

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

JOÃO PEDRO KATER

**Mineração em águas profundas de terras-raras e a sua importância para a  
transição energética**

São Paulo

2025

JOÃO PEDRO KATER

**Mineração em águas profundas de terras-raras e a sua importância para a  
transição energética**

**Versão Original**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do diploma de Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Franco de Monlevade

São Paulo

2025

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

#### Catálogo-na-publicação

, João Pedro Kater

Mineração em águas profundas de terras-raras e a sua importância para a transição energética / J. P. K. -- São Paulo, 2025.

50 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Mineração 2.Terras-raras 3.Transição Energética I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

Versão corrigida e aprovada pelo orientador.

Eduardo Franco de Monlevade

Prof. Dr. Eduardo Franco de Monlevade

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

PMT 3596 – TRABALHO DE FORMATURA II

AVALIAÇÃO DO TRABALHO PELA BANCA EXAMINADORA

ALUNO: João Pedro Kater

TÍTULO DO TRABALHO: "Mineração em águas profundas de terras-raras e a sua importância para a transição energética"

DATA: 09/12/2025

HORA: 14:00

SALA: Sala de reuniões

AVALIAÇÃO:

nota

Prof. Dr. Eduardo Franco de Monlevade  
Orientador

9,0

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Carina Ulsen

8,5

Prof. Dr. Fernando Jose Gomes Landgraf

8,5

Média final

(8,7)

Prof. Dr. Eduardo Franco de Monlevade  
Orientador

Eduardo Franco de Monlevade

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Carina Ulsen

[Handwritten Signature]

Prof. Dr. Fernando Jose Gomes Landgraf

[Handwritten Signature]

Às pessoas que sabem colocar um sorriso  
no meu rosto, principalmente meus amigos  
e minha família.

## Resumo

Diante do desafio do aquecimento global e da necessidade de substituir combustíveis fósseis por fontes limpas, há uma demanda exponencial por terras-raras, elementos cruciais para tecnologias como turbinas eólicas, veículos elétricos e placas fotovoltaicas. A distribuição desigual desses recursos gerou uma complexa situação geopolítica, onde a China estabeleceu um monopólio prático sobre a extração e o refino, criando dependência em grandes potências consumidoras, como os EUA, União Europeia e Japão, questão essa que é explicada ao longo do texto.

O estudo foca na mineração em águas profundas como uma alternativa estratégica para diversificar o fornecimento de minerais críticos. São analisados os principais depósitos marinhos, como nódulos polimetálicos, crostas de ferromanganês e outros que apresentam quantidades significativas desses elementos.

Além disso são detalhados os desafios técnicos da exploração em um ambiente hostil e inóspito e o arcabouço regulatório, incluindo a atuação da Autoridade Internacional dos Fundos Marinhos (ISA) e da Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar, além de destacar que o maior obstáculo para a mineração comercial em larga escala reside nos significativos impactos ambientais e sociais.

Em conclusão, a mineração em águas profundas é apresentada como uma fronteira estratégica e tecnológica que oferece a promessa de suprimento diversificado, redução de tensões geopolíticas e possíveis vantagens ambientais no ciclo de vida em comparação com a mineração terrestre.

**Palavras-chave:** Elementos Terras-Raras (ETRs); Transição Energética; Mineração em Águas Profundas; Geopolítica

## **Abstract**

Faced with the challenge of global warming and the need to replace fossil fuels with clean energy sources, there is an exponential demand for rare earth elements, which are crucial for technologies such as wind turbines, electric vehicles, and photovoltaic panels. The uneven distribution of these resources has created a complex geopolitical situation, in which China has established a practical monopoly over extraction and refining, generating dependence among major consumer powers such as the United States, the European Union, and Japan, an issue explained throughout the text.

The study focuses on deep-sea mining as a strategic alternative to diversify the supply of critical minerals. It analyzes the main marine deposits, such as polymetallic nodules, ferromanganese crusts, and others that contain significant amounts of these elements.

In addition, the text details the technical challenges of operating in a hostile and inhospitable environment, as well as the regulatory framework, including the role of the International Seabed Authority (ISA) and the United Nations Convention on the Law of the Sea. It also highlights that the greatest obstacle to large-scale commercial mining lies in the significant environmental and social impacts.

In conclusion, deep-sea mining is presented as a strategic and technological frontier that offers the promise of a diversified supply, reduced geopolitical tensions, and potential life-cycle environmental advantages compared to terrestrial mining.

**Keywords:** Rare Earth Elements (REEs); Energy Transition; Deep-Sea Mining; Geopolitics

## **Sumário**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introdução</b>                                   | <b>7</b>  |
| <b>2. Os Elementos Terras-raras (ETRs)</b>             | <b>8</b>  |
| <b>2.1. A Química dos ETRs</b>                         | <b>8</b>  |
| <b>2.2 Abundância e Aplicações</b>                     | <b>9</b>  |
| <b>2.3 Valor Econômico</b>                             | <b>12</b> |
| <b>2.4 Importância Geopolítica</b>                     | <b>13</b> |
| <b>2.4.1. China</b>                                    | <b>14</b> |
| <b>2.4.2. Estados Unidos</b>                           | <b>17</b> |
| <b>2.4.3. Japão</b>                                    | <b>19</b> |
| <b>2.4.4. Brasil</b>                                   | <b>21</b> |
| <b>2.4.5. União Europeia</b>                           | <b>22</b> |
| <b>3. Depósitos Marinhos</b>                           | <b>24</b> |
| <b>3.1. Nódulos Polimetálicos</b>                      | <b>25</b> |
| <b>3.2. Crostas de Ferromanganês</b>                   | <b>27</b> |
| <b>3.3. Lamas Ricas em ETRs</b>                        | <b>28</b> |
| <b>3.4. Sulfetos Polimetálicos Massivos</b>            | <b>31</b> |
| <b>3.5. Depósitos de águas rasas (Placers)</b>         | <b>32</b> |
| <b>4. Mineração</b>                                    | <b>33</b> |
| <b>4.1. Legislação e Governança</b>                    | <b>33</b> |
| <b>4.2. O Processo de Mineração em Águas Profundas</b> | <b>35</b> |
| <b>5. Considerações Finais</b>                         | <b>37</b> |

## 1. Introdução

Diante de um cenário mundial em que o aquecimento global é considerado uma ameaça ao futuro do planeta e da humanidade, esta se vê obrigada a promover uma mudança aos métodos tradicionais de geração de energia, uma vez que a matriz energética mundial é fortemente dependente de fontes não renováveis, como gás natural e combustíveis fósseis. A queima desses combustíveis gera gases de efeito estufa que contribuem para o aquecimento global e para o aumento da poluição do ar, que está relacionado com o aumento de doenças respiratórias, incluindo o câncer de pulmão. Visando alternativas aos métodos tradicionais de geração de energia a fim de minimizar e, se possível no futuro, zerar a emissão de gases de efeito estufa, a sociedade contemporânea se encontra em um início de período de transição energética, no qual fontes de energia limpa, que demonstram ser extremamente necessárias, como a solar e eólica, estão começando a ser amplamente valorizadas e adotadas ao redor do mundo [1].

Com o crescimento do mercado de energia limpa, a demanda e desenvolvimento de novas tecnologias estão em alta, o que acaba por resultar em uma crescente demanda pela matéria-prima de diversos equipamentos como turbinas eólicas, placas fotovoltaicas e veículos elétricos. Uma classe especial de elementos, essenciais para a fabricação dos equipamentos citados, além de serem importantes para o desenvolvimento de alta tecnologia militar e civil são os chamados elementos terras-raras (ETRs), que são definidos como um conjunto de 17 elementos químicos, incluindo a família dos lantanídeos, mais o ítrio (Y) e o escândio (Sc) [2].

A demanda crescente por ETRs empurra o mundo para uma situação complicada, uma vez que estes elementos não estão disponíveis em similares abundâncias para diferentes países o que acaba por gerar um aumento na competição por esses elementos em economias emergentes, como o Brasil, Índia, Indonésia e a China, sendo esta última a que domina a extração, o refino e as pesquisas tecnológicas de ETRs. Devido à essa dominância, relações de dependência são geradas entre países consumidores de ETRs como os Estados

Unidos, União Europeia e Japão com a China, que pode afetar facilmente o fornecimento à esses países a partir de restrições e taxações, como está ocorrendo atualmente com os Estados Unidos. Cenários de incertezas e dependências de fornecimento impulsionam uma busca global por novas alternativas de reservas de ETR, sendo uma delas muito sondada, as reservas minerais presentes no fundo do mar com depósitos do tipo de crostas de ferro manganês, nódulos polimetálicos e sedimentos do fundo oceânico. Alguns tipos de depósitos particularmente chegam a possuir maiores concentrações de ETRs pesados em comparação com os depósitos terrestres [3].

A mineração em águas profundas, contudo, ainda é um desafio devido às implicações impostas por um ambiente hostil, inóspito e isolado como o leito oceânico, além de que avanços tecnológicos devem ser realizados em áreas que estão atualmente apenas nas etapas de testes. Há também o fato de que devem ser levados em consideração questões ambientais e sociais que podem ser obstáculos para a exploração de ETRs em um ambiente tão delicado quanto o mar, portador de um complexo e rico ecossistema, apesar de que o impacto ecológico global da mineração submarina em larga escala ainda é desconhecido ou pouco compreendido. Para lidarem com os intrincados regulamentos e questões legais, existem autoridades como a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (UNCLOS) e a Autoridade Internacional dos Fundos Marinhos (ISA), que governam a exploração no mar, além das jurisdições nacionais [4].

## **2. Os Elementos Terras-raras (ETRs)**

### **2.1. A Química dos ETRs**

Segundo a União Internacional de Química Pura e Aplicada, Os elementos terras-raras incluem os 15 lantanídeos mais o Ítrio (Y) e o Escândio (Sc). Os ETR são geralmente divididos em dois grupos principais: leves (ETRL), ou seja, elementos com baixo número atômico (Z): lantânio (La, Z = 57), cério (Ce, Z = 58), praseodímio (Pr, Z = 59), neodímio (Nd, Z = 60), promécio (Pm, Z = 61), samário

(Sm, Z = 62); e pesados (ETRP), com números atômicos altos: európio (Eu, Z = 63), gadolínio (Gd, Z = 64), térbio (Tb, Z = 65), disprósio (Dy, Z = 66), hólmio (Ho, Z = 67), érbio (Er, Z = 68), túlio (Tm, Z = 69), itérbio (Yb, Z = 70) e lutécio (Lu, Z = 71) [5]. No entanto, essa classificação não é rígida, e às vezes o grupo dos ETRLs inclui os elementos de La a Eu, enquanto o grupo dos ETRPs compreende a série de Gd a Lu [6].

Além disso, o grupo de elementos com números atômicos intermediários (de Sm a Ho) é denominado elementos terras raras médios (ETRM) [7]. O comportamento geoquímico do ítrio é semelhante ao do hólmio e, por isso, o ítrio é incluído entre os ETRPs (com número atômico aparente médio = 39, com base em suas propriedades físicas), formando um grupo designado como REY [8]. O ítrio está amplamente presente na natureza [6]. Além dos lantanídeos e do ítrio, o escândio (Z = 21) também é considerado um elemento terra rara; no entanto, às vezes é excluído das discussões sobre ETR, pois possui um cátion cujo comportamento geoquímico está mais próximo dos elementos de transição ferromagnesianos do que dos ETR [9].

