

Bernardo José Domanico Vega

**O domínio chinês do mercado de terras  
raras e suas consequências para o  
mundo e para o Brasil**

São Paulo

2011

Bernardo José Domanico Vega

# **O domínio chinês do mercado de terras raras e suas consequências para o mundo e para o Brasil**

**Trabalho de Formatura  
apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo.**

**Departamento de Engenharia  
Metalúrgica e de Materiais**

**Orientador: Prof. Dr. Fernando  
José Gomes Landgraf**

São Paulo

2011

Faça, ou não faça. Não existe o tentar. (Yoda – O Império contra Ataca)

## **Resumo**

Após dominar o mercado de terras raras pelos últimos 25 anos, e obrigar o fechamento das grandes empresas produtoras do setor, a China avança em sua estratégia para dominar toda a indústria de terras raras global. Por meio de táticas como o controle da produção e da exportação de terras raras, e adicionado ao fato do país ser a principal fonte de tais elementos, o mundo sofreu nos últimos anos um choque de abastecimento de terras raras, o que refletiu em fortes altas nos preços destes metais e fez com que muitas empresas do setor realocassem suas operações para dentro do território chinês. Os preços das terras raras, que em alguns casos chegaram a multiplicar por 20 vezes nos últimos cinco anos causaram uma procura por novas fontes e a reativação de depósitos há muito abandonados. Isso coloca a estratégia de consolidação chinesa em risco, dado que as novas reservas podem suprir a demanda mundial (ex-China) a partir dos próximos anos. Já para o Brasil, isso pode significar uma recolocação de destaque no mercado mundial de terras raras e o reaparecimento de uma indústria que há 25 anos se encontra desativada.

**Abstract**

After dominating the rare earth market for the past 25 years, and forcing the closure of the large producers in the industry, China moves forward in its strategy to dominate the entire global rare earths industry. The use of tactics such as controlling the production and export of rare earths, added to the fact that the country is the main source of these elements, made the world suffer in recent years a supply shock of rare earths, resulting in sharp increases in the prices of these metals and forcing many companies in the industry to relocate operations into the Chinese territory. The prices of rare earths, which in some cases have multiplied by 20 times in the last five years have caused a demand for new sources and the reactivation of long-abandoned deposits. This puts the Chinese strategy of consolidation at risk, since the new reserves can meet world demand (excluding China) from next year. For Brazil, this could mean a replacement in the global market for rare earths and the reappearance of an industry that was disabled 25 years ago.

## Lista de Figuras

<b>Figura 1:</b> Tabela periódica dos elementos com destaque ao grupo das terras raras.....	1
<b>Figura 2:</b> Distintos óxidos de terras raras.....	6
<b>Figura 3:</b> Comparativo entre o produto energético (BH)max de diversos tipos de magnetos. ...	16
<b>Figura 4:</b> Tamanho do mercado de diversos tipos de magnetos. ....	18
<b>Figura 5:</b> Distribuição das aplicações de terras raras, em peso no ano de 2010.....	27
<b>Figura 6:</b> Amostra de bastnasita proveniente de Mountain Pass (EUA).....	31
<b>Figura 7:</b> Amostra de areia com elevado teor de monazita.....	32
<b>Figura 8:</b> Faixa de areia preta rica em monazita em praia de Guarapari (ES).....	33
<b>Figura 9:</b> Amostra de xenotímio em meio à matriz de feldspato encontrado nos EUA. ....	34
<b>Figura 10:</b> Amostra de alanita.....	35
<b>Figura 11:</b> Amostra de apatita com coloração azulada.....	36
<b>Figura 12:</b> Depósito de Bayan Obo.....	50
<b>Figura 13:</b> Distribuição da produção mundial de terras raras, com destaque aos maiores produtores. ....	60
<b>Figura 14:</b> Lista de recursos em que os EUA são mais dependentes atualmente.....	72
<b>Figura 15:</b> Distribuição de elementos com poucas fontes produtoras, com destaque para a hegemonia chinesa na produção de terras raras, antimônio, magnésio, tungstênio, germânio, silício e bismuto. ....	73
<b>Figura 16:</b> Histórico das quotas de exportação de terras raras na China.....	75
<b>Figura 17:</b> Detalhe da extração de terras raras no distrito de Nancheng, na província de Jiangxi. ....	77
<b>Figura 18:</b> Beneficiamento e produção de lantânio em empresa localizada nas proximidades de Bayan Obo.....	77
<b>Figura 19:</b> Detalhe de trabalhador com calças corroídas por ácido em empresa de beneficiamento nas proximidades de Bayan Obo. ....	78
<b>Figura 20:</b> Escalada de preços do óxido de európio, usado em lâmpadas fluorescentes.....	87
<b>Figura 21:</b> Comparativo entre o progresso dos principais projetos de produção de terras raras fora da China. ....	88
<b>Figura 22:</b> Detalhe da operação em Mt. Weld com as concentrações de REO no minério da porção mais rica, CLD.....	90

<b>Figura 23:</b> Vista aérea da planta de concentração junta ao depósito de Mt. Weld. ....	91
<b>Figura 24:</b> Detalhe do processo de flotação (acima) e filtração em prensa (abaixo) para produção do concentrado de minério.....	91
<b>Figura 25:</b> Investimentos da Lynas na fase 1 de seu projeto.....	93
<b>Figura 26:</b> Visão geral do depósito de Mountain Pass e dos planos de construção da Molycorp. ....	94
<b>Figura 27:</b> Comparativo entre custos de produção de REO. ....	97
<b>Figura 28:</b> Numero de pedidos de concessão para exploração de terras raras no Brasil. ....	103
<b>Figura 29:</b> Processo de produção de concentrados de minério. ....	105
<b>Figura 30:</b> Localização dos principais depósitos de terras raras brasileiros. ....	107
<b>Figura 31:</b> Detalhe do depósito de Seis Lagos e da infraestrutura circundante.....	108
<b>Figura 32:</b> Estrada de acesso ao depósito de Seis Lagos. ....	109
<b>Figura 33:</b> Preço do neodímio na China (tido como referência de preços às terras raras) diminuiu nos últimos 3 meses, refletindo o otimismo sobre o aumento da produção mundial. ....	112

## **Lista de Tabelas**

<b>Tabela 1:</b> Resumo dos principais usos das terras raras, elementos utilizados em cada aplicação e desenvolvimentos futuros. ....	28
<b>Tabela 2:</b> Minerais com ocorrência de terras raras e porcentagem contida de tório e urânio.....	39
<b>Tabela 3:</b> Comparativo de preços de terras raras dentro e fora da China. ....	85
<b>Tabela 4:</b> Comparativo entre o minério de Mt. Weld e Mountain Pass. ....	97
<b>Tabela 5:</b> Principais depósitos de terras raras brasileiros, com destaque ao depósito de Seis Lagos. ....	104
<b>Tabela 6:</b> Análise do investimento da Lynas comparado a sua receita operacional projetada. ....	114



## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

CNMC	Grupo Chines de Mineração de Metais não-Ferrosos
CSRE	Sociedade Chinesa das Terras Raras
ES	Espirito Santo (estado brasileiro)
EUA	Estados Unidos da América
FARC	Forças Armadas Revolucionárias da Colômbia
FIRB	Foreign Investment Review Board
GGG	Garnet Gadolínio – Gálio
HDs	Hard Disks
JOGMEC	Estatal Japonesa de Petróleo, Gás e Metais
LED	Light Emitting Diode
REHT	Inner Mongolia Baotou Rare Earth Hi-Tech
REO	Óxidos de Terras Raras
UV	Ultravioleta

## Sumário

1	Introdução .....	1
2	As terras raras – um histórico de descobertas .....	2
3	Características e propriedades .....	5
3.1	Reatividade .....	8
3.1.1	Ar/oxigênio .....	8
3.1.2	Refratários .....	9
3.1.3	Nitrogênio .....	10
3.1.4	Hidrogênio .....	10
3.1.5	Carbono .....	10
3.1.6	Metais refratários .....	11
3.1.7	Ácidos .....	11
4	Aplicações .....	12
4.1	Metalurgia .....	13
4.2	Ferro nodular .....	13
4.3	Aços .....	13
4.4	Superligas .....	14
4.5	Ligas de alumínio .....	14
4.6	Ligas de titânio, cobre e zinco .....	15
4.7	Magnetismo .....	15
4.8	Terfenol .....	18
4.9	Refrigeração magnética .....	19
4.10	Materiais magnetoópticos .....	20
4.11	Cerâmica .....	20
4.12	Eletrônica .....	21
4.13	Química .....	21
4.14	Óptica .....	22
4.15	Fósforos .....	23
4.16	Nuclear .....	24
4.17	Armazenagem de hidrogênio .....	25
4.18	Baterias recarregáveis .....	25
4.19	Supercondutores .....	26

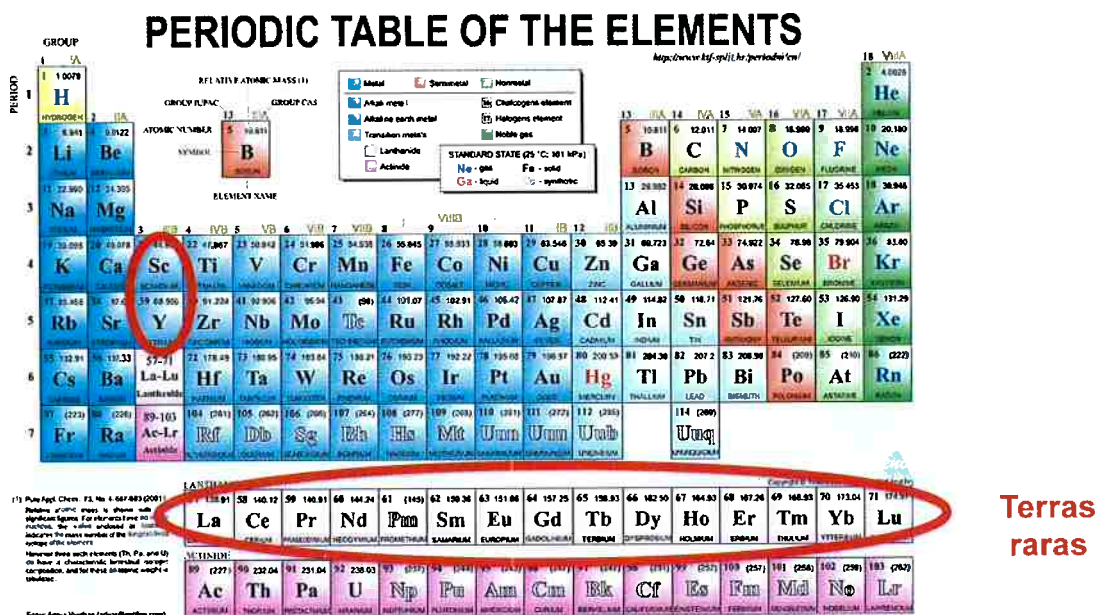
4.20	Outros .....	26
5	Recursos .....	28
5.1	Terras raras na crosta terrestre .....	29
5.2	Minerais .....	30
5.2.1	Bastnasita .....	30
5.2.2	Monazita.....	31
5.2.3	Xenotímio .....	33
5.2.4	Alanita .....	34
5.2.5	Apatita.....	35
5.2.6	Branerita.....	36
5.2.7	Eudialita:.....	36
5.2.8	Euxenita e Fergusonita:.....	36
5.2.9	Florencita.....	37
5.2.10	Gadolinita .....	37
5.2.11	Loparita .....	37
5.2.12	Perovskita .....	37
5.2.13	Pirocloro .....	37
5.2.14	Minerais de escândio .....	38
5.2.15	Promécio .....	38
6	Depósitos de terras raras .....	40
6.1	Primários e secundários.....	40
6.2	Carbonatitas .....	40
6.3	Pegmatitas .....	40
6.4	Depósitos hidrotermais.....	41
6.5	Depósitos sedimentares .....	41
6.6	Distribuição .....	41
7	Reservas mundiais (até outubro de 2010).....	42
7.1	Ocorrência no mundo .....	43
7.1.1	Afeganistão.....	43
7.1.2	Argentina.....	43
7.1.3	Austrália .....	44
7.1.4	Bangladesh .....	46
7.1.5	Brasil (até outubro de 2010).....	46
7.1.6	Canadá.....	47

7.1.7	China .....	48
7.1.8	Alemanha .....	51
7.1.9	Índia .....	51
7.1.10	Indonésia .....	52
7.1.11	Japão .....	52
7.1.12	Malásia .....	52
7.1.13	Malawi .....	53
7.1.14	Moçambique .....	53
7.1.15	Myanmar .....	54
7.1.16	Nova Zelândia .....	54
7.1.17	Peru .....	54
7.1.18	África do Sul .....	54
7.1.19	Sri Lanka .....	55
7.1.20	Taiwan .....	55
7.1.21	Tailândia .....	55
7.1.22	Turquia .....	56
7.1.23	Estados Unidos .....	56
7.1.24	Rússia .....	57
7.1.25	Venezuela .....	57
7.1.26	Vietnã .....	57
7.1.27	República Democrática do Congo (RDC, ex-Zaire) .....	58
8	A produção de terras raras no mundo .....	58
8.1	Histórico da produção mundial .....	60
8.2	Produção no Brasil .....	61
8.3	Produção na Índia .....	62
8.4	Produção nos Estados Unidos .....	63
8.5	Produção na Austrália .....	64
8.6	Produção na China .....	65
8.7	Produção na Rússia .....	66
8.8	Produção na África do Sul .....	66
8.9	Produção no Canadá .....	67
8.10	Produção na Malásia .....	67
8.11	Produção na Tailândia .....	67
8.12	Produção no Sri Lanka .....	67

8.13	Republica Democrática do Congo (ex-Zaire).....	68
9	Situação de mercado das terras raras .....	68
10	Após a consolidação, a ofensiva chinesa .....	74
11	Empresas do segmento com atuação fora da China .....	88
11.1	Lynas Corporation.....	88
11.2	Molycorp Minerals Inc. ....	94
11.3	Arafura Resources .....	98
11.4	Great Western Minerals Group.....	99
11.5	Avalon Rare Minerals.....	100
11.6	Alkane Resources.....	100
11.7	Ucore Rare Metals .....	101
11.8	Greenland Minerals .....	102
12	Uma possibilidade para o Brasil .....	102
13	Conclusão.....	110
14	Referências bibliográficas .....	115

# 1 Introdução

As chamadas terras raras são um grupo de 17 elementos metálicos de propriedades muito similares entre si (Spedding, 1978). O grupo é composto de 16 elementos naturais, sendo um elemento não encontrado na natureza e produzido a partir de reações atômicas (o Promécio).



**Figura 1:** Tabela periódica dos elementos com destaque ao grupo das terras raras (Landgraf, 2011).

Chamadas raras, não exatamente pela sua baixa disponibilidade na natureza, mas sim pela extrema dificuldade em extraí-los de forma pura e refinada. A grande dificuldade em extrair um elemento do outro provém do fato de que as terras raras se comportam de forma muito similar, e mesmo após diversas etapas de separação química, se encontram em uma mesma fase. Até hoje, os maiores desafios tecnológicos estão na separação, purificação e refino das terras raras.

Esse fato também fez com que a descoberta destes 16 elementos naturais fosse realizada ao longo de 160 anos, de uma forma confusa e desordenada. Os químicos do século XIX tiveram muita dificuldade em separar

os elementos, e por este motivo, diversas vezes nomearam como novas descobertas uma mistura de elementos que apresentava uma única fase após complexos processos químicos de separação.

A dificuldade de separação e de obtenção de elementos puros, também fez com que as propriedades destes materiais demorassem a ser conhecidas. Isto porque muitas vezes foram analisadas as propriedades dos óxidos ou inclusive de mistura de elementos. Apenas a partir dos anos 50, que se conseguiu extrair em laboratório muitos destes elementos em forma pura e consequentemente medir propriedades adequadas.

Os anos 60 e 70 foram de grande expansão para a indústria de terras raras, já que com propriedades conhecidas e devidamente separadas e refinadas, puderam ser aplicadas na indústria. Atualmente, as terras raras são aplicadas em metalurgia, magnetismo, eletrônica, em catalisadores químicos, na indústria óptica e também nuclear.

O mundo necessita cerca de 128.000 toneladas de óxidos de terras raras por ano (Lynas, 2011), utilizadas tanto como óxidos quanto como metais extremamente refinados. Apesar do fato de que reservas são encontradas em todos os continentes, a maior produtora mundial é a China. Nos últimos 3 anos, a China não apenas controlou a maior parte da produção mundial (influindo fortemente no preço de terras raras), como também adquiriu reservas, com o objetivo de monopolizar o mercado e verticalizar toda a indústria global.

O presente trabalho possui o objetivo de apresentar as terras raras, suas reservas e utilidades, além de principalmente mapear o atual cenário, suas eventuais consequências ao mundo e especialmente, ao Brasil.

## **2 As terras raras – um histórico de descobertas**

A descoberta dos elementos de terras raras começou em 1787 e continuou por cerca de 160 anos, até que em 1940, o último elemento foi fabricado a partir de reações nucleares. (Szabadvary, 1988; Weeks, 1956).

Em 1787, o tenente do exército real sueco (e geólogo amador) Carl Axel Arrhenius encontrou um mineral negro em uma pedreira na vila de Ytterby, perto de Estocolmo. Após examinar o pedaço de rocha, chegou a conclusão que não se parecia com nada conhecido até então. Alguns anos mais tarde, o químico finlandês, Johann Gadolin ao examinar o mesmo material encontrou ferro, silicatos e uma “nova terra” que perfazia 30% do mineral de Arrhenius. O novo elemento foi chamado ítrio (em homenagem a vila de Ytterby) e o mineral foi batizado de Gadolinita.

Isso era um fato comum à época. Como não se podia separar os elementos das “novas terras”, geralmente a nova terra se tornava um novo elemento, e sua descoberta era anunciada. Foi apenas no começo do século XIX que o químico húngaro Antal Ruprecht teorizou que muitos dos “elementos” da época deveriam ser na verdade complexos que continham diversos elementos em quantidades distintas. Poucos anos mais tarde, o químico inglês Sir Humphrey Davy realizou eletrólises ígneas de diversas terras e conseguiu isolar em estado metálico, diversos elementos, como cálcio, estrôncio e bário, e, finalmente os elementos metálicos começaram a ser distinguidos das terras conhecidas até então.

Em 1804, Jöns Berzelius e Wilhelm Hisinger, trabalhavam em um mineral similar ao descoberto por Arrhenius e conseguiram isolar uma fase, a qual denominaram ser um óxido de um novo elemento. Em homenagem ao asteróide Ceres, que havia sido descoberto há pouco, nomearam o elemento cério (sem conseguir isolá-lo) e o mineral cerita.

Carl Gustav Mosander, um associado de Berzelius, ao analisar a cerita, desconfiou que poderiam haver novas fases e, portanto, novos elementos. Através de complexos métodos de separação e de um longo processo, conseguiu distinguir uma nova fase na cerita, a que denominou ser o elemento lantânio (do grego “o que não é percebido”). Mosander continuou seus experimentos e, mais tarde percebeu que o lantânio também não estava em sua forma pura, mas continha outros elementos. Em 1842, conseguiu finalmente isolar um elemento a que chamou didímio (do grego “gêmeos”), pois



por vezes encontrava o elemento associado ao cério e outras vezes ao lantânio.

Um ano mais tarde, Mosander voltou-se ao mineral encontrado por Arrhenius, e desconfiou que pudessem existir novos elementos nessa “nova terra”, até então chamada gadolinita, em homenagem ao químico finlandês que a descobriu: Johann Gadolin. Após um longo processo de separação, encontrou dois novos elementos na gadolinita, a que chamou érbio e térbio.

A descoberta destes novos elementos foi muito contestada pela comunidade científica da época. Apenas a partir de 1850, com o desenvolvimento da análise em espectômetro de massa, conseguiu-se provar a existência dos novos elementos descobertos na primeira metade do século XIX.

Ao longo das décadas de 70 e 80 do século XIX, diversos minerais foram levados ao espectômetro e seus resultados eram comparados entre si. Tanto a espectometria, quanto novas técnicas de separação tornaram possível a descoberta de novos elementos. Em 1878, o químico suíço Jean Marignac, trabalhando com o térbio descoberto por Mosander, descobriu, uma nova fase, a qual denominou itérbio (com propriedades semelhantes ao ítrio e ao térbio). Em 1879, o escândio (nomeado em homenagem à Escandinávia) foi isolado pelo sueco Lars Nilson e, no mesmo ano, o érbio foi analisado pelo também sueco Per Theodor Cleve e separado em novos elementos, tântalo (em homenagem ao mito nórdico de Thulium) e o hólmio (derivado do antigo nome de Estocolmo). Em 1880, Marignac descobriu o gadolínio (em homenagem a Johann Gadolin) a partir de um mineral de samarsquita.

Pouco mais tarde, em 1886, o hólmio descoberto foi separado em um novo elemento, o disprósio (do grego: “difícil acessar”). O didímio isolado por Mosander cerca de meio século antes, foi separado em dois novos elementos, o praseodímio e o neodímio, pelo químico austríaco, Carl Von Welsbach. A partir do didímio, também foram encontrados novos elementos, como o samário e o európio. Apenas em 1905, o último elemento natural foi isolado a partir do itérbio, sendo chamado lutécio (em homenagem ao nome latino da cidade de Paris).

Com o desenvolvimento da teoria atômica, e de uma expressão matemática que relacionava a frequência de emissão de raios-x ao número atômico do elemento, todas as terras raras foram submetidas a raios-x e puderam ser mapeadas. Desde o lantânio, com número atômico 57 até o lutécio, de número atômico 71, o que comprovou a descoberta destes elementos.

Porém, dentre todos estes mapeados, restava ainda o elemento de número atômico 61, que ainda não havia sido descoberto.

Em 1941, pesquisadores da Universidade de Ohio, ao bombardear uma amostra de praseodímio, neodímio e samário com nêutrons, deutérios e partículas alfa, detectaram radioatividade resultante do elemento 61. Porém, apenas em 1945, no Laboratório Clinton (hoje o Oak Ridge National Laboratory), que o novo elemento foi produzido a partir da fissão do urânio ou do bombardeamento do neodímio com nêutrons. O novo elemento foi batizado de promécio, em homenagem ao mitológico Prometeu, que roubou o fogo dos deuses.

### **3 Características e propriedades**

Em sua forma elementar, as terras raras possuem um brilho metálico que vai desde o similar ao ferro a um brilho mais característico da prata. São tipicamente de baixa dureza, leves, maleáveis e geralmente reativos (Cannon, 1974; Gschneider, 1990; McGill, 1997).

A similaridade entre as propriedades químicas e físicas das terras raras não somente se evidencia pelo fato de que todos estes elementos ocorrem juntamente na natureza, mas também pelo fato de terem sido necessários 160 anos para que estes elementos tivessem sido devidamente isolados em sua forma pura.



**Figura 2:** Distintos óxidos de terras raras (USGS, 2010).

Isso decorre do fato de que a estrutura eletrônica destes materiais é muito semelhante. O escândio, o ítrio e o lantânio, são elementos que iniciam três sucessivas séries de elementos de transição, pois não possuem elétrons no orbital F. A partir do lantânio, os 14 elementos seguintes, que apresentam elétrons no orbital F (cério ao lutécio) são chamados lantanídeos.

As terras raras possuem potencial de ionização relativamente baixo. São bastante eletropositivos e formam compostos essencialmente iônicos. Todos os elementos se ionizam na forma  $M^{3+}$ , porém alguns também ocorrem na forma  $M^{2+}$  e  $M^{4+}$ .

Como resultado da estrutura eletrônica das terras raras, temos um fenômeno chamado: Contração lantanídea. Devido à blindagem imperfeita dos elétrons do orbital F, conforme o número atômico aumenta a partir do lantânio, os elementos apresentam mais elétrons no orbital F (elétrons com cargas direcionais e com pouco efeito de blindagem) e, conseqüentemente, o tamanho do átomo é diminuído (até o lutécio). O tamanho do átomo, juntamente com o forte caráter iônico de seus elementos, são os fatores preponderantes na química de terras raras.

Outra propriedade importante é o caráter básico das terras raras. Isso é uma conseqüência da contração lantanídea e da característica fortemente iônica destes metais. Isto influirá bastante nos processos de extração e refino das terras raras, como também limitará seu uso.

As terras raras possuem ponto de fusão bastante distinto (variando entre 798°C para o cério até 1663°C para o lutécio), caracterizado tanto pelo tamanho do átomo como também pela hibridização do orbital F (Gschneidner and Daane, 1988). Isto explica o aumento regular do ponto de fusão conforme aumentamos o número atômico e as exceções a esta regra (cério, európio e itérbio), que possuem maior hibridização no orbital F que os outros elementos.

O ponto de fusão também pode variar bastante com a concentração (mesmo que baixa) de impurezas. Como exemplo disso, o simples ato de medir o ponto de fusão com amostras provindas de eletrólise ígnea de sais com o uso de eletrodos de grafite apresenta uma variação de cerca de 100°C para o caso do lantânio (Spedding et al, 1968).

O ponto de fusão das terras raras é fator determinante para o processo de redução que será utilizado, seja metalotérmico ou eletrolítico. Terras raras com baixo ponto de fusão são reduzidas de forma mais barata, com processos envolvendo o cloreto do metal, enquanto que aquelas de alto ponto de fusão são obtidas com reações mais complexas e caras envolvendo o uso do fluoreto do metal.

Assim como o ponto de fusão, o ponto de ebulição das terras raras também é fator preponderante para a escolha do processo de refino. Os metais mais voláteis, como o európio, o samário e o itérbio são produzidos através do processo de redução – destilação, de forma similar ao magnésio (Pidgeon and King, 1948). Nestes metais, o processo de purificação e refino inclui etapas de destilação e até sublimação. Por outro lado, a relativa alta volatilidade dos metais do grupo de terras raras é um fator limitante para a aplicação de métodos de ultra purificação, como o eletro transporte em estado sólido.

Quanto à resistividade, os elementos do grupo terras raras são péssimos condutores elétricos, de tal maneira que em alguns processos em que devem ser aquecidos, se utiliza o próprio calor gerado pela autoresistência das terras raras. Destaca-se também, sua resistividade que é muito sensível à presença de impurezas, particularmente hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. Um método conhecido de se medir o teor de impurezas em terras raras é analisar a razão

de resistividades à temperatura ambiente e a 1K (Gupta and Krishnamurthy, 2004).

Entre as terras raras, apenas o lantânio apresenta supercondutividade à pressão atmosférica (Gschneidner and Daane, 1988). O lantânio em seu estado elementar é um dos melhores supercondutores ( $T_c = 6,1\text{K}$ ), juntamente com o chumbo ( $T_c=7,2\text{K}$ ) e o nióbio ( $T_c=9,2\text{K}$ ) (Gupta and Krishnamurthy, 2004).

Outra importante propriedade das terras raras é o magnetismo. Todas as terras raras, com exceção do escândio, ítrio, lantânio, lutécio e itérbio apresentam comportamento magnético. Isso é consequência de sua orientação eletrônica. De tal forma, apenas os elementos com o orbital F incompleto apresentam magnetismo. A existência de ferromagnetismo foi inicialmente observada no gadolínio (Klemm and Boomer, 1937). Porém, apenas a partir dos anos 50, que estudos conduzidos pelo Ames Group elucidaram melhor as propriedades magnéticas destes elementos. Assim como com outras propriedades, a precisa classificação e o estudo das reais propriedades magnéticas das terras raras só foi possível com a obtenção de amostras de elevada pureza (Gschneidner and Daane, 1988) e na forma de grandes cristais, dado que o magnetismo apresenta anisotropia em relação ao eixo cristalográfico.

### **3.1 Reatividade**

#### **3.1.1 Ar/oxigênio**

A temperatura ambiente, as terras raras não são afetadas pelo ar da mesma forma. Algumas corroem muito rapidamente, enquanto outras mantêm o brilho metálico por anos. O európio, por exemplo, se oxida assim que exposto ao ar (principalmente se a umidade do ar for elevada). Em questão de dias ou semanas, um bloco inteiro de európio se transforma em óxido. Lantânio e

neodímio são mais resistentes e permanecem por meses na mesma condição. A maioria das terras raras mais pesadas é mais resistente à corrosão.

O aumento na temperatura e na umidade aceleram fortemente a oxidação de terras raras (Gschneidner and Daane, 1988). A razão pela qual o lantânio se oxida varia cerca de 10 vezes se a umidade for elevada de 1% para 75%. A oxidação do lantânio a 1% de umidade, equivalente a 0,8 mg/cm<sup>2</sup>dia, a 35°C se eleva para 5,1 mg/cm<sup>2</sup>dia, a 95°C, a 32,0 mg/cm<sup>2</sup>dia, a 400°C e a 130,0 mg/cm<sup>2</sup>dia, a 600°C (Love and Kleber, 1960).

Os óxidos formados na oxidação de terras raras leves (lantânio ao neodímio), são de forma hexagonal e fórmula RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. O óxido formado nestes metais reage com a umidade, se expande e expõe partes internas do metal à corrosão.

Do samário ao gadolínio, os óxidos são hexagonais de fórmula também RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, enquanto que o restante das terras raras possuem óxidos RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de formato cúbico que formam uma camada aderente ao restante do metal que impede que a oxidação continue, a camada passiva (Gupta and Krishnamurthy, 2004).

### 3.1.2 Refratários

A reatividade das terras raras com o oxigênio é oriunda da elevada energia livre negativa de formação do óxido. As terras raras possuem as mais negativas entre a tabela periódica (atrás apenas do cálcio). Conseqüentemente, os óxidos das terras raras estão entre os mais estáveis da natureza. Isto faz com que as terras raras ataquem e reduzam os mais inertes óxidos, como a alumina, zircônia e a magnesita (Kremers, 1961). O ataque aos refratários é particularmente importante se a contaminação das terras raras é um fator a ser levado em consideração.

### 3.1.3 Nitrogênio

As terras raras possuem grande afinidade com o nitrogênio. Os mononitratos das terras raras são comparáveis em estabilidade aos formados por metais como o titânio e o zircônio (Pankratz et al., 1984).

