

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

Terras Raras: Aplicações atuais e reciclagem

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Dilma Vana Rousseff

Presidente

Michel Miguel Elias Temer Lulia

Vice-Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Marco Antonio Raupp

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia e Inovação

Luiz Antônio Rodrigues Elias

Secretário-Executivo

Arquimedes Diógenes Ciloni

Subsecretário de Coordenação das Unidades de Pesquisa

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Fernando Antonio Freitas Lins

Diretor

Arnaldo Alcover Neto

Coordenador de Análises Minerais

Claudio Luiz Schneider

Coordenador de Processos Minerais

Cosme Antônio de Moraes Regly

Coordenador de Administração

Francisco Wilson Hollanda Vidal

Coordenador de Apoio Tecnológico às Micro e Pequenas Empresas

Marisa Bezerra de Mello Monte

Coordenadora de Planejamento, Gestão e Inovação

Ronaldo Luiz Correa dos Santos

Coordenador de Processos Metalúrgicos e Ambientais

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

ISSN 0103-7382

ISBN 978-85-8261-010-7

STM - 91

Terras Raras: Aplicações atuais e reciclagem

Flávia Alves Ferreira

Química, M.Sc., Bolsista Programa de Capacitação
Institucional - PCI/CNPq

Marisa Nascimento

Engenheira Química, D.Sc. - CETEM/MCTI

CETEM/MCTI

2013

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

Marisa Bezerra de Mello Monte

Editora

Claudio Schneider

Subeditor

CONSELHO EDITORIAL

Arnaldo Alcover Neto (CETEM), Fernando A. Freitas Lins (CETEM), Regina Coeli C. Carrisso, (CETEM), Reiner Neumann (CETEM), Ronaldo Luiz C. dos Santos (CETEM), Achilles Junqueira B. Dutra (UFRJ), Antonio E. Clark Peres (UFMG), José Aury de Aquino (CDTN), José Farias de Oliveira (UFRJ), Lino R. de Freitas (CVRD), Luciano Tadeu da S. Ramos (CVRD), Mário Rui M. Leite (IGM-PORTUGAL) e Maurício L. Torem (PUC-RIO).

A Série Tecnologia Mineral publica trabalhos na área minerometalúrgica. Tem como objetivo principal difundir os resultados das investigações técnico-científicas decorrentes dos projetos desenvolvidos no CETEM.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Valéria Cristina de Souza

Coordenação Editorial

Rosely Romualdo

Editoração Eletrônica

Andrezza Milheiro

Revisão

Ferreira, Flávia Alves

Terras Raras: Aplicações Atuais e Reciclagem / Flávia Alves Ferreira, Marisa Nascimento. —Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013.

72p. (Série Tecnologia Mineral, 91)

1. Terras Raras. 2. Aplicações. 3. Reciclagem. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Ferreira, Flávia Alves. III. Nascimento, Marisa. IV. Título. V. Série.

CDD – 553.494

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUÇÃO	9
2 TERRAS RARAS – ÁREAS DE APLICAÇÃO	14
2.1 Lantânio, La (Z=57)	16
2.2 Cério, Ce (Z=58)	18
2.3 Praseodímio, Pr (Z=61)	21
2.4 Neodímio, Nd (Z=60)	23
2.5 Promécio, Pm (Z=61)	26
2.6 Samário, Sm (Z=62)	27
2.7 Európio, Eu (Z=63)	29
2.8 Gadolínio, Gd (Z=64)	30
2.9 Térbio, Tb (Z=65)	32
2.10 Disprósio, Dy (Z=66)	34
2.11 Hólmio, Ho (Z=67)	36
2.12 Érbio, Er (Z=68)	38
2.13 Túlio, Tm (Z=69)	40
2.14 Ítérbio, Yb (Z=70)	42
2.15 Lutécio, Lu (Z=71)	44
2.16 Ítrio, Y (Z=39)	46
2.17 Escândio, Sc (Z=21)	48

3 RECICLAGEM DE ELEMENTOS TERRAS RARAS	51
3.1 Ímãs Permantens de Elementos Terras Raras	51
3.2 Baterias de Hidreto Metálico de Níquel	55
3.3 Lâmpadas luminescentes	59
3.4 Fósforo de Tubos de Raios Catódicos (CRTs) Monitores de Computador	61
3.5 Pós para Polimento de Vidro	62
3.6 Catalisadores de Craqueamento de Fluídos	63
4 CONCLUSÕES	65
5 AGRADECIMENTOS	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

RESUMO

As terras raras compreendem um total de 17 elementos, sendo 15 os chamados lantanídeos, além de ítrio e escândio. Estes elementos apresentam abundância moderada na crosta da Terra, com exceção do promécio (Pm) que não ocorre na natureza.

As terras raras possuem aplicações em várias áreas da tecnologia devido a suas propriedades químicas, espectroscópicas e magnéticas. Entre as aplicações estão produtos presentes no nosso dia-a-dia até produtos de alta tecnologia como pigmentos, polimento de vidros, cerâmicas, pedras de isqueiros, catálise automotiva e do craqueamento do petróleo, visualização de imagens em exames laboratoriais, ímãs permanentes, supercondutores, repetidores laser, baterias miniaturizadas, entre outras.

Com a crescente utilização de terras raras ano após ano em diferentes áreas, aumenta também a geração de resíduos sólidos que contêm estes elementos. Já que as terras raras são recursos não renováveis, o aproveitamento destes elementos de produtos usados é primordial para o estabelecimento da economia de reciclagem. Este aproveitamento irá reduzir o volume de lixo produzido e possibilitar a utilização sustentável dos recursos minerais, escolha inevitável ao desenvolvimento da sociedade.