## 2.2 Abundância e Aplicações

*Tabela 1: Lista dos elementos terras raras (ETR), seus números atômicos (Z), seus estados de oxidação, suas abundâncias relativas na crosta terrestre (ppm) e principais aplicações [2]*

|                         |    |        |      |  |
|-------------------------|----|--------|------|--|
| <b>Lantânio (La)</b>    | 57 | +3     | 39   | Lentes de câmeras; catalisadores para refino de petróleo; ressonância magnética (RM); veículos elétricos de nova geração; vidro óptico; baterias recarregáveis                                       |
| <b>Cério (Ce)</b>       | 58 | +3, +4 | 66,5 | Catalisador para refinarias de petróleo; telas coloridas, LCD; ligas metálicas; PET; pó de polimento; blindagem contra radiação; filtros UV em vidro   |
| <b>Praseodímio (Pr)</b> | 59 | +3     | 9,2  | Corante para vidros; telas LCD coloridas; refrigerante criogênico; iluminação eficiente; discos rígidos; lasers; ímãs; pigmentos; eletrônicos portáteis e pequenos motores; técnicas de radioterapia |

|                           |            |        |        |   |
|---------------------------|------------|--------|--------|---|
| <b>Neodímio (Nd)</b>      | 60         | +3     | 41,5   | Discos rígidos; veículos elétricos de nova geração; ímãs permanentes; eletrônicos portáteis e pequenos motores; tratamento de câncer de pele; coloração violeta em vidro e cerâmica                     |
| <b>Promécio (Pm)</b>      | 61         | +3     | Traços | Tinta luminosa; baterias nucleares  |
| <b>Samário (Sm)</b>       | 62         | +3     | 7,05   | Lasers; ímãs; veículos elétricos de nova geração; tratamento de tumores com Sm-153  |
| <b>Európio (Eu)</b>       | 63         | +3, +2 | 2      | Bioimagem; telas LCD coloridas; iluminação eficiente; lâmpadas fluorescentes; lasers; eletrônicos portáteis e pequenos motores  |
| <b>Gadolínio (Gd)</b>     | 64         | +3     | 6,2    | Lasers; ligas magnetoestríctivas; chips de memória; ressonância magnética (RM); captura de nêutrons; aditivo para aço   |
| <b>Térbio (Tb)</b>        | 65         | +3     | 1,2    | Terapias contra o câncer; telas LCD coloridas; células de combustível; lâmpadas fluorescentes; motores elétricos de alta potência; lasers; ligas magnetoestríctivas; memórias ópticas para computadores |
| <b>Disprósio (Dy)</b>     | 66         | +3     | 5,2    | Tratamento de derrames com Dy-165; motores elétricos de alta potência; lasers; veículos mais leves; ligas magnetoestríctivas  |
| <b>Hólmio (Ho)</b>        | 67         | +3     | 1,3    | Terapias contra o câncer; lasers; ímãs; padrões para espectrofotômetros ópticos   |
| <b>Érbio (Er)</b>         | 68         | +3     | 3,5    | Tecnologia de fibra óptica; lasers; prática médica e odontológica; aço  |
| <b>Túlio (Tm)</b>         | 69         | +3     | 0,52   | Lasers; lâmpadas de haletos metálicos; Tm-167 em dispositivos portáteis de DRX  |
| <b>Ítérbio (Yb)</b>       | 70         | +3     | 3,2    | Agente redutor químico; lasers infravermelhos; aço inoxidável; aplicação médica com Yb-176  |
| <b>Lutécio (Lu)</b>       | 71         | +3     | 0,8    | Terapias contra o câncer; catalisador; vidro com alto índice de refração; LED   |
| <b>Ítrio (Y)</b>          | 39 (66,5)* | +3     | 33     | Terapias contra o câncer; cerâmica; telas LCD coloridas; lâmpadas fluorescentes compactas; supercondutores de alta temperatura; laser; LED; filtros de micro-ondas                                      |
| * Número atômico aparente |            |        |        |   |
| <b>Escândio (Sc)</b>      | 21         | +3     | 22     | Ligas para componentes aeroespaciais; iluminação para câmeras; catalisadores; telas LCD coloridas; iluminação eficiente; agente traçador radioativo em refinarias; superligas; tubos de raios X         |

Embora sejam denominados elementos "terras raras", sua abundância na crosta terrestre não é tão rara. Eles existem na natureza em quantidades que variam desde traços (negligenciáveis), como o promécio (Pm), até 66,5 ppm, no caso do cério (Ce) (ver Tabela 1). O promécio não possui isótopos naturais estáveis ou de longa meia-vida, mas apresenta cerca de 40 isótopos de curta duração, como o  $^{145}\text{Pm}$  [10]. Por outro lado, o cério normalmente ocorre substituindo elementos principais em minerais e, como exemplo, é mais abundante que o cobre (Cu, 50 ppm) na crosta terrestre.

Os ETR não existem em forma livre na natureza devido à sua alta reatividade. Em vez disso, são constituintes principais ou secundários de minerais, como silicatos, carbonatos, óxidos e fosfatos [11]. As principais fontes econômicas de ETR são a bastnasita  $[(\text{Ln},\text{Y})(\text{CO}_3)\text{F}]$ , a monazita  $[(\text{Ln},\text{Th})\text{PO}_4]$  e a loparita  $[(\text{Ln},\text{Na},\text{Ca})(\text{Ti},\text{Nb})\text{O}_3]$ . No total, existem cerca de 250 minerais que contêm terras raras [11].

O isolamento dos ETR a partir dos minerais é um processo muito complexo, que envolve várias etapas, começando pela lixiviação do minério, que utiliza tipos diferentes de solventes como solventes orgânicos imiscíveis e solventes ácidos, que dependem do tipo de minério. Após essa etapa, se inicia o processo de separação e purificação, que se baseia em métodos como a oxidação seletiva (usada para o cério, praseodímio e térbio) e a redução seletiva (usada para o európio, samário, itérbio), sofrendo, após essas etapas, cristalização e precipitação fracionada. Para obter o metal puro, processos como eletrólise de sal fundido e redução metalotérmica são aplicados [12]. Assim, obter ETR em forma metálica pura ou como óxidos a partir dos minerais os torna ainda mais valiosos.

Os celulares e outros dispositivos de alta tecnologia são compostos por numerosos componentes metálicos, muitos dos quais contêm elementos terras raras. Mais da metade dos componentes de um celular (como eletrônicos, tela, bateria, alto-falantes, etc.) são fabricados com ampla participação dos ETRs [13]. Todos os ETR (exceto o promécio, que é radioativo) podem ser encontrados em

diferentes tipos de smartphones, e alguns deles são responsáveis pelas cores das telas ou pelas vibrações, como o disprósio e o neodímio [14].

Nas últimas três décadas, as aplicações dos ETRs foram ampliadas em dispositivos tecnológicos, como computadores, DVDs, telas de LCD, baterias recarregáveis, catalisadores automotivos, superímãs, luzes de LED, supercondutores, aditivos para vidro, materiais fluorescentes, agentes de ligação de fosfato, entre outros. Na indústria (veículos elétricos, painéis solares, turbinas eólicas, etc.), a importância dos ETRs também é muito elevada. Algumas das outras principais aplicações dos ETRs estão listadas na Tabela 1. Também são considerados as "vitaminas da indústria moderna" devido à sua capacidade de aumentar a eficiência e o desempenho em inúmeras ligas metálicas que servem de uso para a construção de aeronaves, satélites e outras aplicações [15].

Além das diversas aplicações em tecnologias de ponta, os ETR também são importantes em aplicações médicas (por exemplo, diagnóstico médico, agentes antitumorais, medicamentos para diálise renal, equipamentos cirúrgicos, etc.) e em instrumentos médicos, como a ressonância magnética (RM), a tomografia por emissão de pósitrons (PET) e os raios X [16].

Alguns ETR, como térbio (Tb), hólmio (Ho), lutécio (Lu) e ítrio (Y), têm sido considerados elementos valiosos no tratamento do câncer devido aos seus radioisótopos terapêuticos, especialmente na radioimunoterapia e na terapia fotodinâmica [17]. O samário-153 (Sm-153) e o itérbio-176 (Yb-176) também são utilizados, respectivamente, no tratamento de tumores e em aplicações médicas. Devido às suas propriedades paramagnéticas superiores (as melhores de toda a tabela periódica), o gadolínio (Gd) é o elemento terra rara mais utilizado em exames de ressonância magnética e o íon  $Gd^{3+}$  melhora o contraste nas imagens com toxicidade muito baixa [18].

### **2.3 Valor Econômico**

Como já foi dito, a extração de elementos de terras raras (ETR) a partir de minerais é um processo muito complexo e demorado. O teor de corte nas operações

metalúrgicas de mineração é influenciado por diferentes indicadores econômicos, como os preços de mercado tanto do produto principal quanto do subproduto, além dos custos de mineração e processamento. Além disso, o valor econômico dos ETRs é multiplicado devido à sua importância nas já citadas inúmeras aplicações nas tecnologias modernas e à tendência global de crescimento constante no equilíbrio entre oferta e demanda no mercado mundial. Há também o fato de que a separação e purificação dos ETRs individuais é um grande desafio devido às suas semelhanças químicas. Na Tabela 2, são apresentados os preços médios dos óxidos de terras raras e na Tabela 3, os preços da maioria das terras-raras puras disponíveis no Shanghai Metal Market [19].

*Tabela 2 - Preços dos OTRs em 2025 [19].*

| <b>Óxido</b>         | <b>Preço Médio (USD/kg)</b> |
|----------------------|-----------------------------|
| Óxido de Lantânio    | 0,56                        |
| Óxido de Cério       | 1,44                        |
| Óxido de Praseodímio | 74,24                       |
| Óxido de Neodímio    | 73,80                       |
| Óxido de Samário     | 2,07                        |
| Óxido de Európio     | 20,68                       |
| Óxido de Gadolínio   | 19,92                       |
| Óxido de Térbio      | 776,93                      |
| Óxido de Disprósio   | 171,68                      |
| Óxido de Hólmio      | 61,65                       |
| Óxido de Érbio       | 44,11                       |
| Óxido de Itérbio     | 12,53                       |
| Óxido de Lutécio     | 645,35                      |
| Óxido de Ítrio       | 6,32                        |
| Óxido de Escândio    | 614,02                      |

*Tabela 3 - Preços das TRs em 2025 [19].*

| <b>Produto</b> | <b>Preço Médio (USD/kg)</b> |
|----------------|-----------------------------|
| Lantânio       | 2,69                        |
| Cério          | 3,63                        |
| Praseodímio    | 96,17                       |
| Neodímio       | 90,54                       |
| Samário        | 9,15                        |
| Térbio         | 973,04                      |
| Disprósio      | 214,28                      |
| Ítrio          | 29,45                       |
| Escândio       | 3195,42                     |

## **2.4 Importância Geopolítica**

Para compreender a importância geopolítica dos elementos terras-raras, é necessário analisar a distribuição de suas reservas pelo mundo. A relevância geopolítica dos elementos terras raras está relacionada à distribuição desigual das reservas economicamente exploráveis pelo mundo. Essa disparidade faz com que muitos países tecnologicamente e industrialmente desenvolvidos dependam fortemente de um número limitado de nações exportadoras dessa matéria-prima estratégica. A geopolítica das terras raras refere-se à disputa internacional entre os principais países consumidores de ETRs (Estados Unidos, Japão e membros da União Europeia) e a China, que além de ser uma grande consumidora, domina a produção e exportação global desses recursos [20].

### 2.4.1. China

A China consolidou uma posição de monopólio prático no mercado global de Elementos Terras Raras no início do século XXI, uma condição alcançada e mantida através de uma combinação de vastas reservas, custos operacionais baixos e políticas governamentais estratégicas. Essa dominância tem implicações geopolíticas significativas, gerando intensa dependência e tensões com potências importadoras [21].

O início da ascensão da China ao domínio do, até então dominado pelos EUA, mercado das terras-raras se deu nas décadas de 1980 e 1990, se tornando rapidamente líder absoluta na produção e exportação desses elementos graças à imensidão de suas reservas, como mostra a Figura 1, e ao relativo baixo custo de produção, além de serem favorecidos por uma legislação ambiental mais fraca e ao baixo custo de mão-de-obra local [22].