### 3.1.4 Hidrogênio

Reagem muito bem com o hidrogênio e facilmente formam hidretos à temperatura de 400 a 600°C. Se a hidrogenação continua até a proporção  $REH_2$ , o material sólido se fragmenta. Quando a concentração está abaixo disso, o material se comporta como um metal e até apresenta condutividade elétrica maior em relação ao metal puro.

Um ponto importante é a aplicabilidade desta característica em armazenadores de hidrogênio. O ítrio é capaz de dissolver mais hidrogênio por unidade de volume que o próprio hidrogênio líquido ou que a água. A pressão de decomposição do  $YH_2$  é baixa mesmo em altas temperaturas e se torna 1 atm apenas a 1260°C (Spedding et al. 1968).

Ao contrário do ítrio, nem todas as terras raras possuem elevado grau de solubilidade do hidrogênio em alta temperatura. Tanto que um método de obtenção de pós metálicos de terras raras é a dissolução de hidrogênio até que as propriedades mecânicas sejam alteradas de forma que a cominuição seja facilitada. Após essa primeira etapa, eleva-se a temperatura para que o hidrogênio seja retirado e possamos obter o pó metálico puro. Saliente-se que caso a temperatura de retirada do hidrogênio seja elevada o suficiente, podemos terminar o processo com um material sinterizado.

### 3.1.5 Carbono

Com elevada reatividade com o carbono, as terras raras formam carbonetos do tipo  $REC_2$ ,  $RE_2C_3$  e até  $RE_3C_4$ . A solubilidade sólida do carbono em terras raras também é elevada. (Massalski et al, 1990). A alta solubilidade

do carbono nestes metais faz com que o ataque a eletrodos contendo carbono seja intenso e a contaminação sempre aconteça. Além disso, também inviabiliza a redução por meio de processos carbotérmicos.

### **3.1.6 Metais refratários**

Dentre os metais refratários, o nióbio, molibdênio, tântalo e tungstênio estão entre os mais resistentes ao ataque de terras raras em estado líquido. Os metais acima estão em ordem de solubilidade de terras raras, sendo o tungstênio o menos solúvel (Dennison et al., 1966). Isto define os materiais para serem utilizados em equipamentos destinados ao manuseio de terras raras. Apesar de o tungstênio ser o metal com menor solubilidade, este possui propriedades mecânicas inferiores ao tântalo, o que faz com que este último seja o escolhido para fabricação de contêineres e equipamentos destinados ao uso com terras raras.

O uso de equipamentos cerâmicos impõe um limite superior de 95-98% de pureza das terras raras, enquanto o uso de equipamentos de tântalo permite o alcance de teores de pureza superiores a 99% (Gschneidner and Daane, 1988).

### **3.1.7 Ácidos**

Todas as terras raras se dissolvem facilmente em ácidos minerais, liberando hidrogênio (Gschneidner and Daane, 1988). Um ponto importante é o fato das terras raras se mostrarem resistentes ao ataque pelo ácido fluorídrico. Isto ocorre, pois  $REF_3$  se forma e adere à superfície do metal, formando uma camada protetora. A importância deste fato se dá porque o mesmo ácido fluorídrico dissolve facilmente o Tântalo que, por ser muito usado com terras raras, acaba por tornar-se um contaminante em baixos teores.



## 4 Aplicações

A primeira aplicação tecnológica e comercial das terras raras veio da inventividade do austríaco Carl Von Welsbach, em 1866. À época, uma grande dificuldade era a obtenção de luz com alto brilho e iluminação. Sabia-se que um sólido de composição estável e grande área quando exposto a zona quente da combustão de um gás emitiria luz de forma intensa. O grande problema tecnológico era achar qual a composição desse sólido, para que este se mantivesse enquanto irradiasse luz. Welsbach resolveu esse problema inicialmente ao desenvolver uma manta feita de zircônia dopada com óxido de lantânio (lantânia). A quebradiça e frágil manta viabilizou o uso do lampião a gás, ao emitir uma fria luz azulada. Porém Welsbach, após muita experimentação, desenvolveu em 1891 uma manta composta de 99% de óxido de Tório e 1% de óxido de Cério. A luz obtida desta manta não só era brilhante e superior a recém inventada lâmpada elétrica, mas também muito mais barata. Com um processo fabril relativamente simples, Welsbach produzia a manta a partir de telas de algodão que eram embebidas em uma solução salina de Tório e Cério. Após queima, o óxido resultante mantinha o formato da tela de algodão com relativa resistência mecânica. Estima-se que até 1935, mais de 5 bilhões de telas de lampião foram fabricadas no mundo.

Welsbach não somente produziu as telas para lampião, mas também inventou o mecanismo de ignição para acender seu lampião e mantê-lo aceso. Tratava-se de uma mistura de 70% terras raras (misch metal – lantânio, cério, praseodímio e neodímio na proporção em que apareciam na monazita) e 30% de ferro. No período de 22 anos, entre 1908 e 1930, foram consumidas 1.300 a 1.800 toneladas de terras raras em mecanismos de ignição e mais de 7.500 toneladas de nitrato de tório para produção das mantas de lampião.

Desde o princípio do século XX, as aplicações industriais das terras raras abrangem: metalurgia, magnetismo, cerâmica, eletrônica, química, óptica e nuclear, conforme detalhado abaixo:

## 4.1 Metalurgia

Terras raras possuem grandes aplicações no campo da metalurgia. A mais antiga liga é o misch metal, que conforme descrito acima, foi não apenas empregado na fabricação de mecanismos de ignição, mas também aplicado em outras ligas existentes até então.

## 4.2 Ferro nodular

A produção de ferro nodular se deu com o auxílio de terras raras (Linebarger e McCluhan, 1981). Ao controlar o crescimento de carbonetos e, principalmente, de manter seu formato arredondado, o cério faz com que o ferro fundido tenha ductibilidade semelhante a alguns aços mais caros. Até hoje, o ferro nodular é muito utilizado na indústria de fundição e automobilística.

## 4.3 Aços

Os efeitos indesejáveis do enxofre no aço são largamente conhecidos e temidos. Durante a solidificação, sulfetos férricos se formam e se concentram na borda de grãos, o que faz com que o aço resultante seja frágil e quebradiço.

A adição de terras raras ao banho, faz com que o enxofre seja capturado em compostos extremamente estáveis, como o  $\text{RE}_2\text{S}_3$  e o  $\text{RE}_2\text{S}_2\text{O}$ . Além de evitar a formação e concentração dos indesejáveis sulfetos férricos, os compostos resultantes de terras raras e enxofre formam inclusões globulares que não se concentram no contorno de grão, fornecendo relativa ductibilidade ao aço (Luyckx, 1981). Além disso, compostos sulfurosos de terras raras possuem formas globulares mais estáveis e que não se deformam como os compostos sulfurosos de manganês, que se deformam ao longo de processos de fabricação em que o aço é utilizado. Outra vantagem das terras raras é o fato que se associam muito facilmente ao hidrogênio, diminuindo o coeficiente de difusão deste no aço, o que melhora sua resistência mecânica.

A adição de terras raras ao aço é feita por meio de silicatos ou diretamente por aplicação do misch metal. Durante os anos 70, a adição de terras raras ao aço foi largamente aplicada, com máxima utilização no ano de 1975. Atualmente, as terras raras foram substituídas por cálcio.

#### **4.4 Superligas**

Superligas são essencialmente uma classe de ligas resistente a altas temperaturas, utilizadas em turbinas movidas a gás, geradores elétricos, exaustores de motores a jato e contêineres reativos. Terras raras são geralmente adicionadas para elevar a resistência a oxidação nas condições extremas em que as superligas serão submetidas. A principal terra rara adicionada em superligas é o ítrio.

No começo dos anos 60, pesquisadores da General Electric descobriram que aços inoxidáveis contendo alumínio e ítrio apresentavam elevada resistência à corrosão, mesmo em altas temperaturas (Davies, 1981). A superliga batizada de “Fecralloy” (em analogia a sua composição) foi muito utilizada na fabricação de fornos de aquecimento e foi considerada uma liga substituta aos cerâmicos utilizados em catalisadores automobilísticos.

O lantânio também é bastante utilizado em ligas resistentes a altas temperaturas (Davies, 1981). Uma liga com apenas 200ppm de lantânio combina resistência a oxidação a 1100°C com boa maleabilidade e facilidade de fabricação.

#### **4.5 Ligas de alumínio**

Uma pequena quantidade de ítrio (100ppm), aplicada juntamente com o zircônio em ligas de alumínio é capaz de aumentar em até 50% a condutividade de linhas de transmissão (Davies, 1981). A adição de misch metal também melhorou as propriedades mecânicas, resistência térmica, a corrosão, bem como a extrudabilidade de ligas utilizadas em linhas de transmissão.

Adicionalmente, uma nova liga de alumínio – ferro – cério está sendo desenvolvida para substituir o uso de componentes de titânio em aplicações de 90°C a 315°C. O cério possui o objetivo de elevar a resistência a corrosão nestas temperaturas (Jackson e Christiansen, 1993).

A adição de escândio ao alumínio aumenta significativamente a resistência ao impacto e reduz o tamanho de grão. Atualmente, os principais campeonatos de baseball no mundo utilizam tacos de uma liga de alumínio – escândio. Tal liga confere ao taco um peso relativamente leve com grande poder de rebatidas. (Hedrick, 1997).

#### **4.6 Ligas de titânio, cobre e zinco**

O ítrio, em concentrações de 200ppm, aumenta a maleabilidade e facilita a fabricação de ligas de Titânio (Davies, 1981). A adição de terras raras também melhora a resistência mecânica e resistência a corrosão de ligas de titânio.

A adição de misch metal ou Ítrio a ligas de cobre com alta condutividade e baixos teores de oxigênio aumenta a resistência à oxidação do cobre sem influir em sua desejada condutividade elétrica. Um exemplo disso é o fato que a resistência à oxidação a 600°C quase dobra com a adição de 0,1% em peso ao ítrio.

Em aços galvanizados, a adição de misch metal também confere elevada resistência a corrosão. O Galfan, liga de zinco muito usada na galvanização, possui 5% de alumínio e 0,05% de misch metal (Radtke e Herrschaft, 1983).

#### **4.7 Magnetismo**

Entre as numerosas aplicações das terras raras, uma das mais espetaculares é o seu uso em magnetos permanentes de última geração.

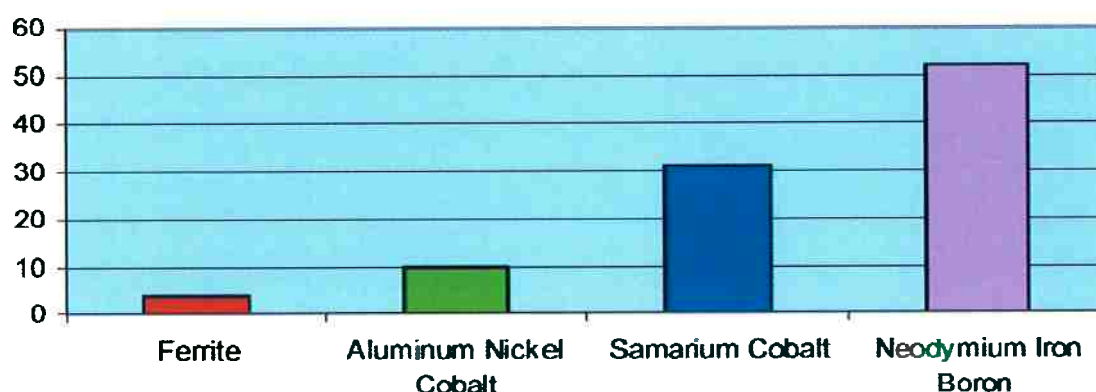
No final dos anos 60, magnetos permanentes de samário e cobalto, produzidos através de sinterização foram produzidos comercialmente. Estes magnetos possuíam propriedades muito superiores aos conhecidos magnetos ferríticos e o Alnico. A força magnética provinha substancialmente dos átomos de cobalto. O samário servia apenas para organizar o cobalto em uma estrutura hexagonal que originava forte anisotropia axial, resultando em alta coercividade.

Tamanha força magnética fez com que o tamanho dos magnetos pudesse ser reduzido e os ímãs de samário – cobalto fossem responsáveis por um avanço significativo da miniaturização de equipamentos. Foram largamente empregados em relógios de pulso, equipamento “hi-fi”, periféricos de informática, todos de microondas e etc.

~~Como~~ Tanto o samário quanto o cobalto são elementos raros e caros, a substituição do samário por misch metal foi empregada em magnetos de qualidade inferior, mas a preços bem mais acessíveis.

A descoberta de magnetos de neodímio – ferro – boro em 1984 iniciou uma nova era de fabricação de magnetos. Não só possuíam 2,5 vezes mais energia magnética (alcançando 50MGOe), como também eram muito mais baratos e fáceis de se produzir.

**Varying Magnetic Strengths (MGO)**



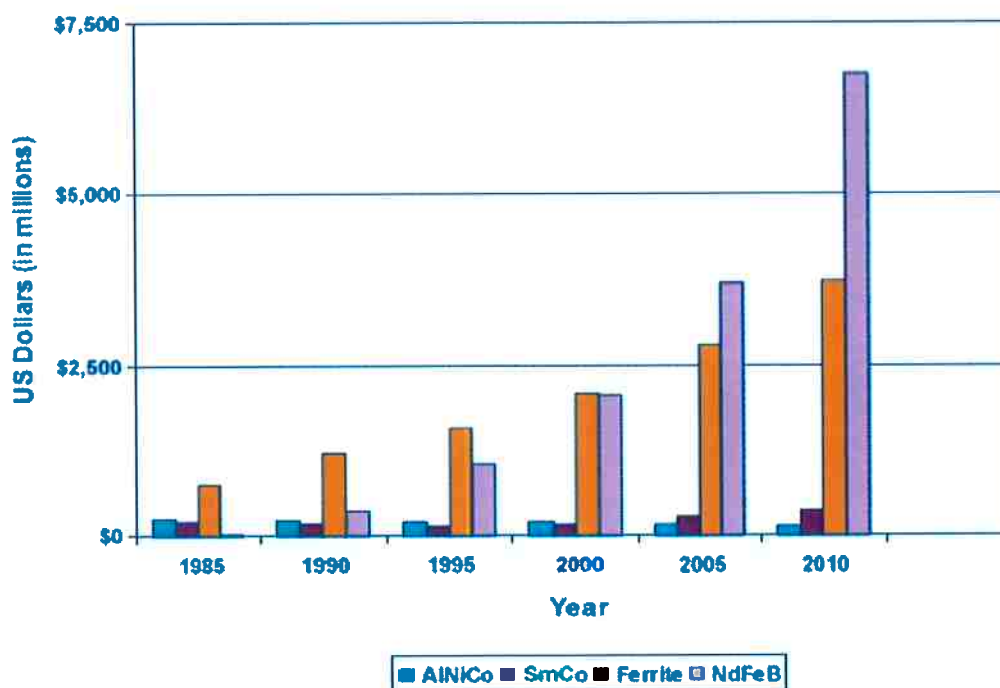
**Figura 3:** Comparativo entre o produto energético (BH)max de diversos tipos de magnetos (WILTW, 30/07/2009).

Tão logo foram descobertos, já foram aplicados, inicialmente na indústria automobilística, de forma pioneira pela General Motors. Mais tarde foram também aplicados em alto-falantes, equipamentos de ressonância magnética, na indústria eletrônica e na manufatura de computadores e aparelhos portáteis. Em 1985, a maior demanda entre as terras raras era pelo neodímio utilizado em magnetos portáteis (Hedrick, 2000). A produção mundial de magnetos permanentes de neodímio – ferro – boro (Nd-Fe-B) foi de mais de 16.000 toneladas (Gupta and Krishnamurthy, 2004). As principais aplicações eram em pequenos motores elétricos (Hard-disks): 69%, aplicações automotivas: 14%, scanners de ressonância magnética: 10% e aplicações acústicas e outras: 7%.

Na época, foi antecipado que os magnetos de neodímio – ferro – boro iriam substituir todos os existentes até então. Porém sua baixa temperatura de Curie (cerca de 300°C) faz que sua aplicação seja limitada em altas temperaturas, onde os magnetos de samário – cobalto ainda são funcionais e eficientes, com temperatura de Curie entre 700°C e 900°C.

Estão em desenvolvimento novas ligas contendo ferro e terras raras com o objetivo de alcançar o poder magnético dos magnetos Nd-Fe-B com uma elevada temperatura de Curie. Por enquanto os maiores avanços foram obtidos com adições intersticiais como nitrogênio e carbono.

Por enquanto, se não fossem os custos de fabricação dos magnetos de neodímio cerca de 20 vezes o custo dos magnetos de ferrita, o mercado seria totalmente dominado pelos magnetos de Nd-Fe-B. Atualmente o mercado de magnetos de terras raras corresponde a US\$6 bilhões anuais.



**Figura 4:** Tamanho do mercado de diversos tipos de magnetos (WILTW, 30/07/2009).

#### 4.8 Terfenol

Magnetostricção é uma característica descoberta em 1971, na qual um material se deforma ao ser exposto a algum campo magnético. O oposto também ocorre, ou seja, ao ser deformado o mesmo material emite um campo magnético em resposta (Jiles, 1994). Ligas de ferro contendo terras raras (Tb, Sm e Dy) exibem propriedades magnetostrictivas. O composto terfenol-D ( $Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,9}$ ) atraiu a atenção por sua acentuada magnetostricção (Clark, 1979).

O terfenol exibe uma magnetostricção cerca de 100 vezes superior à do níquel (um dos poucos metais conhecidos que apresenta o fenômeno). Consequentemente, o terfenol é largamente aplicado em mecanismos avançados de localização e microposicionamento. Também é usado em dispositivos acústicos, sonares, válvulas controladoras e microbombeadores (Gschneidner and Daane, 1988).

Compostos magnetostritivos similares ao terfenol (compostos por disprócio, térbio e ferro) estão em desenvolvimento para utilização em mecanismos de posicionamento em telescópios orbitais (nova geração de telescópios, posterior ao telescópio Hubble).

#### **4.9 Refrigeração magnética**

O gadolínio e suas ligas apresentam ciclos de refrigeração quando expostos a campos magnéticos (Hashimoto et al., 1981). O princípio por trás da refrigeração magnética é de que sólidos a base de gadolínio se aquecem quando expostos a fortes campos magnéticos e se resfriam quando o campo magnético é removido. Tal fenômeno é pouco significativo à temperatura ambiente (apesar de observável), porém em temperaturas criogênicas, a refrigeração magnética é mais significativa.

As principais vantagens de refrigeradores magnéticos são seu tamanho compacto e sua mais eficiente refrigeração por unidade de volume. Também são sistemas confiáveis, livres de vibração, e mais eficientes que a maioria dos sistemas criogênicos de resfriamento, particularmente em temperaturas inferiores a 77K.

Em 1999, foi demonstrado de forma bem sucedida um protótipo de refrigerador comercial feito com 3 kg de esferas de gadolínio. O refrigerador apresentou uma potência de refrigeração de 600 watts, operando com a aplicação de um campo magnético de 5T por mais de 1.200 horas em mais de 10 meses de experiência (Gschneidner et al., 1999).

Novos materiais a base de gadolínio e germânio estão em pesquisa. Sistemas refrigerantes terão aplicações em residências, automóveis e eletrodomésticos (Hedrick, 1997).



#### 4.10 Materiais magnetoópticos

Em nossos computadores, mais especificamente nos HDs (hard disks), filmes finos são aplicados sob um substrato e cobertos por uma camada cerâmica. Um raio laser é aplicado para escrever, ler e apagar a informação armazenada em pacotes. Aplicações modernas, de alta densidade de armazenamento, requerem pacotes de tamanho menores do que 3 micrômetros.

O substrato de nossos HDs é feito de uma liga de terras raras, o GGG (Garnet gadolínio – gálio). Enquanto que o filme fino é um garnet que também contém terras raras, porém em menor quantidade ( $\text{Y}_{1,25}\text{Lu}_{0,45}\text{Sm}_{0,4}\text{Ca}_{0,9}\text{Fe}_{4,1}\text{Ge}_{0,9}\text{O}_{12}$ ). Tanto o substrato quanto o filme contém terras raras, sendo o substrato responsável pelo uso de grandes quantidades de gadolínio.

#### 4.11 Cerâmica

Óxidos de terras raras (particularmente cério e ítrio) são usados como sinterizantes na metalurgia do pó pela sua habilidade de eliminar pontos de fragilidade (Jackson e Christiansen, 1993). Um exemplo disso é a fabricação do nitreto de silício, em que a fase líquida ( $\text{Si} - \text{Y} - \text{O} - \text{N}$ ) é formada durante o processo. No resfriamento, os grãos de nitreto se rearranjam e o oxinitreto de ítrio se solidifica como uma ligação cristalina intergranular que oferece resistência ao crescimento de trincas. O nitreto de silício é, portanto, capaz de ser utilizado em aplicações de esforço extremo como partes internas de motores e ferramentas de corte a alta temperatura.

Outro uso importante e bastante atual é a utilização de ítrio em cerâmicas a base de zircônia com o objetivo estabilizante a altas temperaturas. A aplicação maior destas cerâmicas é no escapamento de motores e chaminés industriais, em que a sonda cerâmica em questão (por vezes chamada “sonda lambda”), é responsável por medir teores de oxigênio no escape para ajuste do combustível e obtenção do nível estequiométrico ótimo (Hedrick, 2000).

As terras raras também são utilizadas em revestimento de fornos, pigmentação de cerâmicas e células combustíveis.

#### **4.12 Eletrônica**

No campo da eletrônica, as terras raras possuem diversa utilização. Um dos importantes avanços no campo dos microcircuitos foi a descoberta que hexaboretos de terras raras possuem coeficiente térmico de resistividade quase nulo, ou seja, tais compostos mantêm sua resistência independentemente da temperatura (Molycorp, 1993).

Além da utilização em HDs, descrita anteriormente, tanto em substratos como em menor quantidade em filmes finos, as terras raras também podem ser utilizadas para a fabricação de lasers. Em particular o neodímio emite luz no comprimento de onda de 1064nm, que é o comprimento dos raios infravermelhos. Com isso uma vasta gama de dispositivos a laser feitos a base de neodímio possuem como objetivo, o aquecimento, corte, gravura, solda e tratamento térmico.

#### **4.13 Química**

Na indústria química, as terras raras possuem sua importância na fabricação de catalisadores que melhoram a eficiência do craqueamento, obtendo mais gasolina das frações mais pesadas do petróleo (Wallace, 1981; Venuto e Habib, 1979).

Terras raras também são utilizadas em catalisadores de processos químicos de alquilação, isomeração, hidrogenação, dehidrogenação, desidratação, polimerização, refino, oxidação e na produção de amônia. Também são aplicados em catalisadores de automóveis, juntamente com metais nobres.

#### 4.14 Óptica

Uma das primeiras funções das terras raras - e ainda hoje em uso - é a manufatura de vidros. Desde 1896, o cério era utilizado para descolorir o vidro (Riker, 1981). Um dos grandes problemas estéticos é o óxido de ferro, um contaminante comum do vidro que deixa uma coloração amarelo esverdeada. Hoje, uma mistura de cério e didímio é aplicada, tanto para neutralizar o efeito do ferro quanto para conferir uma melhor transparência ao vidro.

Saliente-se que terras raras usadas em excesso irão colorir o vidro. Enquanto pequenas quantidades de óxido de cério descolorem o vidro, teores por volta de 1% deixam o vidro amarelo e teores acima de 1%, marrom. Neodímio deixa o vidro com um intenso brilho avermelhado e o praseodímio, verde. Hólmio deixa o vidro azul, enquanto que o érbio confere um tom rosáceo que não pode ser obtido com nenhum outro material (Riker, 1981).

Em 1912, foi descoberto que o cério conseguia filtrar de forma eficiente os raios UV, sem impactar a cor do vidro. Foram fabricados a partir da Inglaterra milhares de óculos protetores contendo cério e didímio que filtravam os raios UV. Óxidos de didímio também são muito utilizados em óculos protetores de soldagem, por absorverem mais a luz no comprimento de onda amarelo do sódio.

O lantânio também possui um papel fundamental na indústria óptica. Sendo usado desde 1935, vidros de sílica contendo óxido de lantânio possuem um alto índice de refração e baixa dispersão luminosa, sendo muito utilizados na manufatura de câmeras e outras lentes (Greinacher, 1981).

Na indústria de fibras ópticas, as terras raras também possuem relevância. Fibras ópticas dopadas com érbio transmitem informações mais eficientemente e dispensam o uso de amplificadores ópticos ao longo da linha. São utilizados em cabos de longa distância e cabos submarinos.

As terras raras também são utilizadas no polimento de vidros. Óxidos de terras raras contendo 50% de óxido de cério são melhores agentes de polimento que sílica ou zircônia. Além de mais rápidos, não deixam a superfície do vidro com riscos. Uma das teorias para este efeito é que o óxido de cério

forma um complexo ativo  $\text{CeO} - \text{Si}$ , que rompe a ligação  $\text{O} - \text{Si} - \text{O}$  por hidrólise. Subsequentemente, a ligação  $\text{CeO} - \text{Si}$  se rompe também, iniciando o processo novamente e removendo a sílica hidratada (Horrigan, 1981).

#### 4.15 Fósforos

A primeira aplicação de terras raras em tecnologia avançada se deu em 1965, quando um material contendo európio dopado com ítrio foi introduzido como um fósforo vermelho em tubos de televisão a cores, no lugar da prata e cádmio, utilizados até então. O brilho vermelho intenso percebido pelo olho humano, sem um componente amarelado fizeram com que as televisões a cores mostrassem uma aparência mais real.

Com a experimentação de novas misturas, foram desenvolvidos três fósforos: um composto por ítrio e európio para o vermelho, um fluoreto de térbio com sulfeto de zinco para o verde e um sulfeto de cério e estrôncio para o azul. Quando ativados por fótons, estes fósforos emitem luz, fazendo com que uma imagem colorida seja percebida na tela. Cada tela de televisão possuía de 5 a 10 gramas de óxido de ítrio, 0,5 a 1g de óxido de európio (Jackson e Christiansen, 1993).

Desde 1964, a indústria de televisores utilizou grandes quantidades de ítrio e európio em um grau de pureza que excedia os 99,9%. A tela também possuía uma camada de óxido de neodímio que impedia que a luminosidade externa pudesse interferir na imagem formada.

Com o desenvolvimento de LEDs orgânicos, a indústria dos fósforos televisivos perdeu relevância ao ser substituída por compostos orgânicos emissores que necessitam menos energia, emitem luminosidade mais brilhante e não requerem o grande tubo televisivo. Uma exceção a isto se dá com o térbio que é utilizado em um polímero orgânico emissor da luz verde, e continua sendo utilizado em telas planas (Hedrick, 2001).

Terras raras também são utilizadas na conversão de bandas não visíveis em luz visível. Um exemplo disso é o uso de cério, que possui banda de

absorção na região ultravioleta (UV). Sólidos com cério (III) absorvem luminosidade da região UV e transmitem a outros fósforos que emitem luminosidade que podemos absorver.

Por fim, as terras raras também possuem aplicações em lâmpadas comerciais. Tubos luminescentes recebem adições de európio, érbio, térbio e hólmio. Escândio, ítrio, lantânio e gadolínio também são utilizados na fabricação de lâmpadas que possuem boa eficiência energética e produzem luminosidade agradável.

#### 4.16 Nuclear

A vasta gama de características das terras raras fazem com que também possam ser utilizadas na indústria nuclear. Óxido de gadolínio é utilizado nos combustíveis de reatores. Uma adição de cerca de 5% ao  $\text{UO}_2$ , faz com que este apresente um fluxo constante e uniforme de emissão de nêutrons. O gadolínio não somente absorve o excesso de nêutrons, mas também possui alta afinidade e propriedades químicas semelhantes ao óxido de urânio.

O európio e seus cinco isótopos ( $^{151}\text{Eu}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{153}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{155}\text{Eu}$ ) também são eficientes em absorver nêutrons emitidos pelo urânio. Isso faz com que sejam muito utilizados em sistemas de segurança e em contramedidas de controle no caso de acidentes (Greinacher, 1981). O hexaboreto de európio é utilizado em reatores de submarinos nucleares.

Devido a capacidade das terras raras de absorver nêutrons, estes são utilizados na radiografia de nêutrons, em que de uma forma semelhante a uma fotografia, elementos extremamente radioativos são analisados e seu espectro de emissão é captado em folhas de gadolínio para a análise de propriedades e emissão.

#### **4.17 Armazenagem de hidrogênio**

Em 1969, foi identificada na Holanda, a capacidade de intermetálicos contendo terras raras de absorver (e consequentemente armazenar) hidrogênio. Com capacidade de absorver mais hidrogênio que o próprio hidrogênio líquido, compostos de lantânio – níquel podem armazenar hidrogênio de forma reversível apenas com um ciclo de histerese.

Enquanto compostos de lantânio – níquel são mais eficientes em armazenagem e cinética, ainda são muito mais caros e podem ser substituídos por cério, neodímio, praseodímio, misch metal e tório no lugar do lantânio e cobalto, cromo, cobre ou ferro no lugar do níquel.

No Japão, carros movidos a hidrogênio foram desenvolvidos e testados de forma bem sucedida. A Toyota montou um protótipo a hidrogênio (2000cc) que foi testado por 200km a uma velocidade de 100km/h. O veículo utilizou uma armazenagem de lantânio – misch metal – níquel – alumínio (Omachi, 1988).

#### **4.18 Baterias recarregáveis**

Dois tipos de baterias recarregáveis foram propostos contendo terras raras (Jackson e Christiansen, 1993). Ambas apresentam bom ciclo de vida, alta densidade de carga, proteção efetiva contra sobrecargas e curto circuitos.

O primeiro tipo é composto por eletrodos de lantânio, neodímio, níquel, cobalto e sílica. Enquanto o segundo, desenvolvido pela Sharp Corporation of Japan, é composto por pequenos botões com um ânodo de óxido de níquel e um cátodo de lantânio – níquel – estanho. Um terceiro (e mais popular) tipo de baterias é fabricado com metais alcalinos, níquel e hidretos de metal (baterias LIMH). Neste caso, também são utilizadas terras raras (misch metal enriquecido com lantânio). O objetivo principal da adição de terras raras é de prolongar a vida destas baterias e de manter a carga continua durante seu uso. São mais populares que as baterias níquel – cádmio e que as baterias de lítio.

