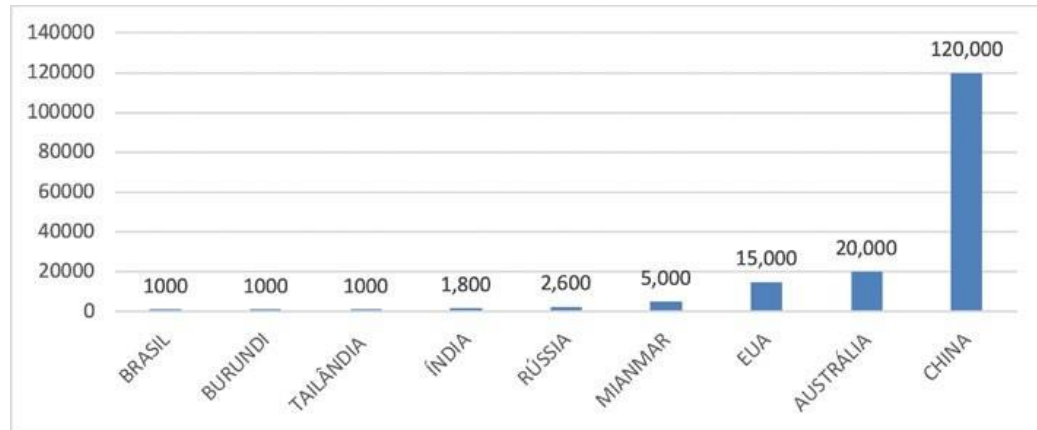


Figura 5 - Produção de ETR em 2018 (dados em toneladas).
Fonte: Adaptada de (USGS 2019).

3.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO

O mineral da bastnasita tem se destacado no processamento do neodímio, pois não apresenta elementos radioativos na sua composição (tório e urânio), o que reduz os custos de armazenamento em relação à monazita, porém os depósitos estão concentrados na China e nos EUA. O processo para obtenção do neodímio, a partir da bastnasita, envolve quatro etapas: extração, beneficiamento físico, tratamento químico e o processo de separação dos elementos entre si. A figura 6 apresenta o fluxograma resumido do processo de recuperação da bastnasita na empresa Molycorp, em Mountain Pass, nos Estados Unidos (Gupta & Krishnamurthy 2005).

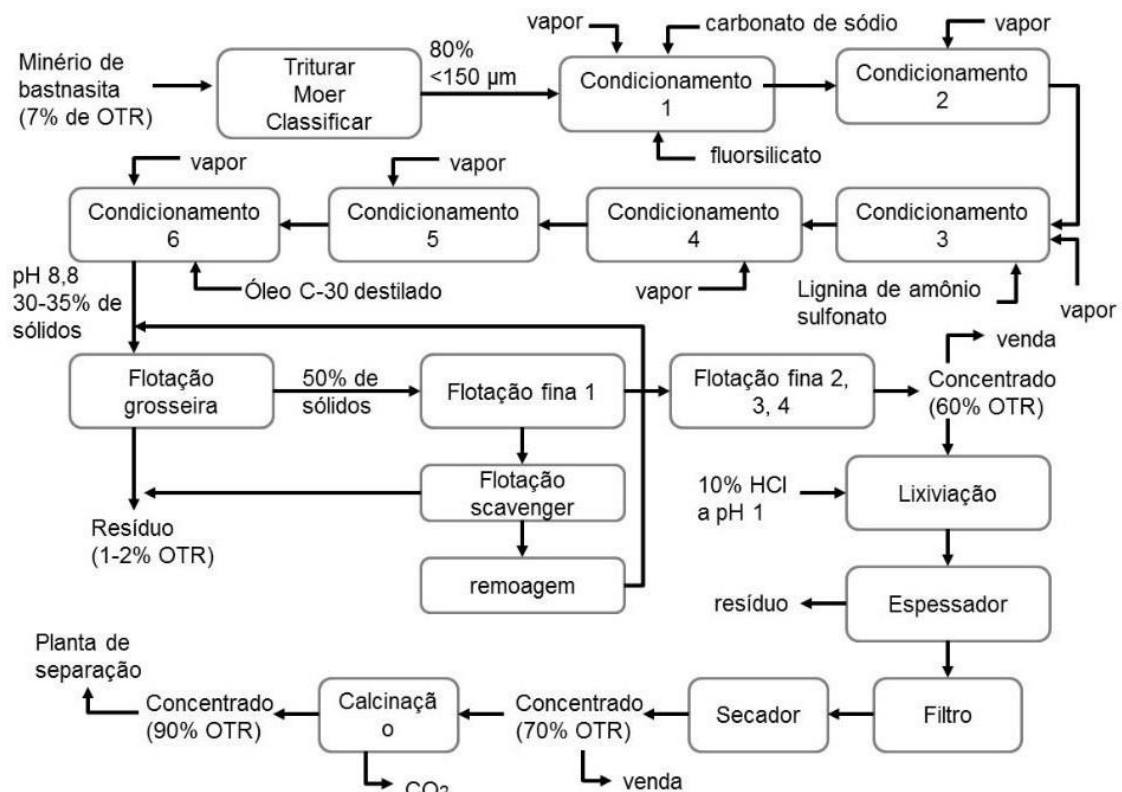


Figura 6 - Processos de recuperação da bastnasita.
 Fonte: Adaptada de (Gupta & Krishnamurthy 2005).

Inicialmente, o minério da bastnasita é triturado e organizado em forma de pilhas de mistura para processamento em moinho de bolas para obtenção de partículas de 150 mesh. Em seguida, ocorrem seis diferentes análises de condicionamento de acordo com a sua composição e depois, a flotação fina. Posteriormente, a realização dos condicionamentos acontece em tanques grandes envolvendo adição de vapor (aquecendo de 70 °C a 90 °C) e de reagentes em cada etapa, com duração em torno de 2h. Na etapa inicial, a massa formada entre minério e vapor ganha adição de carbonato de sódio e fluorsilicato de sódio. Depois, o próximo condicionamento adiciona apenas vapor. Na terceira etapa, lignina de amônio sulfonato é acrescentada na presença de vapor. Na quarta etapa, a massa recebe apenas vapor, na quinta etapa é tratada com vapor e óleo C-30 destilado, e na sexta etapa novamente recebe apenas vapor. O resultado das seis etapas, que inclui 30-35% de sólidos, é conduzido a um processo de flotação exigente, no qual é feito em doze células de flotação, cada uma com uma capacidade de 1700 litros. A flotação exigente contém em torno de 1-2% do rejeito e o concentrado e 30%

de óxidos de terras raras. Posterior à limpeza, o concentrado final do circuito de flotação é espessado, filtrado e seco, obtendo 60% óxidos de terras raras (Gupta & Krishnamurthy 2005).

A técnica de separação dos Terras Raras a partir da mistura concentrada formada posteriormente ao beneficiamento se baseia-se no princípio das curtas diferenças de basicidade, no qual inclui a solubilidade dos sais, a hidrólise de íons e a formação de espécies complexas, tais propriedades compõem a base de procedimentos de divisão por precipitação fracionada, troca iônica, extração com solventes e cristalização fracionada. A figura 7 mostra o fluxograma da divisão da separação por meio de extração por solventes representado na empresa Molycorp, EUA (Habashi 2013).

A semelhança química dos ETR dificulta o processo de separação. Apesar das técnicas de cristalização fracionária e de troca iônica serem usadas para separar as pequenas quantidades, a separação utilizada é a de extração líquido-líquido com solventes. Tal processo consiste na adição de um solvente, produzido por mistura de compostos orgânicos, em solução aquosa obtendo os ETR em uma série de células de mistura/decantação que possibilita o fracionamento repetitivo durante um processo contínuo. Posteriormente, a precipitação e secagem, compostos específicos de ETR com purezas superiores a 99,99% podem ser formados, como por exemplo, hidróxidos, carbonatos e oxalatos (Castor & Hedrick 2006). Após, os elementos separados são refinados e modificados em óxidos via redução e outros procedimentos.

Para os minérios com baixo teor, esses métodos tradicionais geralmente necessitam de uma maior demanda de energia para gerar altas temperaturas ou de maior quantidade de reagentes químicos, o que conseqüentemente aumenta o custo do processo e a geração de resíduos (Barmettler *et al.* 2016). Portanto, existe a necessidade de descobrir novas metodologias alternativas de extração de TRs a partir destes minerais.

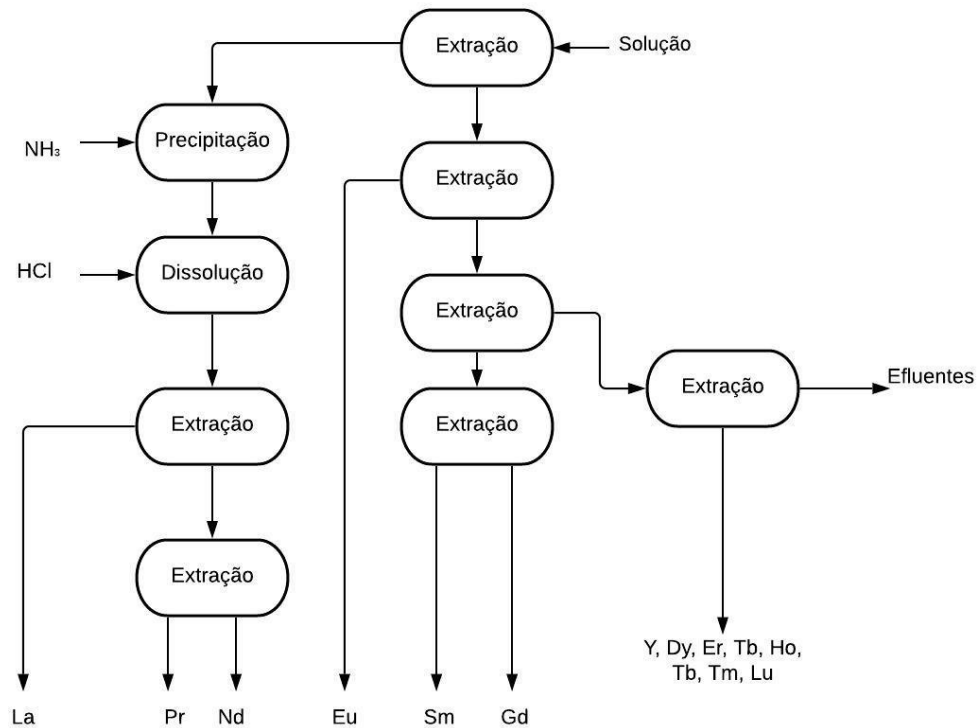


Figura 7 - Separação dos ETR a partir da bastnasita.
 Fonte: Adaptada de (Gupta & Krishnamurthy 2005).