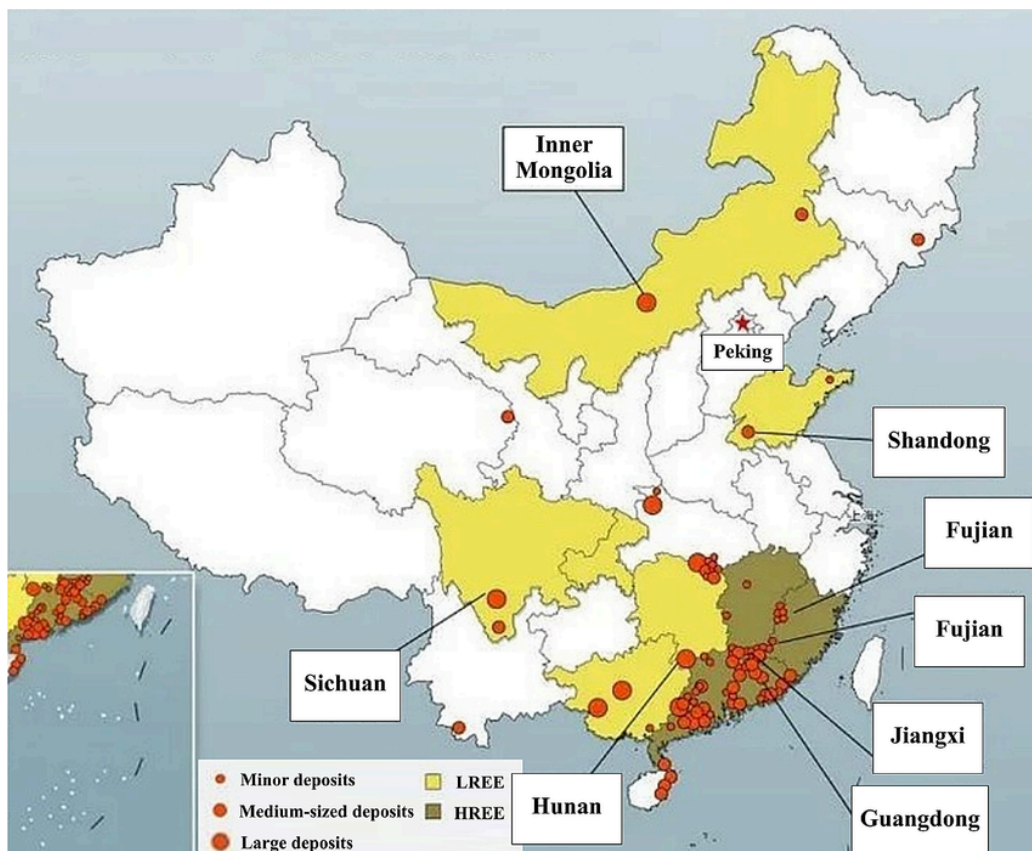


Figura 1 - Distribuição das reservas de ETRs na China [23]

Como será visto mais para frente, os Estados Unidos reduziram ou cessaram a exploração de ETRs após a década de 1970, sendo esse outro motivo para a China expandir o seu domínio, aumentando intensamente a sua produção, resultando em uma alternativa economicamente viável para as empresas importar da China. O país também investiu fortemente no desenvolvimento de atividades de processamento de terras-raras, dominando toda a cadeia de produção, desde a mineração até a fabricação de produtos finais [23].

É importante ressaltar que em 2021, a China possuía 44 milhões de toneladas métricas de ETRs em suas reservas, o que representava aproximadamente 37% das reservas mundiais conhecidas [24]. Embora em 2013 sua participação nas reservas conhecidas fosse de cerca de 50%, em 2019, o total de reservas da China era de 44 Mt (39%) [25].

Atualmente, a China é a maior produtora mundial. Em 2020, a produção chinesa de óxidos de terras raras (OTR) representou cerca de 58,3% do total mundial [26]. Entre 2011 e 2017, a produção chinesa de REE foi responsável por aproximadamente 84% da produção global, caindo para cerca de 63% entre 2018 e 2019 [27]. Em 2021, a produção chinesa foi de 168.000 toneladas. A Figura 2 mostra a evolução da produção de OTR desde a década de 1950, destacando o crescimento significativo da China [28].

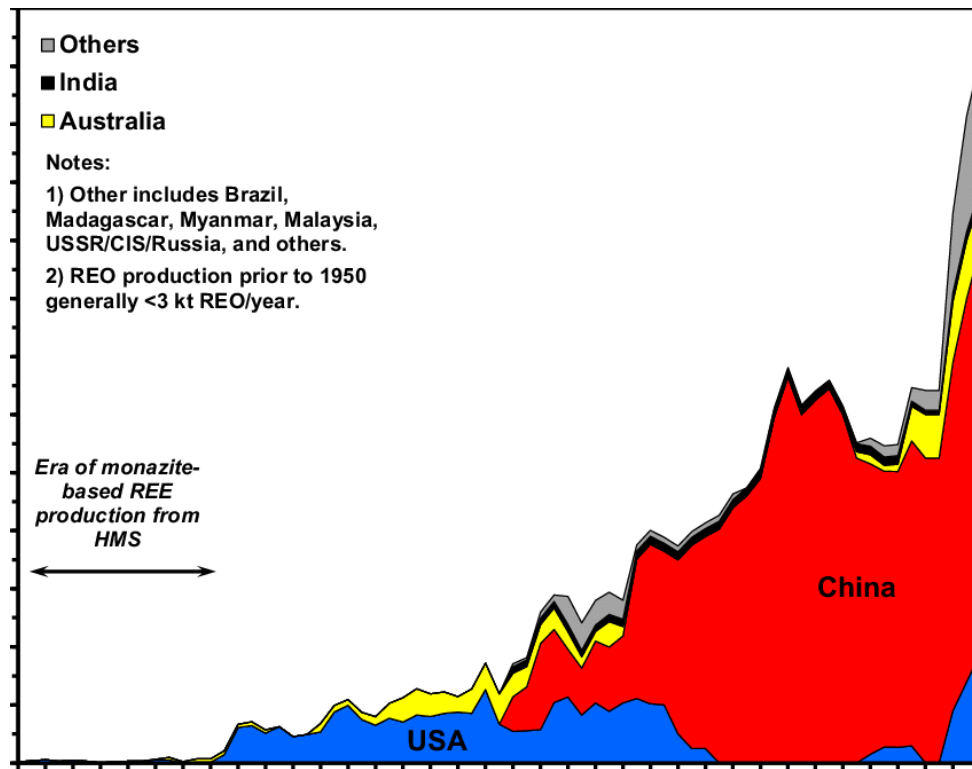


Figura 2 - Evolução da produção mundial de OTRs de 1950 até a década de 2020 [28]

A posição monopolística da China garante um poder para exercer pressão geopolítica, como demonstrado em 2010, ano em que o país era responsável por 97% da comercialização global de ETRs, quando suspendeu as exportações de metais puros de ETRs e de óxidos de terras-raras para o Japão e manteve altas taxas para outros consumidores, causando incerteza no mercado e aumento de preços [29]. Essa ação foi uma retaliação à prisão de um capitão de barco chinês pelo Japão em uma área marítima disputada [30]. Os EUA, UE e Japão alegaram práticas de concorrência desleal na Organização Mundial do Comércio (OMC), resultando na condenação da China em 2014 [22].

A política de restrição de exportação de ETRs implementada pela China iniciada no início dos anos de 2010 expandiu a influência das relações geopolíticas na rede de comércio de terras raras. [31] Essa medida, justificada pela China como forma de proteger suas reservas domésticas e abordar preocupações com o esgotamento dos recursos, aumentou o impacto dos laços geopolíticos nas redes de comércio de ETRs [31].

A China utiliza uma estratégia de "smart power", combinando a narrativa de proteção ambiental com seu poder econômico para afetar as indústrias de alta tecnologia de outros países, tornando a produção mais cara para quem importa TRs chinesas e incentivando a instalação de indústrias estrangeiras em seu território [32].

Vale ressaltar também a ideia do "problema do equilíbrio", a partir do fato de que alguns ETRs são mais abundantes, como o lantânio e cério, e outros mais escassos e críticos, como o disprósio, térbio e európio [21]. Logo, para atender a demanda por elementos mais críticos, há um excesso de oferta de elementos menos demandados, problema este que foi identificado já em 1985 [33].

Ao produzir em larga escala para atender à demanda por elementos críticos (como Neodímio e Disprósio, essenciais para ímãs permanentes de alta performance em carros híbridos e elétricos, e turbinas eólicas [33]), a China inevitavelmente gerou um superávit de elementos menos procurados, como o Cério e o Lantânio, que são mais abundantes na maioria dos depósitos de TRs. Essa situação agrava o problema do equilíbrio, tornando a gestão global da oferta e demanda de TRs ainda mais complexa [34].

#### **2.4.2. Estados Unidos**

Apesar de sua posição como o segundo maior produtor mundial de óxidos de terras-raras, os EUA dependem fortemente de mercados estrangeiros para atender à demanda doméstica por ETRs [35]. Em 2018, a China forneceu aproximadamente 79% das importações de OTRs dos EUA [36]. A dependência é ampliada pelo fato de que muitas importações de outros países (como Estônia, França e Japão) também podem ter origem na China [21].

Os EUA já foram o maior fornecedor global de ETRs, sendo responsável por 70% da oferta mundial até a década de 1970, quando a principal mina norte americana, a Mountain Pass, na Califórnia, teve as suas atividades suspensas

porque o país não conseguia competir com os preços mais baixos da China, e considerava mais viável economicamente importar os ETRs [22]. Essa suspensão também foi influenciada por uma legislação ambiental mais rigorosa nos países industrializados, como os EUA, que dificultou o crescimento da indústria local, enquanto que na China, leis ambientais mais fracas garantiram o oposto aos chineses [21].

Após as já citadas medidas chinesas de restrição à exportação de ETRs no início da década de 2010, os Estados Unidos retomaram a extração em Mountain Pass, na Califórnia [36], com depósitos que possuem teores de cerca de 8% de OTRs [36]. Com isso, a produção estadunidense de ETRs teve um salto significativo, atingindo 43 mil toneladas em 2021 [20].

Para tentar contornar esse problema e ampliar a oferta interna de óxidos de terras-raras, o Serviço Geológico dos EUA (USGS) começou a implementar em 2019 a Iniciativa de Mapeamento de Recursos da Terra (Earth MRI) com o objetivo de identificar depósitos domésticos de ETRs [37]. Em novembro de 2020, conforme estabelecido na Ordem Executiva 13817, o Departamento de Defesa dos EUA (DOD) concedeu US\$ 12,76 milhões a empresas nacionais de processamento de ETR localizadas na Califórnia e no Texas. Recentemente, o Departamento de Energia dos EUA (DOE) destinou mais US\$ 19 milhões para 13 projetos voltados ao apoio da produção de terras raras, como por exemplo projetos para a abertura de novas plantas de processamento em estados como o Colorado, Alasca e Wyoming [38]. Além disso, algumas empresas de mineração de terras raras estão direcionando seus esforços para o desenvolvimento de tecnologias de extração, buscando tornar economicamente viáveis formações minerais ou subprodutos que atualmente não são rentáveis, à medida que os Estados Unidos procuram alternativas ao atual método de extração por solventes [37].

Além disso, os EUA têm se empenhado em buscar novas fontes desses minerais fora do próprio território, com uma série de projetos na África emergindo como uma fonte potencial. Entre os países na mira das expectativas dos Estados Unidos para exploração de ETR na África, estão o Malauí e o Burundi. Contudo o otimismo dos EUA é atenuado pela falta de acordos formais assinados entre os

EUA e países africanos e pela crescente influência da China na mineração africana [36].

