

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**ESTUDO SOBRE O HISTÓRICO, MINERAÇÃO,
APLICAÇÕES, GEOPOLÍTICA E DESAFIOS DAS TERRAS
RARAS**

LEONARDO SHOGI NISHIOKA

SÃO CARLOS - SP
2023

ESTUDO SOBRE O HISTÓRICO, MINERAÇÃO, APLICAÇÕES, GEOPOLÍTICA E DESAFIOS DAS TERRAS RARAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Yuuki Koga

São Carlos - SP
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
Telefones: 16 -3351-8244 e 3351-8246
Endereço eletrônico: demachef@ufscar.br
Rodovia Washington Luís, km 235 - Caixa Postal 676
CEP 13565-905 - São Carlos - SP - Brasil



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Leonardo Shogi Nishioka

RA: 744402

TÍTULO: Estudo sobre o histórico, mineração, aplicações, geopolítica e desafios das terras raras

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Guilherme Yuuki Koga

CO-ORIENTADOR(A):

DATA/HORÁRIO: 14/07/2023, 11h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Guilherme Yuuki Koga	10,0	10,0
Prof. Dr. Lucas Barcelos Otani	10,0	10,0
Média	10,0	10,0

BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Guilherme Yuuki Koga

Guilherme Yuuki Koga

Prof. Dr. Lucas Barcelos Otani

Lucas Barcelos Otani

RESUMO

Os elementos de terras raras são matérias primas essenciais para a transição energética que o mundo está comprometido a realizar. O neodímio e praseodímio são fundamentais para a manufatura de ímãs permanentes de alta performance, que por sua vez, são utilizados em turbinas eólicas e motores de carros elétricos. Dentre os desafios do setor, podem ser citados a ampla dominância do mercado chinês, correspondendo a 90% do mercado de ímãs no mundo, adicionalmente, o país já vem indicando que irá suprir sua necessidade interna, o que deixa o Ocidente com a necessidade de desenvolver projetos que sejam capazes de suprir essa crescente demanda para o futuro. Além disso, a cadeia da manufatura das terras raras é extremamente complexa, desde a sua mineração até o seu refino e posterior uso em suas aplicações finais. Isso porque as terras raras são encontradas em concentrações baixas no ambiente, e para sua separação, inúmeros processos químicos, com reagentes e produtos tóxicos e radioativos são envolvidos no decorrer de sua produção. No presente estudo, são discutidos os conceitos das terras raras, sua mineração, sua história, desde a descoberta desses elementos, a geopolítica que as envolve, empresas fora da China que buscam diversificar a oferta dessas matérias primas, e suas perspectivas para o futuro.

Palavras-chave: Terras raras. Matéria prima. Transição energética. Ímãs permanentes. Tecnologia.

ABSTRACT

The rare earth elements are essential raw materials for the energy transition that the world is compromised to achieve. Neodymium and praseodymium are fundamental for the manufacture of high performance permanent magnets, which are used for wind turbines and electric vehicles engines. Among the sector challenges, can be cited the wide dominance of the chinese market, corresponding to 90% of the magnets market of the world, additionally, the country indicates that they will supply their internal needs, leaving the Occident with the urge to develop projects capable of supplying this growing demand for the future. Moreover, the manufacturing chain of rare earths is extremely complex, since its mining to its refining and posterior use in its applications. This is because the rare earths are found in low concentrations in the environment, and for its separation, numerous chemical processes with toxic and radioactive reagents and products are involved in the course of its production. In the present study, rare earth concepts, the geopolitics that surround them, companies outside China that look for ways to diversify these raw materials supply, and its perspectives for the future.

Keyword: Rare earths. Raw material. Energy transition. Permanent magnets. Technology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Mapa global dos países mineradores de terras raras em 2020.....	2
Figura 1.2: Mapa global dos países que refinam terras raras em 2020.....	2
Figura 2.1: Tabela periódica com os elementos de terras raras destacados em amarelo.....	4
Figura 2.2: Exportação chinesa, em toneladas, de terras raras ao longo dos anos..	7
Figura 2.3: Processos de mineração e flotação das terras raras.....	11
Figura 2.4: Processo de lixiviação de terras raras para seu refino.....	13
Figura 2.5: Mina de Bayan Obo, em Baotou, Mongólia Interior, na China.....	18
Figura 2.6: Mina de Mountain Pass, Califórnia, Estados Unidos.....	19
Figura 2.7: Produção global de terras raras ao longo do tempo.....	20
Figura 2.8: Volatilidade de preços anualizados do óxido de neodímio e praseodímio.....	23
Figura 2.9: Países integrantes da OPEP.....	24
Figura 2.10: Linha temporal do preço do barril de petróleo e os eventos causadores dessas mudanças de preços.....	26
Figura 2.11: Índice de preços pós-pandemia e pós-guerra.....	29
Figura 2.12: Plantas em que a Lynas Rare Earths opera.....	32
Figura 2.13: Instalações na mina de Mountain Pass.....	35
Figura 2.14: Instalação de Fort Worth da MP Materials.....	35
Figura 2.15: Empresas mineradoras de terras raras e seu nível de verticalização..	36
Figura 2.16: Projeto proposto pela Pensana para a mineração de terras raras na Angola.....	38
Figura 2.17: Classificações de ímãs produzidos pela JL Mag.....	41
Figura 2.18: Demanda e oferta de ímãs de NdPr para os próximos anos.....	41
Figura 2.19: Cenário de oferta e demanda de NdPr em 2021 e 2030.....	42
Figura 2.20: Cenário de oferta de terras raras para 2030.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Abundância na crosta terrestre (em ppm), reservas mundiais (em toneladas), Produção anual e anos de reserva, e Aplicações das terras raras separadas individualmente, dados de 2014.....	6
Tabela 2: Separação por países em relação a reservas e produção de terras raras no mundo.....	9
Tabela 3: Aplicações de terras raras em 2019.....	15

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1	CONCEITOS BÁSICOS	4
2.2	MINERAÇÃO E SEPARAÇÃO	10
2.3	HISTÓRICO	17
2.4	GEOPOLÍTICA DAS TERRAS RARAS	25
2.5	OFERTA DE TERRAS RARAS FORA DA CHINA	31
2.6	PANORAMA DAS TERRAS RARAS PARA O FUTURO	41
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
4	METODOLOGIA	48
5	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A transição para energia limpa é um tópico que vem se tornando cada vez mais relevante para os países e o mundo como um todo. Vinculado a esse tema, de uma forma não tão divulgada e conhecida, está atrelada toda a cadeia produtiva de terras raras. Principalmente o neodímio e o praseodímio são utilizados para a manufatura de ímãs permanentes de alto desempenho. Esses ímãs, por sua vez, são aplicados para motores de carros elétricos e turbinas eólicas, principalmente, nessa ideia de transição energética [1].

Um dos grandes desafios desse mercado é o fato de a China dominar toda a cadeia produtiva desse segmento, desde a concentração de terras raras, até a produção de ímãs no mundo, com 90% de participação. O país asiático já sinalizou que irá suprir sua própria demanda interna para a fabricação de tanto veículos elétricos quanto de turbinas eólicas. Isso deixa o resto do mundo em uma situação em que países e empresas fora da China precisam ir atrás de fornecimento dessas matérias primas críticas para o desenvolvimento de um mundo com energia limpa [1].

As terras raras, diferentemente do que seu nome pode sugerir, não são raras na crosta terrestre, mas o grande desafio é encontrar uma reserva com uma concentração minimamente satisfatória para ser economicamente viável para sua mineração.

Além disso, nos minérios que são constituídos por terras raras também podem ser encontrados elementos radioativos e metais pesados, tornando a sua separação e refino altamente poluentes para o ambiente ao redor dessa atividade mineradora.

A figura 1.1 mostra o mapa mundial dos principais países que mineram as terras raras em 2020. Esse estudo foi realizado pela Pesquisa Geológica dos Estados Unidos (*United States Geological Survey*). Já a figura 2.2 apresenta o mapa mundial dos países que realizam o refino das terras raras, para a obtenção de purezas mais elevadas, e subsequente produção de ímãs permanentes. A partir delas, podemos observar a dominância chinesa de praticamente toda a cadeia produtiva de terras raras e posterior manufatura de ímãs.

Vale ressaltar que a China consolidou seu mercado interno de terras raras

pelas últimas décadas, sendo a grande fornecedora de imãs para o resto do mundo. Isso se deve ao fato de, no passado, o país ser menos restritivo em relação a atividades que potencialmente podem poluir e contaminar o solo e aquíferos onde são realizadas essas operações extrativistas. Enquanto isso, países europeus e os Estados Unidos, com a crescente globalização do mundo, ficaram dependentes desse abastecimento de terras raras por parte da China.

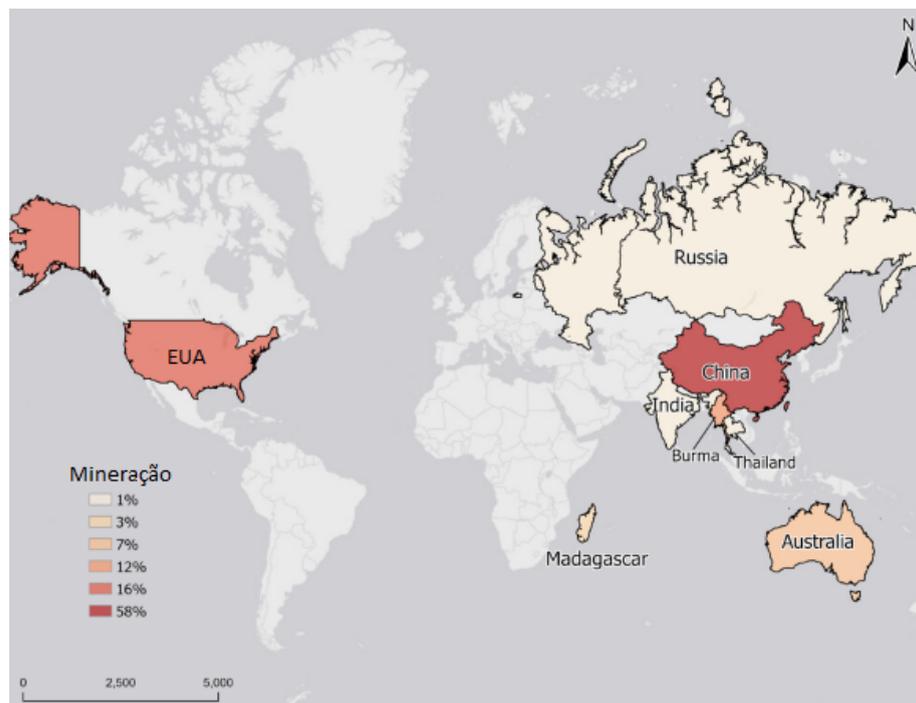


Figura 1.1: Mapa global dos países mineradores de terras raras em 2020 [1].

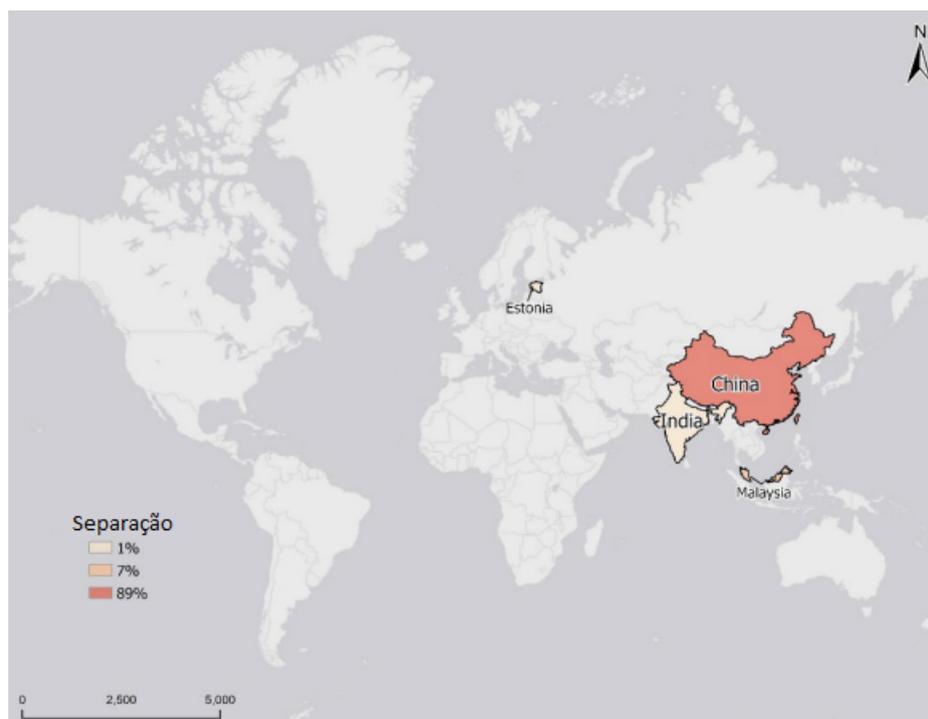


Figura 1.2: Mapa global dos países que refinam terras raras em 2020 [1].

Com base nas informações acima, o presente estudo tem o objetivo de evidenciar, os desafios do mundo ocidental em relação ao fornecimento de terras raras para o desenvolvimento da transição energética. Desde a mineração até a manufatura de ímãs permanentes adequados para aplicação em motores de carros elétricos e turbinas eólicas.

Isso será feito através de pesquisas teóricas, de estudos de matérias primas críticas para o desenvolvimento do mundo, desde a mineração, formação de concentrado de terras raras, e seu refino para ser utilizada na manufatura de ímãs de alto desempenho. São levadas em consideração entrevistas e conversas com especialistas e executivos com ampla experiência na área de mineração de terras raras ao redor do mundo, tal como aspectos relacionados ao mercado, oferta e demanda desses produtos, e uma perspectiva ambiental e geopolítica dessas matérias primas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCEITOS BÁSICOS

As terras raras, na verdade, estão presentes na crosta terrestre de forma relativamente abundante, entretanto, possuem esse nome devido a sua difícil mineração e separação. Elas são compostas por 17 elementos químicos, sendo o Escândio (Sc), Ítrio (Y) e a série dos lantanídeos, são eles: Lantânio (La), Cério (Ce), Praseodímio (Pr), Neodímio (Nd), Promécio (Pm), Samário (Sm), Európio (Eu), Gadolínio (Gd), Térbio (Tb), Disprósio (Dy), Hólmio (Ho), Érbio (Er), Túlio (Tm), Ítérbio (Yb) e Lutécio (Lu). Podemos identificá-los em cor amarela na Figura 2.1, onde estão apresentados na tabela periódica. Além disso, podemos observar implicitamente, inclusive, que as terras raras possuem propriedades e características semelhantes por fazer parte de uma mesma família.

H																		He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo	

Lantanídeos

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Figura 2.1: Tabela periódica com os elementos de terras raras destacados em amarelo [2].

As terras raras possuem relativamente altos pontos de fusão, e possuem propriedades óticas, magnéticas e eletrônicas de grande interesse comercial, tornando-as indispensáveis para determinadas aplicações. Além disso, em seu

estado metálico, são macias, apesar de as terras raras pesadas serem mais duras.

A classificação de terras raras pode ser dividida em duas categorias, leves e pesadas. Segundo a IUPAC (*Internacional Union of Pure and Applied Chemistry*), as leves são constituídas do lantânio ao gadolínio, incluindo o escândio, e as pesadas, do térbio ao lutécio, incluindo também o ítrio. A grande diferença dessas categorias se dá pela diferença de número atômico dos elementos.