3.5 APLICAÇÕES

A procura pelas TRs tem escalado ao longo do tempo devido ao aumento da demanda dos metais e óxidos de grande pureza para investimentos em alta tecnologia. Suas primeiras aplicações ocorreram em 1883 com a evolução da iluminação a gás, quando as camisas dos lampiões eram produzidas de óxidos e zircônio. Na atualidade, os TRs são utilizados em produtos industriais de alta tecnologia, tais como na metalurgia, na eletrônica, como agentes catalíticos, dentre outros (Loureiro 1994).

A partir de 2010, a China tornou-se líder nos recursos mundiais em TRs, fazendo novas restrições comerciais, como por exemplo, limitando suas exportações para os demais países, com no máximo de 35 mil toneladas anuais de OTRs, tal consequência levou o governo e a indústria mineral mundial a buscar novas fontes para suprir seu consumo (Antoniassi 2017).

Os TRs são muito demandados na indústria de energia, acontecendo uma busca contínua por esses elementos. Com uma finalidade ambiental comprovada, as chamadas de 'indústrias verdes' procuram elementos Terras Raras para o desenvolvimento de carros

híbridos, motores elétricos das turbinas eólicas, tornando-as um bem material crítico e impulsionado um aumento de consumo (Loureiro & Santos 2013). Quanto às principais aplicações do Neodímio, 88% do seu total é direcionada para produção do ímã permanente de neodímio-ferro-boro e os outros 12% em catalisadores da indústria petroquímica, ligas metálicas específicas, aditivos para vidros, indústria de cerâmicos, e outros (Sprecher & Kramer 2014). O óxido de neodímio é considerado a matéria prima para diversos setores industriais, no qual se aplica o neodímio. Os catalisadores são usados na indústria petroquímica na fase do craqueamento do petróleo e apresentam concentração de 1,5 a 5% em peso de óxido de Neodímio e outros óxidos de Terras Raras (München 2016).

Tabela 2 - Proporção de óxidos do elemento neodímio (%).

Fonte Primária	País	Localização	Nd
Bastanasita	China	Bayan Obo, InnerMongólia	18,50
		Dechang, Sichuan	13,06
		Maoniuping, Sichuan	15,18
		Weishan, Shandong	10,90
	EUA	Mountain Pass, CA	11,70
Loparita	Rússia	Revda, Murmansk	15,00
Monazita	Austrália	Mount Weld, Central	18,13
	China	Nangang, Guangdong	17,00
	Índia	Manavalakurichi	20,00
Argilas de Adsorção Iônica	China	Xunwu, Jiangxi	30,18
		Xinfeng, Jiangxi	17,55
		Longnan, Jiangxi	3,47
Xenotímio	China	Southeast, Guangdong	3,50

Fonte: Adaptada de USGS-MYB (2014).

Lantânio	<ul style="list-style-type: none"> • Baterias para carros híbridos • Lentes óticas • Craqueamento de petróleo 	Európio	<ul style="list-style-type: none"> • Luminóforos
	<ul style="list-style-type: none"> • Células de combustível • Luminóforos • Ligas metálicas 	Gadolínio	<ul style="list-style-type: none"> • Ímãs • Lasers • Equipamentos de ressonância magnética
		Térbio	<ul style="list-style-type: none"> • Luminóforos • Materiais magnetostrictivos
Cério	<ul style="list-style-type: none"> • Catalisadores de automóveis • Craqueamento de petróleo • Ligas metálicas • Aditivo para vidros • Luminóforos • Polimento de vidros, lentes e semicondutores • Proteção contra corrosão 	Disprósio	<ul style="list-style-type: none"> • Ímãs • Lasers • Luminóforos
		Hólmio	<ul style="list-style-type: none"> • Lasers
		Érbio	<ul style="list-style-type: none"> • Fibras óticas • Lasers
		Túlio	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamentos de raio-X • Lasers
		Itérbio	<ul style="list-style-type: none"> • Lentes óticas • Sensores de pressão
Praseodímio	<ul style="list-style-type: none"> • Ímãs • Fibras óticas • Corantes 	Lutécio	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamentos de PET scan
Neodímio	<ul style="list-style-type: none"> • Ímãs para motores, HDD's, turbinas eólicas, autôfalantes • Lasers 	Ítrio	<ul style="list-style-type: none"> • Supercondutores • Lasers
Promécio	<ul style="list-style-type: none"> • Baterias nucleares • Lasers 	Escândio	<ul style="list-style-type: none"> • Ligas de alto desempenho • Lasers • Luminóforos • Cerâmicas
Samário	<ul style="list-style-type: none"> • Ímãs • Corantes • Luminóforos 		

Quadro 1 - Principais aplicações por elementos de terra rara.

Fonte: Adaptada de Gupta e Krishnamurthy (2005), Hurst (2010), Gschneidner Jr (2011).

Devido ao Neodímio apresentar uma banda de absorção em 580 nm, que é próxima do nível máximo de sensibilidade do olho humano, esse elemento é importante componente para lentes de proteção para óculos de solda, sendo utilizado na coloração de vidro servindo tanto para remover a cor verde causada pelo Fe contaminante como para conferir cores que variam desde o violeta puro, vinho até ao cinza claro. Alguns destes vidros são usados por astrônomos para calibrar dispositivos denominados espectrômetros e filtros de radiação infravermelha. Os lasers de ítrio-alumínio-granada (Nd:YAG) se valem de Neodímio devido a sua ótima absorção e comprimentos de onda de emissão, sendo utilizados em diversas aplicações médicas, perfurações, soldagens e processamento de material.

Outra aplicação consiste em acrescentar elementos Terras Raras em baixas quantidades ao ferro, aço, alumínio e outras ligas para aprimorar as propriedades físicas. No entanto, o Neodímio é adicionado em proporção atômica de 0-5% em ligas de pequena densidade abrangendo em até 90% de alumínio e 0-9% de metais de transição, podendo gerar grandes resistências à tração e boa ductilidade se tornando importante para investimentos aeroespaciais (Gupta & Krishnamurthy 2005). Incorporado em muitas formulações de titanato de bário, o Neodímio é manuseado como revestimentos dielétricos e em capacitores de camadas múltiplas fundamentais para equipamentos eletrônicos.

Por outro lado, os ímãs permanentes contendo Neodímio, gadolínio, disprósio e itérbio são utilizados em diversos componentes elétricos e eletrônicos e nos modernos geradores para turbinas eólicas. O uso das TR é essencial em dois materiais para ímãs permanentes: samário-cobalto (SmCo) e neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B). Os ímãs SmCo apresentam resistência magnética em altas temperaturas e são ideais para tecnologias militares, tais como mísseis guiados de precisão, bombas inteligentes e aeronaves. Já os ímãs Nd-Fe-B são considerados os ímãs permanentes mais fortes do mundo, porém menos custosos que os ímãs de SmCo e são empregados em produtos como alto-falantes, disco rígido de computadores, fones de ouvido, acionadores de partidas de motores e sensores. Os ímãs são componentes fundamentais para as novas tecnologias que buscam a descarbonização da economia, como os carros híbridos e elétricos, as turbinas eólicas, entre outros (Klinger 2015). Sais de Nd são usados como corantes de esmaltes.

No presente, tanto órgãos governamentais quanto mineradoras vêm conduzindo estudos de caracterização tecnológica para melhor assimilação das características intrínsecas dos minerais de interesse, buscando assim introduzir seus conhecimentos sobre os recursos minerais associados aos TRs (Antoniassi 2017).

3.6 ÍMÃS DE NEODÍMIO-FERRO-BORO

3.6.1 Características

Os ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B) foram criados em 1983 e fazem parte da terceira geração de ímãs permanentes. A primeira geração é constituída por ímãs de samário e cobalto com proporção atômica 1:5 (SmCo₅). Na segunda geração, os ímãs sofreram alterações nas suas propriedades com proporção atômica 2:17 (Sm₂Co₁₇). Entretanto na década de 1960 houve um declínio na disponibilidade tanto de samário quanto do cobalto, o

que provocou uma elevação de preços. Com o aparecimento do ímã permanente de Neodímio, observou-se que este metal era mais abundante que o samário e de produção mais barata, além de apresentar melhores propriedades magnéticas. A principal mudança que caracterizou a terceira geração foi à estrutura cristalina, que passou de hexagonal e romboédrica para tetragonal (Pan 2013).

Os ímãs permanentes de Nd-Fe-B são formados por uma fase primária, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (ϕ), uma fase rica em boro de fração volumétrica pequena, NdFe_4B_4 (η), e uma fase rica em Neodímio na região de contorno de grão (Durrant 2014). Suas propriedades magnéticas são superiores, com saturação elevada de aproximadamente 16 kg e produto magnético máximo ente 40-50 MGO_e. Os ímãs de Nd-Fe-B indicam temperatura de Curie em torno de 312 °C, sendo considerados pouco resistentes a altas temperaturas (Herbst & Croat 1991). Também apresentam baixa tolerância à corrosão, por isto são cobertos por uma camada protetora de níquel.

Os ímãs de Nd-Fe-B incluem outros elementos químicos em sua composição, como os TRs praseodímio e disprósio com funções de aperfeiçoamento das propriedades magnéticas e do aumento da temperatura de Curie, respectivamente. Outro metal presente é o cobalto, que em alguns casos, aparece como complemento do ferro, porém devido ao custo elevado, é mantido em baixas concentrações (München 2016). Na tabela 3 observa-se a média das concentrações dos metais encontrados nos ímãs.

Tabela 3 - Composição dos ímãs.

Elemento	Nd	Pr	Dy	Fe	B	Co
Média (%)	25,30	3,83	2,66	64,56	0,97	2,42
Desvio Padrão (%)	3,79	2,94	1,67	4,38	0,13	2,01

Fonte: Adaptada de Stuhlpfarrer *et al.* (2015).

3.6.2 Processo de produção

O passo inicial para a produção dos ímãs Nd-Fe-B, é reduzir os óxidos para metais, conforme a Figura 8. Para isso, os OTR individuais são subordinados ao processo de eletrólise em sais fundidos de TR ou em líquido iônico (CGEE 2013). Posteriormente ao processo de redução, os metais TR não podem entrar em contato com o ar, para evitar sua oxidação. A elaboração das ligas é executada mediante fusão a vácuo, o que expande a complexidade e o

custo dos equipamentos utilizados. Os ETR metálicos também podem ser aplicados na indústria metalúrgica e na produção de ligas para baterias (Machacek & Fold 2014).