Além de promover o aumento da produção interna e de tentar ampliar a exploração na África, o governo dos Estados Unidos tem incentivado iniciativas para reduzir a demanda por óxidos de terras raras (REO) e mitigar os riscos de abastecimento por meio da conservação, reciclagem e busca por alternativas aos ETR na produção. Em abril de 2020, o Departamento de Energia dos EUA anunciou planos para investir até US\$ 18 milhões em pesquisas voltadas à redução do uso de ETR recém-extraídos, por meio de métodos de separação mais eficientes que possibilitem a reciclagem, além da descoberta de substitutos eficazes para os ETR na produção [39]. Apesar disso, a reciclagem de ETRs a partir de produtos no fim da vida útil ainda é muito baixa, tipicamente abaixo de 1%, e graças às suas únicas propriedades químicas e magnéticas, os ETRs são basicamente insubstituíveis em muitas aplicações industriais [40].

### **2.4.3. Japão**

O Japão é um ator global crucial na geopolítica das terras-raras, sendo o terceiro maior consumidor mundial de óxidos de terras raras, atrás apenas da China e dos Estados Unidos. No entanto, sua posição é marcada por uma forte dependência externa em relação ao suprimento desses minerais estratégicos, uma vez que o país não possui grandes reservas de ETRs em seu território.

Atualmente, cerca de 60 a 70% das terras-raras são provenientes da China, um número que já chegou à 80% em 2010 [30] e hoje está menor devido à parceria público-privada entre empresas japonesas e a empresa australiana Lynas, que possui plantas de extração na Austrália e plantas de processamento na Malásia, com envio do material processado para o Japão [41].

A dependência do Japão afeta indiretamente os EUA, cujas cadeias de suprimentos dependem de insumos procedentes do Japão, especialmente no caso

de produtos de alta tecnologia. Exemplo disso é a forte presença de subsidiárias japonesas da área de alta tecnologia nos Estados Unidos, que já era em 2010 (e continua a ser) um importante comprador de produtos da cadeia produtiva japonesa de ímãs permanentes e de produtos de empresas subsidiárias japonesas de automobilismo situadas no território estadunidense [42]. A produção e controle de patentes de ímãs de ETRs mais avançados, utilizados em carros híbridos e aviões de caça, conferem uma vantagem tecnológica em relação à indústria magnética chinesa em termos de qualidade, embora não em volume de produção [43], o que resulta nas contenções de exportações de ETRs da China, que tem como objetivo reduzir essa vantagem tecnológica do Japão e levar empresas japonesas a se deslocarem para a China, o que vem acontecendo não só com as empresas japonesas mas também com estadunidenses e alemãs [20].

Uma medida japonesa para tentar atenuar essa dependência da China foi a adoção da “Lei de Reciclagem de Terras Raras” em 2012, promovendo a conversão de lixo eletrônico, conhecida como “mineração urbana”, permitindo a reciclagem de resíduos eletrônicos em grande escala, como ímãs de neodímio presentes em discos rígidos (HDs) [2]. No entanto, apesar do esforço japonês, geralmente apenas 1% dos ETRs no mundo são reciclados dos produtos eletrônicos ao final de sua vida útil, enquanto o restante é descartado como lixo [44].

Recentemente, uma área de aproximadamente 10000 km<sup>2</sup> foi descoberta nos arredores da Ilha de Minamitorishima, a aproximadamente 1848 km de distância de Tóquio, com estimadas 230 milhões de toneladas de depósitos de nódulos polimetálicos. A chamada fábrica marítima Chikyu, capaz de perfurar o leito marítimo e coletar recursos já foi enviada para o local para juntar amostras, que indicaram um alto potencial de prospecção, o que resultou na decisão do país de explorar a região em 2026, em uma parceria com o governo dos EUA [45].

#### **2.4.4. Brasil**

O Brasil ocupa uma posição de destaque em termos de reservas globais de ETRs, possuindo a terceira maior reserva de terras-raras do mundo, estimada em 17 milhões de toneladas de OTRs em 2021, o que representa 17% das reservas conhecidas globalmente [24]. Foi relatado pelo professor Fernando José Gomes Landgraf, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo que “No Brasil, as terras raras são encontradas nas areias monazíticas do litoral e principalmente em jazidas próximas a vulcões extintos, como nas cidades de Araxá e Poços de Caldas, em Minas Gerais, e Catalão, em Goiás, e também em Pitinga, no Amazonas. É provável que as reservas brasileiras sejam muito maiores do que está comprovado atualmente, em especial na Amazônia”, apesar disso, ele também relata que “na cadeia produtiva das terras raras, o Brasil tem o minério, tem o consumo final, pois importa superímãs para geradores eólicos e motores elétricos, mas não domina as etapas intermediárias do processo, ou seja, a separação dos elementos e a fabricação de superímãs” [46].

O Brasil teve um papel de destaque na produção de TRs na década de 1940, com a extração da monazita, que vinha sendo explorada desde a descoberta de jazidas na Bahia em 1886. Devido à extrema exploração da área, o Brasil se tornou o maior fornecedor mundial de monazita em 1915. Na década de 1950, o foco da exploração de monazita passou a ser a extração de tório e urânio, usados na produção de energia nuclear. Apesar do Brasil dominar a tecnologia de extração de terras raras na época, esses elementos tinham poucas aplicações tecnológicas significativas, cenário que se alterou com o surgimento da televisão em cores, que utilizava európio [46].

Apesar do aparente cenário favorável para a indústria brasileira de terras-raras na época, a situação era mais complexa, uma vez que o resto do mundo já estava lidando com tecnologias mais avançadas, como lasers e ímãs de alta potência, que utilizam neodímio na sua composição. Segundo o professor Henrique Elsi Toma, do Instituto de Química da USP, Em 1962, a Usina Santo Amaro (USAM), pertencente à Orquima, foi estatizada, passando a se chamar Nuclemon em 1975 e, em 1994, Indústrias Nucleares do Brasil (INB). Em 2004, o País deixou de produzir terras raras e, em 2012, foram interrompidas as exportações de monazita para a China, que passou a monopolizar o mercado

mundial com sua produção interna [46]. Atualmente, a produção de ETRs no Brasil é muito pequena, ou praticamente nula, e o país é totalmente dependente da importação desses minerais.

Como já citado, há um imenso potencial de reservas exploráveis na Amazônia, contudo a maior parte dessas reservas está localizada em terras indígenas, como a reserva do do Morro Seis Lagos, na Terra Indígena Balaio, no Amazonas e a reserva da Serra do Repartimento, na Terra Indígena Yanomami, em Roraima, o que é um obstáculo para a exploração nacional, uma vez que a legislação brasileira proíbe a atividade extrativa em terras indígenas para pessoas estranhas aos grupos tribais [47].

Há, no entanto, o ainda não aprovado Projeto de Lei 191/20 proposto pelo então presidente Jair Bolsonaro, que autoriza a exploração de minérios em terras indígenas, e enfrenta a oposição das lideranças da maioria das nações indígenas envolvidas e, antes mesmo da sua aprovação, é um fator de conflito político na Amazônia brasileira, principalmente nos estados de Roraima e Amazonas [20].

O Brasil também conta com a recém reivindicada Elevação do Rio Grande (ERG), um território submarino rico em crostas de ferromanganês e nódulos polimetálicos, localizado a cerca de 1200 quilômetros da costa sudeste brasileira e de área estimada de 500 mil quilômetros quadrados [48]. Desde 2015, o Brasil possui um contrato de exploração de crostas de ferromanganês na ERG, regulado pela Autoridade Internacional dos Fundos Marinhos (ISA) e sob a responsabilidade do Serviço Geológico do Brasil, contudo ainda não há extração da região [49].

#### **2.4.5. União Europeia**

A União Europeia se insere na disputa internacional de terras raras como um dos principais consumidores e importadores mundiais desses elementos. Devido ao risco de escassez da oferta e à dependência em relação ao país fornecedor, a União Europeia classificou as TRs como Matéria-Prima Crítica (CRM). A Comissão Europeia (EC) reconheceu a dependência crítica e, através da Iniciativa de

Matérias-Primas (RMI), estabeleceu uma lista de CRMs que continha 14 materiais em 2011, e 30 em 2020 [20], além de indicar que o risco de seu suprimento está no nível máximo. O parâmetro denominado “índice de substituição”, descrito no relatório da Comissão Europeia como uma medida da dificuldade de substituição de um material, recebeu (tanto para importância econômica quanto para risco de suprimento) valores máximos entre 0,9 e 1,0 para todos os elementos de terras raras [2].

Portanto, em 2011, foi adotada uma estratégia que atualizou as políticas de matérias-primas com base em três pilares principais: fornecimento justo no mercado mundial, promoção de um suprimento sustentável e melhoria da eficiência no uso dos recursos. Por fim, a Rede Europeia de Competência em Terras Raras sugeriu uma estratégia para o desenvolvimento do setor europeu de terras raras, com foco nas oportunidades de suprimento primário na Europa por meio da eficiência no uso de recursos e da reciclagem. A União Europeia está tentando estabelecer acesso a matérias-primas em escala global, mas ainda carece de metas claras voltadas à eficiência dos recursos e de reservas aproveitáveis [2].

Em janeiro de 2023, o governo da Suécia anunciou a descoberta da maior reserva de Terras Raras da Europa, com uma estimativa de 1 milhão de toneladas de terras-raras. Contudo, a perspectiva de início de exploração e obtenção de licença para produção é de 10 a 15 anos, envolvendo estudos e a instalação de toda a cadeia produtiva [20]. A Groenlândia se apresenta como uma fonte alternativa de terras-raras, com empresas como a Tanbreez Greenland A/S, que obtiveram contratos de arrendamento para exploração naquele território, embora os projetos enfrentam discussões sobre impactos ambientais devido à presença de urânio na matéria-prima [20].

Já em países como a Estônia, existem remanescentes de capacidade de processamento e refino de terras-raras, graças à investida canadense no país da empresa Silmet. Na Suécia a mineradora de ferro LKAB e na Noruega a produtora de fertilizantes Yara estão desenvolvendo processos para iniciar a produção de TRs a partir de subprodutos ricos em apatita e resíduos de mineração, além de que

subprodutos da produção de ferro e carvão também demonstram potencial de aproveitamento [50].

Apesar da preocupação da UE a respeito da devastação do meio ambiente, um ambicioso projeto foi financiado para o estudo de depósitos marinhos minerais em águas europeias, com foco nas matérias-primas críticas, incluindo as terras-raras [50]. O chamado GeoERA MINDeSea é uma contribuição conjunta de 12 Organizações Geológicas Nacionais e Institutos Marinhos de 8 países europeus, além dos Estados Unidos e da Rússia, que resultou em um banco de dados abrangente que mostra que há um potencial de exploração de recursos minerais nas regiões da Macaronésia, próxima do arquipélago dos Açores; no Mar Ártico e em regiões do Mediterrâneo próximas da Grécia e do Chipre, além de outros com menos potencial [50]. Apesar do grande potencial, as estimativas são de que a busca por reduzir a dependência da UE em relação à China levará pelo menos 10 anos para ser alcançada, pois exige a instalação de toda a cadeia produtiva, incluindo a fabricação de ímãs permanentes, segundo especialistas [20].

### **3. Depósitos Marinhos**

Como já visto, o aumento expressivo da demanda global por elementos de terras-raras, impulsionado pelo avanço das tecnologias de ponta, energias renováveis e eletrificação da indústria, os depósitos marinhos de terras-raras surgem como uma alternativa cada vez mais viável e estratégica às tradicionais fontes terrestres. Esses depósitos localizados no fundo dos oceanos, especialmente em nódulos polimetálicos, crostas de ferromanganês e sedimentos ricos em terras-raras, têm atraído a atenção da comunidade científica, de governos e de empresas mineradoras em todo o mundo, sendo um dos principais motivos as concentrações de ETRs que podem chegar a 22.000 ppm nas formações do leito oceânico [1].