Os elementos de terras raras são empregados em uma vasta gama de aplicações, indo de ímãs de alta performance, a lasers, luzes fluorescentes, painéis solares, fibra óptica, catalisadores, cerâmicos e entre outras aplicações. Daremos destaque no presente estudo, principalmente para o neodímio e praseodímio, que são utilizados para a fabricação de ímãs permanentes. Vale ressaltar que dos 17 elementos, somente o neodímio, praseodímio, disprosio e térbio representam 22% da produção, em volume, das terras raras, mas 90% de todo o seu valor econômico [3].

Por mais que ímãs de neodímio e praseodímio sejam de alta performance, em altas temperaturas, seus ímãs podem se desmagnetizar, perdendo sua força magnética. Para minimizar esses efeitos, terras raras pesadas, disprosio e térbio são acrescentados para que os ímãs sejam capazes de suportar temperaturas mais elevadas.

O cério, elemento de terra rara mais abundante, pode ser encontrado na crosta terrestre na escala de 60 a 70 ppm, possuindo uma disponibilidade semelhante a do cobre, por exemplo. Entretanto, sua mineração não é tão simples pelo fato de não haver tantas reservas de terras raras com minérios com concentrações economicamente viáveis para sua extração. A mineração de minérios com concentrações menores de terras raras implica em um processamento que consome maiores quantidades de minérios, assim como maior consumo de energia e água, e maior emissão de CO₂. A Tabela 1 apresenta a abundância na crosta terrestre, reservas mundiais, produção anual e usos de cada elemento de terra rara individualmente. O cobre foi referenciado para se ter uma referência.

Elemento	Abundância (ppm)	Reservas (ton)	Produção anual em toneladas (Anos de reservas)	Utilização
Lantânio	32	22.600.000	12.500 (1800)	Motores híbridos,

				ligas metálicas
Cério	68	31.700.000	24.000 (1300)	Refino de petróleo, catalisadores
Praseodímio	9,5	4.800.000	2.400 (2000)	Ímãs, fibra óptica
Neodímio	38	16.700.000	7.300 (2300)	Ímãs
Promécio	-	-	-	Bateria nuclear
Samário	7,9	2.900.000	700 (4100)	Ímãs
Európio	2,1	244.333	400 (610)	Telas de TV e celulares
Gadolínio	7,7	3.622.143	400 (9100)	Ressonância magnética
Térbio	1,1	566.104	10 (57000)	Ímãs
Disprósio	6	2.980.000	100 (29800)	Ímãs
Hólmio	1,4	-	10	Lasers
Érbio	3,8	1.850.000	500 (3700)	Fibra óptica
Túlio	0,48	334.255	50 (6700)	Raio-X
Itérbio	3,3	1.900.000	50 (38000)	Lasers
Lutécio	-	395.000	-	Catalisador
Ítrio	30	9.000.000	8.900 (1011)	Cerâmicas
Escândio	22	-	2	Ligas aeroespaciais
Cobre	60 - 70	1.615.000.000	17.000.000	Fios elétricos

Tabela 1: Abundância na crosta terrestre (em ppm), reservas mundiais (em toneladas), Produção anual e anos de reserva, e Aplicações das terras raras separadas individualmente, dados de 2014 [4].

Segundo a Pesquisa Geológica dos Estados Unidos (*USGS - United States Geological Survey*), os recursos globais são suficientes para suprir a demanda de terras raras, entretanto, o exponencial aumento da demanda pode não ser capaz de atender a necessidade de terras raras no curto prazo [4]. Vale ressaltar que os dados da Tabela 1 são de 2014, porém, por mais que a produção anual dos elementos tenha aumentado, as terras raras ainda são consideradas elementos críticos para o governo norte americano, e está presente no relatório do

Departamento de Energia dos Estados Unidos sobre minérios e materiais críticos [5].

Por essas razões, o mundo precisa encontrar maneiras para endereçar a escassez das terras raras. Assim sendo, pesquisadores, governos e empresas buscam, através da tecnologia, extração e separação mais eficiente desses elementos, também buscam encontrar novas reservas com teores aceitáveis de terras raras para sua extração, e dessa forma, aumentar a produção, sua recuperação e reciclagem.

A Austrália, por exemplo, é uma grande candidata para suprir essa necessidade global. Inclusive, uma companhia chamada *Lynas Rare Earths* é a maior produtora de elementos de terras raras no mundo, fora da China. Esta atua com suas atividades extrativistas na Austrália e refina o material na Malásia, para posterior comercialização, principalmente para Japão e China. A Lynas tem um projeto que visa dobrar sua produção nos próximos anos. A companhia, na última década, vem se desenvolvendo e otimizando sua capacidade em separação desses elementos essenciais [6].

Nos Estados Unidos, a empresa que se destaca se chama *MP Materials Corp.* e é a maior produtora de terras raras no mundo ocidental. A companhia é produtora de concentrado de terras raras, e vendia esse material para a China. Entretanto, vem desenvolvendo desde 2017 um projeto que visa a produção de ímãs de alta performance, ou seja, quer verticalizar suas operações desde a extração, concentração e refino das terras raras, até a manufatura desses materiais magnéticos. Inclusive, a companhia já assinou um contrato com a *General Motors* para fornecimento de ímãs para motores de carros elétricos até 2025 [7].

Já na China, a fala de Deng Xiaoping na década de 1980 não poderia ter envelhecido de forma mais assertiva. O líder chinês afirmou: “O Oriente Médio tem petróleo. A China tem terras raras.” O país asiático possui por volta de um terço de todos os depósitos globais de terras raras e até 2010, 90% do *market share* de toda a cadeia de suprimento de terras raras no mundo. Em 2019, 60% da extração e 87% do processamento mundial de terras raras pertencia à China [8].

Ao longo das décadas a China consolidou e desenvolveu seu mercado de terras raras e em 2021 anunciou a fusão de mineradoras estatais. Dentre as empresas estão a *China Minmetals Corp.*, *Aluminum Corp. of China* e *Ganzhou*

Rare Earth Group Co. A nova entidade é a *China Rare Earths Group*, e o governo sinalizou interesse em criar dois “gigantes”, um responsável na região norte do país e outro no sul, com foco em diferentes conjuntos de materiais. Esse movimento se dá para que a indústria chinesa abasteça seu próprio mercado interno com a tese de eletrificação para os próximos anos, e isso implica em falta de terras raras para o resto do mundo [9].

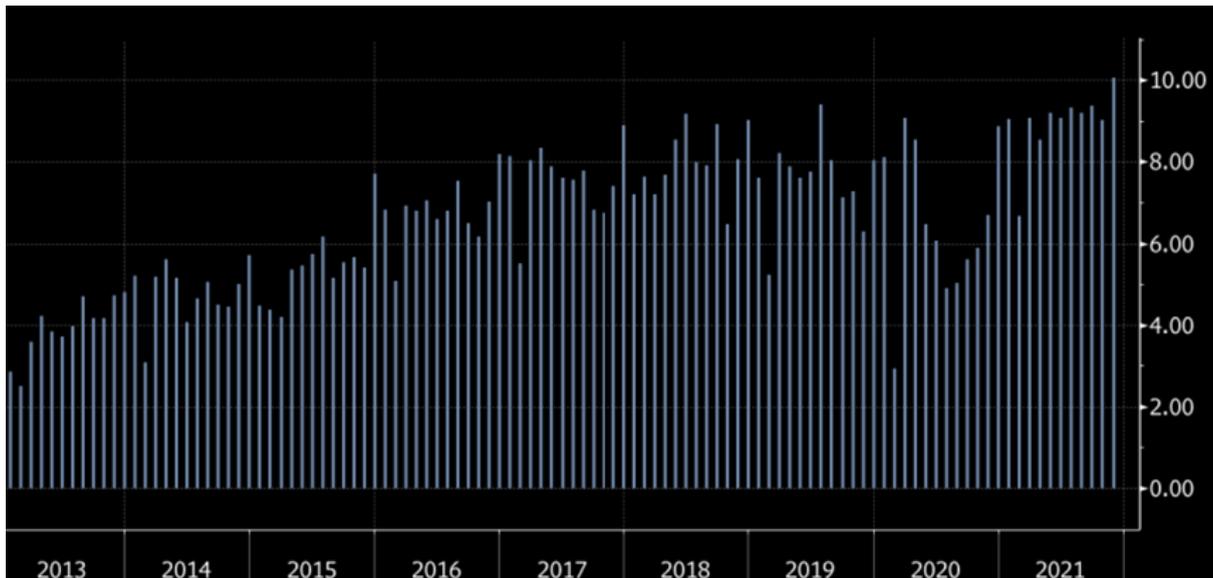


Figura 2.2: Exportação chinesa, em toneladas, de terras raras ao longo dos anos [9].

É possível observar na Figura 2.2 que desde 2013 as exportações chinesas vieram com tendências crescentes. Entretanto, o que não é mostrado é que a participação chinesa no mercado global decresceu durante esse período. Isso porque empresas como a Lynas e MP Materials foram desenvolvidas para reduzir a dependência global do país asiático. Os Estados Unidos importam 80% das terras raras da China [9], e a tendência é que esse número caia ao longo dos próximos anos. Há cada vez mais uma tendência de desglobalização e *nearshoring*, ou seja, estratégia de trazer a produção para lugares mais próximos de onde os produtos finais são vendidos.

A dominância da China pelo mercado de terras raras acaba tendo implicações geopolíticas, podendo ameaçar o corte de suprimento para o resto do mundo. Em outras palavras, há, em escala global, o risco de guerras comerciais ocorrerem e serem impostas. Isso aconteceu em 2010 com o Japão, e vem sendo ponto delicado de diplomacia entre os países desde 2019, principalmente entre

Estados Unidos e China. Essas implicações geopolíticas serão abordadas com mais detalhes adiante.

A partir da Tabela 2 podemos observar as reservas de terras raras separadas por país e sua produção em 2020. Novamente, destaque para China, que não só possui a maior reserva de terras raras (38,0%), mas também é o país com maior produção (57,5%). Também chama a atenção que países como Vietnã e Brasil são os segundo e terceiro colocados no ranking, respectivamente, com níveis de reservas globais que chegam a 19,0% e 18,1%, mas suas produções somadas são de apenas 2.000 toneladas de terras raras. Isso reforça a ideia de que toda a cadeia produtiva da mineração de terras raras é extremamente complexa e leva anos para se consolidar [10].

A fatia de mercado chinesa em 2010 em relação à produção de terras raras era de 92%, e esse número caiu para aproximadamente 58% em 2020. Entretanto, o país asiático ainda possui 85% do market share de fornecimento de terras raras refinadas, ou seja, desses produtos separados e não apenas minerados e concentrados. Também possuem uma tecnologia mais avançada para a produção de ímãs permanentes mais potentes.

País	Produção em 2020	Reservas	% Total de Reservas
China	140.000	44.000.000	38,0 %
Vietnã	1.000	22.000.000	19,0 %
Brasil	1.000	21.000.000	18,1 %
Rússia	2.700	12.000.000	10,4 %
Índia	3.000	6.900.000	6,0 %
Austrália	17.000	4.100.000	3,5 %
Estados Unidos	38.000	1.500.000	1,3 %
Groenlândia	-	1.500.000	1,3 %
Tanzânia	-	890.000	0,8 %
Canadá	-	830.000	0,7 %
África do Sul	-	790.000	0,7 %
Outros países	100	310.000	0,3 %
Burma	30.000	-	-

Madagascar	8.000	-	-
Tailândia	2.000	-	-
Burundi	500	-	-
Total global	243.300	115.820.000	100%

Tabela 2: Separação por países em relação a reservas e produção de terras raras no mundo [10].

2.2 MINERAÇÃO E SEPARAÇÃO

Os minérios de terras raras geralmente são constituídos por terras raras leves ou então pesadas. Dentre os principais minérios que contém terras raras pesadas, podem ser citados a gadolinita, xenótimo, samarskita, euxenita, fergusonite, itrotantalite, itrotungstita, itrialita. Já para minérios que contém predominantemente terras raras leves, estão a bastnasita, monazita, allanita, loparite, ancylite, parasite, lantanite, chevinite, cerite, stillwellite, britolite, fluocerite e cerianite [4].

Dos minerais citados, minas comercialmente operantes pelo mundo extraem minérios de bastnasita, monazita e xenótimo. Na China e nos Estados Unidos está presente predominantemente bastnasita, enquanto na Austrália, monazita e xenótimo [4].

Um dos grandes desafios da mineração das terras raras é o fato de que nos minérios mencionados também são encontrados urânio e tório, elementos radioativos. Isso tem implicações ambientais, uma vez que, por consequência da separação de terras raras, subprodutos poluentes ao ambiente são produzidos. Esse tema será discutido mais a fundo adiante nesse estudo.

De maneira resumida, e sem considerar características e teores específicos de cada mina, a cadeia produtiva das terras raras é composta, inicialmente, por sua mineração. Depois de passar por moagem e esmerilhamento, são realizadas sucessivas etapas de flotação para formar um concentrado de terras raras que possui um teor de 30 a 70% desses elementos. Em seguida, o material passa pela etapa de lixiviação para que seja refinado e tenha teores próximos a 99% ou superior [4].

Comercialmente, há mineradoras que seguem a cadeia até a flotação para vender os concentrados de terras raras. Em geral, os compradores são empresas chinesas que são especializadas em realizar a lixiviação. Após serem refinadas e separadas, as terras raras são utilizadas como matérias primas para sua aplicação final. Como o foco do estudo é direcionado para ímãs, o neodímio e praseodímio são utilizados para a manufatura desses produtos. E, assim como para a lixiviação, há uma ampla dominância chinesa em relação à produção de ímãs permanentes no mundo.

Progredindo na cadeia produtiva, esses ímãs serão utilizados para a produção de motores de carros elétricos e turbinas eólicas, principalmente. Mas também podem ser usados na área de sistemas de defesa, caças aéreos e entre outras aplicações. Há sinalização do governo chinês em integrar empresas mineradoras até a manufatura desses produtos industrializados de alta tecnologia.

A mineração de terras raras é semelhante a de outros minérios, incluindo operações como remoção de sobrecarga, mineração, moagem, esmagamento, esmerilhamento, separação e concentração. Após a etapa inicial de mineração, as terras raras passam pela flotação.

De maneira simplificada, a primeira etapa de separação de terras raras pode ser resumida na Figura 2.3. Vale lembrar que cada mina tem minérios e minerais com teores diferentes, e, portanto, métodos de separação distintos são aplicados. Podemos visualizar que a monazita passa por trituração, e após inúmeras reações com solventes diferentes, se obtém o concentrado de terras raras.