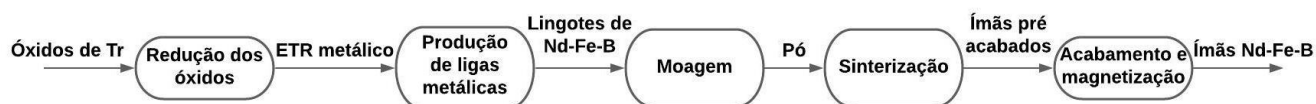


Figura 8 - Esquema resumido do processo de produção do ímã Nd-Fe-B.

Fonte: Adaptada de Wendhausen (2015).

A demanda pelo neodímio com cerca de 30% de massa em sua liga, é considerada a mais importante. Para adicionar ou substituir parte do Nd outros ETR podem ser aplicados como praseodímio (Pr), disprósio (Dy) e térbio (Tb), mas em quantidades menores (CGEE 2013). A ocorrência do boro (B) no ímã é de aproximadamente 1%. A adição de outros metais varia de acordo com o processo de produção e dos padrões desejados na sua aplicação final.

O Brasil pretende futuramente reproduzir em escala industrial ímãs sinterizados, no entanto, faltam recursos para esta reprodução em larga escala. Para produção, as ligas atravessam por uma moagem a jato para conseguir o tamanho de partícula necessário ao processo de sinterização (de 3 a 15 μm). O controle da atmosfera durante o processo é importante para evitar a oxidação do material, que pode afetar a qualidade do ímã (Wendhausen 2015).

Na próxima etapa, as partículas de pó são magneticamente alinhadas e então pressionadas de forma que seus eixos de magnetização sejam paralelos. À medida que estão compactadas, os ímãs são sinterizados em torno de 1.100°C em vácuo ou em atmosfera inerte para alcançar 95% da densidade teórica. Um tratamento térmico pós-sinterização, ocorre em torno de 650°C durante uma hora, aumentando a coercividade dos ímãs Nd-Fe-B (CGEE 2013).

Para evitar a corrosão, os ímãs são cobertos por uma camada metálica, podendo ser de níquel, estanho ou alumínio. Posteriormente são magnetizados até exibirem as propriedades esperadas para o material. A magnetização é efetuada por meio da exposição do ímã a um campo magnético externamente elevado, podendo ser gerado por outros ímãs permanentes ou até mesmo por corrente elétrica aplicada em uma bobina (CGEE 2013).

O Japão foi o segundo maior produtor de ímãs de Nd em 2013, com oferta em torno de 19%, perdendo apenas para a China (Neomag 2017). Para não se tornar dependente da China, o país vem investido em tecnologias menos demandantes de uso de ETR.

Utilizados em motores elétricos, os ímãs que ocorrem em altas temperaturas apresentam o elemento disprósio em pequenas quantidades, sendo empregados para aumentar a coercividade do ímã. No entanto, o Dy é um ETRP e sua maior produção fica situada na China. O uso dos ímãs em carros híbridos e elétricos são os que mais exigem o uso de Dy (7 a 8% em massa). Com um cenário em que a redução do uso de disprósio em ímãs (*low-Dy magnets*) permanentes Nd-Fe-B poderia diminuir sua demanda em 47%, em 2030, lançou-se um programa de redução e substituição de OTR e ETR, em que, os *low-Dy magnets* vêm sendo experimentados, porém no setor de automóveis a sua prática é mais limitado. Contudo, acredita-se que aos poucos o uso de *low-Dy magnets* aumentaria nos demais setores (Seo & Morimoto 2014).

Com o aumento na reciclagem de ímãs, a demanda de Dy seria reduzida em 6,3% em 2030. Este valor é baixo comparado ao outro cenário, pois a maioria dos produtos finais é exportada para América do Norte e Europa, o que pulverizaria o material reciclável. Entretanto, os ímãs com baixa concentração de disprósio dificultariam a recuperação desse elemento na reciclagem (Seo & Morimoto 2014).

Tabela 4 - Produção mundial de ímãs permanentes em 2016.

Tipo de ímã	Toneladas (x1000)	% por peso	Milhões de US\$	% por valor
NdFeB	90	13,5	12.200	61
Ferrite	565	85	6.780	33,9
Samário Cobalto (SmCo)	4	0,6	600	3
AlNiCo	6	0,9	420	2,1
TOTAL	665	100%	\$20.000	100%

Fonte: Benecki (2017).

A busca de substitutos do Neodímio em ímãs permanentes vem sendo um tema abordado há quase 20 anos, no entanto sem êxito. Embora a oferta seja suficiente para atender a demanda de produção de magnetos, porém sempre existe a busca de um material com custo mais barato. No entanto, esta substituição de parte do Nd por La-Ce, obtém resultados

favoráveis com um custo reduzido, já que os substitutos são de menor valor. A Tabela 4 exibe a quantidade de ímãs produzidos em 2016. Observa-se que os ímãs Nd-Fe-B representam 13,5% do total em massa, mesmo assim, são responsáveis por 61% do valor de mercado de ímãs (JIN 2016).

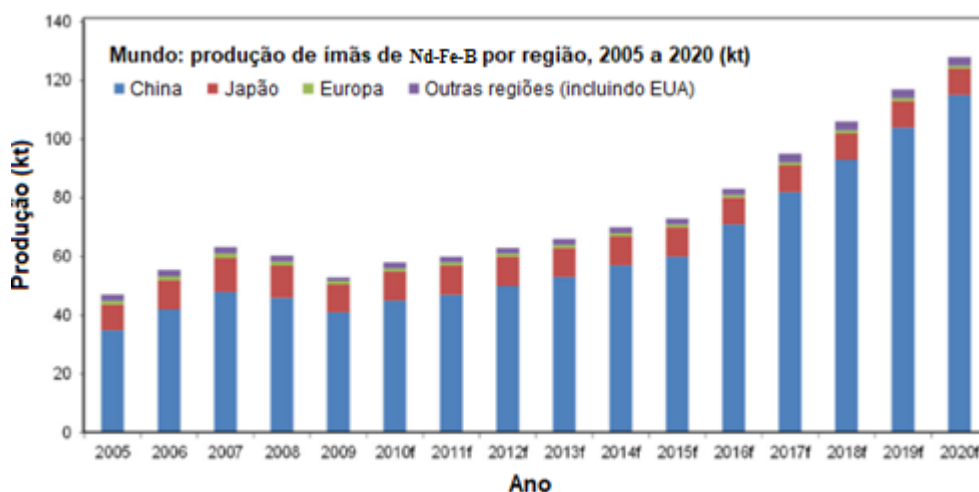


Figura 9 - Produção e previsão de produção global de ímãs a base de Nd-Fe-B.
Fonte: Adaptado de (YANG *et al.* 2017).

3.7 RECICLAGEM

A reciclagem dos ímãs é uma atividade estratégica devido ao alto valor agregado do produto e aos altos teores de Terras Raras contidos em sua composição química. Os ímãs à base de Nd-Fe-B são formados com algo em torno de 30 a 40% dos metais de TRs e 60 a 70% de outros elementos, tais como boro, ferro e alguns elementos de liga que podem ser modificados, de acordo com o fabricante. Além disso, segundo a temperatura, ambiente de aplicação e disponibilidade dos constituintes, a composição química do ímã pode ser alterada (Önal *et al.* 2017).

A reciclagem de ETR é vista como uma solução para países que não apresentam produção desses elementos, proporcionando, assim, o acesso. Os ETR são considerados críticos (de difíceis substituições nas aplicações da economia) por vários países, como EUA, Japão, Coreia do Sul, Reino Unido, União Europeia e Brasil, especialmente devido à concentração da produção e do conhecimento técnico na China (Golev *et al.* 2014).

Uma das principais dificuldades da reciclagem das TR, era a baixa quantidade dos elementos utilizados. O obstáculo da separação e extração dos ETR dos resíduos, junto com o preço baixo e o excedente da oferta também dificultava o crescimento da reciclagem. No entanto, com as incertezas quanto ao fornecimento por parte da China, os interesses na reciclagem têm aumentando gradativamente (Golev *et al.* 2014).

Com a semelhança dos custos para produção dos ETR, a modificação do preço é regida pelas curvas de oferta e demanda. Desse modo, os ETR mais abundantes como, o lantânio e o cério apresentam seu abastecimento estimado abaixo dos custos médios de produção. Contudo, os elementos com baixa disponibilização apresentam valores altos, ou seja, uma situação em que um aumento da procura por determinado elemento podendo provocar um excedente na oferta do outro.

Na reciclagem, os elementos de valor mais baixo são economicamente inviáveis, enquanto os de alto valor podem vir a se tornar um bom negócio (Golev *et al.* 2014). Atualmente, a reciclagem é efetuada em áreas no qual o resíduo mostra certa concentração de ETR, principalmente para os mais valorizados, como por exemplo, lâmpadas de fósforos, ímãs permanentes e baterias níquel metal hidreto (NiMH). A partir de 2013, a empresa japonesa Honda iniciou a reutilização de metais Terras Raras em baterias – NiMH. O processo de remoção desses metais envolve a eletrólise com sal fundido aos materiais das baterias e extrai 80% do conteúdo original da bateria. O grupo Hitachi tem desenvolvido um método pirometalúrgico que usa magnésio fundido no processo de extração de Nd e Dy, e considera esse método de menor impacto sobre o meio ambiente em comparação a outros convencionais porque consome menos energia elétrica e tem melhor rendimento de Dy (Tomohiko & Tomonori 2014). Na França, o Solvay Group reaproveita ímãs permanentes (Pr, Nd, Dy e Tb), baterias NiMH (La, Ce, Pr e Nd) e lâmpadas de fósforo (La, Ce, Eu, Y e Tb) (Binnemans *et al.* 2013).

Os processos de reciclagem podem ser divididos com base na origem do material a ser reciclado e quanto ao produto da reciclagem. Entretanto, a origem do material a ser reciclado pode ser diferenciada em duas categorias: reciclagem pré-consumidor e pós-consumidor. A reciclagem pré-consumo abrange a reciclagem de materiais antes de serem usados pelo consumidor, ou seja, resíduos e materiais rejeitados durante o processamento. A reciclagem pós-consumidor equivale em reciclar ímãs ao final de ciclo de vida, ou seja, após o uso dos consumidores.

Na reciclagem as três opções mais comuns aplicadas para ímãs de Nd-Fe-B são: reutilização direta, reciclagem indireta e reciclagem de liga ou de ímã para ímã. Na figura 10

observam-se as etapas de produção de ímãs à base de TR com base da mineração e os prováveis caminhos de reciclagem, devido aos materiais de entrada e saída do processo, que estão indicados pelas setas (Diehl *et al.* 2018).