Palavras-chave

terras raras, aplicações, reciclagem.

ABSTRACT

The rare earths include a total of 17 elements, 15 called the lanthanides apart from yttrium and scandium. These elements are moderate abundance in the Earth's crust, with the exception of promethium (Pm), that does not occur in nature.

Rare earths have applications in various areas of technology due to their chemical, spectroscopic and magnetic properties. Applications include products present in our day-to-day to high-tech products such as pigments, polishing glass, ceramic, stone lighters, automotive catalysts and petroleum cracking, viewing images in laboratory tests, permanent magnets, superconducting laser repeaters miniaturized batteries, among others.

With the increasing use of rare earth year after year in different areas, it also increases the generation of solid waste containing these elements. Since rare earths are non-renewable resources, the use of these elements used products is paramount to the establishment of recycling economy. This use will reduce the amount of waste produced and enable the sustainable use of mineral resources, the inevitable choice for the development of society.

Keywords

rare earths, applications, recycling.

1 | INTRODUÇÃO

De acordo com a Comissão de Nomenclatura em Química Inorgânica da IUPAC (International Union of Pure and Applied chemistry), o termo terras raras deve ser utilizado para designar o grupo formado pelo lantânio (La, $Z = 57$), os lantanídeos (Ce, $Z = 58$) ao lutécio (Lu, $Z = 71$), o escândio (Sc, $Z = 21$) e o ítrio (Y, $Z = 39$). A inclusão dos dois últimos elementos é devido às semelhanças nas propriedades químicas destes e também porque, em geral, ocorrem nos mesmos minerais que os elementos deste grupo. O promécio não ocorre na natureza (Abrão, 1994; Albanez, 1996).

As terras raras são classificadas em leves: lantânio, cério, praseodímio e neodímio; médias: samário, európio e gadolínio e pesadas: térbio, disprósio, hólmio, térbio, túlio, itérbio, lutécio, escândio e ítrio (Morais, 2012).

O termo terras raras não é apropriado para designar os elementos citados anteriormente, já que estes receberam esta denominação devido à sua descoberta ter ocorrido na forma de óxidos, na verdade mistura de óxidos, os quais eram denominados por *terra* na nomenclatura arcaica, em minerais que, na época, eram considerados raros (Greenwood & Earnshaw, 1984; Lee, 1999).

No entanto, hoje é sabido que as terras raras são mais abundantes que muitos outros elementos da tabela periódica, exceção feita ao promécio, que não ocorre na natureza, apenas em traços nos minerais do urânio (4×10^{-15} g/kg) como consequência da fissão espontânea do urânio-238. Cério é a terra rara mais abundante. Em geral, as propriedades nucleares fazem com que os elementos de número atômico (Z) par sejam mais abundantes que os de número atômico ímpar.

Como exemplo, pode-se citar os elementos túlio (0,5 ppm) e lutécio (0,8 ppm) que são as terras raras menos abundantes na crosta terrestre, são mais abundantes que a prata (0,07 ppm) e o bismuto (0,008 ppm) (Abrão, 1994; Greenwood & Earnshaw, 1984; Albanez, 1996; Lee, 1999).

A primeira aplicação industrial das terras raras data de 1891 e estava relacionada com as invenções do empresário e cientista austríaco Carl Auer von Welsbach, que usou as terras raras para resolver o que era, naquele tempo, um grande problema técnico - a produção de luz brilhante. Welsbach tinha conhecimento que muitos óxidos brilham fortemente sob aquecimento. Após persistente experimentação, Auer apresentou a camisa para lâmpião a gás, um óxido composto de 99% de tório e 1% de cério. Ainda hoje, a produção de luz por meio das camisas para lâmpião a gás permanecem em uso em áreas remotas onde a eletricidade não está disponível ou é irregular e, em alguns dispositivos de sinalização em ferrovia. As ideias e técnicas desenvolvidas por Carl Auer von Welsbach foram patenteadas em 1891 (Gupta & Krishnamurthy, 1992; Martins & Isolani, 2005).

Com o passar do tempo, suas propriedades foram tornando-se mais conhecidas e seus compostos passaram a ser mais utilizados, tais como na produção de “mischmetal” para pedras de isqueiro, baterias recarregáveis e aplicações metalúrgicas (Zinner, 1982, Kilbourn, 1993). As terras raras apresentam uma variedade crescente de aplicações na tecnologia moderna, fornecendo materiais cruciais para a indústria e benefícios aos consumidores dos produtos finais (Molycorp Inc., 1993; Gupta & Krishnamurthy, 1992).

Graças ao desenvolvimento tecnológico, as terras raras ganharam novos usos e aplicações muito diversificadas, conforme se pode constatar a seguir: O Ce apresenta afinidade por elementos como fósforo, sendo adequado para uso em purificadores de água; compostos de cério, com pureza superior a 98% estão presentes em conversores catalíticos nos automóveis, às vezes em concentrações de até 30% em massa. Hidróxido de cério é utilizado na fabricação de vidros especiais e polimento de vidros e lentes. O lantânio atua como um absorvedor de hidrogênio em baterias recarregáveis. Tanto o Ce como o La agem como estabilizadores em compostos catalíticos, como no processo de transformação de petróleo em gasolina. O lantânio é um elemento importante em baterias de carro híbrido; cada exemplar deste tipo de automóvel contém cerca de 4,5 kg de La (Koerth-Baker, 2012; Morais, 2012).

As terras raras Eu, Y e Tb são usadas para produzir materiais luminescentes “fósforos” mais eficientes energeticamente que os produzidos com compostos de Sb e Mn, estão presentes também em monitores para computadores, telefones, assim como em lâmpadas fluorescentes compactas. O Érbio é usado na fabricação de cabos de fibra óptica e laser (Tiesman, 2010).