Atualmente são usadas em eletroeletrônicos portáteis, como celulares, câmeras, Ipods, I pads e smartphones.

#### **4.19 Supercondutores**

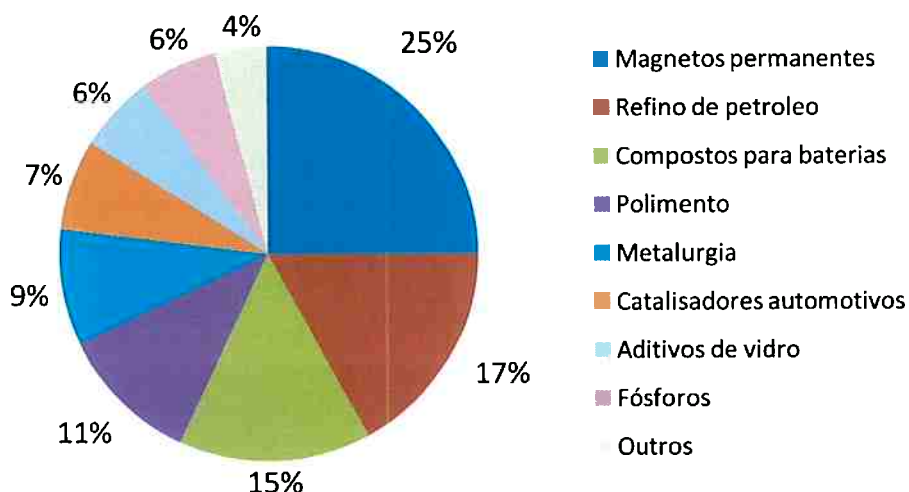
Um tópico grande interesse mundial é a descoberta de supercondutores a altas temperaturas. Até o momento, todas as ligas descobertas apresentam algum tipo de terra rara (geralmente ítrio, ou algum dos lantanídeos). Um composto cerâmico composto de ítrio, bário, cobre e oxigênio apresenta resistência zero na faixa de temperatura de 90-100K. Isso torna possível substituir o caro hélio líquido por nitrogênio líquido como refrigerante para o supercondutor.

Ainda usados em escala laboratorial, o futuro dos supercondutores será definido por novos materiais, e pela capacidade destes materiais de suportar as altas correntes envolvidas na transmissão de eletricidade tanto como em propriedades mecânicas que tornem sua aplicabilidade real. Caso os supercondutores compostos por terras raras sejam utilizados aplicações de engenharia, a demanda por terras raras alcançará níveis jamais vistos.

#### **4.20 Outros**

Uma aplicação pouco conhecida das terras raras vem da sua alta capacidade de absorver água. Óxido de cério juntamente com polímeros acrilonitrados é capaz de absorver mais de 500 vezes seu peso em água. São utilizados no Japão em fraldas. Anualmente o Japão importa centenas de toneladas de óxido de cério para este fim.

Terras raras também são utilizados como traços em fertilizantes, terapia radiofarmacêutica, pigmentos, indústria odontológica e em adições a combustíveis.



**Figura 5:** Distribuição das aplicações de terras raras, em peso no ano de 2010 (Lynas, 2011).

Apesar de relativamente comuns na natureza e com depósitos espalhados em todo o mundo, as terras raras não são baratas. Isso faz com que sempre se busque uma alternativa ao seu uso, seja por meio de novos processos ou de novas substâncias.

Principais aplicações	Elementos utilizados	Tecnologias em desenvolvimento
Magnetos	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm	Motores elétricos de veículos híbridos Hard Disks
Baterias NiMH	La, Ce, Pr, Nd	Baterias de veículos híbridos Baterias recarregáveis
Catalisadores de veículos	Ce, La, Nd	Veículos automotores
Catalisadores de craqueamento	La, Ce, Pr, Nd	Produção de petróleo



Fósforos	Eu, Y, Tb, La, Dy, Ce, Pr, Gd	TVs e monitores LCD e plasma Lâmpadas fluorescentes
Polimento	Ce, La, Pr	Monitores Chips e eletrônicos
Aditivos ao vidro	Ce, La, Nd, Er, Gd, Yb	Vidro óptico para dispositivos de filmagem Fibra óptica

**Tabela 1:** Resumo dos principais usos das terras raras, elementos utilizados em cada aplicação e desenvolvimentos futuros (WILTW, 22/03/2007).

## 5 Recursos

As terras raras são relativamente abundantes na crosta terrestre, e ocorrem em diversos minerais. Ocorrem geralmente como óxidos (por sua afinidade com o oxigênio), carbonatos, fosfatos e silicatos. Encontrados tanto em rochas maciças como em depósitos sedimentares, raramente são encontrados isoladamente ou em grande depósitos. Na maioria dos casos são produtos secundários ou co-produtos de outros minerais. Em alguns poucos depósitos importantes, são o produto principal da mineração, mas veremos que são poucas ocorrências.

Enquanto a quantidade total de terras raras no mundo é razoável, a disponibilidade de elementos de forma individual de dispõe<sup>JE</sup> de maneira distinta. Esta situação é uma combinação de fatores inerentes e transientes.

O fator inerente é que enquanto cada mineral de terra rara sempre contém todos os elementos do grupo, a concentração entre os diversos

elementos se mantêm geralmente de forma bastante desigual. Em cada mineral, alguns elementos são encontrados em altas concentrações enquanto que outros mal apresentam traços, e isso varia de mineral para mineral. Além disso, o teor de minerais que contém terras raras também varia muito entre os depósitos. Os dois minerais com maior ocorrência de terras raras (bastnasita e monazita, a serem descritos adiante), apresentam grandes teores de elementos com número atômico menor (terras raras leves), enquanto que as terras raras de maior número atômico (terras raras pesadas) são encontrados com maior frequência apenas no terceiro tipo mais comum de mineral (Xenotímio). Isto é explicado pela contração lantanídea, que faz com que os elementos mais leves (átomos maiores) apresentem menor miscibilidade química, sendo encontrados mais comumente concentrados. Já os átomos menores, da fração pesada das terras raras consegue se solubilizar mais facilmente com outros elementos, sendo assim encontrados de forma mais dispersa na natureza.

Os fatores transientes são que muitas vezes as terras raras são produtos secundários (by-products), e seus minerais são comumente associados ao tório, elemento radioativo cuja lavra requer cuidados especiais.

## **5.1 Terras raras na crosta terrestre**

A abundância ou escassez de elementos é medida pela sua ocorrência na crosta terrestre. Em termos da ocorrência das terras raras em si, elas juntas apresentam ocorrência razoável (220ppm), maior que a ocorrência do carbono (200ppm). Individualmente muitos elementos são mais comuns do que outros elementos bastante conhecidos. O cério é mais abundante que o cobre, o neodímio, ítrio e lantânio, mais comumente encontrados que o cobalto ou o chumbo. O praseodímio, samário, gadolínio, o disprósio e o érbio, mais comumente encontrados que o mercúrio e a prata.

A extensão pela qual um metal é utilizado decorre de outros fatores além da ocorrência na crosta terrestre (Hampel, 1961). Tais fatores incluem:

- O teor de concentração do metal através de processos naturais em depósitos
- A relativa facilidade de obtenção do minério a partir do depósito
- A facilidade de extrair o metal do minério

Ao contrário de metais mais utilizados como o cobre e o chumbo, que são encontrados em depósitos altamente concentrados, de fácil extração do minério, as terras raras são encontradas em depósitos largamente distribuídos com baixa concentração de minério. Além disso, a natureza da mineralização destes elementos dificulta o beneficiamento do minério a partir do mineral e a complexidade dos processos de redução para obtenção dos metais, justificam o nome “terras raras”, apesar de sua relativa abundância na crosta terrestre.

## **5.2 Minerais**

Atualmente se conhecem mais de 200 minerais que apresentam teores de terras raras maiores que 0,01% (O'Driscoll, 1991). São majoritariamente compostos por óxidos, dada a forte afinidade entre as terras raras e o oxigênio.

São encontrados em diversas formações: granitos, basaltos, silicatos e bacias sedimentares. A maioria destes minerais é rara e dispersamente encontrada, mas o teor de óxidos de terras raras contidos nestes minerais pode ser de até 60%. Como regra, todos os minerais apresentam todos os elementos terras raras, com alguns em teores maiores e outros em concentrações muito baixas (Gupta and Krishnamurthy, 2004).

Apesar de numerosos, 95% dos depósitos de terras raras provém de três minerais: bastnasita, monazita e xenotímio.

### **5.2.1 Bastnasita**

A bastnasita é um fluorocarbonato de terras raras mais leves, e dificilmente contém tório em sua composição. Encontrada em diversos meios, como veios rochosos, zonas metamórficas e pegmatitas. Exemplos disso são

ocorrências em carbonato – silicatos na Califórnia, em veios de quartzo no Burundi e veios de fluorita imersos em rocha sedimentar permiana no Novo México (Jackson e Christiansen, 1993).

O teor de óxidos de terras raras (REO) é de 70% na bastnasita, composto em sua maioria de frações leves. A bastnasita é a principal fonte de terras raras leves em depósitos como o gigantesco depósito de Bayan Obo na China (800 milhões de toneladas, com 5% de REO), as Montanhas Pass na Califórnia (3,3 milhões de toneladas, com 6,6% de REO). Além disso, a bastnasita é o principal mineral contendo REO nos depósitos de Brockman na Austrália, Poços de Caldas no Brasil, Thor Lake no Canadá e Karonge no Burundi. Devido a sua suscetibilidade ao intemperismo, os óxidos de terras raras se dispersam e se combinam com os fosfatos disponíveis no terreno.



**Figura 6:** Amostra de bastnasita proveniente de Mountain Pass (EUA).

### 5.2.2 Monazita

A monazita é um fosfato, também fonte de óxidos de terras raras que geralmente aparece associada ao tório. Encontrada em diversos ambientes geológicos, é comum como mineral associado a rochas ácidas de origem ígnea e em veios rochosos. Também é largamente encontrada em depósitos sedimentares de origem fluvial ou marinha (Aplan, 1988). Notáveis ocorrências são encontradas em Van Rhynsdorp e Naboomspruit na África do Sul, no Colorado, nos EUA, novamente em Bayan Obo na China e em depósitos aluvionares (fluviais e marinhos) no Brasil.



**Figura 7:** Amostra de areia com elevado teor de monazita.

Os mais importantes depósitos monazíticos são aluvionares. Areias de praia com teores elevados de monazita contém outros minerais pesados como a ilmenita, rutilo e zircão. Algumas vezes a monazita aparece associada a metais preciosos ou a depósitos de estanho. Com teores variáveis tanto de terras raras quanto de tório associado, geralmente a monazita contém cerca de 70% de REO, principalmente em frações mais leves como óxidos de cério, lantânio, neodímio, praseodímio e samário. Pequenos teores de disprosio, érbio, hólmio e ítrio também são encontrados em menor concentração. Um problema da monazita é a presença de elementos radioativos como urânio e tório em sua composição. Os elementos substituem as terras raras na composição do mineral e só podem ser extraídos a partir da lixiviação da monazita em ácido. Os teores de tório associado correspondem de 4% a 12% e teores de urânio também são comuns (Mezrahi, 2005).



**Figura 8:** Faixa de areia preta rica em monazita em praia de Guarapari (ES).

### 5.2.3 Xenotímio

A xenotímio é um fosfato de ítrio, contendo cerca de 67% de REO, principalmente em porções de terras raras mais pesadas. O mineral é encontrado principalmente em granitos e por vezes, por sofrer efeitos do intemperismo pode ser encontrado em aluviões, inclusive junto com a monazita (o xenotímio nunca ultrapassa mais que 5% da monazita presente). Depósitos de xenotímio são encontrados na Califórnia (em proporções que alcançam 50%), em depósitos aluvionares da Malásia e Austrália, tanto como em depósitos de cassiterita na Indonésia, Tailândia e em Rondônia, no Brasil.



**Figura 9:** Amostra de xenotímio em meio à matriz de feldspato encontrado nos EUA.

#### **5.2.4 Alanita**

A alanita ocorre em ambientes ígneos, hidrotermais e metamórficos, e é encontrada como pequenos cristais dispersos ou veios em uma matriz pegmatítica. O total de REO presente na alanita é de cerca de 5%, variando de 3 a 51% dependendo do depósito. O tório associado apresenta-se em teores que variam desde traços até 3%. A pequena concentração de terras raras e os elevados teores de tório fizeram com que a alanita não fosse explorada comercialmente. Porém, por ser encontrada em grande quantidade na crosta terrestre e pelo fato de poder ser produzida a custos menores por tonelada que a monazita fazem da alanita um recurso que pode ser explorado no futuro (Nininger, 1956). Atualmente, dois depósitos possuem potencial exploratório da alanita (Jackson e Christiansen, 1993). Tais depósitos são: Mary Kathleen e Alice Springs na Austrália (1 milhão de toneladas com 4% de alanita e 20% de REO).



**Figura 10:** Amostra de alanita.

### **5.2.5 Apatita**

A apatita é um fluoreto de cálcio, e pode ser encontrada em carbonatos, rochas ígneas, e também sedimentares. Não é um mineral de terras raras mas sim um mineral concentrador destas (Aplan, 1988). Os íons de terras raras se concentram aos íons de cálcio pela afinidade química oriunda de tamanhos de átomo similares.

A concentração de óxidos de terras raras na apatita é bastante variável, mas pode alcançar teores de 10% de REO. Apesar do baixo teor de terras raras, a apatita possui elevada ocorrência na crosta terrestre e não apresenta associação com o tório radioativo.

Grandes depósitos de apatita se encontram na península de Kola e nas montanhas Vishnevye na Rússia, com teores de REO próximos de 1% (Hedrick, 1985).





**Figura 11:** Amostra de apatita com coloração azulada.

#### **5.2.6 Branerita**

Mineral de urânio que contém geralmente menos de 1% de REO. Encontrado no planalto cristalino do pré-cambriano nas proximidades do Lago Elliot, em Ontario no Canada.

#### **5.2.7 Eudialita:**

Mineral de zircônio que pode conter de 1% a 3% de REO, principalmente 0,2% a 1% de ítrio (Ferron et al., 1991). Seus depósitos se encontram na Groenlândia e no Novo México. Uma vantagem desde mineral de silicatos é que pode ser facilmente dissolvida em ácidos.

#### **5.2.8 Euxenita e Fergusonita:**

Geralmente encontrados juntos, são complexos envolvendo tantaloniobatos de titânio. Apresentam teores de terras raras, tanto quanto tório e urânio associados. São encontrados em depósitos aluvionares em Idaho, nos EUA.

### **5.2.9 Florencita**

A Florencita é um fosfato de alumínio encontrado em regiões de solo carbonatado. Apesar de apresentar altos teores de REO em sua composição, este mineral é extremamente raro na crosta terrestre (Jackson e Christiansen, 1993).

### **5.2.10 Gadolinita**

A gadolinita é um silicato de ferro – berílio, encontrado em granitos e solos sedimentares. Apesar de muito comum e com altos teores de REO (40%), sempre se encontra em pequenas quantidades na crosta terrestre. Muito comum na América do Norte (EUA e Canada).

### **5.2.11 Loparita**

A loparita é um minério de nióbio que contém titânio e terras raras associadas. Um grande depósito de loparita existe na península de Kola, na Rússia. O conteúdo de óxidos de terras raras chega a 30%, com maiores concentrações de terras raras mais leves (Jackson e Christiansen, 1993).

### **5.2.12 Perovskita**

A perovskita é um titanato de cálcio em que terras raras geralmente substituem o cálcio (assim como na apatita). Contém teores menores que 1% de REO, principalmente de elementos mais leves.

### **5.2.13 Pirocloro**

O pirocloro é outro mineral concentrador de terras raras (Aplan, 1988; Highley et al., 1988). Com baixos teores de REO, o pirocloro ocorre em St. Honoré e Oka no Canadá e em Araxá, em Minas Gerais (Adams, 1971).

#### **5.2.14 Minerais de escândio**

Apesar de mais comum na crosta terrestre que muitos metais mais conhecidos e utilizados, o escândio é raramente encontrado de forma concentrada. A razão disso é que o escândio não se combina quimicamente com os ânions da maioria dos minerais (a única exceção é o gigantesco depósito de Bayan Obo, que contém 0,016% de escândio).

O maior recurso de escândio são os minérios de urânio, em que o escândio é encontrado em teores próximos a 0,1%.

Apenas 1 mineral de escândio é conhecido, a Tortveitita, encontrado no norte da Noruega e em Madagascar em tão pequena quantidade que nem é considerado um mineral fonte do metal.

#### **5.2.15 Promécio**

A única fonte do promécio é o combustível utilizado de reatores nucleares. (Wheelwright, 1973).

Mineral	Formula	Content (weight percent)		
		REO	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>
Allanite (Ce)	(Ce,Ca,Y) <sub>3</sub> (Al,Fe <sup>3+</sup> ,Fe <sup>2+</sup> ) <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH)	3 to 51	0 to 3	—
Allanite (Y)	(Y,Ce,Ca) <sub>3</sub> (Al,Fe <sup>3+</sup> ) <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH)	3 to 51	0 to 3	—
Anatase	(Ti,REE)O <sub>2</sub>	—	—	—
Ancylite (Ce)	SrCe(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> OH·H <sub>2</sub> O	46 to 53	0 to 0.4	0.1
Bastnasite (Ce)	(Ce,La)(CO <sub>3</sub> )F	70 to 74	0 to 0.3	0.09
Brannerite	(U,Ca,Y,Ce)(Ti,Fe) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	—	—	—
Britholite (Ce)	(Ce,Ca) <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH,F)	56	1.5	—
Brockite	(Ca,Th,Ce)(PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	—	—	—
Calcio-ancylite (Ce)	(Ca,Sr)Ce <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	60	—	—
Cerianite (Ce)	(Ce <sup>4+</sup> ,Th)O <sub>2</sub>	—	—	—
Cerite (Ce)	Ce <sub>2</sub> Fe <sup>3+</sup> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> [(SiO <sub>4</sub> )(OH)](OH) <sub>3</sub>	—	—	—
Cheralite	(Ca,Ce,Th)(P,Si)O <sub>4</sub>	—	≤30	—
Chevkinite	(Ca,Ce,Th) <sub>4</sub> (Fe <sup>3+</sup> ,Mg) <sub>3</sub> (Ti,Fe <sup>3+</sup> ) <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>22</sub>	—	—	—
Churchite (Y)	YPO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	—	—	—
Crandallite	CaAl <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	—	—	—
Doverite	YCaF(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	—	—	—
Eudialyte	Na <sub>4</sub> (Ca,Ce) <sub>2</sub> (Fe <sup>2+</sup> ,Mn <sup>2+</sup> ,Y)ZrSi <sub>4</sub> O <sub>22</sub> (OH,Cl) <sub>2</sub>	1 to 10	—	—
Euxenite (Y)	(Y,Ca,Ce,U,Th)(Nb,Ta,Ti) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	—	—	—
Fergusonite (Ce)	(Ce,La,Y)NbO <sub>4</sub>	—	—	—
Fergusonite (Y)	YNbO <sub>4</sub>	—	—	—
Florencite (Ce)	CeAl <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub>	—	1.4	—
Florencite (La)	(La,Ce)Al <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub>	—	1.4	—
Fluocerite (Ce)	(Ce,La)F <sub>3</sub>	—	—	—
Fluocerite (La)	(La,Ce)F <sub>3</sub>	—	—	—
Fluorapatite	(Ca,Ce) <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> F	0 to 21	0 to 0.01	—
Fluorite	(Ca,REE)F <sub>2</sub>	—	—	—
Gadolinite (Y)	Y <sub>2</sub> Fe <sup>2+</sup> Be <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>10</sub>	40	—	—
Gagarinite (Y)	NaCaY(F,Cl) <sub>4</sub>	—	—	—
Gerenite (Y)	(Ca,Na) <sub>2</sub> (Y,REE) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>18</sub> ·2H <sub>2</sub> O	—	—	—
Gorceixite	(Ba,REE)Al <sub>3</sub> [(PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH)] <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	—	—	—
Goyazite	SrAl <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	—	1.4	—
Hingganite (Y)	(Y,Yb,Er) <sub>2</sub> Be <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	—	—	—
limorite (Y)	Y <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> )(CO <sub>3</sub> )	—	—	—
Kainosite (Y)	Ca <sub>2</sub> (Y,Ce) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>12</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	—	—	—
Loparite (Ce)	(Ce,Na,Ca)(Ti,Nb)O <sub>3</sub>	32 to 34	—	—
Monazite (Ce)	(Ce,La,Nd,Th)PO <sub>4</sub>	35 to 71	0 to 20	0 to 16
Parisite (Ce)	Ca(Ce,La) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	59	0 to 0.5	0 to 0.3
Perovskite	(Ca,REE)TiO <sub>3</sub>	≤37	0 to 2	0 to 0.05
Pyrochlore	(Ca,Na,REE) <sub>2</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH,F)	—	—	—
Rhabdophane (Ce)	(Ce,La)PO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	—	—	—
Rhabdophane (La)	(La,Ce)PO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	—	—	—
Rinkite (rinkolite)	(Ca,Ce) <sub>2</sub> Na(Na,Ca) <sub>2</sub> Ti(SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> F <sub>2</sub> (O,F) <sub>2</sub>	—	—	—
Samarskite	(REE,Fe <sup>2+</sup> ,Fe <sup>3+</sup> ,U,Th,Ca)(Nb,Ta,Ti)O <sub>4</sub>	—	—	—
Sphene (titanite)	(Ca,REE)TiSiO <sub>6</sub>	≤3	—	—
Steenstrupine (Ce)	Na <sub>4</sub> Ce <sub>2</sub> Mn <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> (Zr,Th)(Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O	—	—	—
Synchysite (Ce)	Ca(Ce,La)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F	49 to 52	1.6	—
Synchysite (Y) (doverite)	Ca(Y,Ce)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F	—	—	—
Thalenite (Y)	Y <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>10</sub> (F,OH)	—	—	—
Thorite	(Th,U)SiO <sub>4</sub>	≤3	—	10 to 16
Uraninite	(U,Th,Ce)O <sub>2</sub>	—	—	—
Vitusite (Ce)	Na <sub>3</sub> (Ce,La,Nd)(PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	—	—	—
Xenotime (Y)	YPO <sub>4</sub>	52 to 67	—	0 to 5
Yttriofluorite	(Ca,Y)F <sub>2</sub>	—	—	—
Zircon	(Zr,REE)SiO <sub>4</sub>	—	0.1 to 0.8	—

**Tabela 2:** Minerais com ocorrência de terras raras e porcentagem contida de tório e urânio (USGS, 2010).

## **6 Depósitos de terras raras**

### **6.1 Primários e secundários**

Minerais contendo terras raras ocorrem em uma ampla variedade de sistemas geológicos. Geralmente ocorrem em depósitos de rocha maciça ou em areias aluvionares. Depósitos em rocha maciça são chamados primários enquanto que as areias são chamadas de depósitos secundários. A composição destes depósitos é fortemente influenciada pela presença de fosfatos e carbonatos (Jackson e Christiansen, 1993).

### **6.2 Carbonatitas**

A mais dominante fonte de terras raras são carbonatitas. Estes depósitos apresentam predominância por terras raras leves e contém minerais como a bastnasita, alanita e apatita. A monazita quando presente neste tipo de depósito apresenta os menores teores de cálcio e tório.

### **6.3 Pegmatitas**

Pegmatitas são uma fonte de terras raras de rochas maciças oriundas de magma granítico solidificado (Jackson e Christiansen, 1993). Conforme o magma se solidifica, cristais incorporando as terras raras mais pesadas se formam primeiro, seguido da solidificação do líquido resultante, que é mais rico em terras raras mais leves. Por este fato, monazita e alanita em depósitos deste tipo tendem a apresentar maiores níveis de terras raras mais pesadas.

Porém, o total de terras raras é diminuído, pois geralmente estão associadas a maiores teores de cálcio e tório.

#### **6.4 Depósitos hidrotermais**

Terras raras podem ser carregadas juntamente com soluções hidrotérmicas resultantes da interação de água geotermicamente aquecida com o material na crosta terrestre. Como as terras raras mais pesadas se solubilizam mais facilmente na água, geralmente este tipo de depósito apresenta maiores teores de minerais ricos em terras raras mais pesadas, como o xenotímio (Jackson e Christiansen, 1993).

#### **6.5 Depósitos sedimentares**

Grandes volumes de minerais de terras raras são encontrados em depósitos sedimentares. Compostos em sua maioria por uma mistura de monazita e xenotímio, estes minerais são caracterizados por serem inertes ao longo da ação de efeitos naturais que acabam por formar tal depósito.

Geralmente são encontrados em rios, deltas e no litoral. Depósitos antigos podem ser encontrados em terra, devido a efeitos, como elevamento da superfície, mudança de leitos de rios e recuo da linha costeira.

#### **6.6 Distribuição**

Existem 123 importantes depósitos de terras raras no mundo localizados em 20 países. A maioria dos depósitos se encontra nos EUA, seguido pela Austrália, Brasil, Canadá, Índia e China. Numericamente, depósitos sedimentares são mais numerosos que os de rocha maciça. Existem 71 depósitos sedimentares enquanto que 52 depósitos de rocha maciça. A maioria dos depósitos sedimentares são encontrados em antigos litorais e leitos de rios e não na atual costa litorânea ou leitos de rios (Gupta and Krishnamurthy, 2004).

A monazita é o mineral mais encontrado, sendo presente em 96 dos 123 depósitos. A bastnasita é o principal mineral de 16 depósitos e os 11 restante são depósitos de alanita (3), branerita (3), apatita (2) e eudialita (2).

## 7 Reservas mundiais (até outubro de 2010)

As reservas mundiais de terras raras equivalem a depósitos com mais de 20,6 bilhões de toneladas, sendo 85% deste valor em depósitos sedimentares, e os 15% restantes em rocha maciça. Em relação aos minerais, temos 90% dos depósitos em monazita, 6% em bastnasita e 4% em outros minerais (Gupta and Krishnamurthy, 2004).

A partir destes depósitos de minerais, temos um total de REO contido (óxidos de terras raras) de 99,4 milhões de toneladas (USGS, 2010). Importante salientar que deste total de óxidos, apenas 7% provém de depósitos sedimentares, enquanto os 93% restantes estão contidos em depósitos de rocha maciça. Em relação aos minerais, apenas 20% dos óxidos de terras raras estão contidos na monazita (tanto sedimentar quanto em rocha maciça), 77% na bastnasita e 3% em outros minerais (Gupta and Krishnamurthy, 2004).

Em relação ao óxido contido, os países com as maiores reservas são (USGS, 2010):

- China, com 36 milhões de toneladas provenientes de bastnasita
- Rússia e países da CEI, com 19 milhões de toneladas em monazita, bastnasita e outros minerais
- EUA, com 13 milhões de toneladas, sendo 73% disso em monazita
- Austrália, com 5,4 milhões de toneladas, e 69% disso em monazita
- Índia, com 3,1 milhões de toneladas provenientes 100% de monazita

Outros países totalizam reservas de 22 milhões de toneladas de REO.

Canadá e África do Sul também valem menção, pois contem mais de 1 milhão de toneladas de REO. O Canadá possui reservas em bastnazita e outros minerais enquanto que a África do Sul possui a maioria de suas reservas em monazita (87%). Recentemente, foram encontradas reservas acima de 1 milhão de toneladas de REO no Afeganistão (US-DOD, 2011).

Outro país que vale a menção é a Namíbia, com reservas bastnasíticas não confirmadas que podem alcançar 20 milhões de toneladas e colocar o país em situação de destaque (Jackson e Christiansen, 1993).

## **7.1 Ocorrência no mundo**

### **7.1.1 Afeganistão**

Relatórios recentes do Departamento de Defesa dos EUA apontaram depósitos no Afeganistão que totalizam 1,4 milhão de toneladas de óxidos de terras raras contidos. O depósito se encontra na província de Helmand (US-DOD, 2011).

Foram apontados também no mesmo depósito, teores elevados de urânio e tório associados, o que em um país com um histórico de guerra civil de mais de 30 anos, poderia ser desastroso caso tais elementos fossem utilizados para a fabricação de armamentos.

Dadas a complexidade da extração e beneficiamento das terras raras, e ao capital intensivo necessário para explorá-las, dificilmente teremos indústrias de terras raras no Afeganistão. Porém, caso o país se torne um lugar seguro no futuro, a possibilidade de extração e exportação de concentrados é bastante razoável de se assumir.

### **7.1.2 Argentina**

A Argentina possui um pequeno depósito rico em terras raras, urânio e tório, localizado na província de San Luis, a cerca de 300km ao sudoeste da cidade de Córdoba. O depósito, chamado de "Rodeo de los Molles" possui bastnasita e alanita com teores de 2% a 2,5% de REO. Atualmente não há produção de REO na Argentina.



### 7.1.3 Austrália

A Austrália é detentora de grandes reservas de terras raras, com 30 depósitos de monazita, 2 de bastnasita e mais 3 ocorrências de terras raras em outros depósitos. Dos 35 depósitos documentados, 27 são de origem sedimentar (Jackson e Christiansen, 1993). A maioria dos depósitos se concentra em areias espalhadas ao longo do litoral australiano, principalmente na costa leste e oeste. Os depósitos da costa oeste se encontram em altitudes de 10 a 100 metros, em antigas praias paleolíticas. Já na costa leste, os depósitos se formaram pela ação do intemperismo natural e estão no litoral.

**Reserva Eneabba:** As areias de Eneabba se encontram na costa oeste, um pouco ao norte da cidade de Perth. Historicamente, a reserva de Eneabba forma a maior fonte de monazita da Austrália e também contem teores apreciáveis de xenotímio (Taylor, 1991).

**Cooljarloo/Jurien Bay:** Um pouco ao sul da reserva de Eneabba, um grande depósito de areias minerais ocorre na baía de Jurien e na região chamada Cooljarloo. A região de Cooljarloo possui mais de 16 milhões de toneladas, com minerais pesados em teores de 3 a 5%, incluindo monazita (Hedrick, 1985). Já as reservas da baía de Jurien, possuem 25 milhões de toneladas com minerais pesados correspondentes a 6% - 7%. As reservas totais destes depósitos podem alcançar a soma de 164 mil toneladas de REO (Hedrick, 1985).