As estratégias de reciclagem de ímãs que envolvem produtos do topo da pirâmide contêm alta importância econômica. No entanto, os produtos das estratégias de reciclagem possuem relevância econômica e ambiental uma vez que, quanto maior e mais longa a rota de reaproveitamento desde o ímã descartado até a produção de um ímã reciclado, maiores serão os custos e, conseqüentemente, os impactos ambientais.



Figura 10 - Esquema de obtenção de ímãs a base de TR evidenciando as possíveis rotas de reciclagem. Fonte: Adaptado de (Diehl *et al.* 2018).

A reutilização direta ocorre na utilização do ímã após submetê-lo a remagnetização, ou seja, posteriormente ao seu ciclo de vida. As inúmeras aplicações dos ímãs exigem critérios restritos, tais como, a composição química, formato, propriedades magnéticas e dimensões, com menor impacto ambiental, este método nem sempre é economicamente viável.

A reciclagem indireta é executada por processos hidrometalúrgicos que atuam na recuperação dos ETRs na forma de óxidos ou na forma metálica. Os referidos processos são complexos, com alto consumo de produtos químicos e de energia, além de possuírem uma elevada pegada ambiental (Walachowicz *et al.* 2014). Na atualidade, a reciclagem indireta de

sucata de ímãs já é realizada na China e é economicamente viável (Ahonen *et al.* 2015), como no caso da empresa japonesa Hitachi, que reaproveita 95% da sucata resultante de seu processo de fabricação.

A reciclagem de liga ímã para ímã utiliza resíduos resultantes de um ímã ou de etapas do processamento para obter ligas para produção do ímã permanente. Considerada uma possibilidade atrativa em termos de sustentabilidade, custo de matérias-primas e energia, visto que, é possível preservar as ligas magnéticas e manuseá-las diretamente para um novo circuito de produção de ímãs (Diehl *et al.* 2018).

O fornecimento de ETR recuperados na reciclagem poderia exibir uma parcela mais expressiva, entretanto, os custos de produção são elevados. Mesmo com a semelhança no processo de produção por minérios virgens, a reciclagem enfatiza elementos mais valorizados, impedindo, assim, que todos os elementos sejam extraídos. (Golev *et al.* 2014).

3.8 IMPACTOS AMBIENTAIS DA EXPLORAÇÃO

A produção de Terras Raras é voltada para a expansão de uma crescente variedade de tecnologias de ponta, abrangendo aditivos e equipamentos designados à minimização das emissões na indústria automotiva e em outros setores, além das tecnologias de energias renováveis. Na atualidade, as tecnologias de energia renovável correspondem a algo em torno de 20% do consumo mundial de ETR. No entanto, existe uma preocupação em relação ao processo produtivo dos ETR, uma vez que a alta demanda por esses metais resulta no aumento de produção e, conseqüentemente, maiores possibilidades de impactos ambientais, principalmente nas localidades e regiões próximas dos empreendimentos destinados ao seu aproveitamento.

Para entender os impactos na produção de TRs é necessário entender os tipos de depósitos existentes e os processos utilizados, ou seja, de qual minério as Terras Raras são extraídas e qual é a rota selecionada. Os ETR produzidos atualmente são, em sua maioria, provindos de depósitos associados a carbonatitos, mantendo uma diversidade de mais de 200 tipos de minérios que inclui ETR.

Na China, em Bayan Obo, Inner Mongólia, o seu mineral bruto contém uma concentração em torno de 0,04% em massa de tório enquanto o rejeito expõe 5%. O resíduo da produção é colocado em uma barragem de rejeitos, esta barragem fica próxima do Rio Amarelo (já degradado). A lagoa de rejeitos apresenta riscos tóxicos para os corpos hídricos, solo e ar,

que afetam diretamente as comunidades do entorno através de vazamentos, poeira e chuva ácida (Huang 2016).

A vila Dalahai situada próximo a essa barragem, é conhecida como “vilarejo da morte” devido às inúmeras mortes que ocorreram no período de 1999 a 2006 em decorrência de câncer de pulmão ou cerebral (Liu 2016). Mesmo assim, as pessoas que ainda residem no local, sofrem de doenças respiratórias, leucemia, osteoporose, doenças cardiovasculares, câncer de pulmão e de fígado.

Na cidade de Ganzhou, a mineração de TR de adsorção iônica, apresentou elevadas concentrações de sulfato e amônia nas águas subterrâneas do local com lixiviação *in situ*. Também mais de 100 deslizamentos de terra foram evidenciados, sendo a maioria atribuída a essa prática (Hurst 2010, Huang 2016).

As etapas de mineração, beneficiamento e separação utilizam grandes quantidades de água, energia e produtos químicos (Weber & Reisman 2012). Muitos depósitos estão relacionados a altas concentrações de elementos radioativos, de tal maneira que devem ser manuseados em locais específicos de acordo com a legislação.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) observou em 1991 os típicos fluxos de resíduos no processamento de Terras Raras e avaliou o potencial de substâncias perigosas. Foram identificados quatro fluxos de resíduos classificados como perigosos: os resíduos contendo chumbo, devido à toxicidade; os resíduos de solvente, devido à inflamabilidade; os resíduos de zinco contaminados com mercúrio, também devido à toxicidade; e os solventes brutos do processo de extração. A EPA também observou que os rejeitos normalmente continham partículas de alta área superficial, águas residuais e produtos químicos de processo, que as áreas estavam expostas a condições de intempéries e que os represamentos do material continham grande potencial para contaminar o solo, o ar, a superfície e até as águas subterrâneas (Silva 2018). Associados aos rejeitos de TR foram encontrados: radionuclídeos; metais associados de minério (por exemplo, alumínio, arsênio, bário, berílio, cádmio, cobre, chumbo, manganês, zinco); fluoretos; e poeiras fugitivas que, a partir dos depósitos de rejeitos, podem contaminar o solo e o ar circundante.

Contudo, se as medidas de proteção das águas subterrâneas não forem usadas corretamente, irá existir contaminação de recursos hídricos subterrâneos, por isso, a importância de projetos para o aproveitamento de ETR, processos de separação e disposição adequada para cada tipo de depósito conforme a rota tecnológica de aproveitamento estabelecida para a viabilidade do empreendimento.

Se o processo produtivo for realizado de acordo com as normas de controle ambiental, não existirá problemas de impactos ambientais relacionados a obtenção dos ETR, mas, caso contrário, grandes problemas virão, o que pode inviabilizar economicamente os projetos irregulares ou até provocar seu encerramento por infringirem as normas ambientais locais.

4 COMPORTAMENTO DO MERCADO MUNDIAL

As mudanças tecnológicas vivenciaram um rápido desenvolvimento nos últimos anos. Com as inovações, as indústrias vêm diversificando suas linhas de produtos e serviços. No ano de 2025 estima-se que o PIB global referente à tecnologia será da ordem de US\$ 36 trilhões. Entretanto, setores como, por exemplo, carros híbridos e elétricos, energias verdes (exemplo: energia eólica), ímãs permanentes de alto rendimento, supercondutores e luminóforos devem impulsionar o mercado de terras-raras (Ider 2014). Os ETR suprem um mercado global da ordem de R\$ 10 bilhões anuais e agregam valor a produtos que mobilizam mais de US\$ 5 trilhões (Schuessler 2014). No qual equivale a cerca de 6% do PIB global divulgados em 2016 (Statista 2017). Contudo, a falta desses elementos afetará economias, empresas e consumidores ao redor do mundo.

As maiores reservas mundiais são encontradas na China (36,7%), no Brasil, com 22 milhões de t (18,4%), na Austrália, com 3,4 milhões de t (2,8%) e nos Estados Unidos, com 1,4 milhões de t (1,2%). A China também é líder no comércio mundial, com 87,5% (105 mil t) dos óxidos de terras-raras produzidos em 2016, seguida pela Austrália com 14 mil t (11,7%) e pela Rússia com 3 mil t (2,5%). Os demais países, produtores com menores contribuições (Canadá, Malásia, Tailândia, Vietnã, Índia e Brasil), completaram as 126 mil toneladas comercializadas, conforme dados oficiais, no mundo em 2016 (US Geological Survey 2017).

Em 2013, a China consumiu 64% da produção mundial, seguida pelo Japão (15%), pelos EUA (10%) e pela União Europeia (7%) (Andrade 2014). Em 2015, o consumo da China foi acompanhado por ímãs (35%), abrasivos (18%) e catalisadores (15%). A queda nos preços ocorreu devido à produção ilegal, que ainda é muito presente na China; anualmente 20.000 a 30.000 t, ou de 15 a 30% da produção oficial eram contrabandeadas (Mancheri & Marukawa 2016). Mesmo com os esforços demonstrados pelo governo chinês recentemente, a produção ilegal de terras-raras ainda continua.

O aumento da procura por ETR ocorre devido à alta demanda por novos materiais, que envolvem ímãs, catalisadores, baterias e fósforos. Na atualidade, esses produtos representam mais de 60% da demanda global (Kingsnorth 2015). Essa demanda tende a aumentar também por conta de investimentos em energia limpa. Em 2015, o setor de ímãs permanentes foi o que mais participou no total consumido, pouco mais de 30%, por outro lado, em 2015, 22% do total consumido foram destinados aos ímãs, o que representou 62% do valor total para aquele ano (ARGUS 2016).

Tabela 5 - Demanda mundial em 2015.

	China	Japão	EUA	Outros	Total	Participação Do Mercado
Catálise	10000	7000	9000	2000	28000	19%
Vidraria	6000	1000	750	750	8500	6%
Polimento	14500	2500	2000	1000	20000	14%
Ligas metálicas	19500	3500	1500	1000	25500	17%
Ímãs	35500	7000	1500	1000	45000	31%
Fósforos	4500	500	250	250	5500	4%
Cerâmicas	3000	500	1500	500	5500	4%
Outros	4000	1000	2500	500	8000	5%
Total	97000	23000	19000	7000	146000	100%
Participação no mercado	66%	16%	13%	5%	100%	

Fonte: Elaboração própria com base em Kingsnorth (2015).