Os elementos Neodímio e Disprósio apresentam uma magnetização superior a elementos como o Ferro, o que permite utilizá-los na fabricação de um ímã mais forte e menor. Combinado com outros elementos, estes ímãs (Nd-Fe-B) estão entre os mais fortes, capazes de resistir a temperaturas tão elevadas quanto 230°C e operar em um tamanho menor do que caixas de engrenagens em turbinas eólicas e carros híbridos. O disprósio também é muito importante para alto desempenho em motores elétricos de robôs cirúrgicos para turbinas eólicas (<http://www.nothernminerals.com.au>, 2010).

Os elementos terras raras são utilizados em tecnologias que variam de iPods a sistemas de defesa militar, estando totalmente integrados ao dia a dia das pessoas. Embora sejam usados em pequenas quantidades na maioria de suas aplicações, a demanda por esses elementos aumentou exponencialmente (Hatch, 2012).

A China detém atualmente mais de 90% da produção global de elementos terras raras. Graças ao crescente consumo interno, o país diminuiu a cota de exportação dos ETRs de 50.145 toneladas em 2009 para apenas 31.130 toneladas em 2012. Este fato poderá provocar problemas tanto às indústrias que utilizam os referidos elementos em seus produtos quanto aos consumidores finais (Alonso *et al.*, 2012).

Diante deste cenário, muitas empresas da área de mineração estão buscando novos depósitos de elementos terras raras que possam ser explorados e, em paralelo, algumas minas antigas estão sendo reabertas. Países que não possuem depósitos destes metais, terão que investir na mineração urbana, ou seja, na reciclagem de materiais como sucata, resíduos industriais e produtos usados contendo os elementos terras raras. O investimento em reciclagem das terras raras é, além disso, uma estratégia para os “problemas de desequilíbrio de geração das terras raras”. Ou seja, para se obter um determinado elemento gera-se um excesso de outros elementos mais abundantes. Um exemplo que pode ser citado é a mineração de neodímio, responsável por produzir uma quantidade excessiva de lantânio e cério (Binnemans *et al.*, 2013). Existe uma estimativa indicando que a demanda por neodímio e disprósio aumentará em 700% e 2600%, respectivamente, até 2038 (Alonso *et al.*, 2012).

Outro ponto a enfatizar sobre a reciclagem é que comparada à mineração dos elementos terras raras, a obtenção destes elementos por meio da mineração urbana não apresenta preocupações com elementos radioativos como urânio e tório, além da composição do concentrado apresentar menos complexidade (Xu e Peng, 2009).

Apesar da dedicação de muitos pesquisadores neste tema, a reciclagem de elementos terras raras ainda é muito pouco representativa. Entre os fatores que contribuem para esta constatação pode-se citar a coleta ineficiente, desafios tecnológicos e escassez de incentivos (Binnemans *et al.*, 2013).

No texto a seguir serão apresentadas aplicações dos vários compostos de terras raras disponíveis atualmente, assim como dificuldades e soluções existentes veiculadas à reciclagem em resíduos industriais como escórias metalúrgicas, resíduos de bauxita (lama vermelha), fosfogesso, resíduos de mina, águas residuais e de produtos usados como ímãs permanentes, baterias recarregáveis de hidreto de níquel metálico (NiMH) e lâmpadas luminescentes.

2 | TERRAS RARAS – ÁREAS DE APLICAÇÃO

Os elementos terras raras apresentam propriedades químicas, magnéticas e luminescentes incomparáveis. Suas utilizações compreendem desde produtos do nosso cotidiano como catálise automotiva, craqueamento do petróleo, pedras de isqueiro, pigmentos e polimento de vidros e cerâmicas até produtos de alta tecnologia como baterias miniaturizadas, repetidores laser, luminóforos, supercondutores e ímãs permanentes. Desempenham papel importante nas ‘indústrias verdes’ como as das turbinas eólicas e dos carros híbridos (Lapido-Loureiro, 2013). Nas Tabelas 1 e 1a são apresentadas de forma resumida as aplicações das terras raras.

Tabela 1. Campos de aplicações dos elementos terras raras, escândio e ítrio, em ordem alfabética.

Elemento Terras Raras	Aplicações
Cério (Ce)	Catálise (automóveis e refino de petróleo), cerâmicas, vidros, mischmetal, fósforos, pós para polimento.
Disprósio (Dy)	Cerâmicas, fósforos e aplicações nucleares.
Érbio (Er)	Cerâmicas, coloração de vidros, fibras óticas, lasers e aplicações nucleares.
Európio (Eu)	Fósforos.
Gadolínio (Gd)	Cerâmicas, vidros, detecção ótica e magnética, visualização de imagens em medicina.
Hólmio (Ho)	Cerâmicas, lasers e aplicações nucleares.
Lantânio (La)	Catálise automotiva.
Lutécio (Lu)	Cintiladores de cristal único.
Neodímio (Nd)	Catálise, filtros de infravermelho, lasers, ímãs permanentes, pigmentos.

Tabela 1a. Campos de aplicações dos elementos terras raras, escândio e ítrio, em ordem alfabética.

Elemento Terras Raras	Aplicações
Praseodímio (Pr)	Cerâmicas, vidros e pigmentos.
Promécio (Pm)	Fósforos, miniaturas de baterias nucleares e dispositivos de medida.
Samário (Sm)	Filtros de micro-ondas, aplicações nucleares e ímãs permanentes.
Térbio (Tb)	Fósforos.
Túlio (Tm)	Tubos de feixes eletrônicos e visualização de imagens médicas.
Ítérbio (Yb)	Indústrias química e metalúrgica.
Ítrio (Y)	Capacitores, fósforos, radares e supercondutores.
Escândio (Sc)	Indústria aeroespacial, bastões de baseball, aplicações nucleares, iluminação e supercondutores.