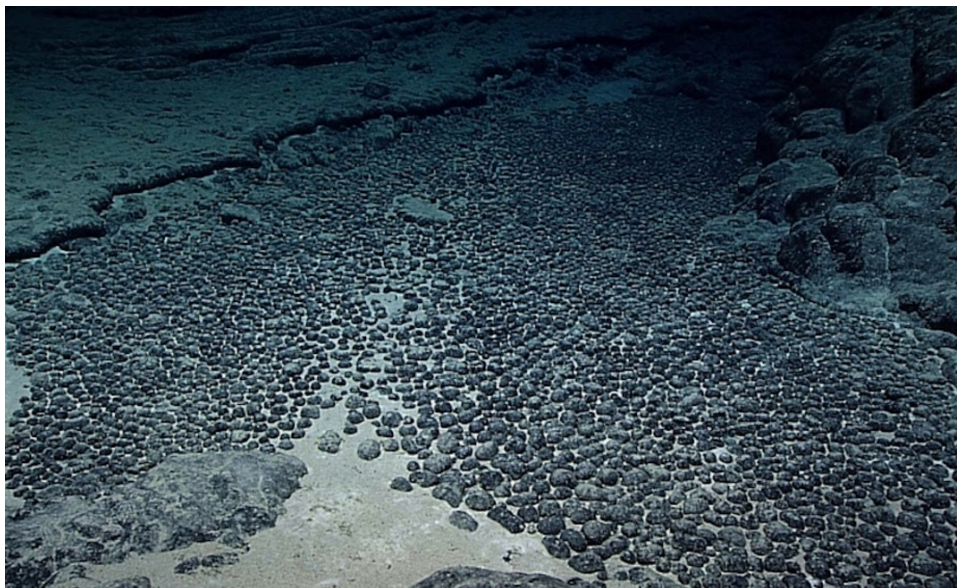
Nesse cenário, os recursos minerais presentes nas profundezas oceânicas passaram a ser considerados não apenas uma possibilidade de diversificação

econômica, mas também uma questão de segurança estratégica. O fundo do mar, antes visto como um ambiente de difícil exploração, está se consolidando como uma fronteira promissora para garantir a estabilidade no fornecimento de terras-raras, mitigar os riscos associados à dependência do mercado chinês e atender de forma sustentável a crescente demanda global por esses elementos essenciais para a indústria moderna [1].

### **3.1. Nódulos Polimetálicos**

Os nódulos polimetálicos, também conhecidos como nódulos de manganês, representam um tipo significativo de recurso mineral encontrado no fundo do mar, emergindo como a mais promissora alternativa às fontes terrestres de elementos críticos. Se tratam de concreções sólidas de óxidos de ferro e manganês descobertas na década de 1870, presentes em todos os oceanos, formadas por precipitação direta na água do mar [1].

Geralmente de forma quase esférica, variam de cor entre marrom e preto, com um tamanho médio de 1 a 12 cm, podendo atingir até diâmetros que variam de poucos milímetros até 20 centímetros [1]. Encontram-se predominantemente em planícies abissais cobertas por sedimentos, em profundidades que variam de 3.500 a 6.500 metros, em áreas com baixas taxas de sedimentação, como áreas planas e encostas dos montes submarinos [51].



*Figura 3 - Nódulos no leito oceânico [52].*

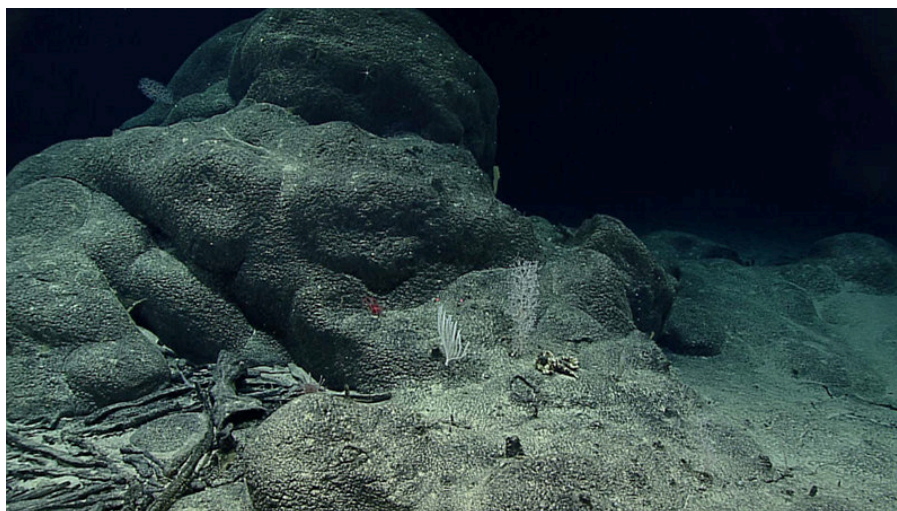
Existem dois tipos genéticos principais: os hidrogenéticos, onde quase todos os metais são derivados da água do mar fria circundante (como os nódulos da Bacia de Penrhyn nas Ilhas Cook), e os diagéticos, onde os metais provêm da água dos poros dos sedimentos (como os da Bacia do Peru). Os nódulos do tipo misto, que adquirem metais de ambas as fontes, são os mais comuns, incluindo os amplamente conhecidos da Zona Clarion-Clipperton (CCZ) [50]. A CCZ, uma área abissal no Pacífico Central Oriental, é a maior fonte potencial de nódulos polimetálicos descoberta até agora, cobrindo aproximadamente 4,5 milhões de km<sup>2</sup> [53].

Em termos de composição, os nódulos polimetálicos são recursos valiosos devido à sua riqueza em, além de ETRs, metais básicos e estratégicos, incluindo manganês, níquel, cobalto, cobre, ítrio e elementos do grupo da platina [54]. Os nódulos da CCZ, por exemplo, contêm mais manganês, níquel e cobalto do que a totalidade das reservas terrestres globais desses metais, além de quantidades significativas de cobre, já nódulos específicos, como os da Zona Econômica Exclusiva (ZEE) das Ilhas Cook, destacam-se por seus altos teores de cobalto, ETRs e titânio [50]. As concentrações de cobre em nódulos polimetálicos podem atingir 1%, enquanto em depósitos terrestres de cobre, os teores médios atuais podem ser tão baixos quanto 0,26% [55].

Além de serem uma fonte adicional de suprimento de metais, os nódulos polimetálicos podem apresentar vantagens em relação às suas contrapartes terrestres. Primeiramente, com um teor metálico que se aproxima de 30% [55], sua composição é mais próxima de um concentrado do que de um minério, o que reduz a intensidade energética específica e o impacto de sua coleta, transporte e processamento, puramente por razões de balanço de massa. Em segundo lugar, suas características de cominuição os colocam em uma classe de minério mais macia do que a média [56], o que exige menos energia no processo de moagem.

### 3.2. Crostas de Ferromanganês

As crostas de ferromanganês são concreções sólidas de óxidos de ferro e manganês que se formam por precipitação direta na água do mar, similares aos nódulos polimetálicos, contudo se apresentam-se como pavimentos de óxido, podendo atingir até 26 cm de espessura, e são compostas por camadas concêntricas de hidróxidos de Fe e Mn [1]. Estas formações encontram-se predominantemente em montanhas submarinas, cristas e planaltos onde as correntes oceânicas previnem a sedimentação ao longo de milhões de anos [57].



*Figura 4 - Crostas de ferromanganês no leito oceânico [58]*

As crostas de ferromanganês ocorrem em todos os oceanos, em profundidades que variam de 400 a 7000 metros, mas as jazidas de maior espessura, abundância e interesse econômico são geralmente encontradas a profundidades entre 800 e 2500 metros [55]. As áreas mais promissoras para exploração e mineração localizam-se no noroeste do Pacífico equatorial, na Zona da Crosta Primária (PCZ), que é reconhecida por preservar crostas mais espessas e extensas, com as maiores concentrações de ETRs [50]. Outros alvos potenciais incluem a margem nordeste do Atlântico (como as margens continentais da Macaronésia e Ibérica) e os oceanos Índico. As jazidas de melhor qualidade, mais enriquecidas em metais, estão situadas fora das jurisdições nacionais [59].

As crostas de ferromanganês são recursos valiosos pela sua riqueza em metais básicos e estratégicos. Contêm cobalto (Co), vanádio (V), cádmio (Cd), telúrio (Te), bário (Ba), níquel (Ni), ETRs incluindo o ítrio (Y) e todos os elementos do grupo da platina. Em particular, as crostas puramente hidrogenéticas contêm metais raros em quantidades suficientes para serem de interesse econômico [62].

Embora as crostas de ferromanganês tenham um preço total por cesta (para ETRs) de 15,14 USD/kg, elas possuem relativamente baixos teores e rendimentos de OTRs em comparação com grandes jazidas terrestres ricas em ETRs (Elementos de Terras-raras leves), mas são comparáveis às jazidas terrestres de argila de adsorção iônica ricas em ETRPs (Elementos de Terras-raras pesados) [50].

### **3.3. Lamas Ricas em ETRs**

As Lamas Ricas em Terras Raras (REE-rich muds) representam um tipo de recurso mineral marinho encontrado no fundo do oceano, composto por sedimentos com concentrações elevadas de elementos de terras-raras. A disponibilidade dos elementos presentes nas lamas abrange desde os elementos terras-raras pesados até os elementos terras-raras leves, lembrando que os ETRPs, em particular, se

tornaram mais valiosos, uma vez que muitos depósitos de minérios terrestres são mais enriquecidos em ETRLs [1].

Nas lamas ricas em ETRs, o principal mineral hospedeiro desses elementos são os fosfatos de cálcio biogênicos (BCP). Esses grãos de BCP podem apresentar concentrações muito altas de ETRs, com médias de 15.000 ppm e picos de até 22.000 ppm. Uma vantagem notável dessas lamas é a baixa presença de elementos radioativos como Urânio (U) e Tório (Th), o que simplifica os processos de extração e recuperação, tornando-as uma fonte promissora [61].

Análises químicas em massa de testemunhos de sedimentos coletados em uma ampla área do Oceano Pacífico revelaram altos teores totais de ETRs nos sedimentos ricos em ETRs no leste do Pacífico Sul (400 - 2800 ppm) e valores moderados no Pacífico Norte Central (400–1.000 ppm), além das recentes descobertas na Zona Econômica Exclusiva (ZEE) do Japão, no Oceano Pacífico Noroeste, ao redor da Ilha Minamitorishima (também conhecida como Ilha Marcus) onde cientistas japoneses descobriram em 2013 lamas com teores de ETRs variando de 2.000 a mais de 5.000 ppm, com alguns pontos superando 22.000 ppm. Essa região, que possui cerca de 105 km<sup>2</sup>, possui um recurso estimado em 1,2 milhão de toneladas de óxido de terras raras. Acredita-se que essa jazida possa suprir a demanda global anual por ítrio, európio, térbio e disprósio por 62, 47, 32 e 56 anos, respectivamente, com potencial para fornecimento semi-infinito [61].

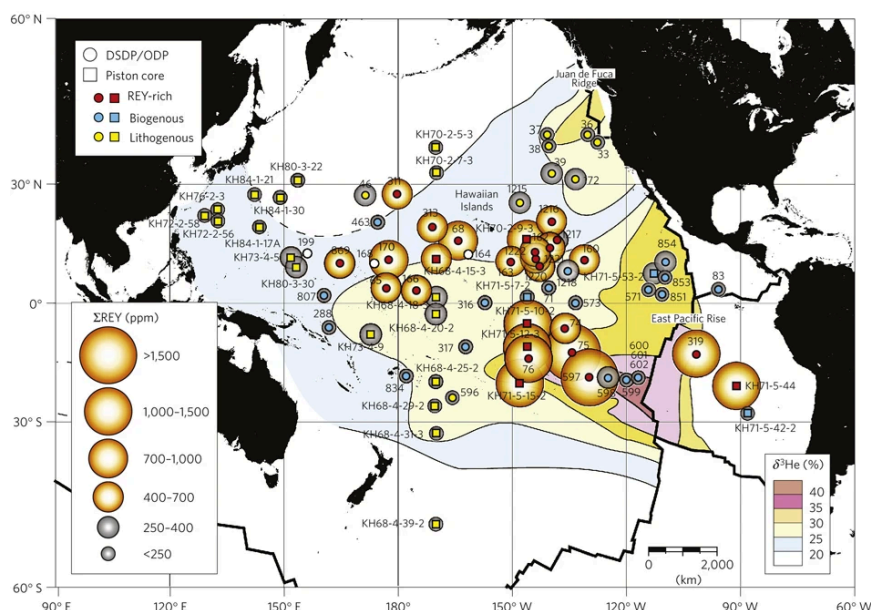


Figura 5 - Distribuição de depósitos sedimentares no Oceano Pacífico [62].