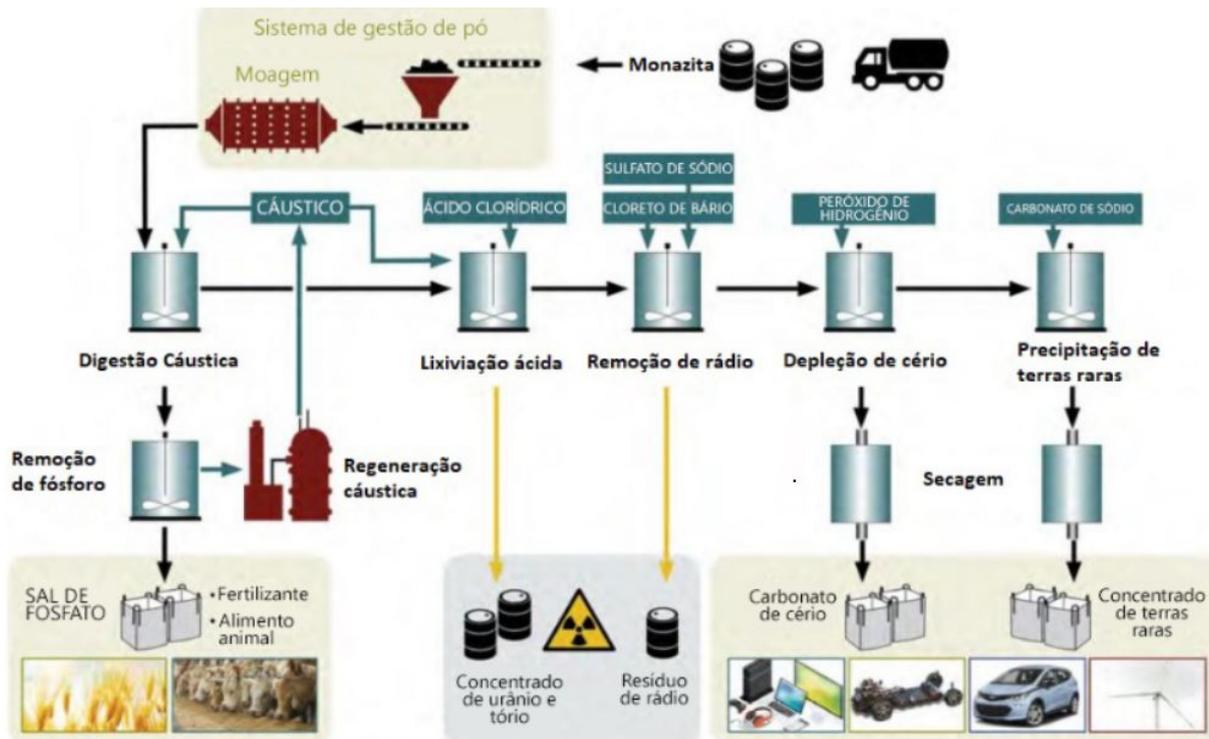


Figura 2.3: Processos de mineração e flotação das terras raras [11].

A flotação é uma complexa técnica de separação de misturas que consiste na introdução de bolhas de ar a uma suspensão de partículas. Esse processo envolve 3 fases (sólidos, água e ar) e explora diferenças de molhabilidade e tensão superficial de minerais espontâneos ou induzidas. Para se obter o resultado desejado, a maioria dos minérios requer o uso de um agente surfactante. Esses surfactantes têm múltiplas classificações, incluindo espumantes, coletores, depressores e ativadores. Eles são utilizados para modificar a superfície da substância de interesse e possibilitar uma maior eficiência no processo de separação de misturas. Além disso, é importante notar que as terras raras são elementos altamente reativos, se oxidando com facilidade com o ar atmosférico, e, portanto, dificultando ainda mais a sua separação [12, 13].

No processo, estão envolvidas questões físico-químicas como a Dupla Camada Elétrica de Stern, onde se encontra um ponto isoelétrico, em que a um determinado pH, o potencial zeta é zero. Tendo informações sobre o ponto isoelétrico do material em questão, junto a faixa de pH em que se trabalha e o comportamento da ionização do surfactante, pode-se selecionar condições ótimas para que a separação por flotação ocorra de forma mais eficiente. Dessa forma,

separa-se os concentrados de terras raras da ganga, resíduos remanescentes da técnica de separação [13].

Vale lembrar que as medidas de pH, potencial zeta e ponto isoelétrico, e conseqüentemente da flotação dependem das propriedades e composição dos minerais extraídos, que por sua vez são mensurados através de testes com as superfícies desses minerais. Logo, uma ampla variação de pontos isoelétricos e demais medidas podem ser calculadas de uma única fonte de recursos, como é o caso de Mountain Pass, nos Estados Unidos. Isso acaba afetando diretamente a dissolução de terras raras e seu processo de separação [13].

Por mais que a literatura sobre a flotação de terras raras seja relativamente limitada, em geral, os elementos de terras raras possuem propriedades físico-químicas similares a de minerais que constituem a ganga, que estão presentes nos mesmos minérios, mas que serão descartados. Portanto, reagentes de flotação altamente seletivos são necessários para o método de separação. Particularmente para monazita e bastnasita, são utilizados coletores de oxidrila, como hidroxamatos, carboxilatos e ésteres de ácido fosfórico. Esses coletores consistem em um ânion de oxigênio e um oxigênio de dupla ligação na qual o cátion do metal irá se vincular. A diferença entre esses três coletores está no átomo na qual o oxigênio está ligado, sendo nitrogênio, carbono ou fósforo. Dependendo da mineralogia do minério, esses coletores precisam ser usados junto a uma variedade de diferentes depressores e ativadores [13].

Tendo um ponto de vista ambiental sobre a flotação, pode-se dizer que a concentração de terras raras envolve dezenas de etapas com solventes orgânicos tóxicos e substâncias químicas extratoras. Além disso, há consumo intensivo de energia e de água, gerando, assim, substâncias poluentes que precisam ser depositadas em lugares seguros para que não poluam o solo e a água ao redor do local depositado [14].

Após concluída a etapa de flotação, obtém-se o concentrado de terras raras, com teor de 30 a 70%. Em seguida, o concentrado é então enviado para ser lixiviado, refinando e separando as terras raras para que cheguem a purezas próximas a 99%. A Figura 2.4 mostra de forma esquematizada esse processo de refino. São utilizados mais produtos químicos como ácidos e bases fortes, e assim como na flotação, resíduos e gases tóxicos são produzidos e devem ser

descartados em lugares apropriados. Também é necessária a utilização de grandes quantidades de água e de energia para esse processo.

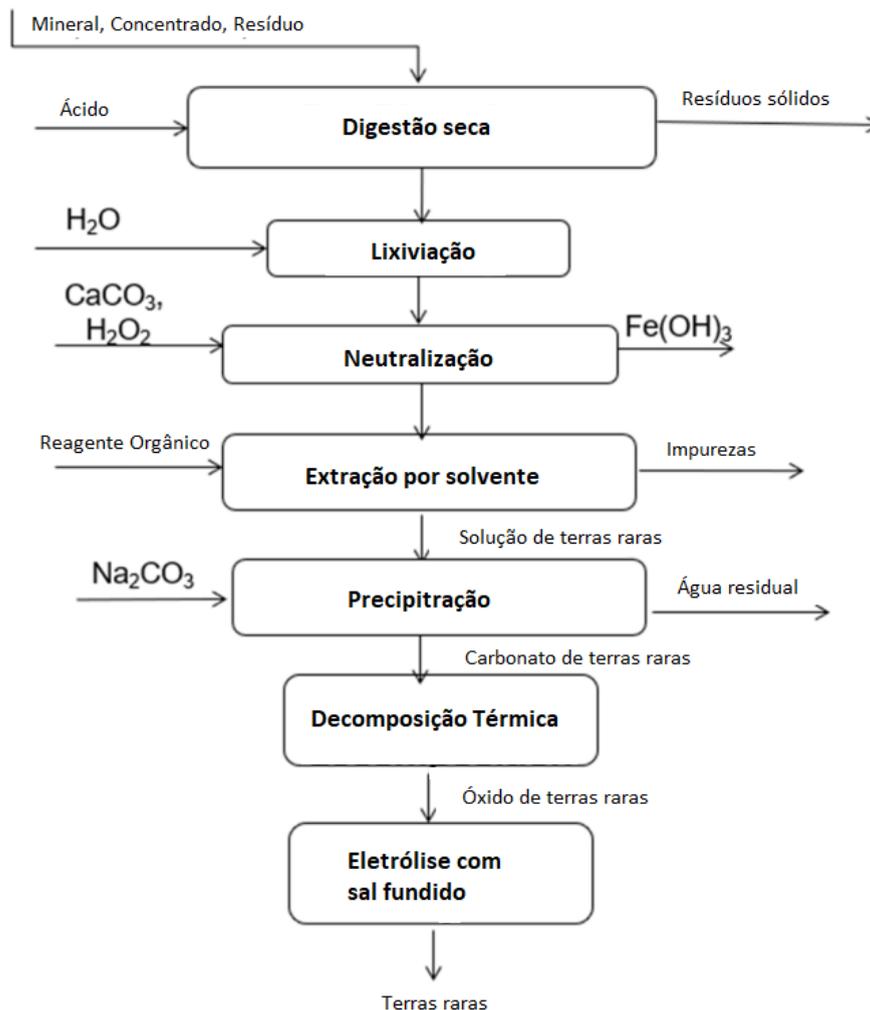


Figura 2.4: Processo de lixiviação de terras raras para seu refino [15].

A lixiviação faz parte de um processo de hidrometalurgia para extração de metais cuja principal etapa é a separação entre o metal de interesse e a ganga através da dissolução do mineral-minério em meio aquoso. A lixiviação consiste na dissolução seletiva de minerais que contém o metal ou metais desejados através do contato do concentrado sólido com uma fase aquosa contendo ácidos, bases ou agentes complexantes, em condições variadas de pressão e temperatura. Em seguida, são realizadas etapas de separação sólido-líquido como ciclonagem, espessamento e filtragem para se obter a fase aquosa que contém o metal de interesse. Vale destacar que a eficiência nesse processo é determinante para a minimização de perdas de metal solúvel na polpa, que faz parte do rejeito, e de

consumo de água nova no processo. Assim como as características dos sólidos a serem descartados também são determinantes para os custos de disposição do rejeito e no risco de potenciais impactos ambientais [16].

É realizado um tratamento da solução que contém os metais desejados visando a purificação. Então, segue-se para o processo de recuperação do metal através de precipitação e/ou cristalização do metal em questão. Como já explicitado, resíduos sólidos e efluentes aquosos, por meio de sua composição, podem impactar tanto o solo quanto os recursos hídricos da região em que é realizada a lixiviação. Para o caso de minérios de metais não ferrosos, como é o caso para terras raras, eles geralmente apresentam uma mineralogia mais complexa e menos inerte em soluções aquosas aeradas, resultando em um potencial de geração de contaminantes maior. Os minérios normalmente são compostos por constituintes metálicos mais tóxicos do que nos minérios de ferro [16].

Estes fatores implicam em um reenquadramento das emissões para limites mais rigorosos no descarte de resíduos em pilhas de rejeitos remanescentes. Além disso, a separação por lixiviação engloba a utilização de uma série de reagentes, que, na maior parte das vezes, podem ser tóxicos e estão em concentrações elevadas. Logo, o tratamento dos efluentes visando a recuperação de reagentes e metais, para o enquadramento de condições adequadas de descarte é obrigatória e necessária [16].

A bastnasita é um mineral de terra rara que contém fluorcarbonatos. Um dos grandes desafios da lixiviação desse minério era a separação entre os elementos de terras raras e fluoretos. Isso foi resolvido através de pré e pós tratamento com aquecimento e reação com ácido sulfúrico ou substância alcalina, como a soda cáustica. Assim, há dissolução do carbonato e separação do flúor através de produtos gasosos [17].

Já em relação à monazita é um mineral composto por fosfato. Um dos principais métodos é a utilização de bases fortes como a soda cáustica para lixiviação. Após a monazita ser digerida em temperaturas na faixa de 150°C por 4 horas, os produtos são dissolvidos em uma solução ácida quente, utilizando ácido sulfúrico ou ácido nítrico. Há produção de tório, que levanta riscos de segurança, e medidas de descarte seguros [17].

Depois de refinadas, as terras raras podem ser encaminhadas ao processo

de produção de ligas metálicas para suas aplicações finais. No caso do neodímio e praseodímio, são utilizados para a produção de ímãs permanentes de NdFeB (neodímio-ferro-boro). A Tabela 3 mostra as aplicações finais onde os elementos de terras raras são utilizados. Destacam-se o uso em ímãs permanentes e catalisadores, principalmente, mas os elementos também são empregados para pó e aditivos para polimento de vidros, metalurgia e ligas metálicas, baterias, cerâmicos, pigmentos e esmaltes, substâncias que contém fósforo e entre outras finalidades.

Uso Final	% da demanda por terras raras em 2019
Ímãs Permanentes	38 %
Catalisadores	23 %
Aditivos e Polimento	13 %
Metalurgia e Ligas	8 %
Ligas para Baterias	9 %
Cerâmicas, Pigmentos e Esmaltes	5 %
Fósforo	3 %
Outros	4 %

Tabela 3: Aplicações de terras raras em 2019 [10].

Até o momento, os ímãs de neodímio-ferro-boro são os que possuem maior força magnética no mercado, e ao adicionar disprosio e praseodímio, há uma melhora de performance dos ímãs, assim como maior resistência em altas temperaturas. Além de motores de carros elétricos e turbinas eólicas, os ímãs e terras raras são utilizados na produção de discos rígidos, eletrônicos portáteis e celulares. Para se ter um maior entendimento da dimensão da importância desses materiais, 1 megawatt de energia eólica de capacidade requer 171 kgs de terras raras, um único avião F-35 americano, 427 kgs e um submarino nuclear da Virgínia (Estados Unidos), 4,2 toneladas de terras raras [10].

De maneira geral, por possuírem excepcionais propriedades magnéticas e condutoras, essa família de metais dúcteis é essencial para expandir a variedade de aplicações em alta tecnologia. Não há um único mercado para as terras raras, mas sim, múltiplos mercados para esses 17 elementos com disponibilidades e

aplicações amplamente diversificadas. O érbio, por exemplo, se torna rosa quando oxidado e fornece sua tonalidade para vidros cor-de-rosa, mas também atua como amplificador em cabos de fibra óptica, ou seja, são críticos para o funcionamento das redes globais de comunicação. Isso torna as terras raras essenciais, elas estão presentes em quase todo lugar, porém em quantidades muito pequenas para se tornarem evidentes e expressivas. A variedade em que são aplicadas são semelhantes à sua incidência geológica, tanto onipresentes quanto dispersas [18].

2.3 HISTÓRICO

O primeiro registro da descoberta das terras raras ocorreu por um minerador em Ytterby, na Suécia, em 1788, que encontrou uma “pedra preta”. Em 1794, ela foi identificada como um tipo de terra, uma referência arcaica para elementos ácido solúveis, cujos constituintes eram cério, ítrio e lantânio juntos a um minério de ferro. Como esses elementos, até então, não foram encontrados em mais lugar nenhum, foram presumidos por serem raros, e daí veio o termo terras raras [18].

Vale destacar que ao longo do tempo, os elementos considerados como terras raras foram mudando. Durante a corrida de armamento nuclear na Guerra Fria, o tório e urânio, assim como o tungstênio, platina e vanádio também foram referenciados como terras raras por serem encontrados frequentemente agregados aos minérios de terras raras. Atualmente, o escândio e ítrio são considerados terras raras apesar de não fazerem parte da família de lantanídeos, totalizando 17 elementos químicos da tabela periódica [18].