**WIM-50:** Nomeado pela mineradora Wimmera Industrial Minerals, este depósito de minerais pesados perto da cidade de Horsham, no estado de Western Victoria contém estimadas 32 milhões de toneladas em uma área de 40km<sup>2</sup>. Estima-se que 580 mil toneladas de monazita e 170 mil toneladas de xenotímio possam ser extraídas da reserva.

**Murray Basin:** Nas proximidades do depósito de WIM-50, o depósito de Murray Basin é rico em minerais de zircônio, titânio e monazita. Ainda sem uma estimativa precisa, especula-se que o depósito de Murray Basin apresenta 6 a 7 vezes mais terras raras que o depósito WIM -50.

**Olympic Dam:** O depósito de Olympic Dam é um grande depósito multimetal, contendo cobre, urânio, ouro e também terras raras (Taylor, 1991). O minério extraído da rocha maciça contém minerais de terras raras (bastnasita, monazita, florencita e xenotímio) em teores de 5000ppm. Um fato incomum é que a bastnasita encontrada neste depósito apresenta teores elevados de terras raras pesadas.

**Brockman:** Depósito encontrado no oeste australiano, a leste da cidade de Kimberley. É potencialmente uma fonte de ítrio e terras raras mais pesadas, sendo recolhidas com outros minerais (Taylor, 1991). O depósito contém estimadas 9 milhões de toneladas de minério (0,2% de REO, sendo 50% disso em  $Y_2O_3$ ), a 100 metros de profundidade. A 250 metros, se encontra uma reserva estimada em 13 milhões de toneladas de minério com teores similares.

**Toongi:** Depósito localizado nas cercanias da cidade de Toongi. Estima-se um total de 10 milhões de toneladas, contendo 0,9% em REO. Em profundidades de 30 a 100 metros estima-se um total de 40 milhões de toneladas neste depósito, rico principalmente em ítrio.

**Mount Weld:** O grande depósito de Mount Weld é um dos concorrentes ao título de maior fonte de terras raras do mundo (Taylor, 1991). Composto de carbonatitos com altos teores de terras raras, nióbio e tântalo. A porção central deste depósito apresenta uma incrível concentração de óxidos de terras raras, com o maior teor já encontrado no mundo. Estima-se um total de 1,4 milhão de toneladas de minério altamente concentrado, contendo 8,1% de REO. A quantidade de terras raras no depósito de Mount Weld é capaz de suprir 15 a 20% da demanda mundial de terras raras por mais de 20 anos (Lynas, 2011).

O mineral preponderante na reserva de Mount Weld é majoritariamente monazita. Teores de ítrio e európio na monazita são mais elevados do que o geralmente encontrado, e mais importante, não há significativos teores de tório associado. Além disso, as reservas também apresentam teores de fluoretos e cálcio que são importantes durante os processos de metalurgia, redução e refino das terras raras.

**John Galt:** O depósito em rocha maciça de John Galt é localizado na porção oeste da Austrália, na região de Kimberley. Composto por quantidades apreciáveis de xenotímio, com teores de ítrio acima do normal (Taylor, 1991).

**Yangibana:** depósito maciço contendo 3,5 milhões de toneladas, com cerca de 1,7% de REO. Apresenta altos teores de európio (Taylor, 1991).

#### **7.1.4 Bangladesh**

Areias litorâneas ricas em minerais pesados, incluindo monazita ocorrem ao longo da costa de Bangladesh a 100km sudeste da cidade de Chittagong. Estima-se um total de 5 milhões de toneladas de minerais pesados (Hedrick, 1985).

#### **7.1.5 Brasil (até outubro de 2010)**

Existem numerosos depósitos de areias ricas em minerais pesados no Brasil. Se encontram no litoral brasileiro compreendido entre os estados da Bahia e o Rio de Janeiro, abrangendo o estado do Espírito Santo. Alguns depósitos de monazita também são encontrados no estado do Paraná. No Brasil existem um total de 14 depósitos de monazita, um depósito de bastnasita e um depósito contendo outros minerais de terras raras. Apesar de inúmeros depósitos e ocorrências, os teores dos depósitos brasileiros são muito baixos, o que distancia o país dos maiores detentores de reservas de terras raras.

Até outubro de 2010, estimou-se que as reservas de monazitas oriundas de sedimentação marinha totalizam mais de 80 mil toneladas entre os estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e Bahia.

Depósitos monazíticos brasileiros contém cerca de 10% de minerais pesados, sendo que apenas 10 a 15% destes minerais é monazita, contendo 64% de REO e altos teores de óxido de tório associado (6%).

**São Gonçalo do Sapucaí:** trata-se do leito do rio Sapucaí, em Minas Gerais que apresenta depósitos sedimentares de minerais pesados. Apesar da monazita ser secundária no depósito.

**Tapira:** apesar de ser uma mina de fosfatos, principalmente oriundos da apatita, teores de REO podem ser extraídos da ganga armazenada.

**Poços de Caldas:** a mais importante reserva de terras raras no país, possui característica completamente diferente das demais reservas. Com origem magmática, a reserva de Poços de Caldas é a única no país composta de bastnasita. Estima-se um total de 1,5 milhão de toneladas de bastnasita, que equivale a pouco mais de 1 milhão de toneladas de REO (3,3% do depósito).

#### 7.1.6 Canadá

O Canadá é um dos sete maiores detentores de reservas de terras raras no mundo. Interessante que o país não apresenta depósitos de monazitas e nem de bastnasitas. Todos os depósitos são oriundos de outros minerais de terras raras.

Existem 5 depósitos de terras raras no Canadá, sendo todos de rocha maciça. Três destes contém uraninita e branerita, enquanto os dois restantes contém gadolinita, zircônia, alanita, fluorita, pirocloro, columbita e xenotímio. Pequenas concentrações de monazita também estão presentes.

**Strange Lake:** Depósito encontrado a nordeste de Schefferville em Quebec, apresenta grandes quantidades de terras raras associadas a minerais de berílio, a pirocloro e fluorita (Argal, 1980). Estima-se um total de 25 milhões de toneladas, contendo 0,38% de ítrio.

**St. Honoré e Oka:** Grandes depósitos de pirocloro, com terras raras associadas na província de Quebec. Com concentração média de 10% de REO, o pirocloro de Oka é uma importante fonte de terras raras, principalmente de cério, lantânio, neodímio e ítrio.

**Thor Lake:** No norte do Canadá, a cerca de 130km a sudeste da cidade de Yellowknife, encontra-se um depósito relativamente rico em ítrio e berílio. Estima-se um total de 430 mil toneladas de minério, contendo 0,2% de óxido de ítrio (Hedrick, 1985).

**Yukon:** Um grande depósito de terras raras foi descoberto no sul da província de Yukon, no norte do Canadá. Mais de 1,5 milhão de toneladas de minerais contendo monazita e xenotímio. Estima-se uma concentração de mais de 1,6% de REO.

### 7.1.7 China

A China é o país com mais reservas dentre o grupo dos 8 países com reservas acima de 1 milhão de toneladas de REO. O país possui um total (entre conhecidas e divulgadas), de 36 milhões de toneladas (Jackson e Christiansen, 1993).

Existem 4 cinturões de depósitos onde são encontrados minerais de terras raras (Clark e Zheng, 1991).

- Cinturão na província de Mongólia interior: composto pelo maior depósito de terras raras do mundo, esta região compõe uma mina de ferro e nióbio que apresenta altos teores de óxidos de terras raras. Entre os minerais de terras raras encontrados estão a bastnasita e a monazita em uma matriz de óxido de ferro de origem dolomítica. Importante salientar que os teores de tório associado à monazita são muito baixos.

- Cinturão das províncias de Fujian, Jiangxi – Guangdong, Guangxi – Hunan: depósitos localizados entre as províncias acima citadas. Este depósito possui uma característica específica. É formado de minerais como bastnasita, alanita e sinchisita que foram adsorvidos em uma matriz laterítica. Pela adsorção ter ocorrido de forma seletiva neste local, pequenas e inúmeras reservas possuem elevados teores de terras raras.

- Cinturão das províncias Hubei – Sichuan: Depósito encontrado na fronteira entre estas duas províncias. É composto de ocorrências de bastnasita e parisita entre uma matriz de barita e calcita.
- Depósitos sedimentares nas praias do sudeste chinês: Depósitos de monazita e xenotímio ocorrem em praias, no litoral da província de Guangdong e a ilha Hainan.

Cada um destes cinturão de mineralização apresenta características completamente diferentes em formação, tipo de minerais encontrados e maneira de extração.

**Depósito de Bayan Obo:** O grande depósito de minerais de ferro, nióbio e terras raras, descoberto na década de 1920, está localizado a 135km a noroeste da cidade de Baotou, na região autônoma de Nei Mongol, no norte da China. A reserva é a maior mina de ferro da China, com reservas de mais de 1 bilhão de toneladas de minério de ferro. As reservas estimadas de terras raras contidas na mina de Bayan Obo ultrapassam os 35 milhões de toneladas de REO, em teores de 5,5% de REO contido, geralmente em bastnasita. Importante salientar que a monazita encontrada juntamente à bastnasita é muito pobre em tório, o que facilita sua extração, beneficiamento e estocagem.



**Figura 12:** Depósito de Bayan Obo (Jones, 2010).

**Reservas de minérios de íon adsorvidos:** um tipo raro de mineral encontrado no restante do mundo, a China também possui reservas ricas em minérios de íon adsorvido. Isso ocorre quando um mineral base adsorve preferencialmente um tipo de elemento, fazendo com que este se associe ao mineral da matriz. No caso da China, uma matriz de laterita adsorveu preferencialmente elementos de terras raras, dando origem a uma cerâmica contendo altos teores de REO. Outro ponto característico é que os depósitos são inúmeros, mas muito pequenos e com composição de terras raras diferente. Isso faz com que possam ser lavrados individualmente, de acordo com a demanda de mercado. Apesar de uma reserva relativamente pequena para os padrões chineses (apenas 1 milhão de toneladas de REO), as reservas de íon adsorvido apresentam teores apreciáveis de neodímio, samário, európio, gadolínio, térbio e altos teores de ítrio.

**Depósitos sedimentares no litoral:** Depósitos localizados no sudeste da China e na ilha de Hainan, com um teor médio de 0,7% de REO. Estima-se

um total de 44 mil toneladas de monazita e 8,2 mil toneladas de xenotímio. Associadas a estes minerais também se encontram zircônia e ilmenita.

### 7.1.8 Alemanha

Apesar de não possuir minas de terras raras conhecidas, a Alemanha possui reservas de areias de minerais pesados na costa do Mar do Norte. Estima-se um total de 10 milhões de toneladas em minerais pesados, incluindo monazita.

### 7.1.9 Índia

Sendo um dos 5 países com maiores reservas de terras raras, a Índia possui uma grande variedade de depósitos, tanto em rocha maciça, quanto em depósitos sedimentares. Apesar de grandes reservas, não existem depósitos individuais que mereçam menção individualmente. Os depósitos indianos são classificados em:

**Depósitos de rocha maciça:** de formação muito similar entre si, os depósitos de rocha maciça da Índia apresentam origem pegmatítica ou hidrotermal. Altas concentrações de minerais de terras raras ocorrem em pegmatitas nas províncias de Bihar, Rajasthan e Andra Pradesh. Já, minerais de origem termal são encontrados nas províncias de Rajasthan, Tamilnadu e Gujarat.

Ocorrências de alanita presente em rochas graníticas são conhecidas nas províncias de Madurai, Tirunelveli e Tamilnadu. Apesar de menores teores de terras raras na alanita (10 a 30% de REO), a viabilização comercial destes depósitos se dá devido à sua ocorrência e facilidade de extração.

**Depósitos sedimentares:** o mais importante grupo de depósitos de terras raras na Índia são os depósitos sedimentares litorâneos. Com depósitos sedimentares totalizando 2,7 milhões de toneladas de REO, a Índia fica atrás apenas da Austrália em quantidade de depósitos deste tipo. Areias monazíticas



são encontradas na costa sudoeste da Índia, com destaques para o depósito de Chatrapur, que se estende por 18km com alto teor de minerais pesados, o depósito da praia de Chavara, que se estende por 22km, e principalmente para as dunas de Orissa, que se estendem por 150km, com depósitos de areia rica em sílica e minerais pesados (incluindo monazita).

#### **7.1.10 Indonésia**

Na Indonésia, o mais importante recurso em relação às terras raras são reservas de xenotímio encontrada juntamente em depósitos sedimentares de cassiterita nas ilhas de Belitung, Bangka, Tjujuh, Singkap, Kundun e Karimun.

São estimadas mais de 5 mil toneladas de REO nestes depósitos que ainda não foram explorados nem processados.

#### **7.1.11 Japão**

Foram encontrados baixos teores de terras raras associados ao mineral de titânio, esfeno. Na mina de zinco e chumbo das proximidades da cidade de Kameoka, o esfeno é encontrado em teores de 4 a 7%, o que totaliza um teor de cerca de 1% ao total de REO encontrados (Ito, 1991).

#### **7.1.12 Malásia**

Os principais depósitos da Malásia são depósitos sedimentares de aluvião, em que minerais pesados são encontrados com a cassiterita depositada no leito de rios. Depósitos deste tipo são encontrados em vários estados da Malásia, com destaques para os depósitos de Kinta Valley, no estado de Perak. Monazita e xenotímio são encontradas em teores de 5 a 10% e 0% a 5% respectivamente. Importante salientar também os altos teores de tório e urânio (6% e 0,2% respectivamente).

As reservas totais da Malásia somam modestas 30 mil toneladas de REO (Kanazawa e Miyawaki, 1991).

### 7.1.13 Malawi

Diversos minerais de terras raras são encontrados no sul do Malawi. Desde as mais comuns monazita e bastnasita até as mais raras sinchisita e florencita (Malunga et al., 1991).

**Kangankunde:** quantidades exploráveis de monazita ocorrem na reserva de Kangankunde. O mineral se encontra disseminado em carbonatitos e contém baixos teores de tório. O depósito contém 180 mil toneladas de REO a um teor médio de 3,5% de REO, principalmente composta de samário e európio, que correspondem a 1,5% no total (Lynas, 2011).

**Nanthace Hill:** bastnasita e sinchisita ocorrem em uma profundidade de até 50m associadas a uma rocha carbonatítica. O teor de REO varia de 1% a até 3,6%, com destaque para os teores de ítrio e európio.

**Songwe:** similar ao depósito de Nanthace Hill, contém mais de 1,4 milhões de toneladas, com teor médio de 1,7% de REO, basicamente oriundos de bastnasita e sinchisita.

**Ilha Chilwa:** sinchisita e florencita ocorrem associados à rocha carbonatítica da ilha. A reserva apresenta teor médio de 5% de REO, com destaques para samário, európio, ítrio, lantânio e cério.

### 7.1.14 Moçambique

Depósitos sedimentares de minerais pesados, incluindo monazita ocorrem nas proximidades da cidade de Congolone. O depósito litorâneo consiste em 167 milhões de toneladas, sendo 3,3% em minerais pesados, totalizando 11 mil toneladas de monazita.

#### **7.1.15 Myanmar**

Monazita e xenotímio são associadas a depósitos sedimentares de cassiterita e wolframita. Columbita e tantalita também ocorrem nestes depósitos, que são encontrados na porção sul do país (Jackson e Christiansen, 1993).

#### **7.1.16 Nova Zelândia**

A Nova Zelândia apresenta 2 depósitos sedimentares na porção oeste da ilha sul, nas proximidades das cidades de Westport e Barrytown. Os depósitos contém ilmenita, rutilo, zircônia, e monazita. Também contém magnetita, cassiterita e ouro. Vale ressaltar que as reservas de monazita são consideradas modestas.

#### **7.1.17 Peru**

Pequenas reservas de areias de aluvião contendo principalmente cério, lantânio, neodímio ocorrem perto da cidade de Tacna no Peru.

#### **7.1.18 África do Sul**

Com mais de 1 milhão de toneladas de REO, a África do Sul possui o potencial de se tornar um dos maiores produtores de terra raras do mundo.

**Complexo Phalaborwa:** grande complexo de flouroapatita que contém 0,5% a 1,0% de REO. A vantagem de reservas de terras raras em apatita é a total ausência de tório, o que facilita a extração, processamento e estocagem da ganga.

**Van Rhynsdorp e Naboomspruit:** grandes depósitos de monazita em rocha macica. Estão entre os maiores depósitos do mundo.

**Richards Bay:** depósito sedimentar litorâneo contendo monazita, ilmenita, rutilo, zircônia e magnetita.

#### **7.1.19 Sri Lanka**

O Sri Lanka possui grandes depósitos sedimentares litorâneos contendo minerais pesados. O grande diferencial do Sri Lanka é que suas areias possuem o mais alto teor de minerais pesados do mundo, com cerca de 60 a 75%. Os principais minerais são: ilmenita, rutilo, zircônia, e pouca monazita. Também possuem poucos elementos radioativos como o tório e urânio.

Outro fato interessante é que grandes porções de minerais pesados são adicionados ao depósito todos os anos durante as fortes tempestades monçônicas.

#### **7.1.20 Taiwan**

Depósitos sedimentares litorâneos ricos em monazita são encontrados nas praias de Taiwan. Estima-se um total de depósitos de 550 mil toneladas, contendo cerca de 10% de monazita negra. A monazita negra de Taiwan, ao contrario das demais é excessivamente baixa em teores de tório (0,4%).

#### **7.1.21 Tailândia**

Depósitos de origem primária e secundária são encontrados na Tailândia, por sua vasta quantidade de sistemas geológicos. Apesar de inúmeros depósitos contendo minerais de terras raras, seus teores são baixos.

As reservas de origem sedimentar são encontradas em praias atuais e antigas. Com teores variáveis de terras raras, não alcançam mais do que 0,5% de REO.

O planalto granítico do leste tailandês também apresenta modestos depósitos de monazita e xenotímio.

### 7.1.22 Turquia

A Turquia possui um depósito de bastnasita localizado na sua porção centro-oeste. Este depósito também contém barita e fluorita e é grande o suficiente para suportar uma extração anual de 12 mil toneladas de REO.

### 7.1.23 Estados Unidos

Antes da descoberta de grandes reservas na China, os Estados Unidos eram o país com maiores reservas de terras raras. Após a descoberta de grandes reservas de bastnasita na Namíbia, os EUA caíram para a terceira posição em reservas de REO.

No país, existem 32 depósitos de monazita e 3 de bastnasita, com mais 5 depósitos de outros minerais (Jackson e Christiansen, 1993).

**Depósitos sedimentares:** monazita sedimentar é encontrada largamente nos EUA. Estados como Florida, Carolina do Sul, Georgia, Alabama, Virginia, Idaho, Wyoming, California e Alaska possuem reservas monazíticas tanto litorâneas como aluvionares. A monazita americana é relativamente baixa em tório, com teores variando entre 0,5% no Idaho até 4% na Florida (ainda assim, muito distantes dos 6% das areias monazíticas brasileiras). Entre os depósitos sedimentares, destacam-se as areias do Idaho, da Florida e principalmente, o depósito de Music Valley na California.

**Depósitos de rocha maciça:** A maior parte dos depósitos americanos é composta por rochas maciças. Grandes depósitos de apatita ocorrem em diversas localidades, com teor médio de 11% de REO contido na apatita.

**Depósito de Mount Pass:** Após o declínio da mineração de areias monazíticas no Brasil e na Índia, e juntamente com o maior desenvolvimento da indústria de terras raras, o depósito de Mount Pass tornou-se a principal fonte de terras raras no mundo. Localizado na California, a reserva é composta de rochas graníticas de origem ígnea, e contém cerca de 12% de bastnasita (com um teor de 6,6% de REO).

#### **7.1.24 Rússia**

A Rússia contém grandes depósitos principalmente de apatita e loparita.

**Península de Kola:** Principal depósito russo junto da fronteira com a Finlândia inclui grandes quantidades de loparita com teores de 32% a 34% de REO. Destacam-se as terras raras mais leves e o elevado teor de ítrio encontrado (0,04%). O teor total de REO é de cerca de 1%. A loparita de Kola também possui outros óxidos de valor relevante, como óxidos de titânio, tântalo e nióbio.

Outros depósitos relevantes são encontrados nas montanhas Vishnevye, com teores de REO de 1%.

#### **7.1.25 Venezuela**

Depósitos apreciáveis de terras raras e nióbio foram encontrados em Cerro Impacto, na Venezuela, a 190km de Ciudad Bolívar. De forma similar aos minérios de adsorção na China, a forte ação do intemperismo na região fez com que rochas carbonatíticas apresentassem uma camada de laterita com altos teores de terras raras e outros elementos. O teor de REO varia de 0,1% a 11,0% com composição variável de elementos contidos.

#### **7.1.26 Vietnã**

No Vietnã, o mais importante depósito ocorre em Nam Nam Xe, na porção noroeste do país (Tirnh, 1991). Com origem hidrotermal, o depósito é composto por uma matriz carbonatítica com veios de barita – baritocelstita em que os óxidos de terras raras se associam. Os teores de REO variam, com uma média de 9 a 13%.

Existem mais 35 minerais secundários no depósito de Nam Nam Xe, que incluem bastnasita, parisita, sichisita, calcita, anquerita, moazita, pirita, galena, apatita, montmorilonita, entre outros. O minério de terras raras possui como

característica principal a facilidade de se extrair os óxidos de terras raras contidos, apesar de nenhum processamento ocorrer no momento.

#### **7.1.27 República Democrática do Congo (RDC, ex-Zaire)**

Monazita aluvionar é encontrada em diversos depósitos na RDC. Principalmente associados a depósitos de estanho e de ouro. Os principais depósitos se encontram na região de Kivu. Os principais depósitos são os de Kabengelwa com mais de 2 mil toneladas de monazita (cerca de 600 toneladas de REO) contida e o de Mashabuto, com 45 toneladas de monazita (25 toneladas de REO).

### **8 A produção de terras raras no mundo**

Apesar de serem comumente encontradas na crosta terrestre, a sua específica mineralização faz com que o processo de mineração das terras raras seja diferente dos elementos mais utilizados pelo Homem. Na maioria dos casos, os teores de óxidos de terras raras são tão baixos que sua mineração como principal produto se torna inviável. Geralmente a produção de terras raras está associada com a operação de outro tipo de mineral, sendo os minerais de terras raras co-produtos associados ou rejeitos do processamento de outros minerais.

Quando as terras raras são extraídas como co-produto, o produto principal da operação é responsável por suportar o custo de extração dos co-produtos, neste caso minerais de terras raras. Estes por sua vez, tornam a mineração do produto principal mais rentável e economicamente mais atrativa.

Existe uma divisão dos custos de operação entre os dois minerais, sendo o mineral principal, o maior responsável pelos custos de lavra.

É raro, mas algumas vezes, o principal mineral podem ser os minerais de terras raras. Na reserva de Mountain Pass, na Califórnia, os teores de bastnasita são tão altos que justificam uma operação exclusivamente focada em óxidos de terras raras (Wilson, 1991). A mesma situação pode ocorrer na

Austrália, mais especificamente nos depósitos de Mt. Weld, Yangibana e John Galt, que possuem teores sustentáveis de minério de terras raras (Taylor, 1991).

Historicamente, o único país em que a extração de monazita era a principal atividade de lavra é o Brasil. Apesar de inicialmente lavrada em busca do tório contido, a monazita de areias sedimentares de costa foi explorada como principal mineral de suas reservas. A partir de 1920, com o desenvolvimento da indústria de terras raras, tais areias começaram a ser exploradas não apenas pelo tório contido, mas principalmente pelos óxidos de terras raras.

Em outros depósitos sedimentares de areias pesadas, a monazita ou xenotímio são lavrados como co-produtos da mineração de ilmenita (na maioria dos casos), cassiterita no sudeste asiático e até de ouro aluvionar (Arplan, 1988).

Atualmente, a maior parte dos óxidos de terras raras é um co-produto associado ao minério de ferro na reserva de Bayan-Obo. Terras raras também foram extraídas como co-produtos da mineração de urânio, no Canadá, titânio na Rússia. Existe um grande potencial de recuperação de terras raras utilizadas na fabricação de ácido fosfórico em várias localidades ao redor do mundo.

Apesar de seu status de importante co-produto (principalmente nos preços atuais), nem sempre os óxidos de terras raras foram recuperados. Isto faz com que tenhamos grande depósitos de ganga com altos teores de terras raras contida. Um exemplo disso é a recuperação de depósitos de extração de anatase no Brasil. Ou então a exploração de reservatórios de resíduos em reservas polimetálicas na Austrália. Os depósitos de Brockman e Toongi possuem resíduos finos de alumina e zircão contendo terras raras. Apesar de teores apreciáveis de terras raras contidas nestes depósitos de resíduos, sua estrutura finamente particulada ainda dificulta a exploração comercial para a produção de concentrados de REO.



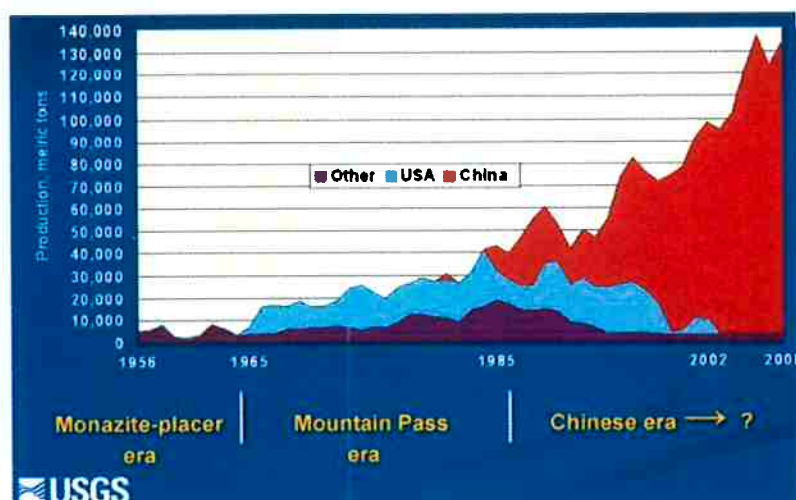
## 8.1 Histórico da produção mundial

A produção comercial de terras raras começou nos anos de 1880, na Suécia e Noruega, com a mineração de monazita. Tal extração provinha matéria prima para a fabricação da manta incandescente de Welsback. Inicialmente, óxidos de zircônio, lantânio e itérbio eram utilizados. Posteriormente, a manta foi melhorada com a adição de óxidos de tório e cério e pequenas quantidades de neodímio e praseodímio para estampar o nome da marca no produto (Hedrick, 2000).

A mineração comercial de terras raras começou pouco depois, ainda no século XIX. A Índia e o Brasil eram os principais produtores mundiais (com pequenas contribuições dos Estados Unidos), até os anos de 1940, quando a Austrália e a Malásia iniciaram sua produção regular.

A partir dos anos 50, e até meados da década de 80, os Estados Unidos foram a principal fonte mundial de terras raras, seguida pela Austrália.

Em 1985, com um movimento estratégico iniciado por Deng Xiaoping, a China se tornou a segunda maior produtora de óxidos de terras raras. E finalmente, em 1988 se tornou a principal produtora de REO no mundo.



**Figura 13:** Distribuição da produção mundial de terras raras, com destaque aos maiores produtores (USGS, 2010).

Até 1965, a maior parte da produção de terras raras era de monazita, principalmente encontrada em depósitos sedimentares. A partir de 1965, depósitos de bastnasita começam a ser explorados e esta se torna a principal fonte de terras raras. Atualmente ainda a maior parcela das terras raras provém da bastnasita. A diferença entre teores nos dois minerais explicita um pouco o desafio da oferta em conseguir alcançar a demanda. Enquanto que a monazita apresenta uma fração leve de REO (La, Ce, Pr, Nd) de cerca de 90%, a bastnasita apresenta 99% de fração leve e quase a total ausência de terras raras mais pesadas e de Ítrio em sua composição. O xenotímio possui uma composição complementar, contendo 60% de ítrio e maiores teores de terras raras mais pesadas que a monazita e a bastnasita.

Mesmo com teores muito inferiores de terras raras mais pesadas e de ítrio, o fato do xenotímio ser muito menos abundante e consequentemente menos processado que a monazita e a bastnasita faz com que as principais fontes de terras raras pesadas sejam historicamente a monazita e a bastnasita.

Apesar de sua importância histórica, a monazita hoje responde por 5% da produção mundial de REO. Inclusive em países onde a monazita é a principal fonte de terras raras e a de mais fácil extração, a sua produção é ínfima. Isto ocorreu pelo fato da monazita comumente estar associada a elementos radiativos como o tório e o urânio. Estes dificultam o beneficiamento e armazenagem durante a produção de REO, além de representarem uma ameaça real à saúde humana.

Atualmente, apesar da demanda mundial de 128 mil toneladas de REO, a produção mundial é de 106 mil toneladas de REO, com capacidade máxima para a produção de 115 mil toneladas (Lynas, 2011). A China corresponde a 97% da produção, com mais de 103 mil toneladas. Destas, 55 mil toneladas são produzidas a partir do minério de ferro de Bayan Obo.

## **8.2 Produção no Brasil**

Apenas o depósito de Buena no Rio de Janeiro (pertencente à INB) produz atualmente terras raras, na forma de concentrados de monazita (apesar

da lavra ter se encerrado em 2011). No caso específico, a monazita é um co-produto geralmente associado à produção de ilmenita, rutilo e zircão.

A produção de monazita se iniciou em 1885 no Brasil, com a exploração de depósitos de areias costeiras pesadas. Tais depósitos cobriam uma faixa de 200km de extensão ao longo dos estados do Espírito Santo e Rio de Janeiro. A monazita era na época tão abundante nestes depósitos que era extraída com técnicas e equipamentos rudimentares até para 1885. Tais ricos depósitos eram apenas uma fração das reservas brasileiras de terras raras e foram exauridos antes de 1950.

A partir de 1950, a produção brasileira de monazita continuou, principalmente de areias mais complexas, que não eram tão ricas em monazita, mas ainda de fácil extração. Com o desenvolvimento de extração em reservas de bastnasita em outros lugares do mundo, a monazita que se apresentava em baixos teores na natureza e ainda por cima continha elementos radiativos em sua composição, perdeu importância como fonte principal de terras raras, e a extração de monazita no Brasil diminuiu drasticamente.