Embora esses sedimentos altamente e extremamente ricos em ETRs, como os da Bacia de Pigafetta, apresentem uma distribuição local heterogênea, o volume estimado de recursos de ETRs na camada de 10 metros abaixo do leito marinho, em uma área de 2.500 km<sup>2</sup>, é superior a 16 milhões de toneladas de óxidos de terras-raras, o que corresponde a várias centenas de anos da demanda mundial de ETRs [61], com destaque para a demanda de ítrio e escândio. Além disso, sedimentos ricos em ETRs também foram identificados nos oceanos Índico e Atlântico, porém com concentrações bem menores de ETRs [63].

Experimentos de separação por tamanho de grão, utilizando peneiras e, em escala industrial, hidrociclones, demonstraram que é possível coletar seletivamente os grãos de BCP, aumentando significativamente o teor do minério. O uso de hidrociclones pode aumentar o fator de concentração de ETRs (atingindo até 260% em lamas de alto teor) e reduzir o volume e peso da lama, o que, por sua vez, diminuiria os custos de elevação e fundição, tornando a extração economicamente mais viável [62].

### 3.4. Sulfetos Polimetálicos Massivos

Os sulfetos polimetálicos massivos são encontrados em profundidades de até 3.700 metros, em diversos ambientes tectônicos no leito marinho atual, incluindo dorsais meso-oceânicas, riftes de arco-traseiro e montes submarinos. Muitos desses depósitos de sulfetos consistem em complexos de chaminés situadas sobre montes de sulfetos, que normalmente são sustentados por uma zona de stockwork (rede de veios mineralizados) [64] e as suas distribuições abrangem tanto regiões do fundo do mar que estão além das jurisdições nacionais, quanto as ZEEs de estados costeiros [59].

Os processos hidrotermais submarinos que causam a emissão de fluidos através de chaminés podem ser divididos em dois grandes grupos: black smokers (fumaça negra) e white smokers (fumaça branca). A principal diferença entre eles é a temperatura dos fluidos emitidos no fundo oceânico. Os chamados black smokers estão tipicamente associados a processos hidrotermais de alta temperatura (acima de 350 °C) e estão localizados próximos às dorsais meso-oceânicas ou em áreas de vulcanismo intraplaca. Já os white smokers estão relacionados a áreas com processos hidrotermais mais distantes do centro principal de emissão; por isso, recebem e expõem fluidos mais frios (abaixo de 350°C) [60].



*Figura 6 - Black smokers [1].*

Está amplamente estabelecido que a água do mar circulante, modificada em uma zona de reação próxima a uma câmara magmática subaxial, é o principal agente transportador de metais e enxofre, os quais são lixiviados da crosta oceânica. A precipitação dos sulfetos maciços e do stockwork ocorre na superfície e abaixo do leito marinho, em resposta à mistura do fluido hidrotermal, rico em metais e de alta temperatura (até 400 °C), com a água do mar ambiente [64].

Os depósitos de sulfetos polimetálicos do fundo oceânico podem atingir tamanhos consideráveis (até 100 milhões de toneladas) e frequentemente apresentam altas concentrações de cobre (calcopirita), zinco (esfalerita) e chumbo (galena), além de ouro, prata e ETRs, sendo a concentração desses últimos influenciada pelos padrões de ETRs dos fluídos que formam os sulfetos e pelas interações com as rochas do subsolo marinho [65].

### **3.5. Depósitos de águas rasas (Placers)**

Os depósitos de águas rasas, ou placers, representam um tipo de jazimento mineral submarino formado pela concentração de minerais pesados e resistentes à meteorização em diversos locais das plataformas continentais e sua formação está ligada à ação de ondas e correntes costeiras (placers de praia), a antigos canais de rios submersos (placers fluviais afogados), ou a depósitos eluviais ou de resíduos. Depósitos semelhantes também podem ser encontrados mais longe da costa, em áreas que correspondem a antigas linhas costeiras durante períodos de baixo nível do mar (glaciações quaternárias) [50].

Em termos de composição, os placers são notáveis por conterem minerais portadores de terras-raras. Os principais minerais encontrados incluem a monazita, contendo lantânio e cério, e a xenotima, contendo ítrio, térbio, disprósio e gadolínio. Além dos ETRs, esses depósitos podem ser ricos em outros minerais pesados e valiosos, como ilmenita, sillimanita, granada, zircão e rutilo. A origem desses placers geralmente remonta a rochas graníticas ou metamórficas de alto grau, cujos elementos foram liberados por erosão e intemperismo [50].

A distribuição global de placers é ampla. A Índia, por exemplo, explora minerais costeiros como ilmenita, sillimanita, granada, zircão, monazita e rutilo, com essas ocorrências representando cerca de 35% do total mundial de depósitos de areia de praia. Na Índia, estima-se que 70% a 75% das reservas de monazita ocorram em placers de praia, enquanto o restante está em áreas interiores e offshore. Outras áreas potenciais para a exploração de sedimentos ricos em ETRs incluem Richard's Bay na África do Sul, Fort Dauphin ao longo da costa sudeste de Madagascar e inúmeros placers em praias e offshore na China [50].

Placers associados à atividade vulcânica também são encontrados, como no placer Aksu Diamas na Turquia e no ambiente marinho raso de Nea Peramos na Grécia [50]. No Brasil, as ETRs são historicamente encontradas nas areias monazíticas do litoral, com extração inicial na praia de Cumuruxatiba, na Bahia, e ocorrências também no litoral do Espírito Santo e no norte do Rio de Janeiro [66].

## **4. Mineração**

### **4.1. Legislação e Governança**

A exploração e extração de minerais no fundo do mar são regulamentadas por um arcabouço legal internacional e nacional. A principal entidade reguladora para áreas além das jurisdições nacionais, conhecidas como "a Área" (que abrange cerca de 54% da área total dos oceanos globais), é a Autoridade Internacional dos Fundos Marinhos (ISA), que foi estabelecida pela Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (UNCLOS) de 1982, que entrou em vigor em 1994. Sua responsabilidade é regular a exploração e mineração no fundo do mar, com o objetivo primordial de prevenir, reduzir e controlar a poluição marinha, e proteger e conservar os recursos naturais e a biodiversidade [1].

A ISA concede contratos de extração, que geralmente têm duração de 15 anos e, desde o início dos anos 2000, foram celebrados contratos para exploração e extração com diversos países da Europa, Ásia e Pacífico, concedendo direitos exclusivos para prospecção em setores do fundo do mar [59]. Até 2020, a ISA possuía 30 contratos de exploração e extração, sendo 16 deles para nódulos polimetálicos localizados na Zona de Fratura Clarion-Clipperton (CCZ) [1].

A ISA está em processo de finalização de seus regulamentos de exploração, conhecidos como "Código de Mineração", que permitirão a futura extração de minerais. Dentro do Código de Mineração, os contratados são obrigados a propor Zonas de Referência de Preservação e Zonas de Referência de Impacto. As primeiras são áreas onde a mineração não ocorre e que servem como ponto de comparação para monitoramento dos impactos, enquanto as segundas são áreas diretamente afetadas. A manutenção de uma Zona de Referência de Preservação próxima à área explorada pode, inclusive, favorecer a recolonização de espécies nativas [67].

Apesar desse possível favorecimento, ainda há um conhecimento limitado sobre a biodiversidade e a dinâmica dos ecossistemas de águas profundas. É amplamente aceito que ainda não é possível emitir uma avaliação conclusiva de risco dos efeitos da mineração comercial em larga escala no fundo do mar devido a essas lacunas. Isso demanda estudos ambientais adicionais antes da extração comercial em grande escala, com a possibilidade de uma moratória na mineração em águas profundas [53].



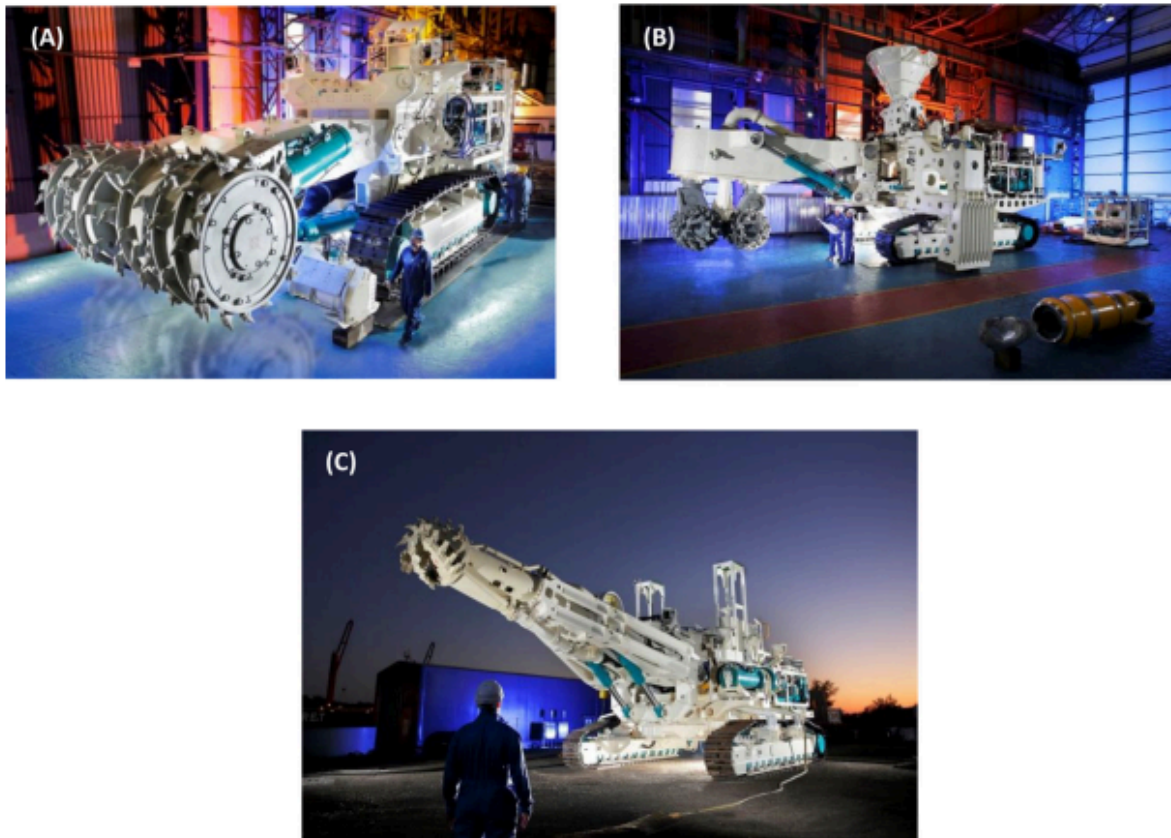
*Figura 7 - Seres vivos em área rica em nódulos polimetálicos [68].*

Diferente da “Área”, as Zonas Econômicas Exclusivas (ZEE) dos estados costeiros estão sob controle da jurisdição nacional que é aplicada à exploração e extração de minerais [53]. Países com grandes áreas de jurisdição marítima e com depósitos de ETRs no fundo do oceano, como Portugal, Reino Unido, Nova Zelândia, França e Japão, possuem o potencial para explorar esses recursos. Um exemplo é o caso das Ilhas Cook, que desenvolveram uma Lei Nacional de Mineração Marinha para a gestão de seus recursos minerais marinhos. Essa legislação permitiu que as primeiras licenças de exploração fossem concedidas, com um processo transparente e apoio da maioria das comunidades locais, apesar da oposição de organizações ambientais globais [50].