Com o propósito de buscar soluções para os riscos consecutivos do desabastecimento de ETR, a empresa alemã Tantalus Rare Earths AG, de Düsseldorf, Alemanha, impulsionou seus esforços na procura de identificar e desenvolver trabalhos de exploração e projetos fora da China, principalmente na África com o Tantalus Rare Earths Project (Tantalus Rare Earths AG 2010). Simultaneamente, houve o recomissionamento da Molycorp, Inc. na operação de Mountain Pass (Califórnia EUA) e o interesse em colocar novas jazidas em produção, incluindo a Lynas Corp. na operação de Mount Weld (Austrália ocidental), de Nolans Bore (Austrália central) e de Kvanefjeld (Groenlândia), as duas últimas com teor de urânio considerável, associados aos óxidos de terras-raras (World Nuclear Association 2015). Em 2018, a Alemanha juntamente com o Brasil se uniu no projeto Regina (Rare Earth Global Industry and New Application), com objetivo da produção de um “superimã verde de Terras Raras”, ou seja, com menor impacto ambiental e feito a partir das Terras Raras que sobram da exploração do nióbio. Esses ímãs são usados, por exemplo, em turbinas geradoras de energia eólica. Ambos os lados sairão ganhando, Alemanha terá uma nova fonte desses recursos e um novo parceiro estratégico e o Brasil, poderá comercializar e agregar valor a essa matéria-prima, que praticamente não está sendo usada.

Diversos acordos são firmados ao redor do mundo por grandes empresas consumidoras de produtos à base de ETR. O objetivo das empresas é se prevenir das restrições de fornecimento impostas pela China, de modo a tentar assegurar o fornecimento alternativo

futuro (Lapido-Loureiro 2013). A prospecção e as pesquisas minerais, a partir de 2010 se intensificaram em todo o mundo na busca por recursos de ETR, com destaque para: Estados Unidos, Austrália, Brasil, Canadá, Finlândia, Groenlândia, Índia, Quirguistão, Madagascar, Malawi, Moçambique, Namíbia, África do Sul, Suécia, Tanzânia, Turquia, Vietnã e Japão. No entanto, alguns resultados começaram a surgir, tais como a descoberta do depósito de Terras Raras na região de Minami-Torishima, no Japão, que se estende do leito marinho até alguns metros de profundidade no Oceano Pacífico. Recentemente, houve a descoberta de uma jazida de nióbio e terras raras localizadas no nordeste da Sibéria, na república de Yakútia, se posicionando como a terceira maior do mundo deste tipo, avaliações das reservas confirmaram que a escala e o alto teor (Projeto Tomtor) a tornam em uma das jazidas-chave de nióbio e terras raras do mundo.

Em relação à produção, a maioria dos ETR tem custos de processamento similares, pois todos são extraídos juntos. No entanto, a mudança dos preços de cada elemento ocorre essencialmente pelas condições do mercado, ou seja, pela proporção entre a oferta e a demanda dos elementos separados, seus benefícios para aplicações específicas e despesas associadas à substituição por materiais alternativos. Não há interesse em recuperar elementos relativamente baratos que não são capazes de atender os custos de processamento, enquanto a reciclagem dos de alto valor pode se tornar atraente devido à lucratividade.

Os fornecimentos de ETR são contratados para um longo prazo através de acordos entre grandes consumidores e fornecedores. Os compradores e vendedores também negociam por meio de sites especializados. As negociações normalmente não estão disponíveis publicamente e no mercado convencional não existe um preço certo. As cotações de preços disponíveis representam estimativas de contratos em negociações (JRC 2013).

Não obstante, os preços aumentaram significativamente a partir do início de 2010, devido à interferência do governo chinês nos limites de exportações, porém, as restrições aplicadas pelas autoridades chinesas no processamento, exportação e níveis de mineração provocaram aumentos relevantes nos preços dos OTR, fazendo com que os produtos atingissem o nível de pico em meados de 2011, antes de sofrer diminuição no início de 2012 e em 2013, acompanhando a desaceleração da economia global.

Em 2011, por exemplo, o preço do óxido de Nd atingiu o valor de 350 US\$/kg no segundo semestre contra 10 US\$/kg em 2001; o preço do Dy, que em 2001 custava 100 US\$/kg chegou a custar 2.200 US\$/kg dez anos depois. A maior alteração nos preços dos óxidos de ETR ocorreu no ano de 2009 e 2011: La (359%), Ce (457%), Nd (159%), Pr (166%), Sm (73%), Dy (492%), Eu (101%) e Tb (324%). Os preços foram se estabilizando em 2014. No

entanto, os preços futuros dependerão das influências provocadas pela lei da oferta e da procura (demanda), influenciadas pelas tendências globais e, principalmente, pela reestruturação da indústria de Terras Raras da China.

4.1 A CHINA E A CONQUISTA DO MONOPÓLIO

A China é considerada líder na produção mundial de ETR (em 2008 contribuiu com 98% do total), nos últimos anos tem indicado uma desaceleração na exportação desses elementos (em 2015 contribuiu com 84,7% da produção mundial) devido às estratégias das reservas minerais. A China é rica tanto em ETRL quanto ETRP. No norte do país, concentram-se os leves e ao sul, os elementos pesados. As três principais áreas de mineração estão situadas no município de Baotou, Mongólia Interior e nas províncias de Jiangxi e Sichuan, que juntas representam 88% dos depósitos chineses. Em Baotou está localizada a mina de Bayan Obo, que é rica em bastnasita e monazita, concentrando 83% dos depósitos chineses. As províncias de Sichuan e Jiangxi concentram cerca de 3% cada. O restante está disperso por toda a China (Chen 2011). A Tabela 6 destaca as províncias onde estão localizados os principais depósitos.

Bayan Obo é considerada maior mina de TRs do mundo, com reservas de 57,4 milhões de t e teor médio de OTR de 6%, começou no final dos anos 1950, embora já existisse exploração de minério de ferro. Assim, os Terras Raras são produzidos como subproduto. O potencial de produção dessa mina, em 2015, de acordo com as cotas de produção adotada pelo país, a província da Mongólia Interior foi responsável por mais da metade do total de TR produzido na China (Morrison & Tang 2012, Mlr *et al.* 2015).

Os recursos de TRs chinesas também são divididos entre os depósitos de Mianning, na província de Sichuan; de Weishan, na província de Shandong; nos depósitos de argilas de adsorção iônica, concentrados principalmente na província de Jiangxi, mas também distribuídos em Guangdong, Fujian e Guansi (Ling & Yang 2015), essas argilas são responsáveis por 17% da produção de ETR da China em 2015 e pela maior parte da produção de ETRP do mundo (MLR 2015, CWR 2016, Fan *et al.* 2016); nos depósitos tipo placers, no sudeste da China, que ocorrem ao longo da zona costeira do oeste de Guangdong e Yunnan (o teor médio de OTR com 0,5–1,0% em peso). Já em Jianxi, estão em atividade: Longnan, contendo principalmente ETRP, semelhante aos depósitos de xenótímio e Xunwu, contendo essencialmente ETRL, particularmente lantânio e algum cério (World Nuclear Association 2015).

Tabela 6 - Distribuição de OTR nos principais depósitos de ETR chineses.

Tipos de óxidos de terras-raras	Mongólia Interior Bayan Obo (OTR % em peso)	Sichuan Mianning (OTR % em peso)	Shandong Weishan (OTR % em peso)	Tipo íons de TR adsorvidos (OTR % em peso)	
				Tipo A	Tipo B
La_2O_3	24-26	28-30	32	31-40	2-5
CeO_2	50	45-50	48-50	3-7	1-2
Pr_6O_{11}	3-5	5	4	7-11	1-2
Nd_2O_3	16-18	12-14	11-12	26-35	3-5
Sm_2O_2	1,5	1,5-2	1,0-1,8	4-6	2-4
Eu_2O_3	0,2	0,4	0,1-0,2	0,5	0,12
Gd_2O_3	0,4	0,8-1,0	0,3-0,5	4	6
$(\text{Tb-Lu})_2\text{O}_3$	0,2-0,3	1	0,4-0,6	4-5	2-12
Y_2O_3	0,3	0,76	0,1-0,3	9-11	>60

Fonte: Adaptada de Ling & Yang (2015).

Os três principais ETR - lantânio (La), cério (Ce) e Neodímio (Nd) são encontrados nos depósitos de Bayan Obo, Mianning (Sichuan) e Weishan (Shandong) conforme mostrado na tabela 6, porém nos depósitos de argilas de adsorção iônica (principalmente do tipo B) ocorre um alto conteúdo de ítrio (Y) e de outros Terras Raras pesadas. Resumidamente, as três primeiras ocorrências (Bayan Obo, Mianning e Weishan) as minas são produtoras de elementos leves nos depósitos de argilas de adsorção iônica, há leves quanto de pesados.

Na China, a Mongólia Interior foi responsável por 50 a 60% na produção do concentrado de ETR na última década, e outros 24 a 30% da Província de Sichuan (segunda maior produtora chinesa) também no mesmo período. O estante foi produzido nas províncias de Fujian, Guangdong e Jiangxi, que são significativas fontes de ETRP (Tse 2011). A política chinesa de desenvolvimento é vista como meios ou metodologias de controle ou restrições sobre a cadeia de fornecimento dos Terras Raras. Essas restrições se manifestam por meio de quotas de exportação e de produção, licenças de exportação, impostos e tarifas (Silva 2018). Contudo, a China também tem aumentado o controle no fornecimento dos TRs através da estocagem do material. A China, historicamente, estabeleceu tarifas de exportação de 15% para os ETRL e de 25% para os ETRP (mais valiosos), e houve situações em que fabricantes americanos chegaram a pagar até 300% de ágio em relação aos concorrentes chineses para o mesmo material (ARGUS 2015).

Em 2012, os EUA, UE e o Japão iniciaram uma disputa na Organização Mundial do Comércio (OMC) contra as medidas restritivas de exportação executadas pela China, alegando

violação da legislação da organização (Mancheri 2012). No entanto, em 2014, a OMC solicitou a remoção das tarifas e cotas de exportação dentro de um prazo aceitável. A partir de 2015, o país extinguiu as cotas de exportação.

Para continuar o seu monopólio, a China buscou TR além de suas fronteiras. No Brasil, um grupo de companhias chinesas comprou 15% do capital da CBMM em 2011. No mesmo período, a CBMM já havia vendido outros 15% para um consórcio formado por companhias japonesas e sul-coreanas. Também compraram a mina Baluba, na Zâmbia (Geology 2017). Em 2016, a empresa Shenghe Resources Holding, considerada líder em TR e com experiências na mineração, beneficiamento, separação, metalurgia e marketing, conseguiu 12,5% da participação da Greenland Mineral and Energy, que desenvolve um projeto no sul da Groelândia de exploração de ETR (GGG 2017).

Ao mesmo tempo, a China padece com o contrabando e a mineração ilegal. Anualmente, 20.000 a 30.000t, ou de 15 a 30% da produção oficial são contrabandeadas (Mancheri & Marukawa 2016). Apesar do contrabando, existem formas de burlar as restrições impostas, uma delas é a exportação de ligas metálicas minimamente processadas, que combinavam metais de TR com baixas proporções de outros metais, pois essas limitações não afetavam os produtos de valor agregado. Dessa forma, a China forçava a criação de setores mais avançados da cadeia de TR.