Em 2010, país produziu modestas 1.054 toneladas de monazita, a partir de areias monazíticas de paleopraias no Rio de Janeiro (depósito de Buena, pertencente à INB). A monazita foi estocada durante anos, alcançando 15 mil toneladas nos estoques da INB. No final de 2009, um acordo entre a INB e a empresa chinesa Beijing HMC Mining Trade Co. Ltd garantiu a venda de 10,8 mil toneladas de monazita armazenada, sendo exportadas 300 toneladas ao mês. A licença de exportação já foi concedida pela CNEN e a exportação ocorre desde março de 2011 (INB, 2011).

No exercício de 2010, os resultados obtidos apontaram esgotamento do depósito de Buena. A lavra foi paralisada e a unidade está processando e vendendo o estoque remanescente para poder encerrar as atividades da unidade de beneficiamento primário e preparar a área para descomissionamento (INB, 2011).

### **8.3 Produção na Índia**

A mineração de areias costeiras indianas com o objetivo de explorar a monazita contida começou em 1911, como uma reprodução do modelo de exploração existente no Brasil desde o século XIX. Antes da 2ª Guerra Mundial, a Índia e o Brasil eram os principais produtores de terras raras.

Dos 5 principais depósitos sedimentares da Índia, 4 deles estão em produção atualmente (todos em áreas costeiras). O quinto depósito, ainda não explorado, situa-se no interior do país e sem acesso à infraestrutura necessária para a sua exploração. Três dos projetos em operação, Chavara, Manavalakurichi e Chatrapur pertencem ao governo da Índia, enquanto que o quarto projeto restante, pertence ao governo da província de Kerala.

Os principais minerais obtidos das areias sedimentares indianas são ilmenita, rutilo, zircão, granada, silimanita, leucoxênio, magnetita e monazita. A atual produção destes depósitos fornece 3 mil toneladas de REO, anualmente.

#### **8.4 Produção nos Estados Unidos**

A produção de terras raras nos Estados Unidos se iniciou em 1887 (dois anos após o Brasil), com a exploração de areias sedimentares em Burke County, na Carolina do Norte (Overstead, et al, 1959), e se seguiu até 1910. Durante esse período, a totalidade da exploração vinha da monazita extraída de areias costeiras. Com a maior parte da monazita vinda do Brasil e da Índia, a indústria de extração de terras raras não evoluiu nos Estados Unidos (apesar do país liderar na indústria de processamento de terras raras e manufatura de produtos associados). Durante a 2ª Guerra Mundial, ambos Índia e Brasil restringiram a exportação de concentrados de monazita (possivelmente para preservar suas reservas de urânio e tório associados para desenvolvimentos futuros) (Kleber e Love, 1963). Isso fez com que nos Estados Unidos surgisse uma indústria de extração de terras raras e com que fossem descobertos grandes depósitos.

Os Estados Unidos se tornaram o maior produtor de terras raras com a descoberta e o desenvolvimento do depósito de bastnasita de Mountain Pass, na Califórnia. Depósitos de monazita também foram bastante explorados,

principalmente como co-produtos da mineração de rutilo, garnet, zircão, ouro e ilmenita (atualmente a extração de monazita nos Estados Unidos está confinada nos estados da Flórida e Carolina do Sul).

Com a descoberta de Mountain Pass em 1949, e sua posterior exploração comercial (até 1980 esta foi a única reserva de bastnasita a ser explorada no mundo), os Estados Unidos se tornaram o principal produtor de terras raras. Os resultados para a economia do país foram fabulosos, atraindo empresas de alta tecnologia, pessoas altamente capacitadas (atração e retenção de cérebros) e uma grande fonte de inovação.

Com o desenvolvimento da indústria chinesa de terras raras, o depósito de Mountain Pass operou na década de 90 de forma intermitente e muito abaixo de sua capacidade plena. Um conjunto de restrições ambientais aliado ao cenário externo desfavorável fez com que a exploração de terras raras fosse interrompida no início deste século. Estima-se que o depósito ainda contenha mais de 1 milhão de toneladas de óxidos de terras raras.

Uma forte restrição por parte de ambientalistas e a forte competição com a produção chinesa fizeram com que atualmente os Estados Unidos se tornassem completamente dependentes de fontes externas de terras raras (China).

## **8.5 Produção na Austrália**

A Austrália foi o principal produtor mundial de monazita desde o final da década de 40. Desde 1967 os depósitos de areias costeiras eram a principal fonte do mineral. Em 1980, a Austrália respondia por 37% da produção mundial de monazita. Através do depósito de Eneabba, a monazita era extraída como co-produto da ilmenita.

A monazita era explorada não só em Eneabba, mas também em diversas outras localidades como co-produto da exploração de ilmenita, rutilo e zircão. Em 1983, a proporção da produção de monazita na Austrália era de quase 17 mil toneladas para cada milhão de toneladas de ilmenita. Apenas 5

anos depois, em 1988, esta proporção havia diminuído para menos da metade, e a produção total de monazita na Austrália despencava ano a ano.

Atualmente, a Austrália se encontra com a produção interrompida. Fatores como a diminuição da demanda por monazita (devido ao tório associado), juntamente com a produção de bastnasita a preços baixos pela china tiraram a monazita australiana do mercado.

Atualmente a Austrália não possui produção de terras raras, mas é um dos países com maior potencial de exploração.

## **8.6 Produção na China**

A mineração de terras raras ocorre em diversos depósitos na China. Desde o início da estratégia de incentivar a produção de terras raras a qualquer custo e consolidar o mercado, iniciada por Deng Xiaoping, diversas reservas são exploradas comercialmente. É atribuída ao próprio Deng a frase: “Se o Oriente Médio possui petróleo, a China possui terras raras”.

Atualmente o suprimento de terras raras vem principalmente do depósito de bastnasita de Bayan Obo na província da Mongolia Interior. Também é importante ressaltar a importância da exploração do depósito de Mianning, na província de Sichuan e Weishan na província de Shangdong. Mais ao sul, temos os depósitos de cerâmicas com altos teores de terras raras mais pesadas e depósitos de monazita e xenotímio sedimentares que também apresentam potencial de exploração comercial (Hedrick, 1997).

Dentre estes, o depósito de Bayan Obo é o que mais contribui para a produção chinesa de terras raras. A produção de minério de ferro no depósito de Bayan Obo foi iniciada em 1957, porém, a produção de terras raras se deu apenas a partir de 1980. Com a produção de terras raras a partir da bastnasita do depósito, a China logo se tornou um expoente na indústria de terras raras e em 1985 ultrapassou os Estados Unidos, se tornando a principal produtora mundial.

Em 1982, de uma modesta produção de 6 mil toneladas de óxidos de terras raras, a China passou em 1985 a produzir mais de 20 mil toneladas. Com o desenvolvimento de projetos diversos pelo país (de Bayan Obo aos depósitos cerâmicos no sul), a China alcançou em 1995 a marca de mais de 40 mil toneladas de óxidos produzidos.

É importante salientar que a alta na produção chinesa foi sustentada principalmente através de incentivos de exportação do governo, baixos salários de mineradores e empregados, ausência total de controle ambiental e de segurança na produção e um câmbio favorável. Com isso, a China conseguiu ganhar mercado, inviabilizando a produção no restante do mundo durante os anos 1995 – 2005. Atualmente a China produz 97% das terras raras no mundo e toda a capacidade produtiva mundial foi desmantelada e inviabilizada.

### **8.7 Produção na Rússia**

A Rússia possui reservas apreciáveis de terras raras. Exploradas desde 1951, as principais fontes são reservas de loparita e fosfatos uraníferos. Reservas de loparita na península de Kola apresentam apreciáveis teores e podem ser exploradas a qualquer momento (apesar da necessidade de fontes externas de processamento no Cazaquistão). Também na península de Kola, se encontram reservas de apatita com teores elevados de ítrio e európio, que podem ser lavradas caso os preços destes metais justifique o investimento.

### **8.8 Produção na África do Sul**

Um único veio descoberto em 1950 em Van Rhynsdorp se manteve como a principal fonte de monazita até 1963. Apreciáveis quantidades de terras raras também foram obtidas do depósito de urânio de Witwatersrand (Highley et. al, 1988). Apesar do grande potencial da África do Sul em se tornar uma forte produtora de terras raras, apenas no depósito de Richard Bay que a monazita é extraída e separada em quantidades pequenas que não ultrapassam mais de 400 toneladas ao ano.

## **8.9 Produção no Canadá**

A produção de terras raras no Canadá ocorreu através de co-produtos da mineração do urânio na reserva de Elliott Lake. Durante os anos 80, uma planta de recuperação extraiu significativos montantes de terras raras a partir de soluções oriundas da mineração do urânio. Chegando a cerca de 100 toneladas de óxidos de terras raras (principalmente ítrio) no final dos anos 80. A partir da década de 90, não foram reportadas significativas quantidades de terras raras recuperadas na planta.

## **8.10 Produção na Malásia**

A Malásia tem produzido terras raras desde 1940. Principalmente monazita e xenotímio aluvionar eram extraídos a partir da mineração da cassiterita no leito de rios. O auge da exploração destas reservas se deu nos anos 80, quando mais de 3000 toneladas de óxidos de terras raras foram extraídos. Porém no final da década de 80, a competição com a crescente produção chinesa inviabilizou projetos no setor, e culminou com o fechamento de todas as operações de lavra no país e a falência da Asian Rare Earth Sdn. Btd. em 1994 (Mining Journal, 1994).

## **8.11 Produção na Tailândia**

Assim como na Malásia, a Tailândia também apresenta depósitos aluvionares de monazita e xenotímio associados à cassiterita em leitos de rios. De forma muito similar ao rival país vizinho, a Tailândia apresentou se auge da produção durante os anos 80, em que produziu mais de 800 toneladas anuais de óxidos de terras raras. Porém, a competição com a barata produção chinesa inviabilizou todos os projetos do setor no país.

## **8.12 Produção no Sri Lanka**



Depositos de areias sedimentares são explorados no Sri Lanka de forma primitiva e rudimentar, na região de Pulmoddai. Concentrados de monazita são produzidos em pequenas quantidades (100 toneladas anuais). Existe o potencial de produção de até 500 toneladas na reserva (Jackson e Christiansen, 1993).

### **8.13 Republica Democrática do Congo (ex-Zaire)**

O recente país, assolado por guerras tribais e governos que mal se sustentam, possui produção de cassiterita aluvionar com monazita associada. Apesar de não existirem dados oficiais, as milícias armadas de apoio ao governo controlam as reservas e se sustentam com a exploração de cassiterita e minerais associados, entre eles, a monazita.

## **9 Situação de mercado das terras raras**

Apesar de um volume extremamente inferior se comparado aos mais utilizados metais, as terras raras constituem uma vasta gama de usos nos setores eletrônico, petroquímico, automotivo, ambiental e militar. E mesmo tendo um elevado custo por unidade, o impacto final do preço das terras raras no custo final de seus produtos é praticamente não existente. As terras raras são presentes geralmente em diminutas quantidades e por tal motivo, não são recicladas. Um exemplo disso são as lâmpadas fluorescentes, que utilizam pequenas quantidades de terras raras, principalmente ítrio e európio (aproximadamente 0,5g por lâmpada).

A demanda mundial por terras raras é estimada em 128 mil toneladas de óxidos de terras raras por ano (Lynas, 2011). Comparado com a demanda de 1 bilhão de toneladas de minério de ferro, o mercado de terras raras é minúsculo. Porém ao considerar a utilização em equipamentos de alta tecnologia, o volume não é relativamente importante. O vice presidente da Lynas Corporation, uma das maiores empresas de mineração e produção de terras

raras fora da China apontou este fato em 2007: "Somos tão viciados em terras raras quanto em hidrocarbonetos, apenas não sabemos disso."

A demanda por terras raras está prevista para aumentar nos próximos anos. Tendências como: transição de lâmpadas incandescentes para fluorescentes, avanços nos veículos automotivos, uso de combustíveis alternativos, investimentos em geração de energia renovável, em sistemas de defesa de alta tecnologia, em melhores equipamentos catalíticos na indústria petroquímica são os principais fatores que contribuem para um aumento na demanda mundial de terras raras (WILTW, 22/03/07).

Até a metade dos anos 80, os Estados Unidos foram o principal produtor de terras raras. Apenas a partir de 1985, que a China ultrapassou os EUA como principal fonte produtora e consolidou o mercado de produção. Tanto que em 2002, a única fonte americana relevante de terras raras, o depósito de Mountain Pass, paralisou suas operações (WILTW, 22/03/07).

A crise tecnológica de 2000-2001, juntamente com a política agressiva chinesa de forte expansão no setor (literalmente a qualquer custo), levaram a um colapso nos preços de terras raras, e inviabilizaram a operação de outras fontes. A China se consolidava então como única e dominante fonte produtora, com mais de 95% da produção em 2006. A maioria da produção chinesa vem da província da Mongólia Interior, onde a estatal chinesa Baotou Iron and Steel Group e Baotou Rare Earth Group são as principais empresas (WILTW, 22/03/07).

A situação atual do mercado de terras raras reflete uma política expansionista no setor iniciada durante os anos 80 por Deng Xiaoping. Desde então, a China investiu em novas minas e plantas de processamento com o objetivo claro de dominar a indústria.

Além disso, o governo chinês também realizou críticos investimentos para garantir a posse e o desenvolvimento de tecnologia relacionada às terras raras. A China financiou a maior rede mundial de pesquisa e desenvolvimento no setor. Apesar do mercado de terras raras apresentar uma escala muito menor em volume se comparado ao mercado de outros metais como o ferro, o

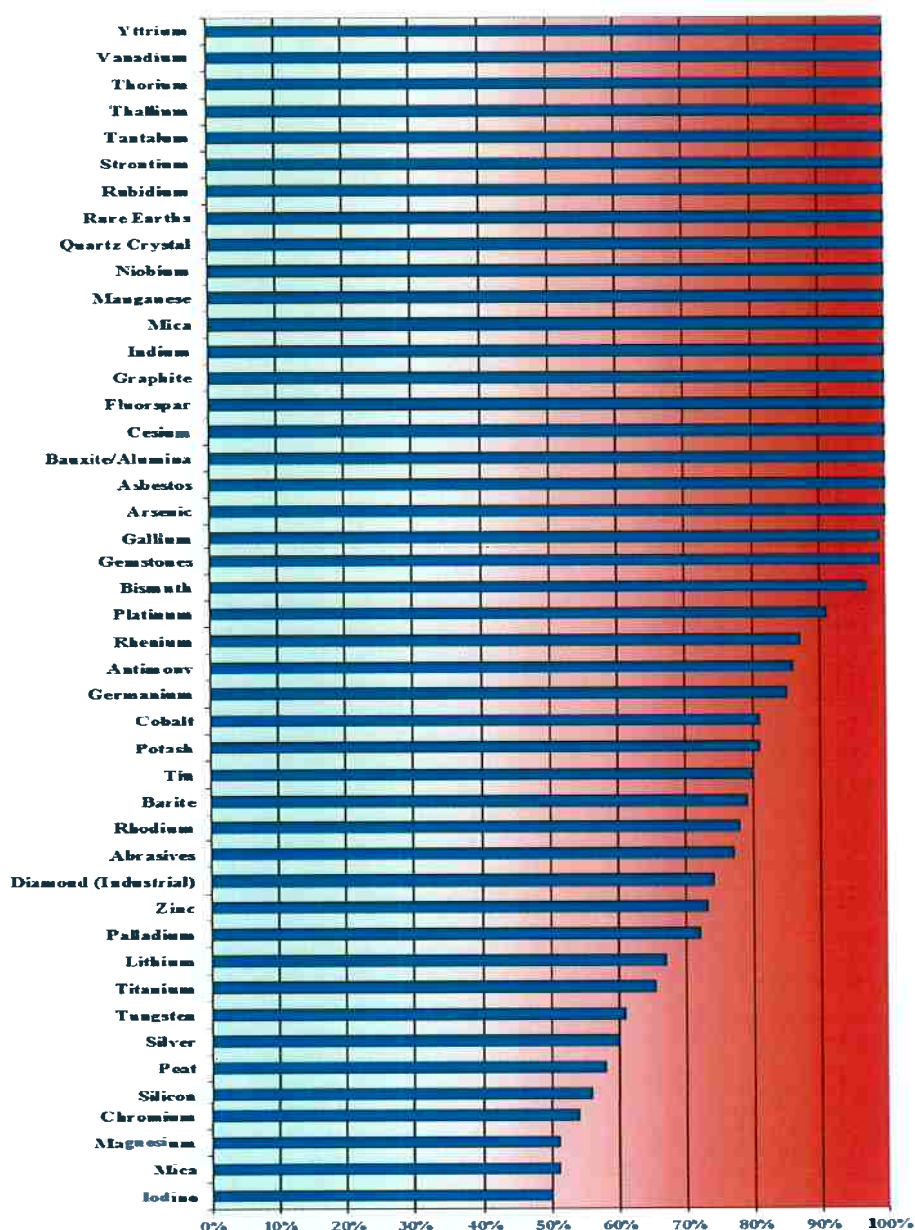
alumínio e o cobre, a sua contribuição para a economia é grande. Dominar a indústria de terras raras para a China corresponde a dominar um recurso chave, com diversos usos relacionados à alta tecnologia e novos materiais (WILTW, 22/03/07).

Com essa política agressiva de expansão, o governo chinês conseguiu atrair uma vasta gama de indústrias de tecnologia de ponta, que realocaram suas operações para o país, levando consigo pessoal capacitado, tecnologia e criando empregos de alto nível para a população chinesa. Intel, Motorola, Nokia, Cisco e Microsoft, são algumas das mais relevantes empresas que investiram pesado em manufatura e pesquisa na China, que hoje responde por mais da metade do consumo mundial de terras raras.

Um dos exemplos clássicos do desenvolvimento chinês de terras raras foi a rápida expansão de produção de turbinas para geração de energia eólica com o uso de magnetos de Nd-Fe-B. A China dobrou sua capacidade de geração de energia eólica a cada ano pelos últimos quatro anos seguidos, atingindo 12,2GW em 2006. Estimativas da Comissão Chinesa de Desenvolvimento indicam que a capacidade deve se expandir e alcançar 100GW gerados a partir de 2020. Esse aumento significativo na geração de energia eólica deve não apenas trazer consequências para a matriz energética chinesa, para a sustentação do forte crescimento no país e o fornecimento de água na China (grande parte da energia é usada para bombear água a partir de aquíferos subterrâneos para consumo), mas principalmente trará consequências para toda a indústria de terras raras do país.

Estimativas da Associação Européia de Energia Eólica apontam que a instalação de 1 megawatt de geração emprega cerca de 15 pessoas durante um ano e resulta em 0,4 empregos por megawatt quando na fase de operação e manutenção. Com base nesta estimativa, a expansão chinesa no setor eólico deve gerar empregos para 111 mil chineses e resultar em 35 mil empregos permanentes no setor. Além disso, o uso de terras raras em magnetos permite à China multiplicar o impacto da geração de energia eólica na criação de novos empregos (WILTW, 30/07/09).

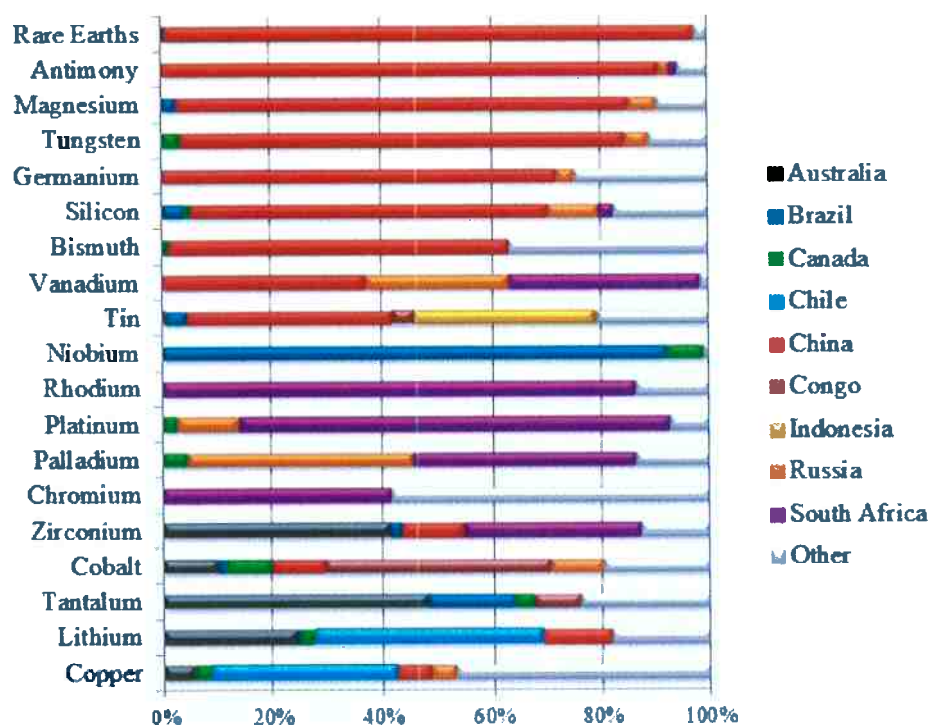
Historicamente, a concentração de recursos e meios de produção sempre foi assunto de extrema relevância aos governos das principais potências mundiais e sempre ligados às questões de soberania econômica e militar. Durante a guerra fria, os Estados Unidos e a União Soviética investiram massivamente na aquisição (militar ou política) de reservas de materiais estratégicos. Desde o final da guerra fria, ambas as nações, acabaram com seus estoques e perderam influência no cenário mundial, se tornando muito mais dependentes da oferta externa. Em 1978, relatórios do U.S. Geological Survey apontavam que os Estados Unidos eram dependentes de outras nações em 7 commodities minerais. No ano de 2009, os EUA já eram dependentes em 100% da produção de 19 recursos minerais (se os elementos de terras raras forem considerados independentemente, este número salta para 33).



**Figura 14:** Lista de recursos em que os EUA são mais dependentes atualmente (WILTW, 02/12/2010).

Apesar de possuir alta dependência de fontes externas, os Estados Unidos ainda possuem diversas fontes não exploradas em seu próprio território. Outras nações como Japão e Coreia do Sul, dependem exclusivamente de seus estoques para manter sua economia altamente focada em exportações de produtos de alto valor agregado.

Por outro lado, assim como com as terras raras, a China iniciou na década de 80 um movimento de consolidação da indústria mundial de diversas outras commodities metálicas. Apoiada com cambio favorável, baixos salários, e ausência de controles ambientais e de segurança, a China conseguiu monopolizar a produção de: terras raras (97%), antimônio (91%), magnésio (82%) e tungstênio (81%). Além disso, exerce controle substancial sobre a oferta de germânio (71%), silício (65%) e bismuto (62%). A China também faz parte do oligopólio de três países que conjuntamente produzem 98% do vanádio no mundo e juntamente com a Indonésia, produz 71% do estanho mundial (WILTW, 2/12/10).



**Figura 15:** Distribuição de elementos com poucas fontes produtoras, com destaque para a hegemonia chinesa na produção de terras raras, antimônio, magnésio, tungstênio, germânio, silício e bismuto (WILTW, 02/12/2010).

Com mais de 90% da produção, grandes empresas e rede de processamento em um país autocrático, o potencial de controle sobre o mercado se torna uma ameaça real à economia mundial.

## 10 Após a consolidação, a ofensiva chinesa

Por muitos anos, a China se manteve satisfeita em ganhar mercado na produção e fornecimento de baratas commodities metálicas e aproveitar os empregos de baixo nível oferecidos pela indústria da mineração. Baixos salários combinados com subsídios do governo e descaso com o meio ambiente fizeram da China o produtor de menor custo dentre diversos materiais. Porém, conforme a economia chinesa evoluiu, a necessidade de geração de empregos mais sofisticados fez com que o país não mais se contentasse em destruir seu meio ambiente e acabasse com suas reservas em nome dos empregos de baixo nível da indústria da mineração. A China deveria então criar um ambiente para fomentar o aparecimento de empresas de maior valor agregado que gerassem produtos mais sofisticados e oferecessem empregos de maior nível técnico. A indústria das terras raras estava prestes a mudar radicalmente para que pudesse se adequar às novas necessidades do país.

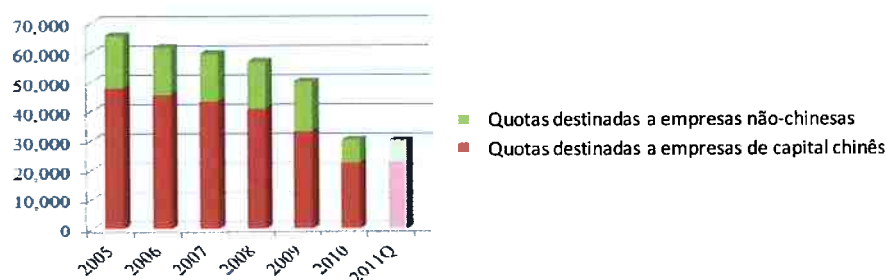
A partir de 2005, a China (que já detinha quase 95% do mercado mundial) iniciou um movimento contrário ao que seguia desde os anos 80. Pela primeira vez em 25 anos, a China instituiu quotas de exportação para companhias chinesas produtoras de terras raras e aplicou uma tarifa de 10% de exportação. Além disso, uma série de empresas foram fechadas por não se adequarem à regulação ambiental. Isso foi um claro sinal de que a China não quer mais ser a provedora mundial de terras raras, mas sim quer desenvolver e consolidar a indústria interna, fomentando não só a produção de commodities, mas de todos os produtos de altíssimo valor agregado da indústria de terras raras. Além disso, A China mostrou-se disposta a usar qualquer tipo de tática para consolidar a indústria dentro de seu território, garantindo empregos de alto nível para sua população.

A transição chinesa de subsídios para tarifas de exportação de terras raras surpreendeu o mundo, justamente pelo fato de anos de fortes subsídios terem tirado de mercado toda a concorrência produtora de REOs.

Com a aplicação das tarifas, companhias chinesas foram capazes de obter matérias primas de terras raras a preços 15 a 25% inferiores que

empresas fora da China (WILTW, 16/06/10), o que criou uma grande disparidade de preços, que permanece até hoje.

Em 2010 a quota de exportação foi de pouco mais de 30 mil toneladas, enquanto que a demanda fora da China esteve na ordem de 50 mil toneladas, o que resultou num expressivo aumento de preços. Além de restringir a oferta mundial por meio de quotas de exportação, a China também manipulou as quotas em favor de empresas com controle ou participação de capital chinês. Enquanto empresas de capital chinês tiveram cortes na quantidade exportável de terras raras de 32%, empresas de capital estrangeiro tiveram cortes de 54% (WILTW, 15/07/10). Algumas empresas seriamente afetadas, como a Neo Materials (empresa fabricante de magnetos com produção de REO na China, de controle e capital estrangeiro) alteraram o mix de elementos exportados, favorecendo elementos de alto valor (disprósio, térbio, európio) e diminuindo exportação de elementos de menor valor (cério e lantânio), para maximizar a rentabilidade em acordo com as quotas impostas.



**Figura 16:** Histórico das quotas de exportação de terras raras na China  
(WILTW, 21/07/2011)

As novas políticas do Ministério de Terras e Recursos chinês possuem o objetivo claro de consolidar o controle da indústria entre poucas gigantes empresas chinesas de controle estatal. Isso dificulta e até inviabiliza a habilidade de pequenas empresas de capital estrangeiro de produzir terras raras na China e exportar. O movimento chinês foi tomado para garantir o controle sobre a indústria global de terras raras, aumentar os preços, e obrigar empresas estrangeiras a investir em produção de bens de maior valor agregado, trazendo pessoal capacitado, gerando empregos de alto nível e



fomentando a indústria local na busca por melhores tecnologias. Este foi um sinal claro para EUA, Japão e Coreia de que o país que deseja assegurar a oferta de um determinado elemento do grupo das terras raras deve garantir a oferta em outro país.

Adicionalmente, os controles ambientais, que outrora eram ignorados pelas autoridades chinesas (também pelos produtores) se tornaram extremamente restritivos. Com a intenção de consolidar o mercado e limitar a produção excessiva e fragmentada (como fomentado nas décadas de 80 e 90), os novos controles classificam como ilegais dezenas de pequenos produtores, que correspondem a aproximadamente 20% da oferta mundial de terras raras. Este foi mais um sinal da intenção da China de consolidar a produção mundial em favor de poucas empresas nacionais.

As tarifas e restrições, juntamente com a aplicação de maior controle ambiental por parte das autoridades chinesas incitaram o aparecimento de um mercado negro de produção de terras raras que se mostrou fundamental para a indústria localizada fora da China. As atividades ilegais (tanto de lavra quanto de beneficiamento) não possuem controle nenhum por parte do governo e são grandes fontes de poluição. Estima-se que a indústria ilegal chegou a corresponder a mais da metade das exportações chinesas para países como EUA, Japão e Coreia do Sul. A partir de 2010, a China lançou um plano consolidado para a indústria de terras raras, que não só regulamentava a produção e exportação, mas também controlava a atividade ilegal, que começou a ser combatida de forma mais eficiente pelo governo. Em outubro de 2011, limites de emissões ao meio ambiente foram revisados, colocando mais produtores e empresas de beneficiamento na ilegalidade (Lynas, 2011).

É importante ressaltar que apesar de o termo ilegais ser atualmente aplicável aos produtores chineses que não se encaixam nas novas regulamentações do país, tais empresas atuam há mais de 20 anos na produção e beneficiamento de terras raras. Desde os tempos de Deng Xiaoping, tais empresas foram incentivadas pelo governo e foram responsáveis pelo aumento de produção no país. São classificadas como ilegais ou como parte do mercado negro porque os controles ambientais e a regulamentação na

produção foram alterados drasticamente nos últimos anos, jogando dezenas de empresas pequenas, que outrora eram incentivadas pelo governo, na ilegalidade.



**Figura 17:** Detalhe da extração de terras raras no distrito de Nancheng, na província de Jiangxi (Gordon, 2011).



**Figura 18:** Beneficiamento e produção de lantânio em empresa localizada nas proximidades de Bayan Obo (Bradsher, 2010).



**Figura 19:** Detalhe de trabalhador com calças corroídas por ácido em empresa de beneficiamento nas proximidades de Bayan Obo (Jones, 2010).