Como já explicitado, as terras raras estão presentes na crosta terrestre de maneira relativamente elevada, e portanto, o potencial que possuem para se tornarem as próximas matérias primas de conflito não se dão por conta de sua escassez ou concentração geográfica em determinado lugar, como a China, mas sim por questões políticas ao seu redor enquanto inúmeros agentes, com interesses diversos navegam entre sua necessidade, custo e risco. As terras raras envolvem questões controversas em um ponto de vista ambiental, político, militar e imperialista desde o final do século 19. Apesar de na atualidade estarem presentes e serem essenciais para a infraestrutura tecnológica da vida moderna, desde sua descoberta, em 1788, até 1880, as terras raras não tinham aplicações interessantes

e não eram utilizadas industrialmente. A partir de 1880 as tecnologias baseadas em terras raras começaram a transformar a vida, sendo usadas em âmbito militar e industrial por suas propriedades peculiares [18].

A primeira aplicação bem-sucedida para terras raras foi para solucionar um problema de zonas recentemente urbanizadas durante a Segunda Revolução Industrial, na década de 1880 em diante. Iluminar de maneira barata e segura grandes áreas para manter a produção durante a noite. Apesar da lanterna de manto de gás conter apenas 1% de cério, sua produção foi em massa e larga escala para a época. Como o manto de gás é difícil de inflamar, e grandes quantidades de restos de terras raras não separadas eram propensos a combustão, esses restos, juntos com ferro, foram utilizados para a criação do sílex, que ainda hoje é empregado como ferramenta de ignição de lanternas, isqueiros, armas e automóveis. Essas operações eram dominadas pela empresa *Welsbach Light Company*, que logo expandiu suas minerações dessa matéria prima para além da Europa, para a América, Índia colonial e China [18].

Durante a Primeira Guerra Mundial, por possuírem características pirofóricas, as terras raras foram usadas em fusíveis e explosivos. Com o término do conflito, a Sociedade Geológica da China foi a primeira instituição científica criada no país, em 1922, promovendo a proteção da existência chinesa e suas atividades geológicas. Foi durante o período entre as guerras mundiais que acordos entre chineses e alemães foram firmados. Em troca de matérias primas chinesas, como tungstênio, antimônio, estanho e cobre, os alemães forneciam equipamentos militares, materiais ferroviários e industriais. Tungstênio e antimônio foram os predecessores das terras raras. O tungstênio possui o menor coeficiente de expansão térmica entre metais puros, antecedendo superligas de terras raras para construção de aviões, tanques, foguetes e outras ligas metálicas. Já o antimônio era utilizado para ser interruptor de ignição e retardar a produção de chamas, e para endurecer balas de chumbo. Entretanto, por ambos os materiais serem pesados, eles se fragmentavam imprevisivelmente, assim, novas tecnologias surgiram [18].

Em 1927, a China descobriu a presença de terras raras em Bayan Obo, que hoje é conhecida como a capital do mundo de terras raras, por possuir as maiores reservas mundiais conhecidas no planeta. Essa descoberta moldou o nascimento de uma China industrial comunista, que procurava desenvolver armas nucleares [18]. A

Figura 2.5 mostra a mina de Bayan Obo, na China.



Figura 2.5: Mina de Bayan Obo, em Baotou, Mongólia Interior, na China [19].

A corrida para a construção de armas nucleares tem as terras raras como “reagentes” e “produtos” desse conflito internacional. Minas de terras raras, tório e urânio foram abertas durante o período da Segunda Guerra Mundial, com os Estados Unidos e União Soviética buscando ter controle sobre a maior quantidade de reservas de urânio e tório que pudessem alcançar. Três das opções que os Estados Unidos mapearam incluíam Brasil, Índia e o Congo belga. Com a independência indiana em 1947 e o Ato Indiano de Armas Nucleares de 1948, o fornecimento de monazita foi interrompido, causando o aumento do preço do tório. Os americanos, procurando em seu próprio território, encontraram a mina de Mountain Pass em 1949, que dominou a produção global entre 1960 e 2000 [18]. A Figura 2.6 mostra a mina de Mountain Pass, no estado da Califórnia, Estados Unidos. A mina atualmente é operada pela empresa MP Materials.



Figura 2.6: Mina de Mountain Pass, Califórnia, Estados Unidos [20].

Cabe ressaltar que o Brasil, antes do domínio americano de Mountain Pass, era um dos grandes fornecedores de terras raras com a Usina Santo Amaro, em São Paulo, pela empresa Indústrias Químicas Reunidas (Orquina). Em 1962, o governo federal estatizou parte da companhia porque a monazita, principal minério de extração, possui elementos radioativos, o que passou a ser monopolizado pela União. Sendo assim, a produção das terras raras ficou a cargo da Comissão Nacional de Energia Nuclear (Cnen). E como o enfoque passou a ser mais concentrado no urânio e tório, as terras raras começaram a ser colocadas em segundo plano. Então, com o início das operações da *Molycorp*, a empresa americana conquistou mais da metade da produção de terras raras no mundo, destituindo a posição, já enfraquecida, do Brasil [21].

Um dos fatores que impulsionou, em partes, a modernização tanto da Guerra Fria, quanto da indústria foi a descoberta de novas aplicações para as terras raras. Em 1952, a *Molybdenum Corporation of North America*, que depois se chamaria Molycorp, começou suas operações em Mountain Pass, mas só atingiu sua plena capacidade a partir de 1960. Superligas de terras raras começaram a ser desenvolvidas na produção de aço para transformar suas produções de pesadas, suscetíveis à corrosão e quebradiças para leves e mais duráveis, tornando as armas mais precisas, de mais longa distância e devastadoras. Os elementos de terras raras permitem que suas ligas permaneçam estáveis em temperaturas tão altas

quanto 1500°C, sendo empregadas, portanto, em foguetes e mísseis de longa distância. Vale destacar que durante esse período, uma relação complexa entre chineses e russos foi estabelecida. Enquanto os chineses forneciam urânio para a União Soviética e permitiam que construíssem bases militares no norte de seu país, solicitavam que os russos concedessem treinamento e transferissem seu conhecimento para dar apoio ao programa chinês de armamento nuclear. Entretanto, a partir do meio da década de 1950, a relação sino-soviética foi se degradando até que os chineses partiram para uma agenda nuclear fora dessa relação com a União Soviética [18].

A corrida para armamento nuclear possui forte correlação com as terras raras, tanto por seus elementos, quanto por seus métodos de separação. Inclusive, com as melhorias de separação, o custo do európio reduziu, viabilizando a produção em massa de fósforo vermelho para televisões em cores, o que simbolizou o início da proliferação de terras raras na vida doméstica de bens eletrônicos. Ao longo da década de 1960, suas propriedades magnéticas e condutoras permitiram miniaturização de dispositivos eletrônicos (sem terras raras, os computadores ainda teriam o tamanho de uma sala ao invés do tamanho de notebooks e smartphones). A indústria petroleira começou a utilizar terras raras para catalisadores de craqueamento do petróleo em 1964. O consumo anual na década de 2000 nos Estados Unidos foi de 10.000 toneladas de terras raras [18].

Durante a segunda metade do século 20, ao mesmo tempo em que novas aplicações para terras raras eram desenvolvidas e descobertas, mudanças econômicas globais foram fatores que impulsionaram a realocação de produção de terras raras e seus derivados. Os Estados Unidos, durante esse período, foram os líderes de exportação de bens manufaturados, porém após a Segunda Guerra Mundial, o governo americano promoveu acordos comerciais internacionais para abrir mercados estrangeiros. Com a redução de restrições no comércio internacional, e redução de custos de comunicação e de transporte, empresas industriais começaram a construir suas plantas onde os bens produzidos teriam os menores custos. Esse processo de globalização teve início na década de 1980, e acelerou e se intensificou na década de 1990 em diante [22].

Muitas indústrias americanas se dirigiram a países onde pagariam salários mais baixos, e teriam menos proteções em relação à saúde e segurança de seus

funcionários, assim como menos regulações ambientais. Essas medidas reduziram os preços de bens de consumo, porém levou ao fechamento de fábricas e à perda de empregos nos Estados Unidos [22].

A China, se aproveitando dessas condições de abertura do comércio, e adotando uma política, já no final da década de 1970, de desenvolvimento de suas capacidades industriais e comerciais internacionalmente, foi capaz de prosperar durante esse período. O líder do Partido Comunista Chinês, Deng Xiaoping, que já foi citado anteriormente, foi um dos grandes responsáveis pela reabertura do país asiático para o resto do mundo, e deu início ao desenvolvimento da indústria de terras raras na China. Entre 1978 e 1995, a produção chinesa teve uma média anual de crescimento na casa de 40% [22].

Já no fim da década de 1980, a mineração chinesa dominava o mercado por uma prática de preços inferiores aos da Molycorp, em Mountain Pass. Além disso, algumas ocasiões de derramamento de resíduos tóxicos pela empresa americana, levaram a produção em Mountain Pass ao fim em 2002 [20]. E vale ressaltar que companhias chinesas fizeram propostas de compras de minas de terras raras na década dos anos 2000. Justamente Mountain Pass, nos Estados Unidos, e Mount Weld, na Austrália. Entretanto, essas ofertas foram rejeitadas por reguladores de investimento estrangeiros [22].

A Figura 2.7 mostra a quantidade, em mil toneladas, produzida de terras raras dentre os principais produtores. Assim como foi explicitado, observa-se que até meados da década de 1970, os Estados Unidos lideravam a produção da matéria prima em quase sua totalidade. A partir de meados da década seguinte, iniciou-se a produção chinesa, que vendia terras raras a preços mais baratos no mercado internacional, tomando liderança e dominando o segmento desde então. Já na década de 2010, podemos ver que a produção foi retomada em países como Austrália e Estados Unidos, principalmente [20].

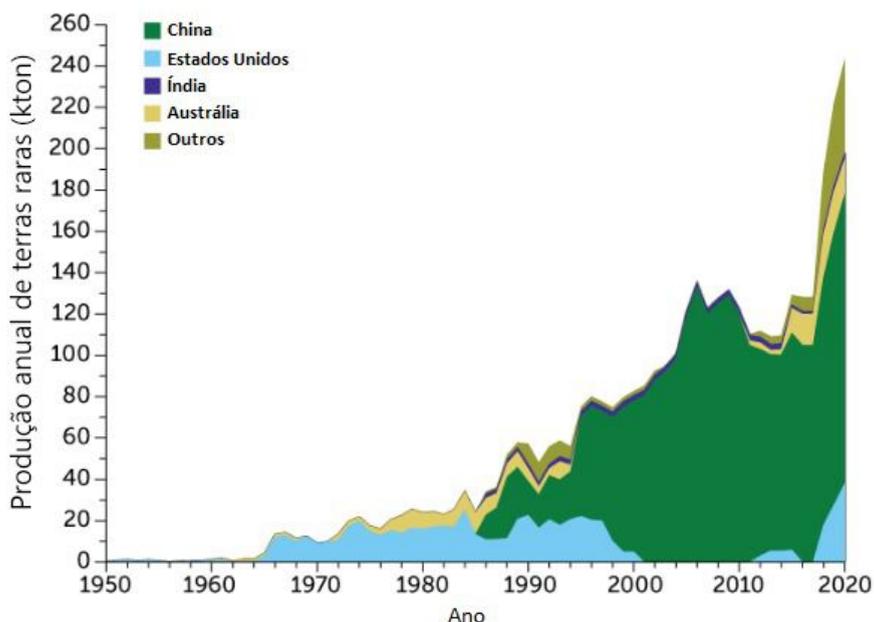


Figura 2.7: Produção global de terras raras ao longo do tempo [20].

Essa volta de produção de terras raras em países fora da China se deu por conta de um conflito entre China e Japão em 2010. A divergência entre as nações foi sobre as Ilhas Senkaku, onde navios de ambos os países colidiram. As autoridades japonesas prenderam o capitão do navio chinês. Em contrapartida, o governo chinês impôs um embargo de terras raras para o Japão, com redução de cotas de exportação que chegaram a 40%. Isso fez os preços das terras raras dispararem [23].

Inesperadamente, os países perceberam o quão dependentes estavam de exportações chinesas das terras raras. Assim, projetos que buscavam endereçar oferta de terras raras ao redor do globo surgiram. E, atualmente, as duas maiores empresas mineradoras de terras raras são a *Lynas Rare Earths*, na Austrália (Mount Weld), e a *MP Materials*, nos Estados Unidos (Mountain Pass).

Vale ressaltar que dezenas de projetos foram desenhados durante a década de 2010, e apenas um sobreviveu, que é justamente a mina de Mount Weld, na Austrália. Isso evidencia o nível de dificuldade para a mineração e separação de terras raras [24].

Mais recentemente, durante a pandemia, os preços de terras raras também aumentaram drasticamente. Isso foi causado por disrupções na cadeia de fornecimento por conta da pandemia de Covid-19, na qual a distribuição e transporte

dessas matérias primas foram paralisados, e conseqüentemente, causando a escassez de certos produtos [25]. Somado a isso, com indicativos de regulações chinesas restringindo o fornecimento de terras raras para o mundo, seja para consumo interno, seja por questões geopolíticas, junto ao aumento de demanda por terras raras como um todo, e por ímãs de NdFeB (neodímio-ferro-boro), fez os preços do óxido de PrNd (praseodímio-neodímio) mais que dobrar de 2018 até o fim de 2021, indo de 50 dólares o quilograma, para mais de 100 dólares. A Figura 2.8 mostra a volatilidade dos preços anualizados do PrNd desde meados de 2008 até 2021. Podemos observar que em 2010 tivemos um aumento expressivo com o corte de fornecimento por parte dos chineses, e, desde o início da pandemia, essa volatilidade de preços também começou a se acentuar [7].



Figura 2.8: Volatilidade de preços anualizados do óxido de neodímio e praseodímio [7].

Analistas do governo americano afirmam que se as terras raras se tornassem indisponíveis, o efeito nos padrões de vida atual não seria catastrófico, porque, na maioria de suas aplicações, as terras raras estão meramente substituindo materiais menos efetivos para esse propósito específico, mas com o desenvolvimento de economias digitais, a importância de comunicações por satélite, economia, segurança e avanço científico estariam comprometidos. E não é à toa que o governo americano apontou as terras raras como elementos críticos para o crescimento econômico, segurança nacional, inovação tecnológica, e *supply chain* para manufatura e agricultura [18].

Dessa forma, o restante do mundo precisa encontrar formas de conseguir o fornecimento dessas matérias primas. Antes de abordar como estão os projetos que buscam endereçar essa falta de terras raras para os próximos anos, veremos algumas implicações geopolíticas desses materiais tão importantes para a transição energética.

2.4 GEOPOLÍTICA DAS TERRAS RARAS

A OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) é uma instituição internacional que foi fundada em 1960 pela Arábia Saudita, Kuwait, Irã, Iraque e Venezuela. Posteriormente, Catar, Indonésia, Líbia, Emirados Árabes Unidos, Argélia, Nigéria, Equador, Gabão, Angola, Guiné Equatorial e Congo se juntaram à organização, sendo que Equador, Indonésia e Catar suspenderam ou interromperam sua participação no grupo. A Figura 2.9 ilustra os países participantes da OPEP e da OPEP+ [26].



Figura 2.9: Países integrantes da OPEP [27].