#### **4.2. O Processo de Mineração em Águas Profundas**

A escavação e coleta de minerais no leito marinho envolve tecnologia avançada e operações remotamente controladas. Um exemplo notável é o da mina Solwara-1 explorada pela empresa canadense Deep Sea Mining Finance Limited (DSMFL), que foi a primeira exploração comercial de sulfetos polimetálicos no fundo do mar. As operações de escavação e coleta são realizadas por três máquinas robóticas remotamente controladas. A primeira é a máquina de corte auxiliar, que prepara o leito marinho robusto (Figura 8 - B), em seguida, a máquina de corte principal (Figura 8 - A), mais potente, realiza o corte em massa, e por último, uma

máquina coletora (Figura 8 - C) recolhe o material cortado, que possui aproximadamente 2,5 cm de diâmetro [1].



*Figura 8 - O maquinário utilizado na escavação e coleta [1].*

Após a coleta, o material é transportado do fundo do mar para uma plataforma de mineração na superfície do oceano através de uma cadeia de tubos com 40 cm de diâmetro, que se estende por aproximadamente 1600 metros de profundidade. Bombas especiais e um sistema de elevação que injeta ar na tubulação facilitam este transporte vertical. Uma vez na embarcação de apoio, o material passa por um pré-processamento, que pode incluir peneiramento rotativo, hidrociclones e desaguamento para gerar uma “mistura de nódulos”. Em seguida o material é drenado, carregado em armazéns de armazenamento e, finalmente, transferido para contêineres para envio para o processamento onshore [1].

## 5. Considerações Finais

É notável que a mineração em águas profundas é vista como uma alternativa promissora para o futuro da energia renovável e uma possível solução para a aquisição de ETRs. No entanto, essa atividade apresenta tanto vantagens quanto desafios complexos, especialmente no que tange à governança e aos impactos socioambientais.

Nódulos do Cinturão Clarion-Clipperton (CCZ) e crostas da Zona de Crosta Primária (PCZ) são de grande interesse econômico pela abundância de ETRPs e outros metais como cobalto e níquel [59], logo essas regiões podem ser exploradas não apenas pelo interesse em ETRs, tornando estes últimos subprodutos da mineração desses outros metais.

Vale ressaltar também que nódulos marinhos e crostas de ferromanganês são depósitos estritamente bidimensionais, localizados no leito marinho sem sobrecarga significativa, ao contrário da mineração terrestre que exige a remoção de grandes volumes de material [55]. Como já foi mencionado, a natureza dessas estruturas é mais próxima de um concentrado do que de um minério, o que pode diminuir a intensidade energética e o impacto de sua coleta, transporte e processamento [56].

Outro fator a ser considerado é a potencial redução de impactos ambientais em terra. Um estudo prospectivo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) sugere que os metais de origem marinha podem reduzir a pegada de carbono em 16% a 38% e os impactos de acidificação em 70% a 72% em comparação com as alternativas terrestres, dependendo da localização e da matriz elétrica do processamento em terra. Isso se deve em parte à maior qualidade do material original, lembrando que o processo de cominuição é menos intensivo em energia, pois os nódulos e outras estruturas são considerados mais macios do que os minérios terrestres convencionais, e à flexibilidade na escolha da localização para o processamento

onshore, preferencialmente em locais com matrizes energéticas renováveis. As atividades offshore de mineração em águas profundas contribuem de forma menor para o impacto ambiental total nas categorias de mudança climática e formação de oxidantes fotoquímicos [53].

Fica evidente também a possibilidade da mineração em águas profundas resolver questões geopolíticas. A exploração de depósitos marinhos pode diversificar as fontes de metais críticos, reduzindo a dependência de um pequeno número de exportadores, como a China, que atualmente domina uma parte significativa da produção e comercialização de ETRs. Essa diversificação pode ajudar a diminuir tensões políticas e comerciais globais [1].

Contudo, os desafios desse tipo de mineração não devem ser ignorados, sendo um deles as já mencionadas lacunas de conhecimentos e os impactos ambientais significativos. As áreas de águas profundas são os ecossistemas menos explorados da Terra, com um conhecimento limitado sobre sua biodiversidade e dinâmica. É amplamente aceito que ainda não é possível fazer uma avaliação de risco conclusiva dos efeitos da mineração comercial em larga escala no fundo do mar devido a essas lacunas [50].

A raspagem do leito oceânico por dispositivos de mineração afetará diretamente as comunidades de águas profundas, levando potencialmente à perda de biodiversidade e mudanças na estrutura dos ecossistemas [2]. Muitos organismos sésseis (como esponjas e corais) que dependem de substratos duros como os nódulos podem ser extintos, e a recuperação natural é muito lenta podendo demorar milhões de anos para a formação de novos nódulos e décadas para recuperação de ecossistemas [50]. Além disso, há a questão das plumas de sedimentos causada pelo movimento dos equipamentos, que podem se dispersar por quilômetros. Essas plumas podem causar o enterramento de organismos bentônicos, e afetar ecossistemas locais e distantes [50].

Outra desvantagem é a liberação de compostos tóxicos e radioativos, como metais pesados de camadas anóxicas, e tório e urânio, presentes em minerais como

a monazita. A produção de uma tonelada de OTRs pode exigir o tratamento de 1,4 toneladas de resíduos radioativos [50].

Deve ser mencionado também o elevado volume de água que é usado na escavação e pré-processamento, o que pode causar perturbações em peixes e a sucção e morte de zooplâncton, um ator essencial para o equilíbrio de ecossistemas marinhos. As preocupações também incluem a destruição de recursos genéticos marinhos com alto potencial farmacêutico, ainda inexplorados [50].

Além dos desafios ambientais, existem os de natureza técnica e econômicas, como por exemplo o fato do fundo do mar ser um ambiente extremamente hostil ao ser humano, devido à alta pressão, grandes distâncias da costa e dificuldade em prever mudanças climáticas a longo prazo, o que torna a exploração e mapeamento altamente desafiadores [1].

Já no âmbito econômico, embora a tecnologia tenha avançado, a exploração de novos depósitos de ETRs pode não ser lucrativa a longo prazo devido às incertezas na demanda e preços [69]. Além disso, o custo de obtenção pode não ser compensador em comparação com o produto importado [46]. Outra questão a ser levantada é a da obsolescência planejada. A cultura de consumo e o descarte rápido de aparelhos que utilizam ETRs, muitas vezes devido à "obsolescência planejada", aumentam a demanda por esses elementos, contribuindo para a escassez e os impactos da mineração [20], sendo a reciclagem apresentada como uma alternativa para mitigar essa demanda [1].

Em síntese, a mineração em águas profundas representa uma fronteira estratégica e tecnológica para suprir a crescente demanda por minerais críticos, oferecendo a promessa de novas fontes e uma possível redução de certos impactos ambientais em comparação com a mineração terrestre [1]. Contudo, essa promessa vem acompanhada de desafios ambientais, regulamentais e econômicos substanciais, exigindo uma abordagem precaucional, pesquisa contínua e colaboração internacional para garantir que qualquer exploração e exploração futuras sejam conduzidas de maneira sustentável e responsável, protegendo os frágeis e pouco compreendidos ecossistemas marinhos.

## Referências

- [1] TORO, N; ROBLES, P; JELDRES, R, I. Seabed mineral resources, an alternative for the future of renewable energy: A critical review. *Ore Geology Reviews*, 2020. v. 126, p. 103699.
- [2] MILINOVIC, J., RODRIGUES, F. J., BARRIGA, F. J., & MURTON, B. J., Ocean-floor sediments as a resource of rare earth elements: An overview of recently studied sites. *Minerals*, 2021. 11(2), 142.
- [3] JARONI, M.S., FRIEDRICH, B., LETMATHE, P., Economical feasibility of rare earth mining outside China. *Minerals* 2019 9 (10).
- [4] SHARMA, R., Deep-sea mining: Resource potential, technical and environmental considerations. *Deep-Sea Mining: Resour. Potential Tech. Environ. Consider.* 2017. 1–535.

[5] EMSBO, P.; MCLAUGHLIN, P.I.; BREIT, G.N.; BRAY, E.A.; KOENIG, A.E. Rare earth elements in sedimentary phosphate deposits: Solution to the global REE crisis? *Gondwana Res.* 2015, 27, 776–785.

[6] BERN, C.R.; SHAH, A.K.; BENZEL, W.M.; LOWERS, H.A. The distribution and composition of REE-bearing minerals in placers of the Atlantic and Gulf coastal plains, USA. *J. Geochem. Explor.* 2016, 162, 50–61.

[7] KYNICKY, J.; SMITH, M.P.; XU, C. Diversity of rare earth deposits: The key example of China. *Elements* 2012, 8, 361–367.

[8] LIAO, J.; SUN, X.; WU, Z.; SA, R.; GUAN, Y.; LU, Y.; LI, D.; LIU, Y.; DENG, Y.; PAN, Y. Fe-Mn (oxyhydr)oxides as an indicator of REY enrichment in the deep-sea sediments from the central North Pacific. *Ore Geol. Rev.* 2019, 112, 103044.

[9] CONNELLY, N.G., DAMHUS, T., HARTSHORN, R.M., HUTTON, A.T., Eds. International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). Nomenclature of Inorganic Chemistry IUPAC Recommendations 2005; IUPAC: Cambridge, UK, 2005; p. 51.

[10] VAN GOSEN, B.S.; VERPLANCK, P.L.; EMSBO, P. Rare Earth Element Mineral Deposits in the United States; US Department of the Interior, US Geological Survey: Reston, VA, USA, 2019; pp. 1–14.

[11] DOSTAL, J. Rare earth element deposits of alkaline igneous rocks. *Resources* 2017, 6, 34.

[12] GOLROUDBARY, S. R., MAKARAVA, I., KRASLAWSKI, A., & REPO, E. Global environmental cost of using rare earth elements in green energy technologies. *Science of the Total Environment*, 832, 155022. 2022.

[13] JENNESS, J.E.; OBER, J.A.; WILKINS, A.M.; GAMBOGI, J. A world of minerals in your mobile device. *US Geol. Surv. Gen. Inf. Prod.* 2016, 167, 1–2.

[14] ROHRIG, B. Smartphones: Smart Chemistry. *Chem. Matters* 2015, 10–12.

[15] HE, P., HE, M. & ZHANG, H. State of rare earth elements in the rare earth deposits of Northwest Guizhou, China. 2018. *Acta Geochim* 37, 867–874

[16] BARRIGA, F.J.A.S. Sustainable and responsible mining in the deep oceanic crust. In *Colóquio Contaminação Ambiental*; Neiva, A., Ed.; Academia das Ciências de Lisboa: Lisbon, Portugal, 2019; pp. 3–28.

- [17] KOSTOVA, I. Lanthanides as anticancer agents. *Curr. Med. Chem. Anticancer Agents*. 2005, 5, 591–602.
- [18] MITSUMORI, L.M.; BHARGAVA, P.; ESSIG, M.; MAKI, J.H. Magnetic resonance imaging using gadolinium-based contrast agents. *Top. Magn. Reson. Imaging* 2014, 23, 51–69.
- [19] Shanghai Metal Market, Rare Earth Prices. **Shanghai Metal Market**. 16 dez, 2025. Disponível em: <https://www.metal.com/en/markets/33>. Acesso em: 16 dez, 2025.
- [20] SANTOS-FUSER, L. N. DOS. A geopolítica das Terras Raras e a inserção do Brasil. *Geopolítica(s). Revista de estudios sobre espacio y poder*, 2023.14(1), 27-50.
- [21] LEE, Y; DACASS, T. Reducing the United States' risks of dependency on China in the rare earth market. *Resources policy*, 2022. v. 77, p. 102702,
- [22] MELO, F. R. A geopolítica das terras raras. *Revista Carta Internacional*. 2017. 12(2), 219-243.
- [23] YANG, R. Analyzing rare earth mine distributions in mainland China: a machine learning approach with k-means clustering and SVM. 2024. *Earth Science Informatics*. 17. 3611-3622.
- [24] USGS (United States Geological Survey). Rare Earths. Mineral Commodity Summaries, **USGS**, Jan, 2022. Disponível em <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-rare-earths.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2025.
- [25] JARONI, M.S., FRIEDRICH, B., LETMATHE, P., Economical feasibility of rare earth mining outside China. *Minerals* 9 (10). 2019.
- [26] U.S. Geological Survey, 2021. Mineral Commodity Summaries 2021. **U.S. Geological Survey**. 2021. Disponível em <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-rare-earths.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2025.
- [27] VAN GOSEN, B.S.; VERPLANCK, P.L.; EMSBO, P. Rare Earth Element Mineral Deposits in the United States; US Department of the Interior, US Geological Survey: Reston, VA, USA, 2019.
- [28] JOWITT, S. Occurrence and detection of the rare earth elements. 10.2166/9781789062236\_0045. 2022.