O impacto real das restrições chinesas é mais dramático que as quotas de exportação sozinhas. O combate à produção ilegal e ao mercado negro faz com que as autoridades chinesas eliminem adicionais 10 a 20 mil toneladas de REO para exportação. Enquanto isso, a demanda mundial por terras raras fora da China é estimada em 50 a 60 mil toneladas por ano. Para o ano de 2011, a quota de exportação de pouco mais de 30 mil toneladas juntamente com a diminuição da oferta no mercado negro, deixam o restante do mundo com um déficit de 20 mil toneladas de terras raras.

Além da elevação das tarifas, redução das quotas de exportação e combate à produção ilegal, a China também fomentou a aquisição de ativos ao redor do mundo. Companhias chinesas estiveram envolvidas em 17 aquisições de minas norte americanas e canadenses, sendo pequenas empresas canadenses o alvo predileto para aquisição de controle. Também foram reportadas aquisições de projetos no Camboja, Laos, Austrália, África do Sul e Mongólia. As companhias chinesas tornam o processo mais efetivo (e difícil de se rastrear) quando fomentam fusões e aquisições por meio de suas empresas

controladas fora da China, usando as aquisições iniciais para adquirir novas participações em projetos e empresas. Um exemplo desse fato é o Grupo chinês Jinchuan, que por meio de seu controle da empresa africana Albidon Ltd., adquiriu de forma agressiva projetos na Austrália e na África. Ou então, o Grupo Sichuan Hanlong, que irá investir mais de US\$4,6 bilhões por meio de sua controlada australiana Moly Mines (WILTW, 07/10/10).

A China já havia tentado, sem sucesso, adquirir as maiores empresas do setor fora da China (Lynas Corporation, proprietária do depósito de Mt. Weld na Austrália em 2009 e Molycorp, proprietária do depósito de Mountain Pass nos EUA em 2005). Na época, houve grande repercussão de ambas as tentativas e a reação dos governos australiano e americano, bem como reações dos acionistas de ambas as empresas impossibilitaram as aquisições.

Desde então, a China mudou sua estratégia, e passou a buscar projetos em que ainda não existe produção efetiva. Isso faz com que a China tenha acesso mais barato aos recursos fora de seu país e também minimiza chances dos governos locais de se mostrarem contrários à negociação, pois praticamente não há empregados e nem operação nas empresas adquiridas. De acordo com estimativas da PriceWaterhouseCoopers, a China foi responsável por 40% das fusões e aquisições no setor mineiro australiano e 25% no canadense (WILTW, 26/08/10).

Não só fora da China, mas também no altamente fragmentado mercado de terras raras chinês, as grandes empresas estatais iniciaram um movimento de consolidação de mercado por meio de aquisições, o que aumenta ainda mais o poder de manipulação do mercado por parte do governo.

A obstinação chinesa chegou em seu máximo quando em setembro de 2010, a China suspendeu por semanas a exportação de terras raras para o Japão após um incidente diplomático, em que um navio pesqueiro chinês foi detido pela guarda costeira japonesa. O confronto ocorreu perto do arquipélago disputado pelas duas nações (arquipélago de Senkaku no Japão e Diaoyu na China). Apesar de o governo chinês negar a suspensão propriamente dita das exportações, a alfândega chinesa deteve os contêineres de terras raras com destino ao Japão por semanas (WILTW, 30/09/10).

A situação fez com que o Japão, principal exportador de produtos tecnológicos com uso de terras raras, fosse atingido e se conscientizasse de que a situação do país é de extrema dependência do fornecimento de matéria prima. E que um eventual corte no fornecimento é capaz de gerar resultados desastrosos para o país. Estima-se que os estoques japoneses, coreanos e da Dacha Capital (empresa de investimentos que investiu em estoques de REO) combinados conseguem suprir a produção japonesa e coreana por cerca de dois a três meses. Sem estoques significativos fora da China, a demanda será racionada pelo aumento dos preços.

Como consequência, o Japão enviou missões diplomáticas a todos os países com reservas de terras raras, com visitas oficiais a Austrália, Vietnã, Cazaquistão, África do Sul, Mongólia e outros. Além disso, provisões legais foram aumentadas para garantir a expansão e aquisição de ativos por parte da estatal japonesa de Petróleo, Gás e Metais (Jogmec). No final de 2010, a Jogmec já havia sinalizado acordos comerciais com a Namíbia, país com grandes reservas de bastnasita e firmado acordos de exploração em Malawi, Botswana, África do Sul, Zâmbia, Moçambique e Angola. As terras raras haviam, portanto, evoluído de uma fonte obscura e pouco conhecida de risco soberano para uma ferramenta de influência internacional.

Os EUA e a Coreia do Sul responderam ao incidente envolvendo o navio chinês de forma similar. Enquanto a Coreia do Sul lançou um programa de expansão dos estoques de terras raras, inclusive com o uso do fundo soberano nacional, os EUA aprovaram medidas que garantiam a criação de um estoque mínimo nacional de óxidos de terras raras (WILTW, 07/10/10). Os EUA não somente estão em risco de perder a liderança no setor tecnológico de terras raras que detiveram por tanto tempo, como também se encontram dependentes de importações chinesas, justamente em um momento que as terras raras possuem aplicações fundamentais no setor de defesa. Enquanto isso, a China expande sua política de consolidação, para além das terras raras, com restrições também aplicadas ao tungstênio, antimônio, manganês e ligas de ferro-silício.

Ambos Japão e Coréia do Sul estão em situação muito delicada não só em relação às terras raras, mas em relação às commodities metálicas em geral. A Coréia importa 87% de suas necessidades minerais. Dentro de todas as indústrias no país, o setor de mineração corresponde à menor parcela, com menos de 1% do PIB do país. Apesar de produzir a maior parte do molibdênio usado em seu aço, a Coréia importa mais de 99% de minério de ferro, cobre, zinco, chumbo, níquel, prata e ouro. Excluindo-se a reciclagem, a Coréia importa 100% dos outros metais industriais, incluindo terras raras. Além disso, a Coréia também é importadora das fontes energéticas de produção, sendo uma das maiores importadoras mundiais de petróleo, carvão e gás natural.

O Japão, não muito diferente, possui uma indústria mineira que corresponde a menos de 5% do PIB do país, fazendo com que também seja um importador da quase totalidade dos recursos minerais e energéticos.

Apesar de serem países muito pobres em commodities, ambos conseguiram estabelecer uma forte e desenvolvida economia, apoiada fortemente na exportação de produtos de alto valor agregado. Para ambos os países, a oferta de matérias primas não só constitui um papel crucial na segurança militar e soberania nacional, mas principalmente na constituição de suas economias.

Adicionalmente, para manterem-se competitivos e exportadores de produtos de alto valor agregado, ambos os países devem manter seu progresso tecnológico acelerado, de forma que sempre exista uma grande diferença tecnológica entre seus produtos e os da concorrência. Com a consolidação chinesa trazendo indústrias, centros de pesquisa, e abundância de recursos naturais, ficará cada vez mais difícil manter a tecnologia avançada para Coréia do Sul e Japão. Enquanto a batalha atual consiste na disponibilidade de matéria prima, a batalha futura será no campo de pesquisa tecnológico.

Em um esforço urgente para reduzir a dependência de matérias primas com oferta variável, o Japão anunciou planos ambiciosos de aquisições e de desenvolvimento de tecnologias. Enquanto centenas de cientistas japoneses tentam encontrar alternativas para substituir terras raras, milhares de cientistas

chineses trabalham para desenvolver maiores aplicações aos mesmos elementos.

Com cortes na produção, na exportação e com um efetivo combate à lavra e beneficiamento ilegais, espera-se que o nível de consumo de terras raras por parte da China exceda os níveis de produção a partir de 2012 (WILTW, 30/09/10). O mundo necessita de mais terras raras e nações ao redor do mundo buscam fontes alternativas que possam garantir suprimento destes elementos. Até a China deseja fomentar a produção de terras raras em outras nações do mundo (de preferência em empresas com controle chinês), para evitar um futuro fracasso, no caso hipotético do país conseguir atrair todo o setor mundial para seu território e ficar sem recursos.

Não será uma surpresa se companhias chinesas importarem óxidos de terras raras de novos produtores fora da China para garantir as reservas domésticas e incentivar o controle de disponibilidade mundial (WILTW, 30/09/10). De acordo com a Sociedade Chinesa das Terras Raras (CSRE), a China irá reduzir sua produção anual de 130 mil toneladas de REO para apenas 87 mil toneladas em 2013 e não mais do que 100 mil toneladas a partir de 2015 (WILTW, 03/02/11). A própria CSRE também estima que a parcela de produção chinesa no mercado mundial cairá de 97% para 36% após 2015. Já para este ano, a produção chinesa será controlada para um máximo de 93,8 mil toneladas. Estima-se que a redução efetiva na produção total da China diminua 15% devido ao combate à produção ilegal e negociação no mercado negro. Se o padrão de restrições das exportações se mantiver, uma parcela ainda menor da decrescente produção chinesa será destinada para o mercado externo. Ainda mais com a interrupção nas autorizações de novos projetos e prospecções de terras raras na China por um ano (até meados de 2012). Já existe na China um comércio de cotas de produção e exportação disponíveis entre os produtores locais. O preço de cotas de produção atingiu 70 mil dólares por tonelada em maio deste ano.

Outra medida que pode ser usada pela China seria a diferenciação entre elementos para a definição de cotas de exportação. Hoje, como as cotas são para REO, independentemente do mix de elementos no óxido, cada produtor

pode alterar seu mix de elementos, com o objetivo de atingir as cotas de exportação com elementos mais pesados (que são os mais caros). Desta forma, cada produtor consegue maximizar seu retorno, apesar de estocar ou destinar ao mercado interno grandes quantidades dos elementos mais baratos. Existe a possibilidade do governo chinês especificar níveis de exportação para cada elemento, com o objetivo de controlar a lavra excessiva de elementos mais raros e pesados. A China é o país em que elementos mais pesados são encontrados em maiores quantidades e será fundamental ao governo manter tais reservas. Espera-se, portanto, que a política de cotas diferenciadas seja implementada a partir de 2012 com o objetivo claro de coibir a excessiva lavra de elementos mais pesados. Isso faria com que o preço de terras raras mais leves diminuísse enquanto que elementos mais pesados teriam um aumento acentuado de preços (WILTW, 30/09/10). Isso também faria com que alguns depósitos bastnasíticos (principalmente o depósito de Mountain Pass na Califórnia) controlados por empresas fora da China perdessem competitividade por possuírem grandes concentrações de elementos mais leves e pouquíssimas concentrações dos mais pesados. É importante ressaltar que terras raras leves correspondem à 98,5% do teor de minério da campeã chinesa REHT. Logo, uma diferenciação de cotas de exportação e a conseqüente diminuição nos preços de terras raras mais leves também afetaria a rentabilidade da campeã estatal chinesa das terras raras.

Com preços que multiplicaram por 20 nos últimos 2 anos, especula-se o quanto mais os preços podem subir. Por um lado a demanda continua restringida, novas aplicações irão aparecer e as terras raras ainda representam uma diminuta porção do custo final dos produtos em que são utilizados. Por outro lado, comparações de preço e estimativas são difíceis de se fazer.

Historicamente, os preços estavam muito suprimidos pela superprodução chinesa, energia subsidiada e pela falta de controles ambientais e de segurança. Em alguns casos as terras raras já começam a ser substituídas (lubrificantes de alta temperatura e na indústria do vidro e cerâmica), o que reduziria a sua demanda mundial. Em outros casos, a excepcional performance conferida pelas terras raras simplesmente não dá



alternativas à substituição, mas sim a encontrar fontes de recursos em outros lugares.

Em outubro de 2011, em consequência dos preços decrescentes, as principais produtoras chinesas simplesmente suspenderam a produção de terras raras. A Baotou Rare Earth foi a primeira, a paralisar suas operações de lavra e beneficiamento em 19 de outubro. O movimento foi seguido pela China MinMetals e pela Gangzhou Rare Earth Industry, que suspendeu a produção e entrou em manutenção pelo tempo estimado de 3 a 5 meses. Apesar de a justificativa ter sido a preservação de reservas, o mais provável é que o movimento tenha sido motivado pela queda nos preços de terras raras a partir do aparecimento de novas descobertas e investimentos em produção fora da China (Molycorp, 2011).

É esperada uma estabilização nos preços para os próximos anos, com o aparecimento de produção fora da China. Os projetos em construção devem começar a impactar o mercado a partir de 2012, fazendo com que a pressão sobre os preços diminua. Porém, é importante lembrar que diferentemente de outras commodities como o minério de ferro ou o alumínio, o preço das terras raras não está associado aos custos de produção. No caso das terras raras, fatores macroeconômicos e manipulação de preços são muito mais responsáveis pela formação dos preços de mercado do que o custo de produção em si. Mesmo que os preços despenquem 90%, produtores de menor custo ainda irão operar com lucro (WILTW, 14/07/11).

Apesar disso, o governo chinês continua a investir de forma maciça nas terras raras. Além das já criadas zonas de desenvolvimento tecnológico, a China anunciou em julho a criação de uma associação de produção de terras raras e de um grupo industrial com laços em universidades e centros de pesquisa para desenvolver novas funcionalidades e tecnologias.

Hoje a formação dos preços é ditada pelas duas maiores companhias chinesas: A Inner Mongolia Baotou Rare Earth Hi-Tech (REHT) e a Gangzhou Rare Earth Mineral Industry. Apesar dos preços praticados pelas duas campeãs estatais não ser obrigatoriamente o preço do mercado, os menores produtores preferem seguir os preços a praticar sua própria política de

precificação. O governo chinês está em processo de estabelecer uma bolsa de negociação de terras raras em Xangai, onde a REHT iria realizar vendas de terras raras no mercado spot (mercado à vista).

As medidas chinesas de proteção de sua indústria e manipulação de mercado fizeram com que houvesse uma grande disparidade de preços dentro e fora da China. A disparidade reflete não somente a estratégia chinesa de consolidação, mas também a disponibilidade de terras raras específicas dentro e fora da China (Lynas, 2011).

**Comparativo de preços (US\$/kg)**

REO	Q2 2011		Q3 2011		Nov-11	
	Preço doméstico China	Preço Exportação (FOB)	Preço doméstico China	Preço Exportação (FOB)	Preço doméstico China	Preço Exportação (FOB)
Óxido de Lantânio	25.93	135.02	20.63	117.68	18.43	65.00
Óxido de Cério	30.86	138.29	23.44	118.65	20.79	55.00
Óxido de Neodímio	242.28	256.15	171.88	338.85	122.83	240.00
Óxido de Praseodímio	163.58	220.08	134.38	244.73	110.24	210.00
Óxido de Samário	20.06	125.60	17.19	129.45	14.96	90.00
Óxido de Disprósio	1929.01	921.20	1531.25	2262.31	1055.12	2020.00
Óxido de Európio	4475.31	1830.00	2812.50	4900.00	2440.94	3800.00
Óxido de Térbio	3549.38	1659.20	2265.63	3761.54	1732.28	2820.00

**Tabela 3:** Comparativo de preços de terras raras dentro e fora da China (Lynas, 2011).

A chave para determinar se a estratégia chinesa irá funcionar ou não é a quantidade de terras raras que pode ser produzida fora da China, para inclusive suprir a demanda de uma China importadora de terras raras. Se a produção fora da china conseguir suprir os principais consumidores, pode até colocar em risco o sonho chinês de consolidar a indústria de terras raras dentro de seu território, assegurando que empresas norte americanas, coreanas e japonesas não necessitem instalar-se na China para manter a competitividade.

Com anúncios de novas descobertas por todo o mundo (inclusive no Brasil), é necessário saber o quanto as novas descobertas poderiam adicionar à oferta mundial e quando poderiam ser produzidas. Em julho de 2011, um consórcio japonês publicou na revista Nature Geoscience a descoberta de reservas submarinas de terras raras no Oceano Pacífico a mais de 3500 metros de profundidade. O artigo, apesar de exagerado (com os resultados

positivos super enfatizados e os desafios de extração minimizados) é um dos muitos anúncios de descobertas de depósitos ao redor do planeta. O Grupo indiano Varun também anunciou a descoberta de areias pesadas em Madagascar, apontando um depósito de 9,2 milhões de toneladas de monazita contida (sem maiores detalhes dos teores de REO, distribuição dos elementos e nem níveis de elementos radioativos). Apesar de um recurso formidável para o Grupo Varun em si, tal depósito dificilmente irá mudar a dinâmica da indústria.

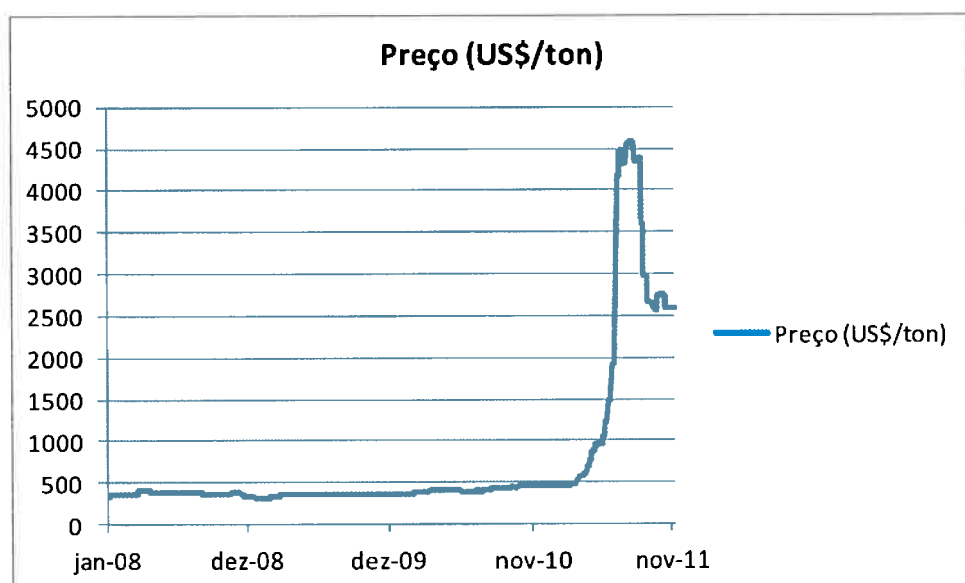
Enquanto as descobertas submarinas e em Madagascar dificilmente irão produzir grandes quantidades de terras raras (se algum dia irão produzir alguma quantidade), o andamento dos projetos é chave para determinar a quantidade de terras raras que pode ser produzida fora da China. Devemos destacar os projetos da Lynas Corp e da Molycorp, que são os únicos fora da China com fundos já garantidos até a fase operacional.

O impacto da política chinesa, juntamente com o progresso dos projetos em desenvolvimento fora da China, sugerem que os déficits na demanda mundial continuarão até 2015.

Em adição a isso, empresas e governos se movem de acordo com a nova situação. A Hitachi (produtora líder de magnetos de terras raras) relutantemente decidiu iniciar produção em território chinês. Os planos da Hitachi envolvem uma joint venture no sul da China (onde virtualmente ocorre toda a produção de terras raras pesadas no mundo), através de investimentos de US\$57 milhões. A Hitachi coloca, portanto, sua valiosa propriedade intelectual em risco, para assegurar a oferta de disprósio e neodímio.

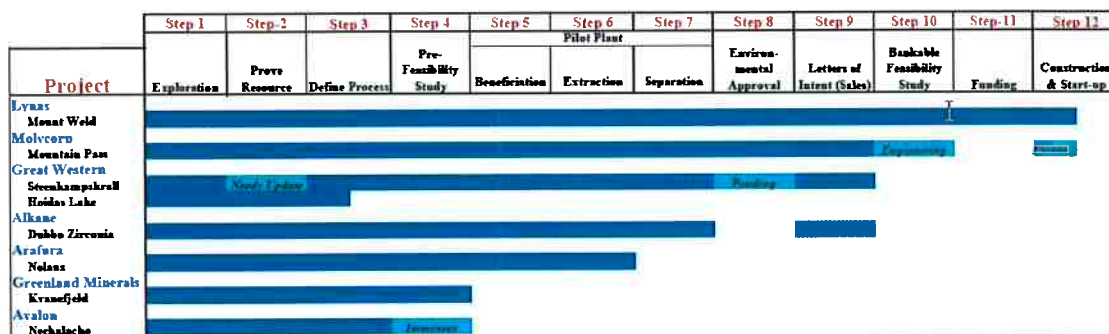
A Philips também anunciou em julho de 2011 o aumento no custo de terras raras como fonte de perda de margens e rentabilidade. Um dos fatores que justificaram perdas da ordem de US\$1,9 bilhão foi o aumento nos preços das terras raras, que contribuíram para o colapso das margens das operações da Philips na fabricação de lâmpadas (de 11,3% para 5,7%). A Philips, General Electric e Osram começaram a repassar o aumento nos custos de produção para lâmpadas fosforescentes a partir de junho de 2011, apesar de terem absorvido aumentos da ordem de 10 vezes nos preços de fósforos de terras

raras (WILTW, 21/07/11). Os preços das terras raras poderiam inclusive fomentar a transição de bulbos fluorescentes para o uso de LEDs (ligh emitting diodes), que são mais eficientes na iluminação e possuem menores quantidades de terras raras em sua composição.



**Figura 20:** Escalada de preços do óxido de európio, usado em lâmpadas fluorescentes (Bloomberg, 10/11/2011).

A questão chave para o sucesso da estratégia chinesa é se a produção fora da China será suficiente para manter o mercado de terras raras fora da China. Caso a produção fora do território chinês seja pequena demais, as companhias serão forçadas a migrar para a China, para manter competitividade e fornecimento de matérias primas. Caso a produção fora da China seja capaz de suprir a demanda, tais companhias optarão pelo fornecimento de companhias mais confiáveis e com menos interferência do governo, e conseqüentemente, não irão se mudar para a China, levando empregos, pessoal capacitado e garantindo demanda interna de terras raras no país. Uma visão geral das indústrias com atuação fora da China é, portanto, questão chave para a compreensão da dinâmica mundial de terras raras atual e futura.



**Figura 21:** Comparativo entre o progresso dos principais projetos de produção de terras raras fora da China (WILTW, 06/10/2010).

## 11 Empresas do segmento com atuação fora da China

### 11.1 Lynas Corporation

A Lynas é uma companhia de capital aberto com sede na Austrália (LYC AU; [www.lynascorp.com](http://www.lynascorp.com)), que possui depósitos consideráveis de terras raras na porção oeste da Austrália. Devemos destacar, o grande depósito de Mt. Weld como o grande ativo da Lynas. O Mt. Weld possui o segundo mais elevado teor de terras raras no mundo, com 8,1% de REO, versus 6,6% em Mountain Pass e cerca de 5,5% em Bayan Obo.

A Companhia é bem gerida e possui capital e autorizações governamentais para desenvolver seu projeto de exploração em Mt. Weld (em andamento). Nos últimos anos, a Lynas conseguiu aumentar sua receita por meio de contratos diretos com os maiores consumidores de terras raras, reduzindo os contratos com tradings e aumentando margens. Desse modo, a Lynas também assegurou o fornecimento para grandes consumidores, como a francesa Rhodia, que detém propriedade intelectual de diversos produtos com o uso de terras raras (receitas de tais produtos da ordem de US\$7 bilhões ao ano) e a Siemens, fabricante alemã de magnetos de grande porte. Apesar disso, seu maior contrato ainda é com a trading japonesa Sojitz, a maior fornecedora de terras raras para o Japão. Apenas a Sojitz responderá por 40% da produção total em Mt. Weld.

A Lynas também possui 8% da Northern Minerals, empresa de pequeno porte da Austrália com depósitos de terras raras mais pesadas. E recentemente, adquiriu o depósito de Kangankunde no Malawi, que fornece uma reserva adicional de minério de terras raras. O minério de Kangankunde é adicionado ao minério de Mt. Weld durante o processamento, aumentando a eficiência da operação. Dessa forma, a Lynas caminha a passos largos para se tornar uma das maiores companhias produtoras de terras raras do mundo, oferecendo tanto terras raras leves (oriundas de Mt. Weld e Kangankunde), quanto terras raras mais pesadas, provenientes de sua subsidiária Northern Minerals. A companhia espera em 2012 produzir pelo menos 11 mil toneladas anuais de terras raras já beneficiadas (Lynas, 2011).

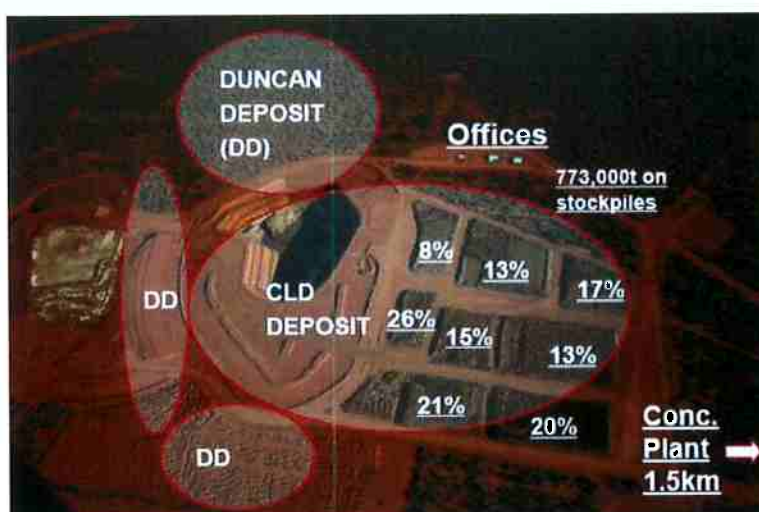
Inicialmente, os planos de expansão da Lynas incluíam a produção de REO em território chinês. Porém, dada a elevada influência das autoridades chinesas e o maior controle da produção por parte do governo, a Lynas alterou seus planos para a construção de uma unidade de beneficiamento na Malásia. Com incentivos por parte do governo malaio (a usina irá corresponder a 1% do PIB da Malásia), a Lynas espera que sua planta de beneficiamento inicie operação em 2012, com capacidade de processar 11 mil toneladas de óxidos de terras raras ao ano (com capacidade de expansão para 20 mil toneladas beneficiadas).

A companhia também considera a exploração de recursos polimetálicos em Mt. Weld, onde também existem teores apreciáveis de nióbio, zircônio, tântalo e titânio. O Mt. Weld é potencialmente o terceiro maior recurso de nióbio do mundo.

Em 2009, a Lynas recebeu uma proposta de compra por um grupo chinês, que não só desejava garantir os depósitos de terras raras, mas também estava interessada no nióbio australiano (a China consome cerca de 20% do nióbio mundial). A oferta foi uma tentativa de tomada de controle da Lynas, na qual o grupo chinês China Non-Ferrous Metals Mining Group estava preparado para desembolsar mais de US\$180 milhões na transação. Autoridades australianas (FIRB – Foreign Investment Review Board) impediram a tomada de controle e chegaram inclusive a propor um teto de 49,9% de participação do

grupo chinês na empresa australiana. De forma surpreendente, o grupo chinês não aceitou os 49,9% e retirou sua proposta da pauta de negociação. A pequena diferença econômica entre as propostas e o fato do grupo chinês ter retirado sua oferta denotam que a China está realmente interessada em possuir controle sobre ativos de terras raras e que não apenas estão interessados em investimentos e participações no setor. Enquanto a Lynas teve que adiar seus planos para o desenvolvimento em Mt. Weld após a retirada da proposta do grupo chinês, as autoridades chinesas prosseguiram com o aumento de tarifas de produção e redução de quotas de exportação para diminuir a oferta global de terras raras.

Atualmente o projeto de Mt. Weld é o mais avançado fora da China. A Lynas já extraiu e estocou mais de 700 mil toneladas de minério, o suficiente para manter as operações de separação e refino por dois anos, enquanto a empresa finaliza suas plantas de beneficiamento na Austrália e na Malásia (ambas prontas em 2012).



**Figura 22:** Detalhe da operação em Mt. Weld com as concentrações de REO no minério da porção mais rica, CLD (Lynas, 2011).

O projeto da Lynas prevê a lavra de minério e concentração de monazita na Austrália e beneficiamento e extração dos óxidos na Malásia. Estimativas da Lynas apontam a produção de até 11 mil toneladas anuais de REO a partir de 2012.





**Figura 23:** Vista aérea da planta de concentração junta ao depósito de Mt. Weld (Lynas, 2011).

As operações de lavra e produção de concentrado no oeste da Austrália já estão em atividade. A empresa já possui um estoque com mais de 1000 toneladas de REO contido. Além disso, já é capaz de produzir concentrados com 37% de REO, com uma taxa de recuperação de 58% (Lynas, 2011). Tais concentrados seriam produzidos na Austrália e transportados por mais de 1000km até a cidade portuária de Freemantle, em que seguiriam em navio até a Malásia para beneficiamento.



**Figura 24:** Detalhe do processo de flotação (acima) e filtração em prensa (abaixo) para produção do concentrado de minério (Lynas, 2011).



Na Malásia, a Lynas está com 85% da fase 1 da sua usina de beneficiamento concluída. A empresa espera entrar em operação já no primeiro trimestre de 2012, fechando o primeiro semestre de 2012 em plena capacidade. A fase 1 do projeto prevê a produção de 11 mil toneladas, e a usina foi planejada para uma rápida expansão (fase 2) que deixaria a usina com a capacidade total de 22 mil toneladas. Enquanto a fase 1 está quase concluída, a fase 2 está em estagio de propostas de engenharia e construção. A Lynas espera decidir entre a empresa responsável pela construção até o final de 2011.

Um grande empecilho para o projeto da Lynas foi a repercussão negativa de sua usina de beneficiamento entre a população da Malásia. Partidários da oposição fizeram uma campanha contra a instalação da Lynas com a afirmação de que o rejeito radioativo da usina seria um risco para a população malaia. Apesar de o governo atual se mostrar a favor da usina de beneficiamento, fornecendo apoio e incentivos, as eleições de 2012 podem reverter o quadro caso a oposição se saia vencedora.

Enquanto isso, a Lynas seguiu a recomendação da Agência Internacional de Energia Atômica e apresentou um completo plano de beneficiamento e disposição de rejeitos para a Agência Atômica Malaia. A empresa aguarda a autorização da entidade malaia, enquanto finaliza a construção de sua usina de beneficiamento. Espera-se que a usina seja aprovada e possa entrar em operação no início de 2012, porém existe o risco de ser vetada e o projeto inteiro da Lynas perder sentido. O parecer final deve ser anunciado até o final de 2011 e a ação da Lynas será fortemente impactada pelo resultado.