As políticas da OPEP atuam no controle da produção do petróleo pelos países participantes, ou seja, na oferta dessa matéria prima. E por isso, a organização é recorrentemente descrita como um cartel. O grande motivo da sua

criação era protestar contra o achatamento do preço do barril de petróleo que era praticado pelas grandes petroleiras ocidentais, chamadas de Sete Irmãs, compostas pela *Anglo-Persian Oil Company* (atualmente, *BP*), *Gulf Oil* (adquirida pela *Chevron*), *Royal Dutch Shell*, *Standard Oil of California* (se tornou a *Chevron*), *Standard Oil of New Jersey* (*Esso*, que se tornou a *Exxon*), *Standard Oil of New York* (*Socony*, que se tornou a *Mobil*, e foi adquirida pela *Exxon*, se tornando *ExxonMobil*) e *Texaco* (adquirida pela *Chevron*) [28, 29].

Para promover o aumento da receita dos países membros com o objetivo de aumentar o desenvolvimento interno de cada um, foram capazes de aumentar gradativamente seu controle sobre a produção do petróleo, diminuindo o poder das grandes empresas mencionadas, e unificando as políticas de produção. Assim, impuseram um aumento no valor dos royalties pagos pelas corporações e as oneraram com impostos [28].

Em 1973, os países exportadores do Oriente Médio, conseguiram impor, pela primeira vez, medidas restritivas contra nações aliadas de Israel, afetando principalmente os Estados Unidos, Europa ocidental, Japão, Austrália e entre outros países. Isso por conta da Guerra de Yom Kipur, conflito entre estados árabes, liderados por Egito e Síria, contra Israel. Durante esse período de embargo, o preço do barril do petróleo saltou de 3 para 12 dólares. Vale ressaltar que a OPEP tinha somente 56% da produção global de petróleo na época, o que não lhe dá controle total sobre o mercado, apesar de ser um aumento expressivo de 400%. Essa falta de oferta por petróleo teve implicações globais, como o início da procura por fontes renováveis de energia, assim como o aumento da produção interna nos Estados Unidos para conseguir suprir a demanda [30, 31].

Em 1979, com a Revolução Iraniana, a produção de petróleo, por um período, foi praticamente zerada, fazendo o preço do barril de petróleo subir para a casa de quase 40 dólares. E em 1980, com a Guerra Irã-Iraque, a oferta de petróleo foi comprometida. Também causando recessão e desaceleração econômica globalmente [31].

A Figura 2.10 mostra, em um amplo intervalo de tempo, a cotação do petróleo ao longo dos anos e os eventos que levaram a essas escaladas ou quedas nos preços. Dessa forma, podemos ter uma visão melhor sobre as commodities em geral e como eventos geopolíticos, como guerras, crises financeiras e

desenvolvimento industrial, como a maior utilização de automóveis pela população mundial são fatores que são capazes de conduzir a volatilidade dos preços de insumos. Cabe destacar que o petróleo é uma das principais commodities negociadas por ser a matriz energética principal de inúmeros países, portanto, teve e tem uma relevância muito maior dentre as matérias primas. E, por mais que as terras raras sejam menos significativas, elas estão começando a se tornar elementos críticos para o desenvolvimento de qualquer nação no globo.

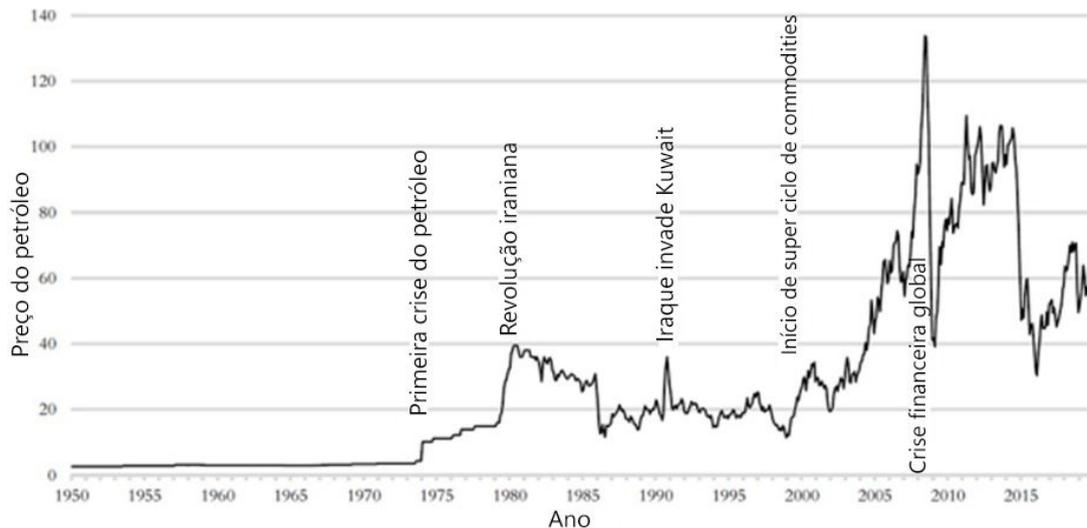


Figura 2.10: Linha temporal do preço do barril de petróleo e os eventos causadores dessas mudanças de preços [32].

À vista disso, assim como o petróleo, que também é chamado de ouro negro, pelo fato de que quem encontrava poços desse insumo enriquecia, as terras raras têm volatilidade em seus preços de acordo com eventos geopolíticos entre países. Além disso, elas são essenciais para a transição energética e sustentabilidade, também possuem significância e implicações estratégicas e econômicas, podendo ser utilizadas como ferramenta e meio para guerras comerciais. Entretanto, diferentemente do petróleo em 1973, na qual os países da OPEP possuíam apenas 56% da produção global, a China possui 90% da cadeia de terras raras já manufaturadas. O que implica em uma escassez muito maior apesar de ser menos amplamente utilizada do que o petróleo, podendo ter saltos de preço até acima dos 400% observados na década de 1970, e semelhantes a cortes de fornecimento como em 2010 com o Japão.

Da última década até o presente, disputas entre China e Estados Unidos vem

se tornando cada vez mais evidentes. Em 2018, o então presidente norte-americano, Donald Trump, comunicou o primeiro pacote de tarifas aplicadas a produtos de origem chinesa como forma de proteger o seu comércio interno, de forma que haja uma menor circulação de produtos chineses nos Estados Unidos, e estímulo para os produtores locais. Em contrapartida, o governo chinês reagiu a essas medidas com retaliações aos norte-americanos. Como por exemplo, a desvalorização forçada do yuan, moeda chinesa, que tornou produtos chineses mais atrativos, sendo posteriormente acusada de manipulação. O país asiático também começou a impor tarifas em produtos importados americanos, assim como suspendeu a compra de produtos agrícolas americanos, principalmente a soja [33].

Essas medidas tomadas por ambos os lados deram início a uma guerra comercial envolvendo a primeira e segunda maiores economias do mundo. Ao longo de 2019, negociações entre os países vinham sendo desenvolvidas para redução das restrições impostas. Houve uma “primeira fase” de um acordo comercial entre as superpotências, mas nada que fosse tão relevante.

Em 2020, chegou a haver um início de conversas para uma reconciliação, o que seria uma segunda fase do acordo comercial, mas com o início da pandemia de Covid-19, as tensões se escalaram com acusações sobre as origens do coronavírus em Wuhan, por parte dos americanos. Assim como uma declaração de um membro do Ministério de Relações Exteriores chinês sugerindo que americanos trouxeram o vírus para a China [34].

E além desse conflito no campo comercial entre as nações, também estão se intensificando tensões na parte de inovações tecnológicas. O governo de Donald Trump acusou o país asiático de roubar tecnologia americana, enquanto as autoridades chinesas alegam que os segredos tecnológicos que vinham utilizando eram parte de acordos mutuamente assinados por ambos os lados. Sanções por parte dos americanos a empresas chinesas como Huawei foram impostas, principalmente relacionadas ao 5G. Causando, dessa forma, uma maior resistência à cooperação tecnológica internacional, e não somente entre os dois países. Já pelo lado dos chineses, há um gradual e ascendente interesse do presidente Xi Jinping de eliminar sua dependência tecnológica dos Estados Unidos [35].

Nesse contexto, os Estados Unidos também proibiram que suas empresas e aliados comercializassem semicondutores e os materiais necessários para a sua

construção para a China. Também baniram a ida de engenheiros com passaporte norte-americano para empresas chinesas que trabalhem no desenvolvimento do produto. Isso porque os semicondutores estão presentes na manufatura de equipamentos eletrônicos como uma torradeira, por exemplo, até computadores, carros de última geração e na construção de mísseis e outros equipamentos militares [36].

Os responsáveis pela produção de semicondutores são poucos. Dentre eles, destaca-se a empresa TSMC, que fica em Taiwan, possuindo aproximadamente 90% da participação de mercado de semicondutores de ponta, e o restante é proveniente da Samsung, na Coreia do Sul. Entretanto, a propriedade intelectual, ou seja, a ideia do semicondutor, desde a sua construção para manufatura até os softwares adequados, é pertencente aos Estados Unidos [36].

Vale destacar que a China é o maior comprador de semicondutores do mundo. Em 2021, o país asiático importou cerca de 430 bilhões de dólares em chips, superando até mesmo a sua importação de petróleo. E desde 2015, o país investiu mais de 150 bilhões de dólares para atualizar o seu mercado doméstico de semicondutores [37].

Para acrescentar ainda mais incerteza a essa polarização entre as duas superpotências, em 2022, com o início da guerra entre Rússia e Ucrânia, os preços de commodities, principalmente agrícolas, aumentaram acentuadamente já que ambos os países do leste europeu são grandes exportadores de grãos. A Figura 2.11 ilustra a variação dos preços desde 2020, e é evidenciado justamente a elevação de preços de fertilizantes, trigo, milho e entre outras commodities que fazem parte das exportações de Rússia e Ucrânia. Junto a isso, os preços do petróleo e do gás natural também deram um salto relevante, causando uma crise energética em países europeus, principalmente.

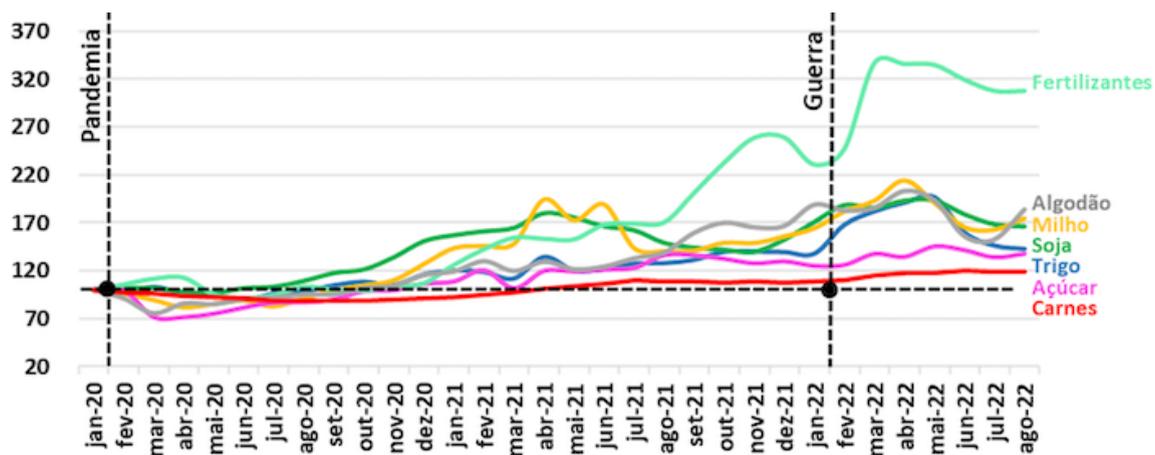


Figura 2.11: Índice de preços pós-pandemia e pós-guerra [38].

Dessa maneira, podemos destacar a força do cenário macroeconômico, geopolítico e militar como grandes influenciadores nas tendências e direcionamentos que não só as superpotências trilham, mas também por nações e economias menores, como da Arábia Saudita com o petróleo ou então a Ucrânia com grãos, dentre eles, trigo e milho, por exemplo, que levantam questionamentos sobre a atividade econômica de países e crises energéticas e de abastecimento de alimentos. E como consequência, o preço de commodities em geral acaba ficando bastante volátil durante conflitos. Por isso, as guerras comerciais, tecnológicas ou até mesmo guerras diretas entre nações afetam diretamente não só o mercado, mas todo o cenário de relações entre os países do globo.

Assim sendo, em resposta às restrições em relação aos semicondutores, a China vem, desde 2019, ameaçando reduzir e/ou banir a exportação tanto de terras raras refinadas e ímãs, quanto de tecnologias que façam parte do seu processo de mineração e refino. E, de maneira diferente ao que aconteceu em 2010 com o conflito entre Japão e China, em que houve uma continuidade na dependência mundial em materiais chineses relacionados a terras raras, não só os Estados Unidos, mas também a União Europeia e o Japão vem tentando se diversificar das cadeias chinesas para ter uma menor dependência de Xi Jinping. E não é à toa que em 2022 o *market share* chinês relativo ao mercado de terras raras como um todo foi de 70%, bem longe dos 90% que já atingiram uma década antes [39].

A seguir, veremos as principais empresas fora da China mineradoras e produtoras de terras raras, assim como seus projetos de expansão e como tem se

posicionado nesse cenário onde as terras raras são tão significativas e indispensáveis para o futuro e a realização dos planejamentos de transição energética dos países do mundo.

2.5 OFERTA DE TERRAS RARAS FORA DA CHINA

Como já foi explorado anteriormente, a produção de terras raras já foi dominada pelos Estados Unidos, com parcela considerável sendo proveniente de países como Austrália, Índia e até mesmo do Brasil, antes de ser controlada pela China. O que aconteceu para que o país asiático dominasse esse mercado foi o programa desenvolvimentista de Deng Xiaoping, observando muito bem que a China possuía grande parte dos recursos minerais em consideração.

O antigo líder do país conseguiu se aproveitar dos conhecimentos que já vinham sendo estudados desde a década de 1920. Inclusive, nos anos que sucederam a Segunda Guerra Mundial, os chineses foram capazes de firmar acordos comerciais de suprimento de matérias primas para a Alemanha, dando seqüência a seu desenvolvimento à extração de minérios [18].

Posteriormente, durante a Guerra Fria, a nação oriental também estabeleceu parcerias com a União Soviética em que a primeira forneceria matérias primas em troca da tecnologia e conhecimento de manufatura industrial da segunda. Fazendo, então, com que a China fosse capaz de, mesmo que de forma incipiente, já na década de 1970, produzir internamente terras raras e se desenvolver e industrializar seu território interno [18].

Então, já na década de 1980, e praticando preços mais baixos do que a concorrência internacional, a China foi capaz de dominar o mercado de terras raras. Um contraponto à realização desses preços inferiores das terras raras já refinadas é que o governo não teve uma regulação mais rígida em relação à poluição emitida pela mineração das terras raras e seus resíduos e gases tóxicos. E como consequência, a região de Bayan Obo também é conhecida por seus recursos naturais como solo e lagos terem em sua constituição partículas de metais pesados e radioativos, ar poluído e arsênio, que pode levar a lesões na pele, náuseas, tontura, enxaqueca e artrite [20].

A partir desses preços mais baixos no mercado internacional de terras raras,

empresas fora da China eram incapazes de competir com valores tão baixos, o que as levou à falência, como é o caso da *Molybdenum Corporation of North America*. Dessa forma, a partir da década de 1990, a China começou a representar uma fatia relevante da produção de terras raras, e fração essa que chegou à casa dos 90% na década de 2010 [20].