Fonte: Lapido-Loureiro, 2013.

As três principais aplicações de elementos terras raras são os ímãs permanentes, as baterias recarregáveis de hidreto de níquel metálico (NiMH) e as lâmpadas luminescentes. Estes itens estão presentes em veículos elétricos, unidades de disco rígido, entre outros. Juntos, estes representam mais de 80% do mercado de terras raras em termos de valor, sendo 38% para ímãs, 32% para lâmpadas e 13% para as ligas metálicas (Binnemans *et al.* 2013). Na Tabela 2 mostra o uso de terras raras por aplicação em porcentagem.

Tabela 2. Uso de terras raras por aplicação em porcentagem.

Aplicação	La	C	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Outro
Ímãs			23,4	69,4			2	0,2	5		
Ligas para baterias	50	33,4	3,3	10	3,3						
Metalurgia	26	52	5,5	16,5							
Catalisadores	5	90	2	3							
FCC	90	10									
Pós para polimentos	31,5	65	3,5								
Aditivos para vidros	24	66	1	3						2	4
Fósforos	8,5	11				4,9	1,8	4,6		69,2	
Cerâmicas	17	12	6	12						53	
Outros	19	39	4	15	2		1			19	

Fonte: Curtis, 2010.

2.1 | Lantânio, La (Z = 57)

Compostos ricos no metal terra rara lantânio têm sido amplamente utilizados como componentes de catalisadores de craqueamento de fluido catalítico, especialmente na fabricação de combustível com baixa octanagem a partir de petróleo. O lantânio é utilizado em materiais luminescentes cuja base é verde de aluminato ($\text{La}_{0.4}\text{Ce}_{0.45}\text{Tb}_{0.15}\text{PO}_4$). Zirconatos lantanídicos são usados por suas propriedades catalíticas e condutividade, ao passo que zircônia estabilizada com lantânio

tem propriedades eletrônicas e mecânicas úteis. O lantânio é utilizado em cristais de laser na seguinte composição: ítrio-lantânio-fluoreto (YLF) (Gupta & Krishnamurthy, 1992).

Suas ligas desempenham papel importante em baterias de armazenamento de hidrogênio, conseguindo absorver até 400 vezes o seu próprio volume deste gás. Seus fósforos são usados em filmes de raios-X e em certos lasers para ajudar a reduzir a dose de radiação em pacientes em até 75%. Apresenta abundância na crosta terrestre de $3,9 \times 10^1$ mg/Kg e no oceano de 3.4×10^{-6} mg/L (HURST, 2010). Nas Tabelas 3 e 3a são apresentados compostos de lantânio disponíveis no mercado, suas características e um resumo de suas aplicações.

Tabela 3. Compostos de lantânio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Acetato de lantânio	$\text{La}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Cristal Branco)	Catálise, eletrônica, cristais, materiais luminescentes;
Boreto de lantânio	LaB_6 (Pó de cor roxa)	Cátodo e filamento (eletrônica), recobrimento de vidro, deposição física de vapor (PVD), materiais supercondutores;
Cloreto de lantânio	$\text{LaCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Cristal Branco)	Catálise, eletrônica, vidro e tratamento de água;
Fluoreto de lantânio	LaF_3 (Cristal Branco)	Catálise, eletrônica e cristais;
Hidróxido de lantânio	$\text{La}(\text{OH})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Cristal Branco)	Catálise, Cristais e materiais luminescentes.

Tabela 3a. Compostos de lantânio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Lantânio metálico	La (Cinza prateado)	Armazenamento de hidrogênio, baterias recarregáveis de NiMH, metalurgia e ligas especiais;
Nitrato de lantânio	La(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O (Branco cristalino)	Catálise, eletrônica, cristais e materiais luminescentes;
Oxalato de lantânio	La ₂ (C ₂ O ₄) ₃ · xH ₂ O (Material branco)	Catálise, eletrônica, cristais e materiais luminescentes;
Óxido de lantânio	La ₂ O ₃ (Material branco)	Vidro óptico, catálise, cerâmica, eletrônica, cristais e materiais luminescentes;
Sulfato de lantânio	La ₂ (SO ₄) ₃ · xH ₂ O (Cristal Branco)	Catálise, eletrônica, cristais e materiais luminescentes.

Fonte: Adaptado de www.metall.com.cn.

2.2 | Cério, Ce (Z = 58)

Os compostos de cério são numerosos e são utilizados em diversas áreas tecnológicas como vidro e polimento, materiais luminescentes, cerâmica, catalisadores, medicina e metalurgia: Na indústria do vidro, é considerado o agente de polimento de vidro mais eficiente para o polimento de precisão óptica. É também usado para descolorir vidro mantendo o ferro no estado ferroso. A capacidade do vidro dopado com cério de bloquear a luz ultravioleta é utilizada na fabricação de objetos para uso médico e janelas aeroespaciais. É também usado para prevenir o escurecimento de polímeros à luz do sol e para evitar a descoloração de vidro da televisão. É aplicado aos