Outro risco para a Lynas seriam os propostos impostos sobre produção na Austrália. Apesar de ser pouco impactada por ter grande parte da produção projetada para ocorrer na Malásia (onde possui 12 anos de isenção fiscal), a Lynas sofreria com o super imposto para a mineração proposto pelo governo australiano. O maior impacto seria no desenvolvimento da coroa polimetálica de Mt. Weld, projetado para ocorrer totalmente em território australiano. Por

sua vez as terras raras apresentam margens superiores dentro dos negócios da Lynas, pelo fato de sua cadeia de produção terminar na Malásia, onde a isenção garantirá margens brutas próximas a 60%. Os preços do minério da Lynas foi estimado com base nos teores dos óxidos obtidos e alcançaria US\$57,25/kg se fosse produzido dentro da China e US\$122,45/kg no mercado internacional (ex-China) (Lynas, 2011).

A Lynas já investiu quase US\$600 milhões (o dólar australiano busca seguir o dólar americano, o que faz com que ambos possuam cotação muito similar) na construção da fase 1 e planeja investir mais US\$248 milhões na fase 2 para dobrar a sua produção. A empresa possui caixa disponível para financiar a operação e, além disso, conseguiu financiamentos adicionais para diluir o risco do investimento (Lynas, 2011).

ESTIMATED CONSTRUCTION & OTHER CAPITAL COSTS	FORECAST TOTAL COST A\$M	SPEND TO 30 SEPT '11 A\$M	FUTURE SPEND A\$M
Mount Weld Concentration Plant	76.32	75.31	1.01
Advanced Materials Plant, Malaysia	300.06	189.91	110.15
Engineering & Project Management Cost	146.44	132.97	13.47
Other Capex including Land at Gebeng	70.85	56.98	13.87
Contingency	5.00	0.00	5.00
<b>TOTAL</b>	<b>\$598.67</b>	<b>\$455.17</b>	<b>\$143.50</b>

Note: Expected future spend will be met by existing cash and the undrawn \$125m working capital facility.

**Figura 25:** Investimentos da Lynas na fase 1 de seu projeto (Lynas, 2011)

É importante ressaltar que a maior parte dos custos está associado ao beneficiamento de terras raras. Logo, a não autorização da operação na Malásia teria consequências muito negativas aos planos da Lynas, com a perda da maior parte de seu investimento. Enquanto o parecer final não é divulgado, a Lynas busca melhorar a sua imagem junto ao povo malaio, e divulga constantemente sua imagem com programas sociais, de apoio à população carente e inclusive com um programa semanal de televisão.

## 11.2 Molycorp Minerals Inc.

A Molycorp é uma companhia norte americana que abriu capital em 2010 (MCP US; [www.molycorp.com](http://www.molycorp.com)), mas foi por muito tempo a maior produtora mundial de terras raras. Com mais de 58 anos de existência, a Molycorp é a proprietária do depósito de Mountain Pass, que foi a maior mina produtora de terras raras no mundo até os anos 80. Em 2002, após inúmeras autuações e acusações por parte do governo da Califórnia da exploração de Mountain Pass contaminar lençóis freáticos da região, as operações da Molycorp foram fechadas. Na época, uma comemorada vitória do governo sobre o capital privado, o fechamento das operações da Molycorp teve consequências mais profundas para a economia americana, que só foram observadas quase dez anos depois.

Apesar de já ter sido bastante explorado no passado, o depósito ainda contém mais de 1 milhão de toneladas de REO, com um teor de pouco mais de 6,6%. Além disso, o depósito de rejeitos e minério estocado permitem à Molycorp produzir cerca de 3 mil toneladas por ano de cério, lantânio, didímio e concentrados de terras raras pesadas.



**Figura 26:** Visão geral do depósito de Mountain Pass e dos planos de construção da Molycorp (Molycorp, 2011).

A Molycorp espera retomar a operação de lavra em Mountain Pass no final deste ano, e junto com sua planta de beneficiamento, espera produzir pouco mais de 19 mil toneladas ao ano de terras raras já separadas e beneficiadas a partir de 2011.

Ao contrário da Lynas que possui uma estratégia comercial de se aproximar de seus consumidores finais e estabelecer parcerias, contratos de longo prazo e joint ventures, a Molycorp trabalha no sentido de verticalizar sua produção, adicionando outras etapas na cadeia de produção e vendendo produtos de maior valor agregado como ímãs de terras raras ao invés de simplesmente fornecer minério ou concentrados ao mercado. Além do plano "da mina ao ímã", a Molycorp também procura reduzir custos com terceiros, e produz e reutiliza o seu próprio ácido clorídrico e também possui planos de construir uma planta de co-geração movida a gás, para economizar energia durante o processamento.

Para conseguir alcançar seus objetivos, a Molycorp busca expertise no mercado. Após decidir investir na produção de ímãs, dado o mix de elementos de suas reservas minerais, a empresa montou joint ventures inicialmente com a japonesa Sumitomo e posteriormente com a Arnold Magnetics e Neo Material Technologies, empresa líder no setor de ímãs de terras raras e ligas relacionadas. A companhia também busca adquirir patentes, principalmente relacionadas ao cério, elemento mais comum em seu depósito. No final de 2010, a Molycorp adquiriu a patente de um sistema de purificação de água com o uso de cério metálico.

A Molycorp também busca aquisições de empresas do setor. Em março de 2011, a companhia adquiriu duas empresas: a AS Silmet, da Estônia, que beneficia e produz mais de 3 mil toneladas de produtos contendo terras raras e a Santoku America, produtora de ligas para a produção de ímãs e também proprietária de um pequeno depósito no Arizona (em exploração desde 1966).

Como a companhia possui o maior depósito de terras raras nos EUA e os mais avançados planos de produção no país, a Molycorp deverá ser a principal beneficiada a receber o apoio do governo em sua nova política de

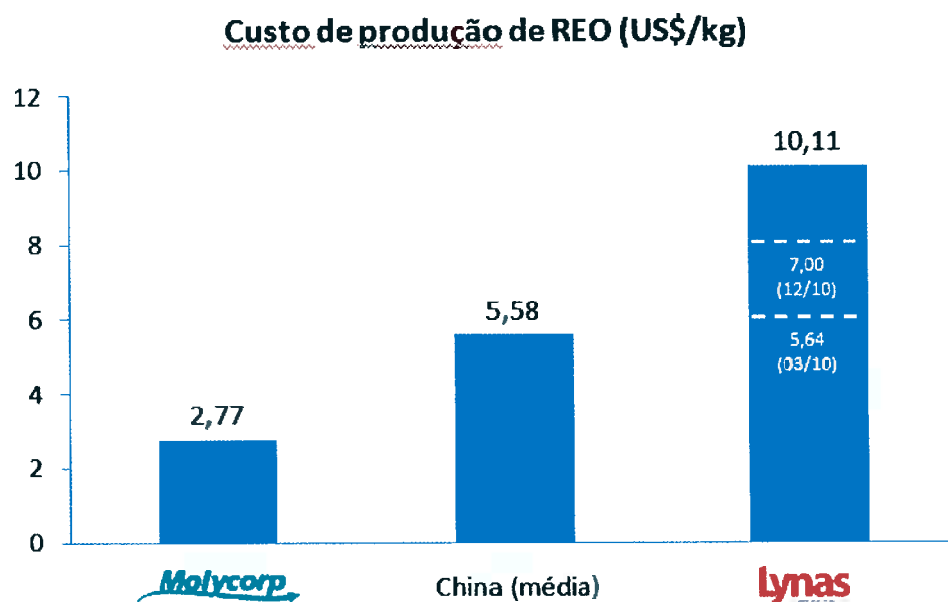
terras raras (projeto RESTART). Caso o projeto seja completamente aprovado, a Molycorp se beneficiará com linhas de crédito a juro reduzido e garantia de apoio à pesquisa e ao desenvolvimento de projetos de lavra e produção de magnetos, além do já iniciado processo de estocagem de terras raras pelo governo americano.

Outra possível alternativa para a Molycorp seria a participação em programas de defesa do exército norte americano. A Molycorp, por estar próxima ao governo pode se beneficiar de projetos de defesa avançada, que incluem o uso de terras raras em dispositivos de comunicação, rastreamento e posicionamento.

Apesar da vantagem inicial favorecer a Lynas, que possui maiores depósitos, com maiores teores de terras raras e um mix de elementos mais valioso, a Molycorp espera mudar esta perspectiva através da verticalização de sua produção ("da mina ao magneto"). Caso os planos de produção de magnetos e sistemas de filtragem tenham sucesso, a Molycorp poderá se beneficiar enormemente.

Em março de 2011, a Molycorp anunciou novas parcerias com a Sumitomo, e com a Hitachi Metals. O objetivo destas parcerias seria o de fomentar a expansão da produção em Mountain Pass. Caso aprovadas e implementadas, ambas seriam capazes de duplicar a produção de terras raras da Molycorp em 2013, alcançando mais de 40 mil toneladas de REO produzidos e ultrapassando a produção da Lynas. Isso posicionaria a Molycorp como a maior produtora fora da China.

Nos relatórios de gestão dos segundo e terceiro trimestres de 2011, outro ponto a favor da Molycorp é a forte redução do custo de produção. As iniciativas de redução de custos começam a aparecer para a companhia como um todo, que atingiu o custo de produção de US\$2,77/kg de REO (equivalente a uma margem bruta de 97%). Já a Lynas reportou aumento dos custos de produção, que partiram de US\$5,64/kg de REO para mais de US\$10,00/kg.



**Figura 27:** Comparativo entre custos de produção de REO (Molycorp, 2011).

Mesmo que o aumento da produção por parte da Molycorp e Lynas reduza a pressão sobre os preços das terras raras no mundo, a Molycorp ainda pode se beneficiar de um baixo custo de produção e das receitas adicionais com produtos de maior valor agregado.

Elemento (kg/ton)	Lynas (Mt. Weld)	Molycorp (Mountain Pass)
Neodímio	17,95	9,64
Praseodímio	5,16	3,46
Európio	0,43	0,11
Disprósio	0,12	0,04
Térbio	0,05	0,02

**Tabela 4:** Comparativo entre o minério de Mt. Weld e Mountain Pass.

### 11.3 Arafura Resources

A Arafura é uma empresa australiana de capital aberto (ARU AU; <http://www.arafuraresources.com.au/>) que possui grandes reservas de terras raras e possui projetos em estágio avançado. Inicialmente uma empresa com foco na mineração de ouro, a Arafura também iniciou a produção de terras raras a partir do início de 2011. A companhia também pretende iniciar a produção de urânio e planeja adquirir projetos de fosfatos, níquel, minério de ferro e vanádio. Com projetos de produção estimados em até 20 mil toneladas (projeto Nolans), a Arafura espera entrar em operação a partir de 2014, caso consiga assegurar financiamento.

Apesar de relativamente grande, o depósito de Nolans possui baixos teores de terras raras (cerca de 2,8%), o que totaliza pouco mais de 140 mil toneladas de REO medidas (a empresa espera que futuras prospecções possam elevar este nível). Além disso, a empresa também espera reduzir custos de produção através de co-produção de urânio e de ácido fosfórico. A Arafura se beneficia de uma anormal concentração elevada de neodímio em suas reservas, que a posiciona como preferida para produtores de ímãs de terras raras.

No início de 2009, a Arafura recebeu um grande aporte de capital chinês, através do Grupo Chines de Mineração de Metais não-Ferrosos (CNMC). O grupo adquiriu 24,9% do controle da empresa com o objetivo de desenvolver o projeto Nolans, no norte da Austrália. Apesar do aporte chinês, a companhia ainda espera novos financiamentos e a previsão de produção de 20 mil toneladas é para o ano de 2014.

Como ponto positivo, a recente alta do neodímio nos mercados internacionais fez com que a operação da Arafura se viabilizasse sem a produção de co-produtos associados. Além disso a empresa ainda não finalizou a análise completa de seu depósito de Nolans, que pode conter mais reservas do que o inicialmente medido.

## 11.4 Great Western Minerals Group

A Great Western é uma empresa listada em bolsa de origem canadense (GWG CN; <http://www.gwmg.ca>). Apesar de canadense, o principal ativo da Great Western é o depósito sul africano de Steenkampskraal, que deve retomar suas operações em 2013 com uma produção inicial de 2,7 mil toneladas, para alcançar 5 mil toneladas até 2015. O depósito consiste em uma antiga mina, em que a monazita era extraída e concentrada entre os anos 1953 e 1963 mais pelo seu teor de tório do que pelas terras raras contidas. O teor da mina de Steenkampskraal é o maior do mundo, com 17% de REO, o que coloca a Great Western como potencial produtora de menor custo do setor de terras raras. É importante considerar que apesar do depósito de Steenkampskraal ser majoritariamente de terras raras leves, seu teor de REO é tão alto que a quantidade de terras raras pesadas por tonelada lavrada será a maior do mundo.

Além de Steenkampskraal, a Great Western também possui projetos no Canadá e EUA, como o projeto de Hoidas Lake em Saskatchewan, Deep Sands em Utah (ainda inviável comercialmente) e Benjamin e Douglas River, ambos também no Canada.

Apesar de possuir depósitos pequenos se comparados à Lynas e Molycorp, a Great Western espera aumentar seu faturamento através da verticalização da cadeia produtiva, conseguindo assim produzir itens acabados de maior valor agregado. A vantagem da Great Western em relação à Molycorp é que a Great Western já é fabricante de ligas e produtos de terras raras e agora iniciará a operação de lavra.

A companhia em seus últimos relatórios espera triplicar a produção de magnetos de neodímio-ferro-boro até 2015. Com uma base de consumidores global, 60% de seus produtos são vendidos na Europa, 30% no Japão e 10% em Taiwan. Além disso, a Great Western alega ser a maior fornecedora de magnetos de samário-cobalto ao exército dos EUA e espera beneficiar-se do programa RESTART e de futuros contratos militares.



### **11.5 Avalon Rare Minerals**

A Avalon é uma companhia canadense listada em bolsa (AVL CN; [www.avalonraremetals.com/](http://www.avalonraremetals.com/)), com um depósito localizado no norte do Canadá – projeto Nechalacho próximo ao lago Thor. Apesar do grande depósito abranger mais de 9 milhões de toneladas, contém teores de apenas 1,9% de óxidos de terras raras. Apesar disso, a Avalon afirma que novas medições podem estender o tamanho do depósito.

A Avalon espera produzir cerca de 5 mil toneladas de óxidos de terras raras a partir de 2014, e até duplicar sua produção caso o tamanho do depósito Nechalacho seja maior do que o esperado. Apesar do teor ser baixo se comparado aos depósitos da Lynas, Molycorp e Great Western, cerca de 23% das terras raras encontradas são as mais valiosas terras raras pesadas. O depósito de Nechalacho também é o quarto maior depósito de nióbio, que poderá ser explorado para reduzir custos da operação com as terras raras, mas que dificilmente chegará a produzir 2% da demanda mundial de nióbio.

O projeto se encontra no extremo norte do Canadá e inclui dificuldades adicionais de lavra relacionadas ao clima. A produção deverá ser escoada por estradas de gelo durante o inverno e por uma combinação de balsa e ferrovia durante o verão.

### **11.6 Alkane Resources**

Companhia australiana listada em bolsa (ALK AU; <http://www.alkane.com.au/>), a Alkane é uma produtora de zircônio e nióbio que espera que produzir a partir de 2012, cerca de 1500 toneladas de REO como co-produto da lavra no depósito de Dubbo, na Austrália. Com um teor de terras raras inferior a 1%, o depósito de Dubbo não consegue se sustentar apenas pela operação de lavra de terras raras em si. A companhia projeta em um cenário otimista que a produção de terras raras alcance no máximo 6,4 mil toneladas de REO anuais. Apesar de pequeno, o projeto da Alkane Resources

é o mais próximo de entrar em operação, já iniciando produção no início de 2012.

Pelo pequeno porte de sua operação de terras raras a Alkane não irá investir em beneficiamento e separação de terras raras, vendendo apenas o concentrado de REO. Apesar disso, os teores relativamente altos de disprósio e térbio irão prover uma receita adicional à companhia.

### **11.7 Ucore Rare Metals**

A Ucore é uma empresa canadense listada em bolsa (UCU CN; <http://ucore.com/>), com a maior parte de suas operações nos EUA. A Ucore possui o depósito de Bokan Mountain no Alasca e também inclui depósitos submarinos em profundidades que variam de 2 a 174 metros de profundidade. Apesar de grandes, os depósitos da Ucore possuem baixos teores de terras raras (0,89% de REO) e não são viáveis de se operar individualmente. A Ucore espera manter a viabilidade econômica de seus projetos através da mineração de nióbio e urânio como co-produtos.

Do lado positivo, 40% dos óxidos de terras raras dos depósitos da Ucore são de elementos mais pesados, o que adiciona valor ao seu depósito e auxilia na viabilização de suas operações.

Além disso, a Ucore realiza lobby junto ao governo para a construção de uma usina de beneficiamento de uso conjunto. Dessa forma, pequenos produtores de terras raras (não só dos EUA, mas também do Canada e até do Brasil) poderiam beneficiar sua produção e vender seus produtos com maior valor de mercado. Outros pequenos produtores apoiaram a causa da Ucore e se uniram, mas o ambicioso projeto da usina conjunta de beneficiamento, ainda está em tramitação no congresso americano.

Durante o ano de 2011, a Ucore conseguiu expandir sua influência no governo e buscou apoio para viabilizar a sua operação em Bokan Mountain junto ao senado e ao Departamento de Defesa dos EUA. Apesar de possuir senadores importantes e influentes ao seu lado, dificilmente um projeto com

menos de 1% de teor de REO será viável e, portanto aprovado para receber apoio financeiro. Apesar de tudo, a ação da Ucore triplicou no ano de 2011, ao longo da épica jornada da pequena empresa em conseguir capital para seus projetos.

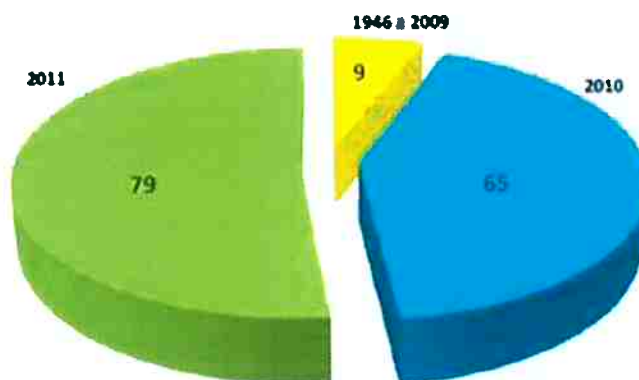
### **11.8 Greenland Minerals**

Empresa listada na bolsa australiana (GGG AU; [www.ggg.gl](http://www.ggg.gl)) com capital australiano, americano, canadense e dinamarquês que possui o objetivo de explorar riquezas minerais na Groenlândia.

Apesar de a companhia indicar um dos maiores reservatórios de terras raras do mundo, seu teor de REO é muito baixo (1,07%) e o depósito fica abaixo do limite de viabilidade. A saída para a Greenland Minerals deve ser a exploração do urânio associado. Sem o urânio, o projeto não faz sentido. Infelizmente, a mineração do urânio é cara e necessita de investimentos de mais de US\$2 bilhões para ser iniciada (4 vezes mais do que foi necessário para a Lynas e Molycorp colocarem seus projetos em operação). Além disso, a legislação atual da Groenlândia proíbe a lavra de urânio. O projeto de terras raras da Greenland Minerals é um dos menos prováveis de entrar em operação. A Arafura apresenta um modelo de negócios parecido (baixos teores com co-produção de urânio) com riscos muito menores.

## **12 Uma possibilidade para o Brasil**

Com a elevação dos preços de terras raras, foi retomada não só a busca por depósitos viáveis, como também projetos que não eram comerciais, tornaram-se grandes oportunidades de investimento. No mundo todo, isso fez com que minas abandonadas voltassem à ativa (inclusive o depósito de Mountain Pass, explorado há quase 60 anos), e com que depósitos de rejeito fossem avaliados novamente (a Rússia encontrou 20 mil toneladas de monazita estocada durante os anos da União Soviética).



**Figura 28:** Numero de pedidos de concessão para exploração de terras raras no Brasil (Landgraf, 2011).

No Brasil, os depósitos foram reavaliados e analisados sob a nova dinâmica das terras raras (e novos preços). A partir de outubro de 2010, novos relatórios indicavam que o Brasil possui grandes reservas de terras raras, que podem ser exploradas comercialmente, para inclusive, desenvolver uma indústria própria e uma equipe nacional de pesquisa e desenvolvimento.

Em outubro de 2010, o USGS geological review apontou 7 depósitos de grande relevância para o Brasil que totalizam mais de 52 milhões de toneladas de óxidos de terras raras. Isso seria mais do que o suficiente para pelo menos colocar o Brasil de volta no segmento de produção de terras raras, e mais ainda, poderia viabilizar o desenvolvimento de uma cadeia produtiva no Brasil, com indústria, pesquisa e governos unidos por uma política comum desenvolvimentista (USGS, 2010).

Ainda é cedo para afirmar que o Brasil desponta como um dos destaques do setor, mas definitivamente existe o potencial para aumentar e muito a produção de terras raras no país, e mais ainda, voltar a ter processos de maior valor agregado e desenvolvimento de tecnologia nacional.

Depósito	Tamanho do depósito (ton)	Teor de REO (%)	Quantidade de REO (ton)
Araxá	450.000.000	1,8	8.100.000
Catalão	10.000.000	0,9	90.000
Pitinga	164.000.000	0,15	246.000
Poços de Caldas	-	-	115.000
Seis Lagos	2.900.000.000	1,5	43.500.000
Tapira	5.200.000	10,5	546.000

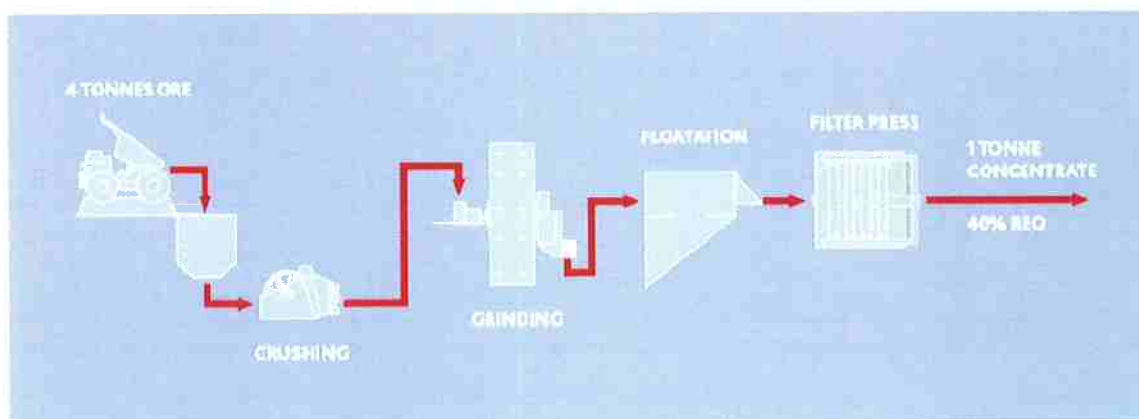
**Tabela 5:** Principais depósitos de terras raras brasileiros, com destaque ao depósito de Seis Lagos (USGS, 2010).

Os novos depósitos brasileiros possuem peculiaridades que devem ser ressaltadas, além da quantidade de terras raras que pode ser lavrada. Os depósitos menores estão em áreas com maior infraestrutura, onde já existe lavra de outros minerais e próxima a grandes centros. Destacam-se os depósitos de Catalão (10 milhões de toneladas com teores de 0,9%), Poços de Caldas (115 mil toneladas de REO), Tapira (5,2 milhões de toneladas com um alto teor de 10,9%) e o grande depósito de Araxá (com 450 milhões de toneladas em um teor de 1,8% de REO). Tais depósitos possuem teores mais elevados e já existe lavra associada (inclusive alguns possuem altos teores de REO na ganga armazenada), o que faz com que a produção de concentrados de terras raras possa ser iniciada em um curto espaço de tempo. Tais depósitos totalizam mais de 8,8 milhões de toneladas de REO, o que já coloca o Brasil em uma posição de destaque no cenário mundial (USGS, 2010).

Outro ponto importante a se destacar é a granulometria dos depósitos. Com exceção do depósito de Tapira, todos os outros depósitos situados na região Sudeste/Centro Oeste possuem granulometria muito fina. Isso dificulta o processo de produção de concentrados. Na produção de concentrados, o

minério passa por estágios de separação gravimétrica em espirais ou então por uma etapa de flotação (Valdiviezo e Lins, 1997). A separação hidrogravimétrica ou por flotação é etapa inicial do processo e fundamental para extração da fração de minerais pesados do minério inicial (Vasconcellos, 2005). Nos anos 50, a Nuclemon foi bem sucedida no beneficiamento de minério oriundo de praias monazíticas e conseguiu não só extrair a monazita do minério, como também beneficiar e produzir cloretos de terras raras na cidade de São Paulo (Vasconcellos, 2005).

O processo da Nuclemon era viável, pois partia de uma granulometria adequada de minério, o que permitia a separação gravimétrica inicial e posterior separação da monazita com obtenção de 99% de pureza (Vasconcellos, 2005).



**Figura 29:** Processo de produção de concentrados de minério (Lynas, 2011).

Processos industriais de concentração alcançam teores de concentrado de 60%, com recuperação de 70% de REO (Valdiviezo e Lins, 1997). Note-se que o processo de concentração da Lynas ainda pode ser melhorado, pois produz concentrados com 40% de REO, pelo menos com uma taxa de recuperação de 67% (Lynas, 2011). Isso decorre do fato do depósito de Mt. Weld apresentar granulometria fina (abaixo de 10 $\mu$ m), o que diminui a eficiência da coleta via flotação (Lottermoser, 1995). Apesar da baixa concentração do produto final, a Lynas alcançou teores elevados de recuperação de minério em seu concentrado. Enquanto em atividade, a

Molycorp produziu concentrados com 60% de REO a uma taxa de recuperação de 68% (Gupta and Krishnamurthy, 2004).

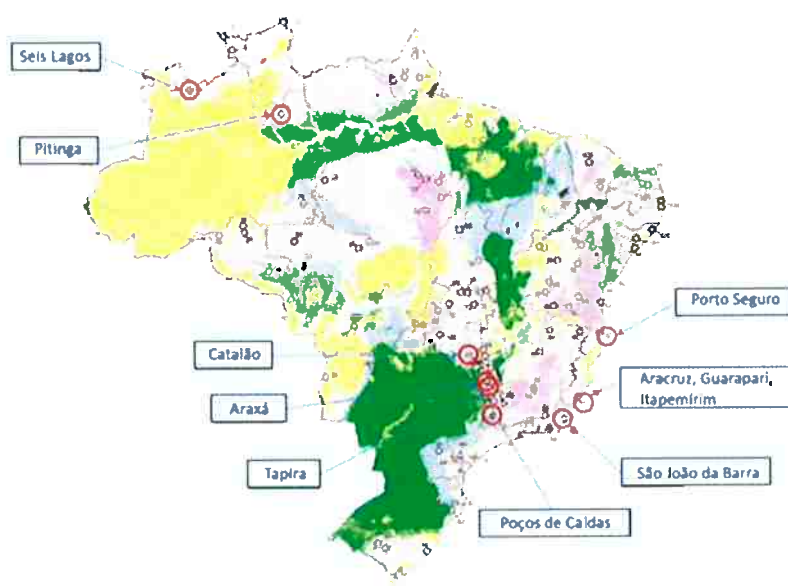
No depósito de Bayan Obo, pelo fato do minério conter diversos minerais distintos, o processo de separação é mais complexo, envolvendo cominuição e separação magnética antes da flotação. Devido a granulometria fina da bastnasita e monazita no minério (abaixo de  $40\mu\text{m}$ ), o processo de flotação em Bayan Obo é mais complexo e envolve uma flotação coletiva com depressores de óxido de ferro e silicatos. Após a flotação inicial, a monazita e bastnasita encontram-se no rejeito, junto com os óxidos de ferro. Em seguida, uma etapa de separação magnética de alta intensidade extrai a hematita. O produto não magnético é submetido em seguida à uma flotação seletiva com o uso de depressores de óxido de ferro e um coletor especificamente produzido para esse minério, o HOE-F1415 – derivado do ácido fosfônico (Valdiviezo e Lins, 1997). Atingem-se assim, após uma etapa adicional de separação magnética, teores de 60% de concentrado, com recuperação de 61% (Gupta and Krishnamurthy, 2004).

Tentativas de concentração dos minérios de terras raras no Brasil não foram bem sucedidas exceto pela nuclemon. Experimentos com o minério de Poços de Caldas apresentaram em seus melhores resultados, concentração final de apenas 23% de REO com 55% de recuperação (Valdiviezo e Lins, 1997). Com granulometria da monazita abaixo de  $10\mu\text{m}$ , os depósitos de Araxá e Catalão também se mostram de grande dificuldade de extração (Toledo et al, 2004), onde não só a concentração da monazita é dificultada, mas a extrema cominuição necessária para se atingir tamanhos de partícula dessa ordem encarecem o processo. Apenas no minério de São Gonçalo do Sapucaí, devido à maior granulometria da monazita aluvionar, se conseguiram resultados mais satisfatórios, com 65% de REO e 75% de recuperação (Valdiviezo e Lins, 1997).

Outro empecilho seria a legislação brasileira que dificulta o processo de exportação de minérios com tório e urânio associados. Minérios com teores acima de 0,2% de tório e 0,05% de urânio dependem de aprovação da CNEN para serem exportados (CNEN, 1988), e as empresas responsáveis devem não

só renovar o pedido de exportação a cada três meses, como também devem apresentar um comprometimento de instalação de beneficiamento de minérios, realizar investimentos em pesquisa de processos de beneficiamento, e garantir um percentual da exportação para a CNEN. Caso contrário, a exportação deve ser compensada com uma importação de mineral de urânio equivalente, a ser entregue sem custo na sede da CNEN (CNEN, 1969).