Com a interrupção do suprimento de terras raras por parte da China, em 2010, quando se deu o conflito das Ilhas Senkaku com o Japão, o mundo inteiro se deu conta da grande dependência do fornecimento de terras raras pela China. Com receios de que isso se repetisse e pudesse ser utilizado como forma de guerra comercial ou mesmo como retaliações, empresas mineradoras surgiram com o propósito de produzir terras raras e suprir a demanda por esses metais críticos e ocupar esse espaço tão dominado pelos chineses.

Nesse contexto, a *Lynas Rare Earths*, empresa australiana, surgiu, justamente com o objetivo de construir relacionamentos com clientes estratégicos fora da China. A companhia minera terras raras em sua planta em Mt. Weld, Austrália, onde realiza a flotação dos componentes, e os transporta para a Malásia, onde termina o processo de refino e separação de terras raras com a lixiviação. Assim, operando mais próximo da Ásia, a comercialização de terras raras é facilitada, já que um de seus principais clientes é o Japão. Adicionalmente a isso, a empresa também tem projetos de construção de novas plantas para aumentar sua capacidade de produção em Kalgoorlie, Austrália, e nos Estados Unidos, no estado do Texas, cuja planta será específica para a separação de terras raras pesadas [6].

No ano de 2022, a Lynas foi responsável pela produção de 15,97 mil toneladas de elementos de terras raras, sendo 5,88 mil toneladas de neodímio-praseodímio (NdPr). Em Mt. Weld, a companhia também possui projetos para aumentar sua capacidade de produção de NdPr de 7 para 12 mil toneladas, com a matriz energética passando de diesel para gás e energia renovável híbrida. E para essa finalidade, investimentos nessas plantas serão da ordem de 500 milhões de dólares australianos. E, para todos os seus projetos, a companhia espera desembolsar 600 milhões de dólares australianos em 2023 e em 2024, totalizando 1,2 bilhões [40].

Uma grande vantagem da mina de Mt. Weld é seu teor de terras raras, que corresponde a 8,3% de TREO (*total rare earth oxides*, ou total de óxidos de terras

raras). Segundo Daniel Havas, vice-presidente e diretor de relações com investidores da empresa, esse teor de terras raras é um dos grandes fatores que tornam um projeto de mineração economicamente viável. O diretor inclusive mencionou que projetos em que os teores de terras raras são abaixo de 4,5% a companhia nem sequer considera realizar, isso porque aumentaria bastante a dificuldade de mineração, flotação, lixiviação e refino de terras raras, o que tornaria o processo muito mais caro e ineficiente [6].

A Figura 2.12 mostra as diferentes localizações onde a Lynas atua. À esquerda, na parte de cima da imagem, podemos visualizar a mina de Mt. Weld, à direita, a instalação da Malásia, onde as terras raras são refinadas, e abaixo, a planta de Kalgoorlie, que ainda está entrando em operação, e sendo construída.



Figura 2.12: Plantas em que a Lynas Rare Earths opera [40].

Cabe ressaltar que mesmo com esse plano de diversificação e afastamento das cadeias produtivas chinesas, a Lynas ainda tem como clientes empresas chinesas. Isso porque a cadeia é tão concentrada na China, com quase 90% do mercado de ímãs, por exemplo, que não existem clientes marginais que tenham demanda de terras raras refinadas. Portanto, esse projeto de expandir sua

capacidade produtiva é diretamente dependente da premissa de que outras empresas e países, para reduzir a influência e subordinação à China, irão desenvolver suas próprias cadeias para suprimento de terras raras, ímãs e entre outros produtos provenientes destes materiais [6].

Além disso, a Lynas também se destaca pelo fato de que é uma das únicas companhias que foi bem-sucedida na separação das terras raras. Após o choque de 2010, que desestabilizou o mercado global de terras raras, inúmeros projetos para a mineração dos elementos surgiram ao redor do mundo. Entretanto, como já foi explicitado até aqui, a separação de terras raras é um processo extremamente complexo, tendo inúmeros processos para realizar sua flotação, lixiviação e refino, que também tem como produtos secundários e resíduos metais pesados e elementos radioativos e poluentes que podem afetar o meio ambiente adjacente ao local de mineração. Junto ao fato de que o mercado é altamente competitivo por conta dos baixos preços realizados pelos chineses, é quase impraticável e insustentável uma empresa conseguir ter sucesso nesse setor. Sendo assim, a Lynas é uma das poucas empresas que foram capazes de prosperar.

Outra empresa que obteve êxito, mas que iniciou suas operações posteriormente à instabilidade de 2010 foi a MP Materials, que foi estabelecida em 2017 após a aquisição da mina de Mountain Pass, localizada no estado da Califórnia, nos Estados Unidos, onde a Molycorp operou durante o século anterior. Desde então, a empresa se tornou a maior produtora de terras no hemisfério norte fora da China.

Após a compra dos direitos para operar em Mountain Pass, a *MP Materials* implementou um programa de desenvolvimento de terras raras constituído por três estágios. O Estágio 1 foi desenvolvido para restabelecer e escalar a produção de concentrados de terras raras nas operações da companhia por meio da flotação. O Estágio 2 tem o propósito de avançar mais um passo na cadeia produtiva das terras raras, para que o refino seja feito, e, portanto, seja desenvolvido um processo para a separação individual de cada elemento de terras raras, através da lixiviação e processos mais eficientes. E, por fim, o Estágio 3 tem o objetivo de reconstituir toda a cadeia de produção de terras raras, aumentando ainda mais a verticalização da MP, e a desenvolvendo para a manufatura de ligas e ímãs de terras raras, assim como aumentar a capacidade de reciclagem desses materiais [7].

Atualmente a MP se encontra no Estágio 2 de seu processo de desenvolvimento. Em 2022, a empresa produziu um total de 42,5 mil toneladas de concentrados de terras raras, o que representa algo em torno de 22% do mercado de óxidos de terras raras [41].

Desde a sua criação em 2010, a empresa já desembolsou mais de 2 bilhões de dólares. Isso para justamente trazer de volta aos Estados Unidos uma maior independência em relação ao suprimento de terras raras. E cabe destacar que as regulações governamentais são mais rígidas quanto à produção secundária e emissão de substâncias poluentes ao meio ambiente, o que torna seus processos de separação mais ambientalmente amigáveis, além de suas plantas também terem sido desenvolvidas para utilizarem menos água e serem capazes de reutilizá-la [41].

A MP tem um plano para desenvolver uma segunda planta que é localizada em Fort Worth, Texas. Essa instalação será construída para dar continuidade ao Estágio 3 do seu programa de crescimento, sendo capaz de realizar a separação de terras raras, a partir dos concentrados produzidos em Mountain Pass e fazer a manufatura de ligas metálicas e ímãs contendo terras raras. Inclusive, a MP tem um contrato de longo prazo com a *General Motors*, uma das maiores empresas fabricantes de carros no mundo, para o fornecimento de ímãs permanentes para a construção de motores de carros elétricos [7].

A Figura 2.13 ilustra as instalações de Mountain Pass. Podemos observar as unidades de tritramento, flotação, secagem e separação. E vale destacar a integração dentro da mina de Mountain Pass, visto que, a água recuperada na secagem das terras raras após a flotação é reutilizada, reduzindo o desperdício de recursos.



Unidade de Trituração



Moagem e Flotação



Unidade de Secagem e Resíduos



Instalação de Separação de Terras Raras

Figura 2.13: Instalações na mina de Mountain Pass [42].

Já a Figura 2.14 mostra a unidade sendo construída em Fort Worth, no estado do Texas. Enquanto os Estágios 1, com a concentração de terras raras, e 2, com a lixiviação e separação dos elementos se dando em Mountain Pass, a cadeia da companhia continua em Fort Worth, onde ligas metálicas de terras raras, assim como a fabricação de ímãs de neodímio-ferro-boro será realizada. A MP espera produzir, no Estágio 2, cerca de 20 mil toneladas de terras raras refinadas, sendo aproximadamente 6 mil toneladas de NdPr, enquanto que no Estágio 3, visa fabricar 1000 toneladas de ímãs por ano, o que seria suficiente para a produção de 500 mil motores de carros elétricos por ano [41].



Figura 2.14: Instalação de Fort Worth da MP Materials [43].

Semelhante a Lynas, a MP Materials também tinha até pouco tempo atrás um acordo de venda de seu concentrado de terras raras principalmente para a China. Inclusive, foi justamente a *Shenghe Resources*, uma das empresas líderes do setor, que comprava os produtos da MP, para então, revender os concentrados no mercado chinês, para posterior refino e separação dos elementos. A relação entre as duas empresas teve origem em 2017, quando após a aquisição de Mountain Pass, a Shenghe entrou com um pré-pagamento para ajudar a financiar os inícios das operações da MP. Assim, firmou-se um contrato entre as duas companhias estabelecendo as condições de compra e venda de terras raras por parte da MP. Esse acordo esteve vigente desde 2017 até 2022, e a MP não se compromete mais a vender a maior parte de seu concentrado para a Shenghe com descontos, e está livre para comercializar seus produtos com qualquer empresa [7].

A Figura 2.15 mostra algumas das principais empresas chinesas mineradoras de terras raras e seu nível de verticalização, ou seja, até que ponto da cadeia produtiva elas atingem. Com a China Northern Rare Earth Group sendo capaz de desenvolver o processo inteiro, desde a mineração das terras raras até a produção de ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro. Mais abaixo na imagem podemos ver onde a Lynas e a MP Materials estão posicionadas, entretanto, a MP tem a intenção de se verticalizar mais até a manufatura dos ímãs, enquanto a Lynas ainda depende de clientes que sejam capazes de fabricar ligas metálicas de terras raras ou seus ímãs permanentes.



Figura 2.15: Empresas mineradoras de terras raras e seu nível de verticalização [44].

Como a produção não só de elementos de terras raras separadas, mas como as ligas e ímãs são de interesse direto do governo americano, a MP, assim como a Lynas com suas operações se iniciando nos Estados Unidos, foram concedidas com subsídios do governo por meio de redução de impostos e investimentos diretos do Departamento de Defesa americano em seu desenvolvimento das plantas de produção de terras raras [7]. E isso ilustra a preocupação do governo americano em conseguir diversificar sua oferta de terras raras para ser menos dependente dos chineses, e não é à toa que ele conseguirá incentivar as duas maiores empresas produtoras de terras raras no mundo fora da China para território estadunidense.

Entretanto, apesar de apenas a Lynas e MP Materials estarem operando, no momento, fora de território chinês nesse mercado de mineração e separação de terras raras, outras empresas também estão se aventurando no setor tentando aproveitar o momento de desglobalização e diversificação de cadeias de fornecimento para fora da China. Essas empresas são conhecidas como juniores de terras raras, porque ainda não estão completamente em operação, mas já realizando investimentos para poder atender a demanda futura de terras raras nessa ideia de que a China atenderá majoritariamente o seu próprio mercado interno, fazendo com que haja escassez desses elementos e seus derivados no resto do mundo.

Nesse contexto, uma das empresas que se destaca é a *Pensana PLC*. A empresa tem sua sede na Inglaterra, em Saltend, onde será realizada o refino das terras raras, e o concentrado virá de sua mina localizada em Longonjo, na Angola. Dentro do planejamento da companhia, após a extração e concentração das terras raras em Longonjo, os produtos serão transportados de lá até o porto, em Lobito, por meio de uma ferrovia de 320 quilômetros de extensão. De lá, as matérias primas serão levadas por transporte marítimo até Saltend, onde serão refinadas e comercializadas. A Figura 2.16 mostra o trajeto que as terras raras fariam da mina de Longonjo até o porto de Lobito, para depois serem transportadas para o Reino Unido [45].



Figura 2.16: Projeto proposto pela Pensana para a mineração de terras raras na Angola [45].

A Pensana acredita que até 2025 é capaz de produzir cerca de 12,5 mil toneladas de elementos de terras raras, sendo que 4,5 a 5 mil toneladas serão de neodímio-praseodímio, o que pode representar algo em torno de 5% do mercado global em 2025 [45].

A empresa britânica tem a vantagem de que boa parte da infraestrutura de Angola já está completa e funcional. Isso porque os chineses construíram a ferrovia que liga Longonjo ao porto de Lobito, chamada de Ferrovia de Benguela. Os chineses investiram cerca de 1,8 bilhões de dólares nesse projeto. E o porto de Lobito foi reformado pelo próprio governo angolano, com investimentos na casa de 2 bilhões de dólares, tornando-o em um terminal capaz de operar contêineres com cargas secas [45].

A companhia europeia, ao contrário de suas concorrentes, espera desembolsar em investimentos uma quantia bem inferior quando comparada a Lynas e a MP Materials. Enquanto a australiana já alocou algo superior a 1,5 bilhões de dólares americanos, e a MP, mais de 2 bilhões, para desenvolver a produção de

terras raras refinadas, a Pensana estima despende algo inferior a 500 milhões de dólares para produzir cerca de 4,5 mil toneladas de NdPr [46].

Entretanto, já em 31 de março de 2023, a companhia anunciou que precisaria de um maior financiamento para poder cumprir com o pagamento de fornecedores e demais credores, o que levantou um sinal amarelo para a sua capacidade de execução e para o início de sua produção de terras raras. Não é à toa que as ações da companhia, que é listada na bolsa de valores de Londres, caíram 30% nesse dia [47].

Esse acontecimento reforça o ponto de que conseguir ter sucesso nesse mercado é uma tarefa extremamente difícil. Em conversa com Daniel Havas, da Lynas, o executivo comentou sobre as dificuldades que enfrentaram para conseguir produzir as terras raras refinadas na Malásia. Isso porque cada mineral de uma determinada mina de uma certa geografia, reage de forma diferente para a separação das terras raras, e isso levou cerca de 3 anos para conseguirem aperfeiçoar. Além disso, mencionou também o grande domínio dos chineses nesse mercado, que não abrem informações sobre seus estudos e desenvolvimentos no segmento, e também tentaram, inicialmente, boicotar, através do seu grande controle de preços dessas commodities, a Lynas. Tendo em vista também que a separação de terras raras é um ramo de capital intensivo, é difícil de se dizer se empresas juniores de terras raras como a Pensana terão sucesso.

Nesse contexto, o que especialistas, consultores e profissionais da área acreditam é que no curto e médio prazo, a produção de terras raras ainda será amplamente dominada pela China (a não ser que haja cooperação por lado dos chineses, e o que parece bastante improvável), por ter se desenvolvido e se preparado para a produção desses elementos muito antes do que qualquer outro país. Veem que a participação do país asiático no mercado pode até cair, mas ainda serão os grandes competidores a serem batidos. Comparam até que, por mais que o Reino Unido tenha sido pioneiro na produção de energia nuclear, o país não deu continuidade a esse processo, perdendo com o tempo mão de obra qualificada e especializada para realizar a atividade [48].

Na próxima sessão, o panorama geral das terras raras será abordado de acordo com a opinião e pesquisas de profissionais e especialistas que atuam na área para entender como o mundo será capaz de minerar, refinar e produzir

materiais a partir de elementos de terras raras.

2.6 PANORAMA DAS TERRAS RARAS PARA O FUTURO

Uma das principais razões do grande interesse na produção e cadeia logística das terras raras são por conta de ímãs permanentes de alta performance. Não é à toa que nas apresentações das companhias mineradoras de terras raras elas destacam a sua capacidade de produção de elementos de terras raras, mas também destacam seu potencial de produção de NdPr, que é fundamental na manufatura de ímãs.