componentes ópticos para melhorar seu desempenho. Em materiais luminescentes, o papel de cério não é como o átomo emissor, mas sim como um "sensibilizador". O cério é também usado em uma variedade de cerâmicas, incluindo as composições dentárias e como um estabilizador de fase em produtos à base de zircônio. O óxido de cério desempenha vários papéis catalíticos. Em conversores catalíticos atua como um estabilizador para a elevada área superficial da alumina, como um promotor da reação de deslocamento de gás de água, tal como um componente de armazenamento de oxigênio e como um potencializador da capacidade de redução do número de oxidação do ródio. O cério é adicionado ao catalisador dominante para a produção de estireno a partir de metil-benzeno para melhorar a formação de estireno. É utilizado em catalisadores de FCC contendo zeólitos para proporcionar tanto a reatividade catalítica no reator quanto a estabilidade térmica no regenerador. Na fabricação de aço, ele é usado para remover o oxigênio livre e enxofre, formando oxissulfetos estáveis e para atrair oligoelementos indesejáveis, tais como chumbo e antimônio. Como integrante de um mischmetal, é usado para fabricar ligas pirofóricas para isqueiros. Um revestimento com cério em sua composição não é corrosivo e pode apresentar aplicações militares significativas. Cério é o metal terra rara mais abundante, sua concentração é de 6.65×10^1 mg/Kg na crosta terrestre e 1.2×10^{-6} mg/L no oceano. (HURST, 2010; Gupta & Krishnamurthy, 1992). Algumas das aplicações do cério são apresentadas nas Tabelas 4 e 4a.

Tabela 4. Compostos de cério disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Acetato de cério	$Ce(CH_3COO)_3 \cdot xH_2O$ (Cristal branco)	Catálise, eletrônica, vidro;
Nitrato de cério amoniacal	$(NH_4)_2Ce(NO_3)_6$ (Cristal laranja)	Catálise, eletrônica, vidro;
Sulfato de cério amoniacal	$Ce(NH_4)_4(SO_4)_4 \cdot xH_2O$ (Cristal amarelo)	Catálise, eletrônica, vidro;
Carbonato de cério	$Ce_2(CO_3)_3 \cdot xH_2O$ (Material branco)	Catálise, eletrônica, vidro;
Cloreto de cério	$CeCl_3 \cdot xH_2O$ (Cristal branco)	Catálise, eletrônica, vidro;
Fluoreto de cério	CeF_3 (Material branco)	Catálise, metalurgia, vidro;
Hidróxido de cério	$Ce(OH)_4 \cdot xH_2O$ (Material branco)	Catálise, eletrônica, vidro, tratamento de água;
Iodeto de cério	CeI_3 (Amarelo)	Eletrônica;
Cério metálico	Ce (Cinza prateado)	Metalurgia, área nuclear;
Mischmetal	Ce (Cinza prateado)	Metalurgia; bateria recarregável de NiMH; liga para pilha;
Nitrato de cério	$Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ (Cristal branco)	Catalisador para craqueamento de petróleo; produção de vidro, pó para polimento, cerâmica, cristais, materiais luminescentes;
Octoato de cério	$Ce(C_7H_{15}COO)_2$ (Branco)	Tinta.

Tabela 4a. Compostos de cério disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Oxalato de cério	$Ce_2(C_2O_4)_3 \cdot xH_2O$ (Material branco a amarelado)	Catalisador para craqueamento de petróleo, produção de vidro, pó para polimento, cerâmica, cristais, materiais luminescentes;
Óxido de cério	CeO_2 (amarelo a branco)	Catalisador para craqueamento de petróleo, produção de vidro, pó para polimento, cerâmica, cristais, materiais luminescentes;
Óxido de cério (Pó para polimento)	CeO_2 (Pó amarelo)	Vidro plano, espelhos e vidros, lentes e cristais, vidro para LED;
Fosfato de cério	$CePO_4 \cdot xH_2O$ (Cristal branco)	materiais luminescentes, eletrônicos, vidros;
Sulfato de cério	$Ce(SO_4)_2 \cdot xH_2O$ (Cristal amarelo)	Catálise, eletrônicos, vidro.

Fonte: Adaptado de www.metall.com.cn.

2.3 | Praseodímio, Pr (Z= 61)

É altamente valorizado por ser utilizado como pigmento amarelo brilhante para cerâmicas em zircônia dopada com praseodímio, devido à sua ótima reflectância a 560 nm. Há muitas pesquisas em andamento a respeito de suas propriedades óticas para uso no sistema de telecomunicações, inclusive para uso em conjunto com fibras de flúor. É também utilizado no cintilador em tomografias computadorizadas para uso médico (Gupta & Krishnamurthy, 1992).

Praseodímio é adicionado à liga com magnésio para criar metais de alta resistência usados em motores de aviões. Também é utilizado na concentração de 5% como um componente de mischmetal para utilização em pedras de isqueiros. Praseodímio constitui o núcleo do sistema de iluminação de arco de carbono, usado na indústria cinematográfica. Adiciona-se aos cabos de fibras ópticas, como um agente de dopagem, em que é utilizado como um amplificador de sinal. Sais de praseodímio são utilizados para colorir vidros e esmaltes. É também um componente do vidro didímio, usada para fazer vários tipos de máscaras do soldador. A abundância do praseodímio na crosta terrestre é de 9.2 mg/Kg e no oceano, 6.4×10^{-7} mg/L (HURST, 2010). Nas Tabelas 5 e 5a são apresentados compostos de praseodímio disponíveis no mercado, suas características e um resumo de suas aplicações.

Tabela 5. Compostos de praseodímio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Acetato de praseodímio	$\text{Pr}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Verde cristalino)	Pigmento & coloração de tinta, vidro, cerâmica;
Carbonato de praseodímio	$\text{Pr}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Verde cristalino)	Pigmento & coloração de tinta, vidro, esmalte para cerâmica;
Cloreto de praseodímio	$\text{PrCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Verde cristalino)	Catálise, pigmento & coloração de tinta, vidro, cerâmica;
Fluoreto de praseodímio	PrF_3 (Material verde claro)	Pigmento & coloração de tinta.