De acordo com a Rare Earth Industry Association, 40.000 t de TR foram extraídas ilegalmente em 2014. No entanto em agosto de 2015, o ministério da indústria e tecnologia da informação (MIIT) anunciou que não pouparia esforços para extinguir a mineração ilegal, que ocasiona uma queda no preço devido ao excesso de oferta (Chinadaily 2015).

O governo chinês apoiou uma série de normas e regulamentações para proteger os recursos e desenvolver um caminho sustentável de exploração, mas entre 10 e 15% da produção chinesa ainda é ilegal (Mancheri & Marukawa 2016). Autoridades chinesas se expressaram quanto à queda das exportações de ETR. A causa seria a reorganização de toda a cadeia industrial das TR para combater a produção e exportação ilegal e, assim, preservar o meio ambiente.

Ao final de 2012, a China limitou os direitos de mineração, de 113 para 67, concentrando-os em três empresas, que unidas somavam mais de 90% das reservas liberadas para exploração. Contudo, seis grupos de empresas foram criados para consolidação da indústria de TR direcionada à mineração, beneficiamento e do uso consciente do recurso (Rao 2016). Com a criação do sexteto, a China planeja limitar a capacidade instalada de beneficiamento/separação e ser mais rigorosa nas questões ambientais. O que pode levar a um

aumento na produção em outros países, uma vez que a produção chinesa se desenvolveu sem custos ambientais e regulatórios, com isso barateou o produto e impossibilitou a competição com empresas fora da China (Rao 2016).

As exportações chinesas cresceram em 2016 mais de 34%, ou seja, 46.749t, comparadas ao ano anterior. E o preço dos TR chineses caiu mais de 30% no mesmo período, o que mostra uma alta instabilidade de mercado, apesar das tentativas de controle da China. Por outro lado, o medo de uma crise nos países importadores e dependentes de ETR chineses aumentou, levando a descoberta de mais de 400 potenciais projetos de exploração de ETR. Com a alta dos preços, especuladores compraram ações de pequenas mineradoras, que foram alimentadas por investidores inexperientes com a promessa de desenvolver novas fontes de TR.

5 CENÁRIO NACIONAL

No Brasil, a busca pelas TRs iniciou no final do século XIX e foram descobertos depósitos de areias ricas em ETR entre o norte do Rio de Janeiro e o sul da Bahia, passando por todo litoral do Espírito Santo. No começo, tratava-se de areias para lastro de navio e passaram a ser vendidas para a Europa como matéria-prima das mantas incandescentes dos lampiões a gás. Eram as TR que davam às mantas a capacidade de não se queimarem em contato com o fogo (Souza Filho & Serra 2014).

Na década de 1940 teve-se o início da produção de TRs no Brasil, sendo que a primeira produção ocorreu na Usina Santo Amaro (USAM), pertencente à ORQUIMA – Indústrias Químicas Reunidas S/A, localizada na cidade de São Paulo. Apresentavam grau de pureza elevado (99,9 a 99,99%) e dominavam todo o processo de extração, purificação e separação. Nos anos 50, os EUA importaram TR para ser utilizado no controle da absorção de nêutrons do reator atômico do USS Nautilus, o primeiro submarino de propulsão nuclear da história. Em 1960 foi encontrada monazita com teores de urânio e tório, o que proporcionou a estatização da SULBA, sendo suas atividades assumidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN.

O potencial de elementos Terras Raras no Brasil foi assinalado em complexos alcalinos, rochas graníticas e placers marinhos e fluviais (Takehara 2015). Os complexos alcalinos brasileiros são considerados os depósitos com maior potencial econômico da atualidade, pois há a possibilidade de extração como subproduto de outros materiais que já são explorados. Os mais expressivos são em Araxá (MG), que exhibe o maior potencial econômico de TR conhecido no Brasil, com 24,23 Mt de OTR, e Catalão I (GO). Atualmente, nesses depósitos existe a exploração de nióbio e de fosfato, respectivamente, (Takehara 2015).

Também são considerados depósitos com potencial reconhecido, Morro dos Seis Lagos (AM), Catalão II (GO), Tapira (MG), Morro do Ferro – Poços de Caldas (MG), Barra do Itapirapuã I e II (SP e PR) e Salitre I, II e III (MG). Outros complexos que não possuem cálculos de recursos/reservas estimadas para ETR, mas que possuem mineralização são: Serra do Repartimento (RR), Maicuru (PA), Angico dos Dias (BA), Mata da Corda (MG), Serra Negra (MG), Lages (SC), Anitápolis (SC), Mato Preto (PR), Juquiá (SP) e Jacupiranga (SP).

Os depósitos mais desenvolvidos em termos de produção de ETR são Araxá e Morro do Ferro. O primeiro vem sendo explorado pela empresa Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM). Em 2012, a mineradora canadense ITAFOS realizou uma avaliação preliminar em outro lote do depósito em Araxá (Clay & Ackroyd 2013). Nesse período, ocorreu uma produção de 200 kg de concentrado de OTR que atingiu 98% de grau de pureza, no

entanto, nos novos planos da ITAFOS, o “Projeto Araxá” tem como objetivo a exploração de fosfato, mas ainda reforça a riqueza de TR e nióbio na região. O interesse foi deixado de lado devido à queda nos preços das TR, porém, caso os preços voltem a subir, os objetivos dos projetos podem ser retomados (ITAFOS 2017). Já o Morro do Ferro está sendo estudado pela Prime Star Brasil Mineração LTDA.

No complexo carbonatítico de Catalão I foram observados recursos de TR de mais de 125 milhões de t com teor de lavra de 2% de OTR. O depósito do Córrego do Garimpo, que pertence ao complexo, expõe características com o tamanho reduzido da monazita e a ausência de tório, tornando a exploração atrativa (Lapido-Loureiro 2013).

As rochas graníticas também são consideradas importantes, pois podem gerar depósitos ricos em ETRP, os principais depósitos são Pitinga (AM) e Granito Serra Dourada (GO). Semelhante com os depósitos de argilas de adsorção iônica do sul da China, o Granito Serra Dourada (GO) tem se destacado em estudos pela Mineração Serra Verde. Sendo assim, o processo de separação que será utilizado é mais simples e menos custoso que o convencional de separação por solventes (MSV 2016).

Merecem atenção os placers marinhos que são geralmente encontrados em ambientes costeiros de margens continentais passivas e estão distribuídos por toda a costa brasileira desde o Pará até o Rio Grande do Sul com destaque para Maranhão, Piauí, Rio Grande do Norte, Ceará, Paraíba, Sergipe, Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul. Historicamente esses depósitos colocaram o país entre os maiores produtores de ETR até os anos 1950 (Takehara 2015).

Já os placers fluviais indicam potencial para minerais contendo monazita e xenotímio e são encontrados no estado da Bahia, Rio Grande do Norte e Rio Grande do Sul, porém sem valor econômico devido à baixa concentração. Por outro lado, São Gonçalo do Sapucaí (MG) é um depósito de pequeno porte, mas existe potencial econômico.

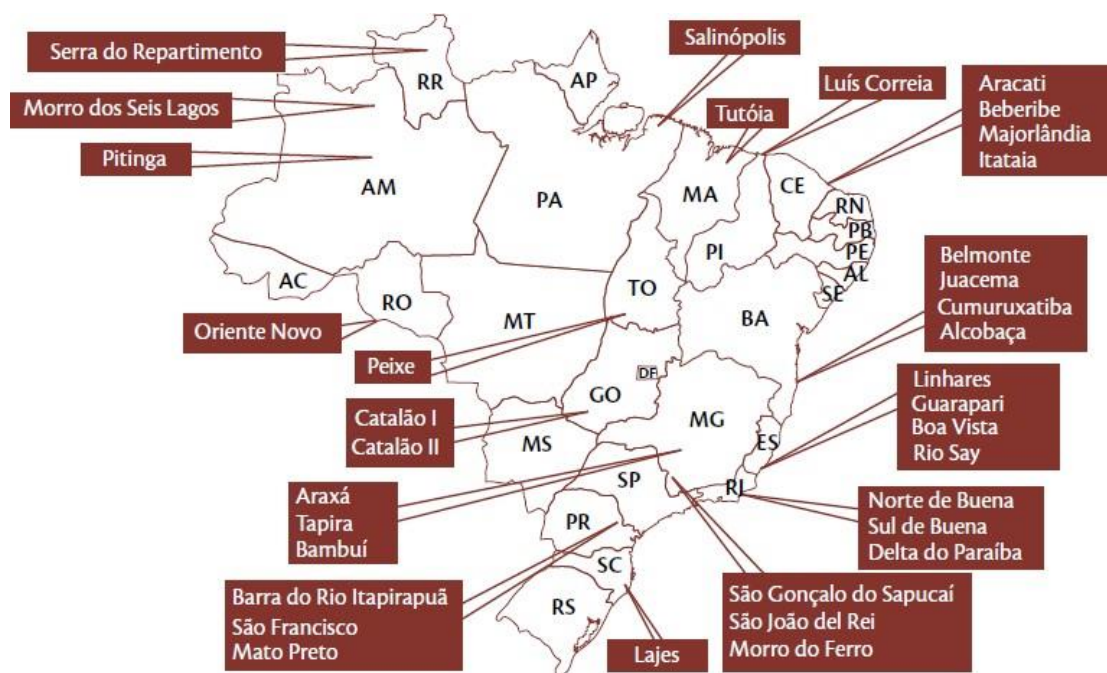


Figura 11 - Mapa do Brasil com as principais ocorrências de ETR.
Fonte: CGEE (2013).

O Governo Brasileiro está consciente da necessidade da retomada da mineração, do processamento dos elementos Terras Raras e de sua utilização na cadeia produtiva, acrescentando valor e garantindo ao país uma autonomia estratégica em sua matriz energética, especialmente no refino de petróleo, energia eólica e veículos híbridos. Para um processamento equilibrado, sem danos ambientais, aliado a programas de recuperação e reciclagem. Mesmo que, os valores envolvidos sejam pequenos e os lucros financeiros duvidosos, o setor produtivo e instituições de pesquisa devem ser fortemente incentivados. As Terras Raras não podem ser apenas mais uma commodity brasileira para exportação. Existe a necessidade de um aprofundamento nos estudos de viabilidade tanto no âmbito técnico quanto econômico para melhor conhecer o verdadeiro potencial do país na produção de TR (CGEE 2013).