Os ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB) são os mais fortes produzidos no mercado. Isso porque possuem um alto grau de magnetização e coercividade. A coercividade é a capacidade de um material de se manter magnetizado ao aplicar uma dada força desmagnetizadora. E isso é consequência da estrutura cristalina tetragonal dos átomos do ímã de NdFeB, mantendo fortemente suas direções de campo magnético interno [49].

A força dos ímãs são medidas de acordo com sua densidade de fluxo magnético (B) e a força de seu campo magnético (H) para desmagnetizar um dado ímã. A partir desse produto, chega-se ao produto energético máximo de um ímã (BHmax), que é medido em Mega Gauss Oersteds [50]. Os ímãs de NdFeB tem um BHmax que varia entre 30 a 55 MGOe, sendo os valores mais altos de qualquer ímã permanente produzido. Além disso, os ímãs também são classificados de acordo com a temperatura máxima em que conseguem operar sem se desmagnetizar. Por exemplo, um ímã classificado como N35, tem 35 MGOe de força e opera até a 80°C [51].

A Figura 2.17 mostra uma tabela com a classificação de ímãs produzidos pela companhia chinesa JL Mag, que é uma das grandes desenvolvedoras desses materiais no país asiático. Podemos identificar a temperatura máxima que esses ímãs são capazes de atuar, assim como suas forças magnéticas.

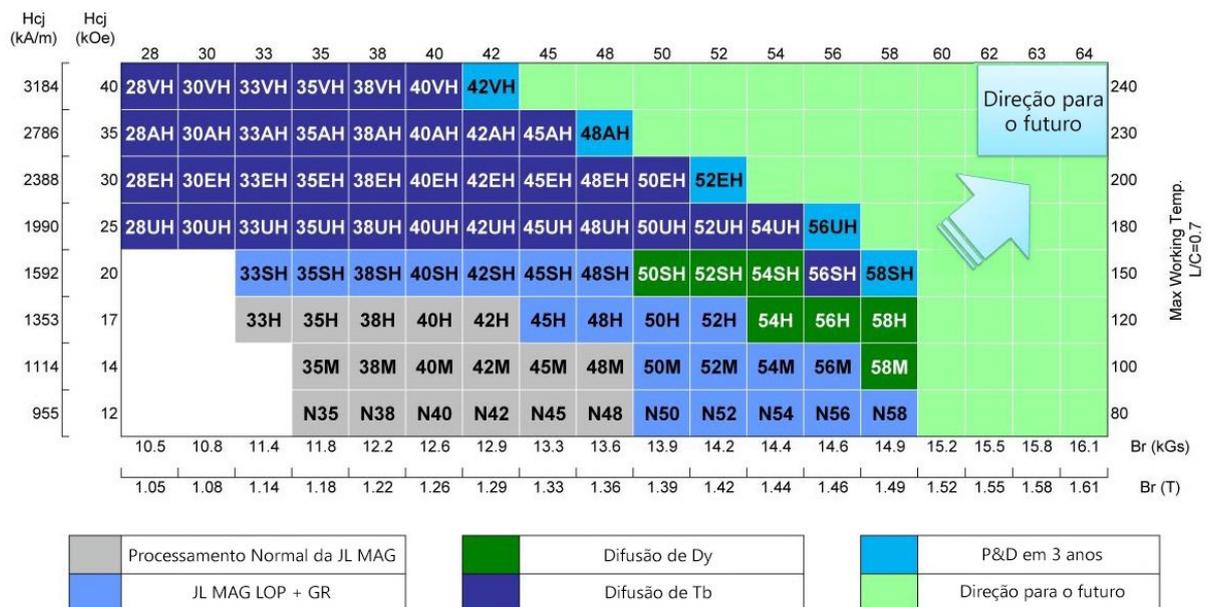


Figura 2.17: Classificações de ímãs produzidos pela JL Mag [52].

Segundo a Hastings, empresa australiana que também pretende iniciar projetos para a produção de terras raras, a demanda por ímãs de NdPr irá crescer em ritmo mais acelerado do que a oferta que empresas mineradoras conseguem produzir, causando um déficit no mercado, como indicado na Figura 2.18. Podemos observar que havia equilíbrio entre a oferta e demanda até a pandemia de Covid-19, em que após esse período, a China diminui suas cotas de exportação de terras raras, diminuindo sua disponibilidade global. Isso porque o país asiático irá voltar sua produção para o mercado interno, para poder atingir a meta de energia limpa.

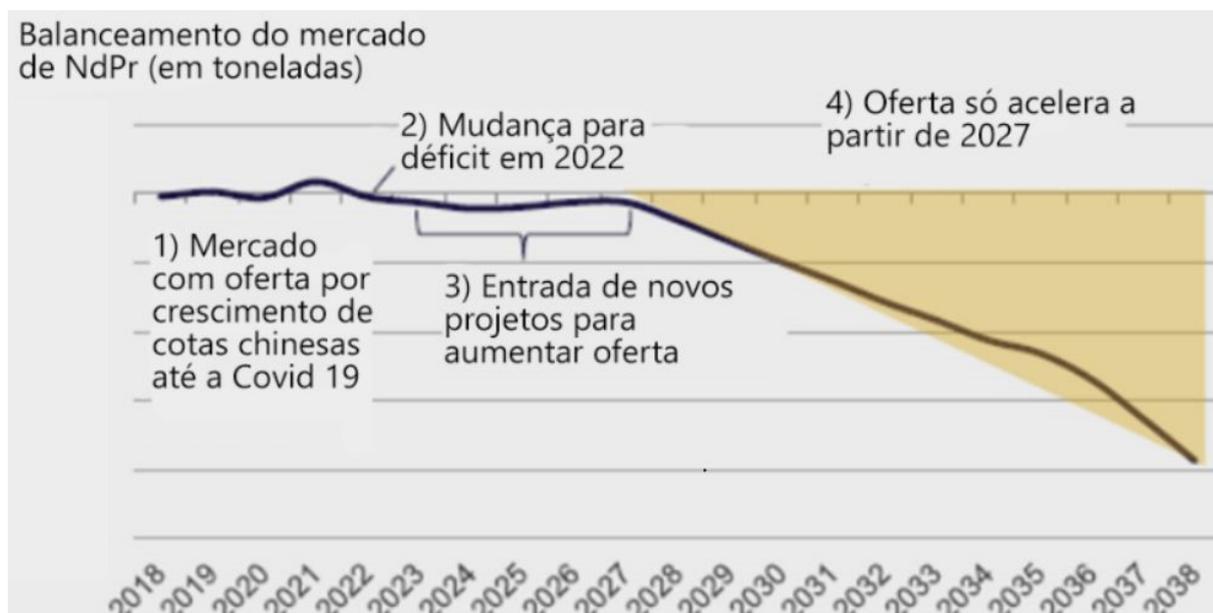


Figura 2.18: Demanda e oferta de ímãs de NdPr para os próximos anos [53].

E para atender a essa crescente demanda para o futuro, novos projetos como os da Pensana e Hastings precisam ser bem sucedidos. Como podemos visualizar na Figura 2.19, da empresa australiana Arafura, que também tem a intenção de minerar essas matérias primas estratégicas, até 2030, serão necessários novos projetos capazes de produzir cerca de 50 mil toneladas de NdPr, além das 55 mil já produzidas em 2021 pela China, Lynas, MP e entre outros produtores menores. Além disso, vale destacar a aplicação final desses ímãs, sendo mais da metade dessa demanda para o transporte e energia eólica [54].

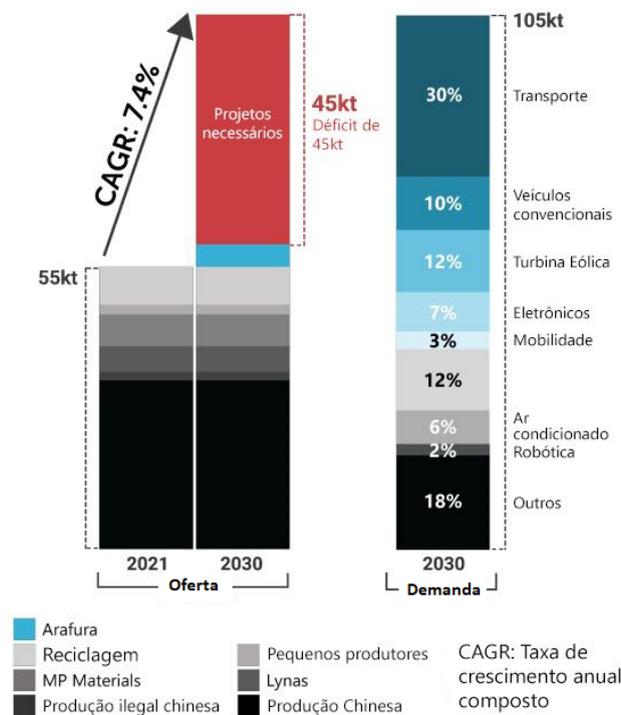


Figura 2.19: Cenário de oferta e demanda de NdPr em 2021 e 2030 [54].

Segundo Ross Embleton, analista da consultoria Wood Mackenzie, a oferta de terras raras ao redor do mundo se diversificará, porém ainda com grande parte da produção sendo proveniente de lá. Como podemos ver na Figura 2.20, a fatia de mercado chinesa para a mineração de terras raras, em 2030, corresponderá a algo em torno de 55%, pelo refino, a aproximadamente 70% e quanto à reciclagem desses materiais, 85%. Portanto, o cenário ainda aponta uma ampla dominância chinesa para a próxima década, mesmo com essa redução de dependência da

produção da China [24].



Figura 2.20: Cenário de oferta de terras raras para 2030 [24].

Vale ressaltar o ponto de que a reciclagem de terras raras ainda é bastante incipiente em todo o mundo. Isso porque por mais que seu uso e sua demanda seja bastante ampla, a quantidade de terras raras em ímãs e demais produtos, é bem baixa, o que torna a recuperação e reciclagem desses elementos uma tarefa árdua. Para se ter uma ideia de escala, diferentemente de baterias de carros elétricos, que são grandes e com alto valor agregado, um motor tem cerca de 1 a 3 kgs de ímãs permanentes, que acaba sendo um volume significativamente menor [48].

Outro desafio para a reciclagem de terras raras é conseguir centralizar a concentração de ímãs para essa finalidade através de veículos elétricos e turbinas eólicas, principalmente, uma vez que são as principais aplicações para o futuro. Além disso, deve ser levado em consideração que esses processos de separação possuem custos bastante elevados, sendo necessário fundir o motor do carro elétrico, e depois realizar a separação de terras raras. Assim, tendo custos energéticos e também relacionados à emissão de carbono [48].

Logo, para que esse grande obstáculo seja endereçado, incentivos governamentais também precisam ser estabelecidos. Junto a isso, não se pode descartar os avanços tecnológicos que podem favorecer todos esses processos relacionados às terras raras para uma maior eficiência desde sua mineração, refino e reciclagem. E dessa forma, a perspectiva para os próximos 5 a 10 anos quanto a reciclagem ainda é de que provavelmente não haverá uma quantidade relevante de veículos elétricos ou mesmo de turbinas eólicas que serão descomissionados para

reciclagem. Em 2015, haviam cerca de 3200 turbinas eólicas offshore, ou seja, que estavam em alto mar, que serão descomissionadas somente entre 2025 e 2030, e portanto, ainda com quantidades quase nulas de ímãs de terras raras para a finalidade de reciclagem, que é uma tecnologia bastante recente. Assim, a quantidade de terras raras a serem recicladas no médio prazo ainda acaba sendo bastante irrelevante. E vale destacar, que uma das principais fontes de ímãs para reciclagem são provenientes das turbinas eólicas, que têm uma vida útil de 19 a 25 anos [48].

Em conversa com Martin Sheehan, responsável pelas relações com investidores da MP Materials, o executivo diz que para os próximos 5 a 10 anos não vê um substituto efetivo para os ímãs de NdPr, isso porque são os mais eficientes e fortes do mercado. Algumas opções que ele enxerga são ímãs de samário-cobalto (SmCo), sendo o samário também um elemento de terras raras, porém mais pesado e mais caro, e ímãs de ferrita, que também são mais pesados para uma mesma quantidade de força magnética quando comparado a um ímã de NdPr. Ele ainda ressalta que para turbinas eólicas em alto mar não tem como fugir da utilização de NdPr, e que, para sistemas de som, outros tipos de ímã tem uma qualidade sonora pior.

Sheehan ainda aponta que, de início, a qualidade dos ímãs que a MP produzirá para a GM não serão tão boas quanto a que os chineses são capazes de produzir, apenas com o tempo que conseguirão aperfeiçoar essa manufatura, mas diz que essa diversificação e menos dependência de produtos chineses já é um grande passo. E, por serem menos competitivos nesse início, aponta que os subsídios do governo americano como sendo bastante relevantes para o desenvolvimento do mercado no mercado ocidental.

Em linha com essa ampliação de produção global de terras raras, no dia 13 de janeiro de 2023, a companhia LKAB, estatal da Suécia, divulgou ter encontrado o maior depósito de terras raras do continente europeu, estimado em cerca de 1 milhão de toneladas de terras raras. Entretanto, por ter uma alta complexidade, como já explicitado, os executivos da empresa dizem que a produção teria, de fato, início somente daqui 10 a 15 anos, isso por conta de autorização das autoridades europeias para início de exploração e desenvolvimento de plantas de separação levariam um tempo considerável para serem finalizados [55].

Em relação ao meio ambiente, e novos projetos que vem surgindo, Thomas Kruemmer, diretor da *Ginger International Trade & Investment*, diz ver os Estados Unidos e Austrália como sendo mais proativos quanto à mineração de terras raras, enquanto vê os países europeus mais passivos. Além disso, ainda fala que os países da União Europeia não têm muito interesse em realizar esses projetos em seus territórios, dada a poluição e contaminação que pode ser causada, e não é à toa que procuram realizar esses projetos fora do continente, como na África. Já os americanos e australianos ele vê com bons olhos o progresso realizado até aqui, e aponta que novas tecnologias podem auxiliar na obtenção de terras raras de maneira mais sustentável e menos poluente [3].

Assim sendo, as perspectivas para a produção global de terras raras, como já foi destacado, é de que a China ainda continuará a ser uma grande potência nesse mercado. E sem que haja cooperação por parte dos chineses, não parece que a oferta desses elementos será diversificada ao redor do mundo. E portanto, para conseguir atender a essa grande demanda, inúmeros projetos ao redor do mundo, como já explicitados, estão sendo iniciados. O grande desafio é ser capaz de financiar esses projetos, uma vez que são de capital intensivo. E, além disso, para serem bem sucedidos e competitivos no mercado, é provável que no início desses projetos, terão a necessidade de suporte governamental, caso contrário, podem passar por dificuldades para dar sequência e continuidade ao andamento da produção de terras raras.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando em consideração o que foi pontuado até aqui, ainda temos um cenário incerto, em que guerras militares, comerciais e tecnológicas podem moldar como o futuro do mundo será construído. Em uma conjuntura sem grandes disrupções e eventos geopolíticos bruscos entre principalmente, Estados Unidos e China, que são as duas maiores economias globais, e sendo também, a nação que busca diversificar sua cadeia produtiva em um contexto de desglobalização, e o país que domina amplamente o mercado de terras raras, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- A China continuará sendo uma potencial no mercado de terras raras, porém, com maior distribuição de oferta entre os países. A Austrália e os Estados Unidos são os candidatos mais prováveis de serem os competidores dos chineses.
- A demanda de terras raras continuará crescendo de forma exponencial, dada suas aplicações para energia eólica, carros elétricos, armamento como mísseis e aviões e entre outras aplicações.
- Em um futuro próximo, não há nenhuma tecnologia que possa substituir os ímãs de NdFeB, e portanto, sua exploração e demanda se manterá estável.
- Para o sucesso de empresas e governos em diversificar a cadeia produtiva de terras raras, inicialmente, os governos terão que dar incentivos e subsídios para que as empresas consigam competir ao alto nível de qualidade de produtos chineses, que já estão consolidados há décadas.
- Em relação ao meio ambiente, já estão sendo aplicadas tecnologias que conseguem reaproveitar reagentes das reações e a água já utilizados previamente na separação de terras raras, e a tendência é que isso continue, com aumento da eficiência dos processos.