Tabela 5a. Compostos de praseodímio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Hidróxido de praseodímio	$\text{Pr}(\text{OH})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Verde cristalino)	Pigmento & coloração de tinta;
Praseodímio metálico	Pr (Cinza prateado)	Metalurgia, ligas especiais, ímãs de Nd-Fe-B;
Nitrato de praseodímio	$\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Verde cristalino)	Pigmento, esmalte para cerâmica;
Oxalato de praseodímio	$\text{Pr}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Verde cristalino)	Pigmento, esmalte para cerâmica;
Óxido de praseodímio	Pr_6O_{11} (Sólido marrom)	Pigmento, esmalte para cerâmica;
Sulfato de praseodímio	$\text{Pr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Verde cristalino)	Pigmento; esmalte para cerâmica.

Fonte: Adaptado de www.metall.com.cn.

2.4 | Neodímio, Nd (Z = 60)

As principais aplicações de neodímio incluem lasers, coloração de vidro, tingimento e, possivelmente, a aplicação mais importante, ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). O ímã de neodímio foi apresentado pela primeira vez em 1982 simultaneamente por Sumitomo Metais Especiais (Japão) e General Motors (EUA) e comercializado em 1986. Produtos da tecnologia moderna como telas de tablets, telefones celulares, CD players portáteis, computadores e sistemas de som seriam muito diferentes sem a utilização de

ímãs permanentes feitos de neodímio. Os ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro são ideais para a miniaturização de uma variedade de tecnologias. São amplamente utilizados na indústria automotiva, com muitas aplicações, incluindo motores de arranque, sistemas de freio, reguladores de assento e alto-falantes estéreo do carro. Sua maior aplicação é nos motores de bobina de voz usados em discos rígidos de computador. Neodímio tem uma banda de absorção forte centrada em 580 nm, o que é muito próximo ao nível máximo de sensibilidade do olho humano, tornando-se útil em lentes de óculos de proteção para solda.

Ele também é usado em monitores para melhorar o contraste entre vermelhos e verdes. Óxido de neodímio pode ser adicionado ao vidro do tubo de raios catódicos para melhorar o brilho da imagem, absorvendo ondas de luz amarela (GUPTA & KRISHNAMURTHY, 1992; HURST, 2010).

O óxido apresenta uma coloração azul que é usada na produção de pigmentos para colorir telha cerâmica. É altamente valorizado na fabricação de vidro por atribuir coloração roxa ao mesmo.

Neodímio é incluído em muitas formulações de titanato de bário, usado como revestimento dielétrico e condensadores em multicamadas essenciais para equipamentos eletrônicos. Compostos de neodímio ajudam a estabilizar propriedades elétricas em capacitores de cerâmica.

Lasers de estado sólido de ítrio-alumínio-granada (YAG) utilizam neodímio devido a sua ótima seleção de comprimentos de onda de absorção e emissão. Os lasers de neodímio são utilizados em processamento de material, perfuração, soldagem e em medicina, em que o laser deste elemento é

usado em vários procedimentos cirúrgicos não evasivos. O ímã de neodímio também é usado em ressonâncias magnéticas. O mischmetal usado como pedra de isqueiro apresenta uma concentração de 18% de neodímio. Sua abundância na crosta terrestre é de 4.15×10^1 mg/Kg e no oceano, 2.8×10^{-6} mg/L (GUPTA & KRISHNAMURTHY, 1992; HURST, 2010). Nas Tabelas 6 e 6a são apresentados compostos de neodímio disponíveis no mercado, suas características e um resumo de suas aplicações.

Tabela 6. Compostos de neodímio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Acetato de neodímio	$\text{Nd}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Roxo claro cristalino)	Vidro, laser para cristal;
Carbonato de neodímio	$\text{Nd}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Roxo claro cristalino)	Vidro, MLCC capacitor, catalisador, laser para cristal;
Cloreto de neodímio	$\text{NdCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Roxo claro cristalino)	Vidro, catalisador, laser para cristal;
Fluoreto de neodímio	NdF_3 (Roxo claro)	Vidro, metalurgia, laser para cristal;
Hidróxido de neodímio	$\text{Nd}(\text{OH})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Roxo claro)	Vidro, catalisador, laser para cristal;
Iodeto de neodímio	NdI_3 (Verde)	Eletrônica;
Neodímio metálico	Nd (Cinza metálico)	Ímã, ligas.

Tabela 6a. Compostos de neodímio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Nitrato de neodímio	$\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Rosa cristalino)	Vidro, catalisador, laser para cristal, capacitor elétrico;
Oxalato de neodímio	$\text{Nd}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Pó roxo)	Vidro, cerâmica, capacitor elétrico, aditivos para borracha;
Óxido de neodímio	Nd_2O_3 (Pó roxo)	Vidro, cerâmicas, liga, laser para cristal, capacitor elétrico, aditivos para borracha;
Sulfato de neodímio	$\text{Nd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Rosa cristalino)	Vidro, catalisadores.

Fonte: Adaptado de www.metall.com.cn.

2.5 | Promécio, Pm (Z = 61)

Promécio não é encontrado na natureza. É usado como fonte de radiação beta, sendo que esta pode ser absorvida por um fósforo para produzir luz. Este elemento pode ser usado como uma bateria de propulsão nuclear por meio da captura de luz em fotocélulas que a convertem em corrente elétrica. Promécio se apresenta como uma promessa de fonte de raios-X portátil. Esta terra rara pode também ser útil como uma fonte de calor para fornecer energia auxiliar a sondas e satélites, além de poder ser usado para a fabricação de lasers para comunicação com submarinos submersos (HURST, 2010).