6 CONCLUSÃO

Os ETR são cada vez mais utilizados em diversas aplicações. Esses elementos são conhecidos por suas propriedades únicas e pelo fato de que pequenas quantidades são suficientes para aumentar o desempenho dos produtos. Com o avanço da tecnologia, a demanda por ETR aumentou, já que podem ser usados na indústria metalúrgica, magnética, eletrônica, cerâmica, óptica, nuclear, entre outras.

Os ETR estão dispersos por todo o globo terrestre. A China contém a maior reserva e controla o mercado. A mão de obra barata e uma exploração que desinteressava as questões ambientais contribuíram para o domínio chinês. Diante dessa concentração, pesquisas apontaram esses elementos com alto risco de suprimento, principalmente a partir de 2010. Nesse ano, a China gerou limitações para a exportação, ocasionando um aumento nos preços e nas incertezas dos países que precisam dos ETR nas suas economias. Principalmente dos ETRP, que mesmo com a entrada de novos fornecedores no mercado, ainda dependerão do país por certo tempo.

Com a ausência da transparência dos suprimentos dos TR somado ao desconhecimento da dinâmica do seu mercado aumenta o risco de oferta. A atenção é maior para as tecnologias que visam a busca pela redução e, a longo prazo da eliminação de gases do efeito estufa, já que essas necessitam de alguns desses elementos, como acontece com os veículos híbridos e elétricos e com as turbinas eólicas, que utilizam ímãs Nd-Fe-B.

De uma maneira geral, as buscas de alternativas para minimizar os riscos de fornecimento podem incluir substituição desses materiais, redução do uso e busca por novos fornecedores, seja por meio de novas explorações ou por reciclagem. Enquanto cada país traça sua própria estratégia para os elementos críticos em sua economia, as empresas que utilizam esses materiais também buscam soluções.

A China, no entanto, tem investido em pesquisa e desenvolvimento na área de TR desde a década de sessenta. Com medidas protecionistas e baixa preocupação com o meio ambiente, conseguiu o controle sobre o mercado. O pequeno custo de produção chinesa levou outros países a terminarem suas explorações. Após o domínio, as barreiras para a exportação e o risco de interrupção no fornecimento incentivaram as empresas que utilizam ETR a se colocarem em solo chinês, ocasionando mais propriedade intelectual para dentro do país. A instalação das plantas de produção dessas empresas estrangeiras associados a contratos de fornecimento mais longos foram umas das opções encontradas. Porém essas soluções não diminuem o domínio da China.

Em longo prazo, o desenvolvimento de tecnologias menos dependentes de elementos críticos ou que não façam o uso deles também vem sendo executados nas empresas. Portanto, essa substituição deve ser feita sem que existam perdas na eficiência e no desempenho dos produtos finais e, assim, não perder competitividade diante às empresas chinesas, que possuem acesso mais fácil a esses materiais.

A reciclagem pode ser considerada uma opção para garantir a oferta dos ETR e diminuir a dependência dos produtos chineses. Porém as dificuldades tecnológicas nos processos, que muitas vezes são ineficientes, e a falta de incentivo são os principais problemas. Ademais, a quantia requerida para esses tipos de aplicação são altas, sendo assim, o resíduo a ser reciclado deve conter grande volume de ETR para se tornar viável, ou seja, a reciclagem só é uma alternativa se o custo da matéria já reciclada for menor ou equivalente ao da matéria virgem.

A procura por novas minas é outra opção em que o Brasil mostra-se com potencial elevado, já que possui a segunda maior reserva e já foi produtor de ETR. Por parte do governo nacional, existe a intenção de gerar cadeias produtivas de aplicação dos TR. A intenção não é apenas explorar o minério e vender para outros países na forma de concentrado ou de óxidos. O objetivo é criar uma cadeia para produzir produtos de valor agregado, como o ímã de Nd-Fe-B e até mesmo motores elétricos e turbinas eólicas.

O incentivo a extração dos minérios de TR não é uma questão simples. Depósitos que parecem ser produtivos, a princípio, podem não ser recuperados tão facilmente como imaginados. A falta de mão de obra qualificada e a necessidade de altos investimentos financeiros também limitam novas explorações. Países que passaram a explorar minérios de TR estão exportando o material para serem processados e separados na China.

REFERÊNCIAS

- Abrão A. 1994. *Química e tecnologia das terras-raras*. Rio de Janeiro, CETEM/MCTIC.
- Ade R. H. P. 2014. Terras-raras. In: Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral. *Sumário mineral 2014*. Brasília,DF, DNPM, p. 114-115. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2014>. Acesso em: 26 set. 2017.
- Ahonen S., Arvanitidis N., Auer A., Baillet E., Bellato N., Binnemans K., Zaleski S. 2015. *Strengthening the European rare earths supply-chain Challenges and policy options a report by the European Rare Earths Competency Network (Erecon)* (No. cea-01550114).
- Antoniassi J. L. 2017. *Caracterização tecnológica de recursos minerais de terras raras em complexos alcalinos e alcalino-carbonatáticos do Brasil*. PhD Theses, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 207p.
- Argus Consulting Services. 2015. *Argus white paper: impact of changes to chinese policy on the rare earth market in 2015*. London.
- Argus Consulting Services. 2016. Analysing the changing global rare earths supply and demand outlook. Argus Metal Pages Forum. Tokyo - Mark Seddon, Argus Media Ltd 4 August.
- Balaram V. 2019. *Geosci. Front.* **10**: 1285.
- Barmettler F., Castelberg C., Fabbri C., Brandl H. 2016. Microbial mobilization of rare earth elements (REE) from mineral solids – a mini review. *AIMS Microbiology*, **3**(2): 190-204. DOI:10.3934/microbiol.2016.2.190.
- Benecki W. 2017. *The international forum on magnetic applications, technologies & materials*. Orlando – Florida, More than you Ever Wanted to Know About the Permanent Magnet Industry. Disponível em: http://www.magneticmagazine.com/conferences/wp-content/uploads/2017/01/Benecki_Benecki.pdf acesso em fev. 2017.
- Binnemans Koen *et al.* 2013. Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, [S.l.], **51**:1-22, jul.
- Castor S. B. & Hedrick J. B. 2006. Rare earth elements. In: Kogel J. E. (edt.) *Industrial minerals: commodities, markets, and uses*. 7th ed. Littleton, Colorado, Society for mining, Metallurgy, and Exploration, p. 769-792.
- Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE. 2013. *Usos e aplicações de terra rara no Brasil: 2012–2030*. Brasília, DF, 254 p. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10182/7303/Terras_Raras_Web_9532.pdf. Acesso em: 2013.
- Chakhmouradian A.R. & Zaitsev A.N. 2012. Rare earth mineralization in igneous rocks: sources and processes. *Elements*, **8**(5):347-353. Doi: 10.2113/gselements.8.5.347.

Chen Z. 2011. Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry. *J. Rare Earths* **29**: 1–6.

Chinadaily. 2015. *China vows continued crackdown on illegal rare earth mining*. Ago, Disponível em: http://www.chinadaily.com.cn/china/2015-08/08/content_21538605.htm. Acesso em fev. 2017.

China Water Risk – CWR. 2016. *Rare earths: shades of grey - can China continue to fuel our global clean & smart future*. Disponível em: <http://chinawaterrisk.org/notices/cwr-rare-earths-shades-of-grey/>. Acesso em: dez. 2016.

Clay A. N. & Ackroyd B. 2013. *A preliminary economic assessment in the form of an independent technical report on MbAc fertilizer corp*. Araxá Project, Venmyn Rand (Pty) Ltd., p113. <http://www.sedar.com/GetFile.do?lang=EN&docClass=24&issuerNo=00012959&issuerType=03&projectNo=01960621&docId=3262275>. Acesso em fevereiro de 2017.

Clenfield J., Yasu M., Biggs S. 2010. *Hitachi leads rare earth recycling efforts as China cuts. Access to Supply*. Bloomberg, 8 Decmeber 2010.

Diehl O. *et al.* 2018. Towards an alloy recycling of Nd–Fe–B Permanent Magnets in a Circular Economy. *Journal of Sustainable Metallurgy*, **4** (2): 163–175.

Durrant A. J. 2014. “*The effect of microstructure and composition on HDDR processing of scrap magnets*”. PhD Theses, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, 105p.

Fan H., Yang K., Hu F., Liu S., Wang K. 2016. The giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, China: controversy and ore genesis. *Geoscience Frontiers*, **7** (3): 335-344

Habashi F. 2013. “Extractive metallurgy of rare earths”, *Can. Metall. Q.*, **52** (3): 224–233, jul.

Geology geoscience news and information 2017. Disponível em: <http://geology.com/articles/rare-earth-elements/>. Acesso em: 2018.

Greenland Minerals and Energy-GGG. 2017. *Materials for an energy efficient future*. Disponível em: <http://www.ggg.gl/>. Acesso abr. 2017.

Golev A. *et al.* 2014. Rare earths supply chains: current status, constraints and opportunities. *Resources Policy*, [S.l.], **41**:52-59, Set.

Gupta C. K. & Krishnamurthy N. 2005. *Extractive metallurgy of rare earths*. Boca Raton, Fla: CRC Press.

Heider M. 2018. *A evolução das terras raras no Brasil*. Disponível em: <https://inthemine.com.br/site/a-evolucao-das-terras-raras-no-brasil/>. Recuperado em: 01 agosto, 2018.

Herbst J. F. & Croat J. J. 1991. “Neodymium-iron-boron permanent magnets”, *J. Magn. Magn. Mater.*, **100** (1–3): 57–78, nov.

Huang X. *et al.* 2016. Protecting the environment and public health from rare earth mining. *Earth's Future*, [S.l.], **4** (11):532-535, nov.

Humphries M. 2011. *Rare earth elements: the global supply chain*. [S.l.], Congressional Research Service, p. 1-15.

Hurst C. 2010. *China's rare earth elements industry: what can the west learn?* [S.l.], Institute for the Analysis of Global Security, March.

Ider K. 2014. *Recapture strategic value chains in the rare earth market: a contemporary market analysis of rare earths and their economic implications*. Berlin, Bachelor of Arts (Double Degree Program in Business Administration) – Berlin School of Economics and Law. Disponível: https://www.theseus.fi/fibitstream/handle/10024/105572/Ider_Kadir.pdf?sequence=1. Acesso em 10 jan. 2016.

Integrated Producer of Phosphate Fertilizers Near Term Production and Development Upside-ITAFOS. 2017. *Near Term Production and Development Upside*. Disponível em: <https://itafos.com/site/assets/files/1649/2017-04-ifos-cp.pdf> Acesso em mai. 2017.