- [29] KALANTZAKOS, S. China and the Geopolitics of Rare Earths. New York: Oxford University Press. 2018.
- [30] KIGGINS, R. D. . The Strategic and Security Implications of Rare Earths. Em Kiggins, R. D. (Ed.), The Political Economy of Rare Earth Elements – Rising Powers and Technological Change. (pp. 1-19). London: Palgrave Macmillan. 2015
- [31] ZHANG, H., CAO, H., & GUO, Y. The time-varying impact of geopolitical relations on rare earth trade networks: What is the role of China's rare earth export restrictions?. Technological Forecasting and Social Change, 206, 123550. 2024.
- [32] LEITE, A. C. C., & ARAÚJO, M. C. G. Elementos de terras raras como instrumento de Smart Power da China. Estudos Internacionais, 3(2), 287-307. 2015.
- [33] FALCONNET, P., The economics of rare earths. J. Less Common Met. 111 (1–2), 9–15. Gholz, E., Hughes, L., 2021. Market structure and economic sanctions: the 2010 rare earth elements episode as a pathway case of market adjustment. Rev. Int. Polit. Econ. 28 (3), 611–634. 1985.
- [34] GOLEV, A., SCOTT, M., ERSKINE, P.D., ALI, S.H., BALLANTYNE, G.R., Rare earths supply chains: current status, constraints and opportunities. Resour. Pol. 41, 52–59. 2014.
- [35] SCHMID, M. Mitigating supply risks through involvement in rare earth projects: Japan's strategies and what the US can learn. Resour. Pol. 63, 101457. 2019a
- [36] CASEY, J. P. Into Africa: the US' drive for African rare earth minerals. **Mining Technology**, 18 set, 2019.. Disponível em <https://www.mining-technology.com/features/intoafrica-the-us-drive-for-african-rare-earth-minerals/>. Acesso em: 14 jun. 2025.
- [37] TRACY, B.S. An Overview of Rare Earth Elements and Related Issues for Congress (CRS Report R46618). 2020.
- [38] U.S. Department of Energy, DOE awards \$19 million for initiatives to produce rare earth elements and critical minerals [Announcement]. **U.S.D.O.E.** 29 Abr, 2021. Disponível em: <https://www.energy.gov/articles/doe-awards-19-million-initiatives-produce-rare-earth-elements-and-critical-minerals>. Acesso em: 14 jun. 2025.
- [39] U.S. Department of Energy, Department of energy to provide \$18 million for research on critical materials. **U.S.D.O.E.** Abr, 2020. Disponível em: <https://www.energy.gov/articles/department-energy-provide-18-million-research-critical-materials>. Acesso em: 14 jun. 2025.

[40] PAVEL, C.C., LACAL-ARÁNTEGUI, R., MARMIER, A., SCHULER, D., TZIMAS, E., BUCHERT, M., JENSEIT, W., BLAGOEVA, D., Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines. *Resour. Pol.* 52, 349–357. 2017.

[41] DAVIS, R. A., NOTOYA, K., How Japan Built a Rare-Earth Supply Chain Without China. **The New York Times**. 8 dez, 2025. Disponível em: <https://www.nytimes.com/2025/12/08/business/japan-rare-earths-lynas.html>. Acesso em: 18 dez, 2025.

[42] BRADSHER, K. Amid Tension, China Blocks Vital Exports to Japan. **The New York Times**, 22 set, 2010 Disponível em: <https://www.nytimes.com/2010/09/23/business/global/23rare.html>. Acesso em: 14 jun. 2025.

[43] MEDEIROS, C. A., & TREBAT, N. M Transforming natural resources into industrial advantage: the case of China's rare earths industry. *Brazilian Journal of Political Economy*, 37(3), 504-526. 2017.

[44] JOWITT, S.M.; WERNER, T.T.; WENG, Z.; MUDD, G.M. Recycling of the rare earth elements. *Curr. Opin. Green. Sustain. Chem.* 2018, 13, 1-7.

[45] RYALL, J. Japan, US join forces to mine deep-sea rare earths amid China's dominance. **South China Morning Post**, 7 nov, 2025. Disponível em: <https://www.scmp.com/week-asia/politics/article/3331818/japan-us-join-forces-mine-deep-sea-rare-earths-amid-chinas-dominance>. Acesso em: 10 nov, 2025.

[46] BERNARDES, J. Valiosas e versáteis: pesquisas com terras raras mostram caminho para criar cadeia produtiva no Brasil. **Jornal da USP**, 22 dez, 2021. Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/valiosas-e-versateis-pesquisas-com-terras-raras-mostram-caminho-para-criar-cadeia-produtiva-no-brasil/>. Acesso em: 14 jun, 2025.

[47] FARIAS, E. Terras indígenas da Amazônia são alvos de pesquisas sobre terras raras. **Amazônia Real**, 21 out, 2013. Disponível em: <https://amazoniareal.com.br/terras-indigenas-da-amazonia-sao-alvos-de-pesquisas-sobre-terras-raras/>. Acesso em: 14 jun, 2025.

[48] FOSTER, G. Brasil reivindica ilha submersa no Atlântico do tamanho da Espanha rica em 'minerais do futuro'; entenda. **G1**. 5 jul, 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2025/07/05/brasil-reivindica-ilha-submersa-no-atlantico-do-tamanho-da-espanha-rica-em-minerais-do-futuro-entenda.ghtml>. Acesso em: 10 nov, 2025.

[49] DE MATOS, C. S., et al. "Chemical-mineralogical characterization of critical elements into ferromanganese crusts." *Journal of Materials Research and Technology* 25. 2023: 5633-5649.

[50] SAKELLARIADOU, F., GONZALEZ, F. J., HEIN, J. R., RINCÓN-TOMÁS, B., ARVANITIDIS, N., & KUHN, T. Seabed mining and blue growth: exploring the potential of marine mineral deposits as a sustainable source of rare earth elements (MaREEs)(IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 94(3), 329-351. 2022.

[51] KONSTANTINOVA, N., CHERKASHOV, G., HEIN, J.R., MIRÃO, J., DIAS, L., MADUREIRA, P., KUZNETSOV, V., MAKSIMOV, F., Composition and characteristics of the ferromanganese crusts from the western Arctic Ocean. *Ore Geol. Rev.* 87, 88–99. 2017.

[52] RAJKOTWALLA, N. Polymetallic nodules may be a source of under-water oxygen. **Mining Magazine**. 24 jul, 2024 Disponível em: <https://www.miningmagazine.com/environment/news-analysis/4339357/polymetallic-nodules-source-water-oxygen>. Acesso em: 15 jun, 2025.

[53] ALVARENGA, R. A. F., PRÉAT, N., DUHAYON, C., & DEWULF, J. Prospective life cycle assessment of metal commodities obtained from deep-sea polymetallic nodules. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129884. 2022.

[54] GONZÁLEZ, F. J.; SOMOZA, L.; LEÓN, R.; MEDIALDEA, T.; DE TORRES, T.; ORTIZ, J.E.; LUNAR, R.; MARTÍNEZ-FRÍAS, J.; MERINERO, R. . Ferromanganese nodules and microhardgrounds associated with the Cadiz Contourite Channel (NE Atlantic): Palaeoenvironmental records of fluid venting and bottom currents. *Chem. Geol.* 310–311, 56–78. 2012.

[55] HEIN, J. R., MIZELL, K., KOSCHINSKY, A., CONRAD, T.A., Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources. *Ore Geol. Rev.* 51, 1–14. 2013.

[56] FUERSTENAU, M., HAN, K. *Principles of Mineral Processing*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., ISBN 0-87335-167-3. 2003.

[57] RONA, P.A., The changing vision of marine minerals. *Ore Geol. Rev.* 33 (3–4), 618–666. 2008.

[58] GLICKSON, D., 2016. Leg 3: A Geological Tour of the Northern Marianas!. **Nora Ocean Exploration**. Disponível em: <https://oceanexplorer.noaa.gov/oceanos/explorations/ex1605/logs/jul5/welcome.html>. Acesso em: 15 jun, 2025.

- [59] KOSCHINSKY, A., HEINRICH, L., BOEHNKE, K., COHRS, J.C., MARKUS, T., SHANI, M., SINGH, P., SMITH STEGEN, K., WERNER, W., Deep-sea mining: Interdisciplinary research on potential environmental, legal, economic, and societal implications. *Integr. Environ. Assess. Manage.* 14 (6), 672–691. 2018.
- [60] MARINO, E., GONZÁLEZ, F.J., SOMOZA, L., LUNAR, R., ORTEGA, L., VÁZQUEZ, J.T., REYES, J., BELLIDO, E., Strategic and rare elements in Cretaceous-Cenozoic cobalt-rich ferromanganese crusts from seamounts in the Canary Island Seamount Province (northeastern tropical Atlantic). *Ore Geol. Rev.* 87, 41–61. 2017a.
- [61] TAKAYA, Y., YASUKAWA, K., KAWASAKI, T., FUJINAGA, K., OHTA, J., USUI, Y., ... & KATO, Y. The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements. *Scientific reports*, 8(1), 5763. 2018.
- [62] KATO, Y., FUJINAGA, K., NAKAMURA, K. et al. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geosci* 4, 535–539. 2011.
- [63] YASUKAWA, K., LIU, H., FUJINAGA, K., MACHIDA, S., HARAGUCHI, S., ISHII, T., NAKAMURA, K., KATO, Y., Geochemistry and mineralogy of REY-rich mud in the eastern Indian Ocean. *J. Asian Earth Sci.* 93, 25–36. 2014.
- [64] HERZIG, P., HANNINGTON, M. D., & PETERSEN, S. (2002). Technical requirements for exploration and mining of seafloor massive sulphide deposits and cobalt-rich ferromanganese crusts.
- [65] ZENG, Z.G.; MA, Y.; YIN, X.B.; SELBY, D.; KONG, F.C.; CHEN, S. Factors affecting the rare earth element compositions in massive sulfides from deep-sea hydrothermal systems. *Geochem. Geophys. Geosy.* 2015, 16, 2679–2693.
- [66] ROSENTAL, S., Terras Raras. Em CETEM (Ed.), *Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações.* (2 ed). (pp. 817-840). **Rio de Janeiro: CETEM/MCTI.** 2008. Disponível em <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/>. Acesso em: 15 jun, 2025.
- [67] MILLER, K. A., THOMPSON, K. F., JOHNSTON, P., SANTILLO, D., An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps. *Frontiers in Marine Science*, 4, 312755. 2018.

[68] COWING, K., Oxygen Produced In The Deep Sea Raises Questions About Extraterrestrial Life. **Astrobiology**. 27 ago, 2024. Disponível em: <https://astrobiology.com/2024/08/oxygen-produced-in-the-deep-sea-raises-questions-about-extraterrestrial-life.html>. Acesso em: 16 jun, 2025.

[69] ZHOU, B., LI, Z., CHEN, C., Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. *Minerals* 7 (11). 2017.