2.6 | Samário, Sm (Z = 62)

Samário é utilizado principalmente na produção de ímãs permanentes de samário-cobalto ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$), estes ímãs são os que apresentam a maior resistência à desmagnetização. É utilizado também em laser por suas propriedades dielétricas (Gupta & Krishnamurthy, 1992).

Os ímãs de samário-cobalto são utilizados em equipamentos eletrônicos leves, em que o tamanho ou o espaço é um fator limitante e em que o desempenho a alta temperatura (250°C) é uma preocupação. As aplicações incluem relógios eletrônicos, equipamentos aeroespaciais, tecnologias de micro-ondas e militares (como sistemas de radar de defesa). Munições de precisão guiadas usam ímãs permanentes de Sm-Co em seus motores para controlar o voo. São utilizados também em helicópteros para eliminar o som das pás do rotor (HURST, 2010).

Devido à fraca banda espectral de absorção, o samário é usado em filtros de vidro de laser de estado sólido Nd:YAG (Ítrio-alumínio-granada) para cercar a haste do laser, melhorando a eficiência de absorção de emissões dispersas. Samário forma compostos estáveis com titanato que apresentam propriedades dielétricas úteis para revestimentos e em capacitores em frequências de micro-ondas (Gupta & Krishnamurthy, 1992).

Samário também é usado como iluminação de arco de carbono para a indústria cinematográfica. Utiliza-se seu óxido em vidro de absorção de radiação infravermelha e como um absorvedor de nêutrons em reatores nucleares. Apresenta abundância na crosta terrestre de 7.05 mg/Kg e no oceano, $4.5 \times 10^{-7} \text{ mg/L}$ (HURST, 2010).

Na Tabela 7 são apresentados compostos de samário disponíveis no mercado, suas características e um resumo de suas aplicações.

Tabela 7. Compostos de samário disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Acetato de samário	$\text{Sm}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Amarelo cristalino)	Catalisadores, vidro, absorção de nêutrons;
Carbonato de samário	$\text{Sm}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Material branco)	Vidro, absorção de nêutrons;
Cloreto de samário	$\text{SmCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Amarelo cristalino)	Catalisadores, vidro, absorção de nêutrons;
Fluoreto de samário	SmF_3 (Material branco)	Catalisadores, metalurgia, vidro;
Hidróxido de samário	$\text{Sm}(\text{OH})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Amarelo cristalino)	Vidro, absorção de nêutrons;
Samário metálico	Sm (Cinza prateado)	Metalurgia, ímãs de Sm-Co;
Nitrato de samário	$\text{Sm}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Amarelo cristalino)	Catalisadores, vidro, absorção de nêutrons;
Oxalato de samário	$\text{Sm}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Amarelo claro)	Cerâmica, vidro, absorção de nêutrons;
Óxido de samário	Sm_2O_3 (Amarelo claro)	Catalisadores; cerâmica; vidro; absorção de nêutrons;
Sulfato de samário	$\text{Sm}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Amarelo cristalino)	Catalisadores, vidro.

Fonte: Adaptado de www.metall.com.cn

2.7 | Európio, Eu (Z = 63)

Európio é utilizado principalmente por suas peculiares características luminescentes. A excitação do átomo de európio por absorção de radiação ultravioleta pode resultar em transições de níveis de energia específicos dentro do átomo, causando a emissão de radiação na faixa visível do espectro eletromagnético (Gupta & Krishnamurthy, 1992).

Na iluminação fluorescente eficiente em termos energéticos, európio fornece não só o vermelho, mas também o azul. Vários fósforos vermelhos comerciais são baseados em európio para TV a cores, telas de computadores e lâmpadas fluorescentes. Sua luminescência também é valiosa em aplicações médicas, cirúrgicas e bioquímicas. Európio tem sido adicionado a alguns tipos de plásticos para a fabricação de lasers. Este elemento é o mais reativo dentre as terras raras e, sendo assim, está sendo estudado para uma possível utilização em reatores nucleares. Sua abundância na crosta terrestre é de 2,0 mg/Kg e no oceano, $1,3 \times 10^{-7}$ mg/L (HURST, 2010). Nas Tabelas 8 e 8a são apresentados compostos de európio disponíveis no mercado, suas características e um resumo de suas aplicações.

Tabela 8. Compostos de európio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Acetato de európio	$\text{Eu}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Material luminescente, vidro, cerâmicas;
Carbonato de európio	$\text{Eu}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Material branco)	Material luminescente, vidro, cerâmicas.

Tabela 8a. Compostos de európio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Cloreto de európio	$\text{EuCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Material luminescente, vidro, cerâmicas;
Fluoreto de európio	EuF_3 (Material branco)	Material luminescente, vidro, cerâmicas;
Hidróxido de európio	$\text{Eu}(\text{OH})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Vidro, absorção de nêutrons;
Európio metálico	Eu (cinza prateado)	Metalurgia, indústria nuclear, ligas especiais;
Nitrato de európio	$\text{Eu}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Catalisadores, material luminescente, vidro, cerâmicas;
Oxalato de európio	$\text{Eu}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Material luminescente, vidro, cerâmicas;
Óxido de európio	Eu_2O_3 (Pó branco)	Material luminescente, vidro, cristais;
Sulfato de európio	$\text{Eu}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Material luminescente, vidro, cerâmicas.

Fonte: Adaptado de www.metall.com.cn.