Jin Y., Kim J., Guillaume B. 2016. Review of critical material studies. *Resources, Conservation And Recycling*, [S.l.], **113**:77-87, Out.

Joint Research Centre (JRC). 2013. *Critical metals in the path towards the decarbonisation of the EU Energy Sector*. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies.

Jordens A. Cheng Y. P., Waters K. E. 2013. "A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals". *Miner. Eng.*, **41**: 97–114, Fev.

Kingsnorth D. J. 2015. *Professor kingsnorth on the 'real state' of the global rare earth market*. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=wpioUEIcKqA>. Acesso em jan. 2017.

Lapido-Loureiro F. E. 2013. *O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras*. Rio de Janeiro, CETEM; MCTI. 216 p. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br>. Acesso em: mar. 2016.

Ling Z. L. & Yang X. 2015. China's rare earth resources, mineralogy, and beneficiation. In: Lima I. B. de & Leal W. *Rare earths industry: technological, economic, and environmental implications*. Outokumpu, Elsevier, Cap. 9, p. 139-150. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128023280000097>. Acesso em: 26 fev. 2016.

Liu J.K.D. 2016. *Evaluation of rare earth projects using the real options model*. PhD Thesis. To the Faculty of Economics and Business Administration of the Technische Universität Bergakademie Freiberg, 270p.

Loureiro F. E. L. 1994. *Terras raras no Brasil: depósitos, recursos identificados, reservas*. Rio de Janeiro, CETEM/MCTIC.

Loureiro F. E. L. & Santos L. C. 2013. Terras raras: do monopólio da produção primária ao oligopólio tecnológico. In: Loureiro F. E. L. & Santos L. C. (ed.). *Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras*. Rio de Janeiro, CETEM/MCTIC. Cap. 1, p. 4-62.

Machacek E. & Fold N. 2014. Alternative value chains for rare earths: the Anglo- deposit developers. *Resources Policy*, [S.l.], **42**:53-64, Dez.

Mancheri N. 2012. China faces WTO again over rare earth metals. *In: 16° East Asia Forum. Proceedings[...]* Disponível em: <http://www.eastasiaforum.org/2012/05/16/china-faces-wto-again-over-rare-earth-metals/>. Acesso em abr. de 2017.

Mancheri N. & Marukawa T. 2016. *Rare earth elements China and Japan in industry: trade and value chain*. [S.l.,s.n], 186p. (ISS Contemporary Chinese Research Series, v. 17).

Mariano A.N. 2010. The nature of economic REE and y minerals on a world level. *In: MIT Energy Initiative Workshop*, April 29,

Mcllellan B. C., Corder G. D., Golev A., Ali S. H. 2014. Sustainability of the rare earths industry. *Procedia Environmental Sciences*, **20**(1): 280-287. Doi:10.1016/j.proenv.2014.03.035.

Mineração Serra Verde. *Press release*. Toronto, 11 de ago. de 2016. Disponível em: <http://mineracaoserraverde.com.br/innovation-metals-corp-announces-the-successfulseparation-of-high-value-rare-earth-elements-from-mineracao-serra-verde-concentrate-using-the-rapidsx-process-2/> Acesso em mai. 2017.

Ministry of Land and resources of the People's Republic of China (MLR) 2015. *Cotas de produção por província (em chinês)*. Disponível em: <http://www.mlr.gov.cn/zwgk/zytz/201505/P020150514345370780259.doc>. Acesso em dez. 2016.

Morrison Wayne M. & Tang Rachel. 2012. *China's rare earth industry and export regime: economic and trade implications for the United States*. [S.l., s.n].

Neomag. 2017. *Produção mundial de ímãs NdFeB* http://www.neomag.jp/statistics/ndfeb_production_transition.php. acessado em jan. 2017.

Önal M. A. R. *et al.* 2017. Hydrometallurgical recycling of NdFeB magnets: Complete leaching, iron removal and electrolysis. *Journal of Rare Earths*, **35** (6): 574–584.

Pan S. 2013. *Rare earth permanent-magnet alloys' high temperature phase transformation: in-situ and dynamic observation and its application in material design*. New York, Springer.

Philipp S., Stefan L., Helmut A. 2015. “Recycling of Nd₂Fe₁₄B-Magnets”. *In: Of EMC Proceedings[...]*, p. 925–938.

Ramalho T. E. B, Vital A. B, Moriyama A. L. L., Souza C. P. 2016. Caracterização do mineral monazita/alanita proveniente do estado de Goiás. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Fortaleza, CE, Brasil, Anais[...]* ID. 40757.

Rao Zhenbin. 2016. Consolidating policies on Chinese rare earth resources. *Mineral Economics*, [S.l.], **29** (1):23-28, Abr.

Rocio M.A., Silva M.M., Carvalho P.S., Cardoso J.G. 2012. *Terras raras: situação atual e perspectivas*. [S.l.], BNDES Setorial.

Santos R. L. C. & Ribeiro V. M. 2014. *Breve revisão bibliográfica dos processos de lixiviação de minérios e concentrados de terras-raras*. Rio de Janeiro, CETEM/MCTIC.

Schuessler R. L. 2014. *Missouri mine shines spotlight on global battle for rare-earth metals*. Al Jazeera. 30 jan. Disponível em: <http://america.aljazeera.com/articles/2014/1/30/us-counts-on-pearidgerareearthsmine.html>. Acesso em: 20 Dez. 2017.

Schüler D., Buchert M., Liu R., Dittrich S., Merz C. 2011. *Study on rare earths and their recycling*. Germany, Öko-Institut. Disponível em: <http://www.oeko.de/oekodoc/1112/2011-003-en.pdf> . Acesso em jun. 2016.

Senado Federal. Secretaria Especial de Comunicação Social. 2013. Terras raras: estratégia para o futuro. *Em Discussão*, **4**(17): 62.

Seo Y. & Morimoto S. 2014. Comparison of dysprosium security strategies in Japan for 2010–2030. *Resources Policy*, [S.l.], **39**:15-20, mar.

Sousa Filho P. C. & Serra O. A. 2014. Terras raras no Brasil: histórico, produção e perspectivas. *Química Nova*, **37**(4): 753-760. Doi:10.5935/0100-4042.20140121.

Sprecher B., Kleijn R., Kramer G. J. 2014. “Recycling Potential of Neodymium: the case of computer hard disk drives”. *Environ. Sci. Technol.*, **48** (16): 9506–9513, Ago.

Stanway D. 2015. Fate of global rare earth miners rests on China smuggling crackdown. *Reuters*. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/us-china-rareearth-idUSKCN0PH2DO20150707>. Acesso em: 2017.

Statista - relatório “Global apparel market size projections from 2017 to 2025, by region (in billion U.S. dollars)”. *Statista*. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/279757/apparel-market-size-projections-by-region/>. Acesso em: 2017.

Stuhlpfarrer P., Luidold S., Antrekowitsch H. 2015. Recycling of Nd₂Fe₁₄B magnets. *World of metallurgy-Erzmetall: Internationale Fachzeitschrift für Metallurgie*, **68**(5): 278-285.

Takehara Lucy. (org.). 2015. *Avaliação do potencial de terras raras no Brasil*. Brasília,DF, CPRM, 218 p. (Informe de Recursos Minerais, Série Minerais Estratégicos, 02).

Tantalus Rare Earths AG. 2010. *Regulatory news*. Disponível em: http://www.tre-ag.com/media/regulatory-news.aspx?sc_lang=en. Acesso em: 10 jan. 2016.

Tomohiko A. & Tomonori S. 2014. *Recycling process for rare earth magnets in end of life electric products. presentation at TMS 2014*. San Diego, USA. Disponível em: Acesso em: 23 mar 2016.

Tse Pui-kwan. *China’s rare-earth industry*. U.S. Geological Survey Open-file Report 2011, Reston, p.1-15, 2011.

U.S. Geological Survey, 2014. Minerals Yearbook 2014. Rare earths [advanced release] Disponível em: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/myb1-2014-raree.pdf. Acesso em jan. 2017.

U.S. Geological Survey, Mineral Commodities Summaries. Rare Earths. P. 128-129, jan.2015. Disponível em: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2015-raree.pdf.

U.S. Geological Survey – USGS. 2002. *Rare earth elements* - critical resources for high technology. USGS Fact Sheet 087-02. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/fs087-02.pdf>. Consultado em 10 de janeiro de 2017.

United States Geological Survey - USGS. 2017. *Rare earth elements: U.S. Mineral commodity summaries*. Reston, USGS. Disponível em: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2016-raree.pdf. Acesso em: 20 Jan. 2018.

USEPA 2012. *Rare earth elements: a review of production, processing, recycling, and associated environmental issues*, EPA/600/R-12/572, Cincinnati, USEPA.

Voncken J. H. L. 2016. *The ore minerals and major ore deposits of the rare earths*. USA, Springer International Publishing. Cap 1., p. 15-52.

Walachowicz F. *et al.* 2014. *Verbundprojekt: recycling von elektromotoren – more*. Teilprojekt, Ökobilanz der Recyclingverfahren. Projekt gefördert im Rahmen des Programms "Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM) des BMBF. February 2015.

Weber R. J. & Reisman D. J. 2012. Rare earth elements: a review of production, processing, recycling, and associated environmental issues. *US EPA Region*, **8**: 189-200.

Wendhausen P. A. P. 2015. Desenvolvimento de ímãs de alto desempenho à base de Terras Raras In: 3º Seminário brasileiro de terras raras. Rio de Janeiro. Disponível: <http://www.cetem.gov.br/images/palestras/2015/iisbtr/28-paulo-wendhausen.pdf>. acesso em mar de 2016.

World Nuclear Association. 2015. *Uranium from rare earths deposits*. Information Library. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/uranium-from-rare-earths-deposits.aspx>. Acesso em: 20 fev. 2016.

Yang Y. *et al.* 2017. REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, **3** (1): 122–149.

Zepf V. 2013. *A new approach to the nexus of supply, demand and use: exemplified along the use of neodymium in permanent magnets*. Berlim, Alemanha, Springer-Verlag.

Zini J. 2010. *Usos das cromatografias de extração e de troca iônica na separação de tório e terras raras de um resíduo gerado na unidade de purificação de Tório. Aplicação das terras raras como catalisadores na geração de hidrogênio*. PhD Theses, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. xxii, 150p.

Zhang Z., Jia Q., Liao W. 2015. *Progress in the separation processes for rare earth resources*. North Holland, Elsevier Inc. Cap. 4, p. 287-37.

Zhou B., Li Z., Chen C. 2017. Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. *Minerals*, **7**(11): 203-217.