Porém, as novas descobertas incluem um enorme depósito no extremo norte do Brasil. O depósito de Seis Lagos é uma grande reserva situada no extremo norte do estado do Amazonas, perto da região conhecida como “boca do cão”, onde inúmeros conflitos ocorrem entre as FARC, narcotraficantes, latifundiários, garimpeiros e índios. O depósito de Seis Lagos possui 2,9 bilhões de toneladas, com um teor de 1,5%, o que resulta em mais de 43 milhões de toneladas de REO (quase o total de Bayan Obo). Apesar da quantidade de terras raras e nióbio (também presente em grande quantidade) na reserva, a região não possui qualquer tipo de infraestrutura minerária ou de suporte a uma eventual operação de lavra, além de situar-se dentro do parque nacional do Pico da Neblina. Além disso, foi observada uma atividade radioativa anormalmente elevada na região, indicando presença de altos teores de tório no depósito.



**Figura 30:** Localização dos principais depósitos de terras raras brasileiros (Landgraf, 2011).



Ao considerar-se o fato de que a produção de terras raras em Seis Lagos necessita não só de um projeto de lavra, mas também da construção de toda a infraestrutura e ainda mais da aprovação e concessão de lavra em região reservada, conclui-se que o depósito deve demorar anos (senão décadas) a entrar em operação. Apesar disso, o Grupo Moreira Salles já indicou interesse no local. Mais pelo nióbio contido (14 vezes as reservas de Araxá), do que pelas terras raras em si.



**Figura 31:** Detalhe do depósito de Seis Lagos e da infraestrutura circundante (Google Maps, 17/11/2011).



**Figura 32:** Estrada de acesso ao depósito de Seis Lagos (WILTW, 02/12/2010).

Sem dúvida, o Brasil possui um potencial enorme para se tornar novamente um expoente no mercado mundial de terras raras. Com investimentos em processos de concentração e separação, o Brasil já poderia ser um grande produtor de terras raras. Poderia ser fomentada uma indústria de beneficiamento e manufatura no país, com o reaparecimento de projetos de pesquisa no ramo (desaparecidos desde os anos 90) e formação de pessoal capacitado e produtos de alta tecnologia nacionais. Além disso, o Brasil possui um ótimo relacionamento com outras nações, que certamente iriam preferir receber fornecimentos de terras raras brasileiras às produzidas na China. Essa é uma oportunidade de relevância para o Brasil sem que sejam disponibilizados grandes recursos ("low hanging fruit").

Apesar de possuir grandes reservas, o Brasil ainda possui um longo caminho a percorrer para conseguir alcançar um feito como o da China, de consolidar toda a indústria produtiva em seu território e manipular preços e condições em prol de sua população. Para isso, seria necessário que as terras raras se tornassem prioridade governamental por anos a fio, até que toda a infraestrutura fosse construída e a indústria local se organizasse e pudesse ameaçar a produção global de forma competitiva e planejada.

Difícilmente ocorrerá com o Brasil, a situação que ocorre agora com a China, porém é importante que o nosso governo, instituições de pesquisa e empresários se unam para conseguir ao menos colocar o país de volta ao patamar de expoente mundial no setor, se beneficiando da situação do mercado (capitalização de reservas a preços elevados) e atraindo empresas de alta tecnologia e mão de obra capacitada, o que geraria empregos de baixo e alto valor ao país e fortaleceria a indústria nacional.

### **13 Conclusão**

O domínio de mercado chinês, juntamente com manipulação de preços e quotas por parte da China, fizeram o restante do mundo despertar para o risco de as terras raras (e muitos outros metais/minerais) ficarem sob controle de um país de raízes comunistas, totalitárias e não muito confiável comercialmente.

Apesar de se posicionar firmemente perante outros países e de perseguir um objetivo nobre, como a criação de empregos para seu povo e a atração de empresas e tecnologia para seu território, o governo chinês agiu de forma precipitada nos últimos 12 meses. Isso despertou países como Japão e Coréia, de que toda a sua economia estaria em risco de ser substituída pela China, que ao verticalizar operações em seu território, produziria bens similares aos japoneses e coreanos a preços muito mais baratos. Isso não era uma questão de custos de matérias primas japonesas, mas uma questão de economia nacional e viabilidade econômica do Japão e Coréia como países soberanos.

Se a China conseguisse (ou conseguir) atrair indústrias de alta tecnologia para desenvolver operações que antes eram feitas no Japão e Coréia, ambos os países sofrerão com desemprego, fuga de talentos, perda de receita e viabilidade econômica. Isso colocaria em risco toda a existência do modelo econômico pós-guerra desenvolvido pelo Japão e copiado pela Coréia do Sul.

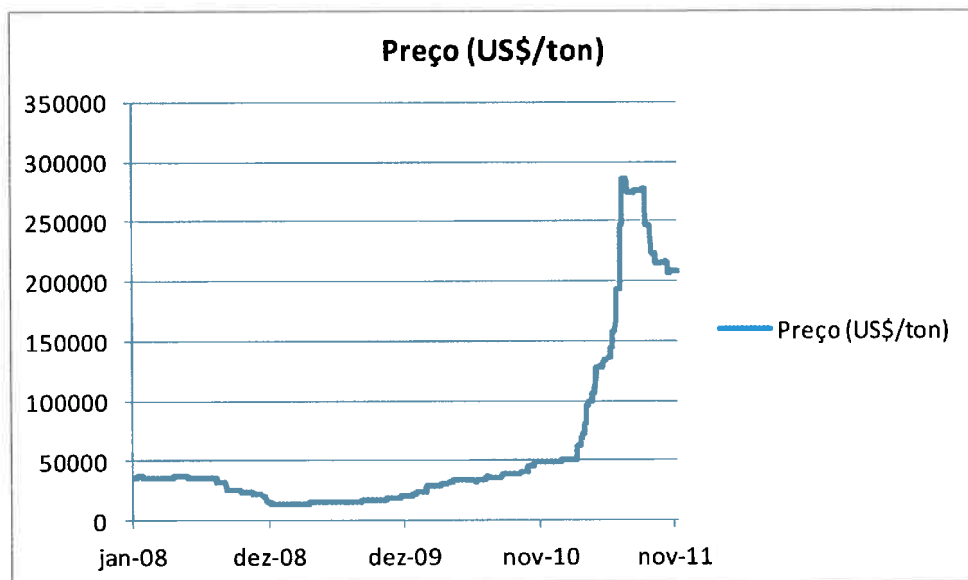
Os EUA que por muito tempo mantiveram uma política de acúmulo de reservas estratégicas a qualquer custo diplomático e militar, também se

encontraram dependentes demais se comparados aos anos 70. A primeira década do século XXI para os EUA foi uma década perdida, em que o país se endividou, não avançou em desenvolvimentos sociais e suas guerras não trouxeram benefícios ao seu povo. Com isso, outras nações tomaram a dianteira em diversos aspectos sociais e econômicos, iniciando uma tendência que deverá se fortalecer durante a primeira metade deste século. Assim, os EUA perderam influência em regiões onde já foram muito atuantes como no Oceano Índico e no Oriente Médio. Os EUA também se tornaram mais dependentes de outros países no fornecimento de matérias primas. Além disso, o modelo de terceirização fomentado pelas empresas do país a partir dos anos 70 fez com que sua indústria local se tornasse ineficiente e defasada em relação ao restante do mundo.

Estes três países, mais dependentes do fornecimento de terras raras chinesas do que nunca na história iniciaram uma campanha mundial de descoberta de novos depósitos e aquisições que garantissem um fornecimento futuro sem a interferência do governo chinês.

Consequentemente, empresas e projetos que antes nunca saíram do papel se tornaram reais e hoje se preparam para produzir uma significativa parcela das terras raras mundiais. O mundo se prepara para virar as costas à China e seus grandes depósitos, com a produção de pelo menos 30 mil toneladas anuais de REO, já em 2012. A China perdeu credibilidade mundial e isso ameaça toda a sua estratégia inicial de desenvolvimento da indústria de terras raras e tecnologias associadas.

As novas reservas descobertas, ao entrarem em operação, irão diminuir a relevância da China no setor, tornando o impacto de novas táticas chinesas menos relevante ao mundo. A China acertou na estratégia de consolidar mercado e atrair empresas para o seu território, mas errou na tática de implementação da estratégia, se precipitando e tornando os benefícios para o seu povo temporários e de curto prazo. Os preços das terras raras em geral já refletem essa expectativa de mercado. Desde julho de 2011, os preços das terras raras vem diminuindo, como reflexo do otimismo do mercado em relação à oferta futura.



**Figura 33:** Preço do neodímio na China (tido como referência de preços às terras raras) diminuiu nos últimos 3 meses, refletindo o otimismo sobre o aumento da produção mundial (Bloomberg, 10/11/2011).

Sem dúvidas, a estratégia chinesa irá gerar resultados muito positivos ao país. Uma enorme indústria chinesa de terras raras irá surgir, criando empregos e trazendo enorme progresso ao povo chinês. Porém, os benefícios poderiam ter sido muito mais profundos se o país não perdesse a confiança mundial como parceiro comercial.

A China poderia ter optado (e ainda pode optar) por eliminar seus competidores apresentando produtos melhores e mais baratos ao mercado, ou então ultrapassar tecnologicamente seus competidores. Isso faria com que a China realmente se consolidasse como principal fabricante de produtos de alto valor agregado e descobridor de novas tecnologias. Apesar de essa possibilidade ainda existir para a China, será mais difícil com o mundo inteiro

se voltando contra o país e monitorando de perto seu desenvolvimento, suas atitudes e suas indústrias.

Apesar da oportunidade desperdiçada (ou ao menos adiada), foi um grande passo para a China a transição de um país produtor de commodities de baixo valor para um país consolidador da indústria e com capacidade de desenvolver sua própria tecnologia. O próprio Brasil nunca conseguiu fazer o salto que a China fez, e sempre se manteve basicamente um produtor de baixo valor agregado, apesar de algumas exceções pontuais.

Para o Brasil, a oportunidade no segmento de terras raras também não pode ser desperdiçada. Por mais que seja muito difícil e improvável que o país consiga manter uma estratégia de governo por longos anos para consolidar a indústria de forma similar ao que a China fez, é razoável a possibilidade de se tornar novamente um expoente de produção no setor e desenvolver uma indústria e equipe de pesquisa próprias.

Apesar de alguns empecilhos operacionais e de uma legislação defasada que reflete o cenário mundial de 30 anos atrás, o Brasil poderia investir na produção de concentrados para inicialmente exportação e posteriormente para beneficiamento próprio.

Um bom paralelo poderia ser a comparação com a Lynas, que também possui um minério de baixa granulometria e de difícil extração, apesar de com maior teor. Pelos investimentos realizados pela Lynas, uma planta de concentração capaz de concentrar minério de baixa granulometria custaria menos de US\$80 milhões. A própria Molycorp também conclui que nos preços atuais, seu investimento será pago em meses (Molycorp, 2011).

Análise do projeto Lynas - fase 1	
Investimentos (US\$)	598.670.000,00
Produção (toneladas)	11000
Valor dos produtos - Receita projetada (em US\$, preço exportação - US\$122,45)	1.346.950.000,00
Custo de produção (a 10,11 US\$/kg)	111.210.000,00
Receita Operacional (em US\$, preço exportação - US\$122,45)	1.235.740.000,00
Margem Operacional (preço exportação - US\$122,45)	92%

**Tabela 6:** Análise do investimento da Lynas comparado a sua receita operacional projetada.

Mas seria muito mais proveitoso ao país, se governos, indústria e centros de pesquisa se unissem para se beneficiar da situação de forma mais impactante e duradoura. Por 20 anos, a indústria brasileira não vai além da produção de concentrados monazita em pequena quantidade e não fabrica componentes com o uso de terras raras locais. O Brasil também perdeu o seu grupo de pesquisadores e especialistas no setor há cerca de 20 anos que optaram por outras áreas de pesquisa.

Pesquisadores que outrora foram especialistas e atuaram junto a uma pequena indústria nacional de terras raras (principalmente a INB e a Eriez), deixaram o assunto para buscar outras áreas de pesquisa, de tal forma que hoje é difícil até de encontrar material em português sobre o assunto. O que é espantoso para um país que foi o maior produtor mundial durante cerca de 50 anos.

O Brasil deve possuir uma política de terras raras que permita não só a exploração em curto prazo de recursos no país (em até 5 anos), mas também possibilite o reaparecimento de uma indústria do setor e de pesquisas sobre o tema. O Brasil não pode deixar que sua inação mais uma vez o faça perder uma bela oportunidade de desenvolvimento e geração de empregos e tecnologia para seu povo, nem que tenha que utilizar o capital privado para isso, por meio de subsídios e benefícios fiscais.

## 14 Referências bibliográficas

ADAMS, J.W. IN PARKER, J.G. AND BAROCH, C.T. (EDS.), **The Rare Earth Elements, Yttrium and Thorium — A Materials Survey**, p. 22–39, Bureau of Mines Information Circular 8476, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C., 1971.

APLAN, F.F., **The processing of rare earth minerals** In Bautista, R.G. and Wong, M.M. (eds.), **Rare Earths**, p. 15–34, The Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, PA, 1988.

ARGALL JR., G.O. **Three iron ore bodies of Bayan Obo**, *World Min.*, 3(1): p. 38–46, 1980.

BLOOMBERG, **Terminal de consulta de preços e mercado**, 10/11/11

BRADSHER, K., **China Still Bans Rare Earth to Japan** – The New York Times – 10/11/10 - <http://www.nytimes.com>

CANNON, J.G. **Rare earth elements and metals**. Chemical and Process Technology Encyclopedia, p. 961–969, McGraw Hill, New York, 1974.

CLARK, A.L. AND ZHENG, S., **China's rare earth potential, industry and policy**. Proc. Int. Conf. Rare Earth Minerals and Minerals for Electronic Uses, Jan. 1991, Hat Yai, Thailand, p. 577–662, Prince of Songkla University, Thailand, 1991.

CNEN – **Resolução CNEN 03/65** – CNEN, 1965, <http://www.cnen.gov.br/>

CNEN – **Resolução CNEN 04/69** – CNEN, 1969, <http://www.cnen.gov.br/>

CNEN – **Resolução CNEN 08/77** – CNEN, 1977, <http://www.cnen.gov.br/>

CNEN – **Resolução CNEN 18/88** – CNEN, 1988, <http://www.cnen.gov.br/>



COULSON, M., **Guide to the mining sector, in-depht study of gold and mining shares**, Harriman House, 2<sup>nd</sup> Edition, 2009

DAVIES, K.E., **Industrial applications of pure rare earth metals and related alloys**. Industrial Applications of Rare Earth Elements, pp. 165–175, ACS Symposium Series 164, American Chemical Society, Washington, D.C., 1981

DENNISON, D.H., TSCHETTER, M.J., AND GSCHNEIDNER, JR., K.A., **The solubility of tantalum in eight liquid rare earth metals**, J. Less Common Metals, p.108–115, 1966

EMDEN, B. V.; THORNBURGH, M.; GRAHAM, J.; LINCOLN, F.J., **The incorporation of actinides in monazite and xenotime from placer deposits in western Australia**, The Canadian Mineralogist, Vol. 35, p. 95 – 104, 1997

FERREIRA, K. R. S.; SABEDOT, S.; SAMPAIO, C. H., **Avaliação da presença de monazita em concentrado de ilmenita produzido na mina do Guaju (PB)**, Escola de Minas de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007

FERRON, C.J., BULATOVIC, S.M., AND SLATER, R.S., **Beneficiation of rare earth oxide minerals**. Int. Conf. Rare Earth Minerals and Minerals for Electronic Uses, Jan. 1991, Hat Yai, Thailand, p. 251 -269, Prince of Songkla University, Thailand, 1991

GOOGLE EARTH, **Visualização de imagens reais de satélite**, 18/11/11, <http://www.google.com/intl/pt-PT/earth/index.html>

GORDON, J. – **China shakes up rare earth industry**, Reuters, 15/02/2011, <http://rareearthinvestingnews.com>

GREINACHER, E., **History of rare earth applications, rare earth market today: Overview**. In Gschneidner, Jr., K.A. (ed.), Industrial Applications of Rare

Earth Elements, p. 3–18, ACS Symposium Series 164, American Chemical Society, Washington, D.C, 1981

GSCHNEIDNER, JR., K.A. AND DAANE, A.H., **Physical metallurgy**, Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, Vol. 11, p. 409–484, North Holland, Amsterdam, 1988

GSCHNEIDNER, JR., K.A., **Physical properties of rare earth metals**, Bull. Alloy Phase Diagrams, p.216–224, 1990

GSCHNEIDNER, JR., K.A., PECHARSKY, V.K., PECHARSKY, A.O., AND ZIMM, C.B., **Recent developments in magnetic refrigeration**, Materials Science Forum, p. 315–317, 1999

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B., **Geomorfologia, uma atualização de bases e conceitos**, Bertrand Brasil, 2009

GUPTA, C. K., KRISHNAMURTHY. **Extractive Metallurgy of Rare Earths**, CRC Press, p.10-132, 2004

HASHIMOTO, T., NUMASAWA, T., SHINO, M., AND OKADA, T., **Magnetic refrigeration in the temperature range from 10K to room temperature: the ferromagnetic refrigerants**, Cryogenics, p. 647–653, 1981

HATCH, G., **Recent developments in the North American permanent magnet industry and its supply chain**, 21<sup>st</sup> Workshop on rare earth permanent magnets and their applications, Bled, Slovenia, 2010

HEDRICK, J.B. **Rare earth elements and yttrium**. Minerals Facts and Problems, Bureau of Mines Bull, p. 647–664, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C, 1985

HEDRICK, J.B. **Rare earth metal prices in the U.S. ca. 1960 to 1994**, J. Alloys and Compounds, 250:471, 1997

HEDRICK, J.B. **Rare earths**. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook 2000, Vol. 1, 62.1–62.17, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C, 2000

Hedrick, J.B. **Rare earths**. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook 2001, Vol. 1, 61.1–61.17, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C, 2001

HIGHLEY, D.E., SLATER, D., AND CHAPMAN, G.R. **Geological occurrence of elements consumed in the electronics industry**, Trans. Instn. Min. Metal., p. 97, 1988

HILDOR, J. S., ET AL., **Leucogranitos intrusivos no grupo Araxá: registro de um evento magmático durante colisão neoproterozóica na porção meridional da faixa Brasília**, Revista Brasileira de Geociências, 2006

HORRIGAN, R.V. **Rare earth polishing compounds**. In Gschneidner, Jr., K.A. (ed.), Industrial Applications of Rare Earth Elements, p. 95–100, ACS Symposium Series 164, American Chemical Society, Washington, D.C, 1981

INB, **Relatório anual 2010** , Indústrias Nucleares do Brasil – INB, 2011

INB, **Relatório de gestão do exercício de 2010**, Prestação de contas ordinárias anual, Indústrias Nucleares do Brasil – INB, 2011

ITO, T. **The MMAJ rare earth R&D project**. Int. Conf. Rare Earth Minerals and Minerals for Electronic Uses, an. 1991, Hat Yai, Thailand, Prince of Songkla University, Thailand, p. 325–336, 1991

JACKSON, W.D. AND CHRISTIANSEN, G. **International Strategic Minerals Inventory Summary Report—Rare Earth Oxides**, U.S. Geological Survey Circular 930-N, U.S. Geological Survey, Map Distribution, Denver CO, 1993

JILES, D.C. **The development of highly magnetostrictive rare earth iron alloys**, J. Phys. D., Appl. Phys. 27:1–11, 1994

JONES, R., **Inside China's secret toxic unobtainium mine** – dailymail UK – 10/01/2010 - <http://www.dailymail.co.uk/>

KANAZAWA, Y. AND MIYAWAKI, R. **Rare earth minerals and their crystal structures**. Int. Conf. Rare Earth Minerals and Minerals for Electronic Uses, Jan. 1991, Hat Yai, Thailand, Prince of Songkla University, Thailand. pp. 43–79, 1991

KLEBER, E.V. AND LOVE, B., **The Technology of Scandium, Yttrium and the Rare Earth Metals**, Pergamon, Oxford, 1963

KOGEL, J. E.; TRIVEDI, N. C.; BARKER, J.M.; KRUKOWSKI, S. T., **Industrial Minerals and Rocks**, 7<sup>th</sup> Edition, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2010

KREMERS, H.E. **Rare earth metals**. Rare Metals Handbook, p. 393–417, Reinhold, New York., 1961

LANDGRAF, F. J. G., **Uma visão da cadeia produtiva das terras raras: há lugar para o Brasil?**, Painele: Terras raras e outras commodities, IBRAM, Belo Horizonte, 2011

LIFTON, J., **The consequences of uncertainty in the future rare earth supply chain**, 21<sup>st</sup> Workshop on rare earth permanent magnets and their application, Bled, Slovenia, 2010

LINEBARGER, H.F. AND MCCLUHAN, T.K. **The role of rare earth elements in the production of nodular iron**. Industrial Applications of Rare Earth Elements, pp. 19–42, ACS Symposium Series 164, American Chemical Society, Washington, D.C., 1981

LOTTERMOSER, B.G. **Ore minerals of Mt Weld rare earth element deposit, Western Australia.** *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy.*, vol.104, p.B157- 210, 1995.

LOUZADA, J. C. G., **Flotação seletiva entre calcita e apatita utilizando-se ácido fosfórico e ácido cítrico como depressores**, UFRJ, Rio de Janeiro, 2008

LOVE, B. AND KLEBER, E.V. **Rare earths: sixteen new metals are ready to use**, *Mater. Des. Eng.*, 52(5): 134–137, 1960

LUYCKX, L.A., **The rare earth metals in steel.** *Industrial Applications of Rare Earth Elements*, p. 43–78, ACS Symposium Series 164, American Chemical Society, Washington, D.C., 1981

LYNAS CORPORATION – **Lynas Institutional Presentaion** – May 2011, <http://www.lynascorp.com/>

LYNAS CORPORATION – **Q3 2011 – Quarterly Report** – September 2011, <http://www.lynascorp.com/>

LYNAS CORPORATION – **Roskill International Rare Earths Conference Presentation** – November 2011, <http://www.lynascorp.com/>

LYNAS CORPORATION – **Annual Report, 2010**, December – 2010, <http://www.lynascorp.com/>

MALUNGA, G.W.P., SAMAMA, J.C., AND HOUOT, R., **Rare earth potential in Malawi.** *Int. Conf. Rare Earth Minerals and Minerals for Electronic Uses*, Jan. 1991, Hat Yai, Thailand, p. 193–203, Prince of Songkla University, Thailand, 1991

MASSALSKI, T., OKAMOTO, H., AND SUBRAMANYAM, R. (EDS.), **Binary Alloy Phase Diagrams**, 2nd ed., Vols. 1 and 2, American Society for Metals, Materials Park, OH, 1990

MCGILL, I., **Rare earth metals**. Handbook of Extractive Metallurgy, Vol. III, p. 1695–1741, Wiley-VCH, Weinheim, 1997

MEZRAHI, A., **Avaliação crítica dos requisitos de segurança e radioproteção adotados para o transporte de minérios e concentrados que contém urânio e tório**, UFRJ, Rio de Janeiro, 2005

MINING JOURNAL, **Malaysian Rare Earth Plants to Close**, Mining Journal (London), February 11, 1994 Issue, 322(8262): 106, 1994

MOLYCORP – **A Lanthanide Lanthology**, Molycorp, Inc., Mountain Pass, CA, U.S, 1993

MOLYCORP – **Molycorp Institutional Presentaion** – November 2011, <http://www.molycorp.com/>

MOLYCORP – **Q3 2011 – Quarterly Report** – September 2011, <http://www.molycorp.com/>

MONTGOMERY, M., **China Stalls Rare Earth Production to Curb Falling Prices** – Rare Earth Investing News – 7/11/11 – <http://rareearthinvestingnews.com>

O'DRISCOLL, M. **An overview of rare earth minerals supply and Applications**. Int. Conf. Rare Earth Minerals and Minerals for Electronic Uses, Jan. 1991, Hat Yai, Thailand, pp. 409–420, Prince of Songkla University, Thailand, 1991

OVERSTEAD, W.C., THEOBOLD, P.K., AND WHITLOW, J.W. **Thorium and uranium resources in monazite placers of the western Piedmont, North and South Carolina**, Trans. AIME, 214: 709–714, 1959

PANKRATZ, L.B., STUVE, J.M., AND GOKCEN, N.A. **Thermodynamic Data for Mineral Technology**, Bureau of Mines bulletin 677, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C., 1984

PIDGEON, L.M. AND KING, J.A., **Vapour pressure of magnesium in the thermal reduction of magnesium oxide by ferrosilicon**, Discussions Faraday Soc. (4): 197–206, 1948

PIRAJNO, F., **Hydrothermal processes and Mineral Systems**, Springer, Geological Survey of Western Australia, Perth, WA, Australia, 2010

RADTKE, S.F., AND HERRSCHAFT, D.C., **Role of misch metal in galvanizing with a Zn-5%Al alloy**, J. Less Common Metals, 93:253–259, 1983

RAJENDRAN, J.; BALASUBRAMANIAN, G.; THAMPI, P. K., **Determination of rare earth elements in Indian coastal monazite by ICP-AES and ICP-MS analysis and their geochemical significance**, Current science, Vol 94, No 10, 2008

RANGEL JR., H, **Tório, fatos e perspectivas**, Miniforo Iberoeka, Indústrias Nucleares do Brasil - INB, 2010

RIKER, L.W., **The use of rare earths in glass compositions**. Industrial Applications of Rare Earth Elements, p. 81–94, ACS Symposium Series 164, American Chemical Society, Washington, D.C., 1981

RUDENNO, V., **Mining Valuation Handbook**, Wrightbooks, 3<sup>rd</sup> Edition, 2009

SOE, N. N.; SHWE, L. T.; LWIN, K. T., **Study on extraction of lanthanum oxide from monazite concentrate**, World Academy of Science, Engineering and Technology 46, 2008

SPEEDING, F.H. AND DAANE, A.H., **Metallurgy Division Research and Development Report IS-1900**, Ames Laboratory, USAEC, Iowa State University, Ames, Iowa, National Technical Information Service, Springfield, VA, 1968

SPEEDING, F.H., **Prologue.**, Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, Vol. 1, p. xv–xxv, North Holland, Amsterdam, 1978

SZABADVARY, F., **The history of the discovery and separation of the rare earths**. Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, Vol. 11, p. 33–80, North Holland, Amsterdam, 1988

TAYLOR, R.K.A., **Australian rare earth resources for the electronics industry**. Int. Conf. Rare Earth Minerals and Minerals for Electronic Uses, Jan. 1991, Hat Yai, Thailand, p. 125–136, Prince of Songkla University, Thailand, 1991

TEIXEIRA, L. M., BOTELHO, N.F., **Comportamento cristaloquímico de monazita primária e hidrotermal durante a evolução de granitos e greisens: exemplos das subprovíncias Tocantins, Paranã e Goiás**, Revista Brasileira de Geociências, 2002

TIRNH, X.B., **Mineralogical characteristics of Nam Nam Xe rare earth deposit in Vietnam**. Int. Conf. Rare Earth Minerals and Minerals for Electronic Uses, Jan. 1991, Hat Yai, Thailand, p. 636–643, Prince of Songkla University, Thailand, 1991

TOLEDO, M., ET AL., **Mineralogia, morfologia e cristaloquímica da monazita de Catalão I (GO, Brasil)**, Revista Brasileira de Geociências, 2004



TOLEDO, M. C. M.; PASSOS, C. M.; FERRARI, V. C., **Caracterização mineralógica, micromorfológica e geoquímica da fase fosfática de compostos organo-fosfatados obtidos pelo processo Humifert**, Revista do Instituto Geológico, São Paulo, 2005

TROUT, S.R., **Rare Earth Permanent Magnets:Raw Materials, Magnets and Opportunities** – Spontaneous Materials, 2009, <http://spontaneousmaterials.com/>

U.S. GEOLOGICAL SURVEY – **The principal rare earth elements deposits of the United States – A Summary of domestic deposits and a global perspective** – USGS and US Department of the Interior, 2010

US – DOD, **Afghan Sovereignty: Establishing a viable nation**, U.S. Department of Defense, USA, 2011

VALDIVIESO, E.; LINS, F. F., **Concentração de minérios de terras raras: uma revisão**, Série Tecnologia Mineral, CETEM/CNPq, 1997,

VASCONCELLOS, M. E., **Aproveitamento de ítrio e lantânio de um carbonato de terras raras de baixo teor em cério, de um carbonato de ítrio e de um óxido de terras ítricas**, IPEN, São Paulo, 2006

VENUTO, P.B. AND HABIB, E.T., **Fluid Catalytic Cracking with Zeolite Catalysts**, Marcel Dekker, New York, 1979

WALLACE, D.N.,**The use of rare earth elements in zeolite cracking catalysts**. Industrial Applications of Rare Earth Elements, p. 101–116, ACS Symposium Series 164, American Chemical Society, Washington, D.C., 1981

WEEKS, M.E., **Discovery of the Elements**, 6th edn., p. 695–727, American Chemical Society, Easton, PA, 1956

**What I learned this week - 22/03/07** – 13-D Reports (<http://www.13d.com/>)

**What I learned this week - 30/07/09 – 13-D Reports (<http://www.13d.com/>)**

**What I learned this week - 16/06/10 – 13-D Reports (<http://www.13d.com/>)**

**What I learned this week - 15/07/10 – 13-D Reports (<http://www.13d.com/>)**

**What I learned this week - 26/08/10 – 13-D Reports (<http://www.13d.com/>)**

**What I learned this week - 30/09/10 – 13-D Reports (<http://www.13d.com/>)**

**What I learned this week - 07/10/10 – 13-D Reports (<http://www.13d.com/>)**

**What I learned this week - 2/12/10 – 13-D Reports (<http://www.13d.com/>)**

**What I learned this week - 03/02/11 – 13-D Reports (<http://www.13d.com/>)**

**What I learned this week - 14/07/11 – 13-D Reports (<http://www.13d.com/>)**

**What I learned this week - 21/07/11 – 13-D Reports (<http://www.13d.com/>)**

WHEELWRIGHT, E.J., **Promethium Technology**, American Nuclear Society, Hinsdale, IL, 1973

WILSON, T.A., **Mining, refining and marketing of bastnasite and its separated products**. Int. Conf. Rare Earth Minerals and Minerals for Electronic Uses, Jan. 1991, Hat Yai, Thailand, p. 271–277, Prince of Songkla University, Thailand, 1991