4 METODOLOGIA

Para a discussão e apresentação dos estudos acima, foram levados em consideração artigos científicos, notícias de veículos mais voltados à economia, em geral, relatórios tanto do Departamento de Energia dos Estados Unidos, quanto relatórios de resultados trimestrais e anuais de empresas listadas nos EUA (MP Materials), Austrália (Lynas) e Reino Unido (Pensana), revista de audiência do senado brasileiro, e entrevistas de pesquisadores e consultores de terras raras. Essas entrevistas foram gravadas e podem ser reproduzidas pelo YouTube ou então foram concedidas por parte de executivos da Lynas e MP Materials para conversar com o aluno Leonardo Nishioka que estava à trabalho na empresa CL4 Capital.

5 REFERÊNCIAS

[1] US Department of Energy. Rare Earth Permanent Magnets - Supply Chain Deep Dive Assesment, 2022. Disponível em:

<<https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/Neodymium%20Magnets%20Supply%20Chain%20Report%20-%20Final.pdf>>. Acesso em: 20/06/2023.

[2] Tabela Periódica: Terras Raras, 2017. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Tabela-Periodica-terras-raras_fig1_320047542>. Acesso em: 20/06/2023.

[3] Kruemmer, T. Outlook for the Rare Earths - Ginger International Trade & Investment, 2022. Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=wdfP7USVOMc&ab_channel=121MiningInvestmentTV> . Acesso em 20/06/2023.

[4] Haque, N. et al. Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, Uses, Sustainability and Environmental Impact, Resources, 2015, Pages 615-635, ISSN 2079-9276, <https://doi.org/10.3390/resources3040614>.

[5] US Department of Energy. Critical Minerals And Materials, 2022. Disponível em:

<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/01/f82/DOE%20Critical%20Minerals%20and%20Materials%20Strategy_0.pdf>. Acesso em: 20/06/2023.

[6] Lynas Rare Earths - Annual Report 2022. Disponível em:

<<https://wcsecure.weblink.com.au/pdf/LYC/02581455.pdf>>. Acesso em: 20/06/2023

[7] MP Materials - Annual Report 2021. Disponível em:

<<https://d18rn0p25nwr6d.cloudfront.net/CIK-0001801368/77b2894e-b746-43c5-938a-a3f524823baa.pdf>>. Acesso em: 20/06/2023.

[8] Kluth, A. The Washington Post, 2023. China's Got the Dysprosium. That's a Problem. Disponível em:

<https://www.washingtonpost.com/business/energy/chinas-got-the-dysprosium-thats-a-problem/2023/01/09/acb01e22-8fe3-11ed-90f8-53661ac5d9b9_story.html>. Acesso em: 20/06/2023.

[9] Deaux, J. Bloomberg, 2021. China Cements Rare Earth Dominance With New Global Giant. Disponível em:

<<https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-12-23/china-cements-rare-earths-dominance-with-new-global-giant#xj4y7vzkg>>. Acesso em: 20/06/2023.

[10] LePan, N. Visual Capitalist, 2021. Rare Earth Elements: Where in the World Are They?. Disponível em:

<<https://www.visualcapitalist.com/rare-earth-elements-where-in-the-world-are-they/>>. Acesso em: 20/06/2023.

[11] Gleeson, D. International Mining, 2020. Saskatchewan to create Canada's first rare

earth processing facility at SRC. Disponível em:
<<https://im-mining.com/tag/rare-earth-element/>>. Acesso em: 20/06/2023.

[12] Gschneidner, K. Britannica. Rare Earth Elements - Properties of the Metals. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/rare-earth-element/Elastic-properties>>. Acesso em: 23/07/2023.

[13] Marion, C., Li, R., Waters, K. A Review of Reagents Applied to Rare-Earth Mineral Flotation, *Advances in Colloid and Interface Science* 279, 2020, Pages 3-25, <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102142>.

[14] Shetty, S. et al. Foam flotation of rare earth elements by conventional and green surfactants, *Minerals Engineering* 158, 2020 Pages 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106585>.

[15] Stopic, S., Friedrich, B. *Advances in Understanding of the Application of Unit Operations in Metallurgy of Rare Earth Elements*, MDPI, 2021, Pages 1-20, <https://doi.org/10.3390/met11060978>.

[16] Ciminelli, V. *Mineralis, Hidrometalurgia*, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006, Páginas 158-174. Disponível em:
<<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1288/1/Tend%C3%AAnciasParte2.4.pdf>>. Acesso em: 20/06/2023.

[17] Peelman, S. et al. Leaching of Rare Earth Elements: Review of Past and Present Technologies, *Delft University of Technology*, 2016, Pages 319-333, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802328-0.00021-8>.

[18] Klinger, J. A historical geography of rare earth elements: From discovery to the atomic age, *The Extractive Industries and Society* 2, 2015, Pages 572-580, <https://doi.org/10.1016/j.exis.2015.05.006>.

[19] Bayan Obo world biggest rare earths mine, Baotou, Inner Mongolia, China. Disponível em:
<<https://www.ejAtlas.org/conflict/bayan-obo-world-biggest-rare-earths-mine-baogang-group-baotou-inner-mongolia-china>>. Acesso em: 20/06/2023.

[20] Gramling, C. *Science News*, 2023. Rare earth mining may be key to our renewable future. But at what cost?. Disponível em:
<<https://www.sciencenews.org/article/rare-earth-mining-renewable-energy-future>>. Acesso em: 20/06/2023.

[21] *Revista de Audiências Públicas do Senado Federal - Terras raras: Estratégia Para o Futuro*, 2013.

[22] *Science History. The History and Future of Rare Earth Elements*. Disponível em:
<<https://www.sciencehistory.org/learn/science-matters/case-of-rare-earth-elements-history-future>>. Acesso em: 20/06/2023.

[23] Wortzel, L., Selley, K. *Japan Forward*, 2021. Breaking China's Stranglehold on the Rare

Earth Elements Supply Chain. Disponível em:
<<https://japan-forward.com/breaking-chinas-stranglehold-on-the-rare-earth-elements-supply-chain>>. Acesso em: 20/06/2023.

[24] Rare Earths Panel: Discussing the Trends and Dynamics for These Vital Elements, 2022. Disponível em:
<https://www.youtube.com/watch?v=eAwVcBC5HL8&ab_channel=121MiningInvestmentTV>. Acesso em: 20/06/2023.

[25] Woodall, T. S&P Global, 2020. Coronavirus disruption brings China's rare earth metals monopoly into focus. Disponível em:
<<https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/coronavirus-disruption-brings-china-s-rare-earth-metals-monopoly-into-focus-58151160>>. Acesso em: 20/06/2023.

[26] OPEC. OPEC Member Countries. Disponível em:
<https://www.opec.org/opec_web/en/about_us/25.htm>. Acesso em: 20/06/2023.

[27] Tavaga Invest. OPEC supply cut: how will it impact oil prices?, 2023. Disponível em:
<<https://tavaga.com/blog/opec-supply-cut-how-will-it-impact-oil-prices/>>. Acesso em: 20/06/2023.

[28] Gasparetto, A. Info Escola. Crise do Petróleo. Disponível em:
<<https://www.infoescola.com/economia/crise-do-petroleo/>>. Acesso em: 20/06/2023.

[29] OilField Wiki. Seven Sisters (Oil Companies). Disponível em:
<[http://www.oilfieldwiki.com/wiki/Seven_Sisters_\(oil_companies\)](http://www.oilfieldwiki.com/wiki/Seven_Sisters_(oil_companies))>. Acesso em: 20/06/2023.

[30] Energy Education. Oil crisis of the 1970s. Disponível em:
<https://energyeducation.ca/encyclopedia/Oil_crisis_of_the_1970s>. Acesso em: 20/06/2023.

[31] Stoodi, 2020. Crise do Petróleo: o que foi, fases e consequências. Disponível em:
<<https://blog.stoodi.com.br/blog/historia/crise-do-petroleo-o-que-foi/>>. Acesso em: 20/06/2023.

[32] Blas, J., Farchy, J. The World For Sale. Oxford: Oxford University Press, 2021.

[33] Trevizan, K. G1, 2019. Guerra comercial: entenda as tensões entre China e EUA e as incertezas para a economia mundial. Disponível em:
<<https://g1.globo.com/economia/noticia/2019/08/16/guerra-comercial-entenda-a-piora-das-tensoes-entre-china-e-eua-e-as-incertezas-para-a-economia-mundial.ghtml>>. Acesso em: 20/06/2023.

[34] FIA Business School, 2020. Guerra comercial: o que significa, impactos e últimas notícias. Disponível em: <<https://fia.com.br/blog/guerra-comercial/>>. Acesso em: 20/06/2023.

[35] Disis, J. CNN Brasil, 2020. Estamos em meio a uma nova guerra mundial: a da tecnologia. Disponível em:
<<https://www.cnnbrasil.com.br/economia/estamos-em-meio-a-uma-nova-guerra-mundial-a-d>>

[a-tecnologia/](#)>. Acesso em: 20/06/2023.

[36] Bertolini, R. InfoMoney, 2022. A guerra dos semicondutores: as razões da disputa entre EUA e China. Disponível em:
<<https://www.infomoney.com.br/stock-pickers/a-guerra-dos-semicondutores-as-razoes-da-disputa-entre-eua-e-china-e-as-oportunidades-no-radar/>>. Acesso em: 20/06/2023.

[37] Barella, J. NeoFeed, 2023. Energia solar é a nova arma chinesa na guerra tecnológica com os EUA. Disponível em:
<<https://neofeed.com.br/blog/home/energia-solar-e-a-nova-arma-chinesa-na-guerra-tecnologica-com-os-eua/>>. Acesso em: 20/06/2023.

[38] Insper, 2022. Impactos de geopolítica nos mercados agrícolas. Disponível em:
<<https://www.insper.edu.br/noticias/impactos-da-geopolitica-nos-mercados-agricolas/>>. Acesso em: 20/06/2023.

[39] Tabeta, S. Nikkei Asia, 2023. China weighs export ban for rare earth magnet tech. Disponível em:
<<https://asia.nikkei.com/Spotlight/Supply-Chain/China-weighs-export-ban-for-rare-earth-magnet-tech>>. Acesso em: 20/06/2023.

[40] Lynas Rare Earth Limited FY2022 Results Presentation, 2022. Disponível em:
<<https://wcsecure.weblink.com.au/pdf/LYC/02558710.pdf>>. Acesso em: 20/06/2023.

[41] MP Materials 2022 Annual Report, 2023. Disponível em:
<<https://d18rn0p25nwr6d.cloudfront.net/CIK-0001801368/d13164d6-f197-48e4-a6d6-51cb96f0303d.pdf>>. Acesso em: 20/06/2023.

[42] MP Materials and FVAC Business Merger Conference Call, 2020. Disponível em:
<https://s25.q4cdn.com/570172628/files/doc_presentations/2020.07-MP-Materials-Transaction-Deck.PDF>. Acesso em: 20/06/2023.

[43] MP Materials - Fourth Quarter & Full Year 2022 Results, 2023. Disponível em:
<https://s25.q4cdn.com/570172628/files/doc_presentations/2023/02/MP-4Q22-Earnings-Deck-2-22-23-FINAL.pdf>. Acesso em: 20/06/2023.

[44] Embleton, R. Wood Mackenzie, 2021. Rare Earth Elements: Frequently asked questions. Disponível em:
<<https://www.woodmac.com/news/editorial/rare-earth-elements-frequently-asked-questions/>>. Acesso em: 20/06/2023.

[45] Pensana 2022 Annual Report, 2022. Disponível em:
<<https://pensana.co.uk/wp-content/uploads/2022/10/Pensana-Plc-2022-Annual-Report.pdf>>. Acesso em: 20/06/2023.

[46] Pensana: Independent and Sustainable Rare Earth Production, 2022. Disponível em:
<<https://pensana.co.uk/wp-content/uploads/2022/04/Pensana-Plc-Corporate-Presentation-WBSITE-April-2022.pdf>>. Acesso em: 20/06/2023.

[47] Vardon, E. Market Watch, 2023. Pensana Shares Plummet After Going Concern

Warning. Disponível em:

<<https://www.marketwatch.com/story/pensana-shares-plummet-after-going-concern-warning-d59f576e>>. Acesso em: 20/06/2023.

[48] Rare Earths Outlook Panel, 2022. Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=faxJZci9d64&ab_channel=MinesandMoney>. Acesso em: 20/06/2023.

[49] Magnet Partner. Why Is Neodymium So Magnetic? Disponível em:

<<https://magnetpartner.com/why-neodymium-magnetic#:~:text=power%20is%20unlimited.-,Why%20is%20neodymium%20so%20magnetic%3F,powerful%20magnet%20on%20the%20market>>. Acesso em: 20/06/2023.

[50] ImaShop. Glossário magnético. Disponível em:

<<https://www.imashop.com.br/central-tecnica/glossario#:~:text=O%20produto%20energ%C3%A9tico%20m%C3%A1ximo%20de,gerar%20para%20uma%20determinada%20aplica%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 20/06/2023.

[51] Brand, M. SM Magnetics. Understanding Magnet Grades And Magnet Tables.

Disponível em:

<[https://smmagnetics.com/blogs/news/understanding-magnet-grades-and-magnet-tables#:~:text=The%20most%20common%20grades%20of,N50%2C%20N52%2C%20and%20N55.&text=For%20Samarium%20Cobalt%20\(SmCo\)%20Magnets,number%2C%20the%20stronger%20the%20magnet](https://smmagnetics.com/blogs/news/understanding-magnet-grades-and-magnet-tables#:~:text=The%20most%20common%20grades%20of,N50%2C%20N52%2C%20and%20N55.&text=For%20Samarium%20Cobalt%20(SmCo)%20Magnets,number%2C%20the%20stronger%20the%20magnet)>.

Acesso em: 20/06/2023.

[52] JL Mag. NdFeB Grades Matrix as per Process. Disponível em:

<<https://www.jlomag.com.cn/en/about.php?cid=66>>. Acesso em: 20/06/2023.

[53] Hastings Technology Metals Limited - Enabling Green Technologies, 2021. Disponível em:

<<https://www.investi.com.au/api/announcements/has/bb2da2ab-afa.pdf>>. Acesso em: 20/06/2023.

[54] Arafura Rare Earths Limited - Investor Presentation, 2022. Disponível em:

<<https://wcsecure.weblink.com.au/pdf/ARU/02608215.pdf>>. Acesso em: 20/06/2023.

[55] Press Conference LKAB, 2023. Disponível em: <<https://vimeo.com/785924322>>.

Acesso em: 20/06/2023.