2.8 | Gadolínio, Gd (Z = 64)

Gadolínio é utilizado tanto por seu momento magnético elevado quanto por sua fosforescência. Esta terra rara apresenta um comportamento magnético muito peculiar, o qual permite formar a base da tecnologia de gravação magneto-ótica utilizado para o tratamento de dados de computador (HURST, 2010).

Na área médica é usado como agente de contraste injetável em pacientes submetidos a ressonância magnética nuclear (RMN). Com seu alto momento magnético, o gadolínio pode reduzir tempos de relaxação e, assim, aumentar a intensidade do sinal lido pelo equipamento para melhorar as imagens criadas. O preenchimento parcial dos orbitais 4f, particularmente estável, possibilita aplicações como um hospedeiro inerte de materiais luminescentes (Gupta & Krishnamurthy, 1992).

Gadolínio é utilizado com ítrio para formar granadas que têm aplicações em micro-ondas. Esta terra rara pode ser misturado a certos metais, como ferro e cromo para melhorar a sua manipulação e resistência a altas temperaturas e à oxidação. Apresenta abundância na crosta terrestre de 6,2 mg/Kg e no oceano de 7×10^{-7} mg/L (HURST, 2010). Nas Tabelas 9 e 9a são apresentados compostos de gadolínio disponíveis no mercado, suas características e um resumo de suas aplicações.

Tabela 9. Compostos de gadolínio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Acetato de gadolínio	$Gd(CH_3COO)_3 \cdot xH_2O$ (Branco cristalino)	Catalisadores, laser para vidro, material luminescente;
Carbonato de gadolínio	$Gd_2(CO_3)_3 \cdot xH_2O$ (Material branco)	Catalisadores, laser para cristal, cerâmicas;
Cloreto de gadolínio	$GdCl_3 \cdot xH_2O$ (Branco cristalino)	Material luminescente, cerâmicas, vidro ótico, eletrônica.

Tabela 9a. Compostos de gadolínio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Fluoreto de gadolínio	GdF ₃ (Material branco)	Vidro, metalurgia, laser para cristal;
Hidróxido de gadolínio	Gd(OH) ₃ .xH ₂ O (Branco cristalino)	Vidro, catalisadores, laser para cristal;
Iodeto de gadolínio	GdI ₃ (Material branco)	Eletrônica;
Gadolínio metálico	Gd (Cinza metálico)	Ímãs, ligas, refrigerador magnetic;
Nitrato de gadolínio	Gd(NO ₃) ₃ .6H ₂ O (Branco cristalino)	Vidros, catalisadores, laser para cristal, material luminescente;
Oxalato de gadolínio	Gd ₂ (C ₂ O ₄) ₃ .xH ₂ O (Branco cristalino)	Material luminescente, cerâmicas, absorção de nêutron, vidro ótico, eletrônica;
Óxido de gadolínio	Gd ₂ O ₃ (Material branco)	Material luminescente, cristais, absorção de nêutrons, cerâmicas, vidro ótico, eletrônica, materiais GGG (Gd-GI-Garnet);
Sulfato de gadolínio	Gd ₂ (SO ₄) ₃ .xH ₂ O (Branco cristalino)	Eletrônica, cristais, cerâmicas.

Fonte: Adaptado de www.metall.com.cn.

2.9 | Térbio, Tb (Z = 65)

Térbio é utilizado principalmente em materiais fosforescentes, em particular em lâmpadas, como emissor de elevada

intensidade da cor verde utilizada em televisão. Esta terra rara responde de forma eficiente à excitação de raios-x e é, portanto, utilizada como um fósforo de raios-x. Ligas de térbio, como TbFeCo, são utilizadas em filmes de gravação ótica-magnética (Gupta & Krishnamurthy, 1992). O produto formado pela adição de térbio a dióxido de zircônio pode ser usado como um estabilizador em células de combustível que operam a temperaturas elevadas. O térbio apresenta abundância na crosta terrestre de 1,2 mg/Kg e no oceano de $1,4 \times 10^{-7}$ mg/L (HURST, 2010). Nas Tabelas 10 e 10a são apresentados compostos disponíveis no mercado, suas características e um resumo de suas aplicações.

Tabela 10. Compostos de térbio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Acetato de térbio	Tb(CH ₃ COO) ₃ .xH ₂ O (Branco cristalino)	Material luminescente, vidro ótico, eletrônica, cerâmicas;
Carbonato de térbio	Tb ₂ (CO ₃) ₃ .xH ₂ O (Material branco)	Material luminescente, vidro ótico, eletrônica, cerâmicas;
Cloreto de térbio	TbCl ₃ .xH ₂ O (Branco cristalino)	Material luminescente, vidro ótico, eletrônica, cerâmicas;
Fluoreto de térbio	TbF ₃ (Material branco)	Vidro, metalurgia, laser para cristal;
Hidróxido de térbio	Tb(OH) ₃ .xH ₂ O (Branco cristalino)	Material luminescente, vidro ótico;
Térbio metálico	Tb (Cinza metálico)	Ímãs, ligas;
Nitrato de térbio	Tb(NO ₃) ₃ .6H ₂ O (Branco cristalino)	Vidro, laser para cristal, material luminescente.

Tabela 10a. Compostos de térbio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Oxalato de térbio	$Tb_2(C_2O_4)_3 \cdot xH_2O$ (Branco cristalino)	Material luminescente, vidro ótico, eletrônica, cerâmicas;
Óxido de térbio	Tb_4O_7 (Pó marrom)	Material luminescente, vidro ótico, eletrônica, cerâmicas;
Sulfato de térbio	$Tb_2(SO_4)_3 \cdot xH_2O$ (Branco cristalino)	Cristais, cerâmicas.

Fonte: Adaptado de www.metall.com.cn.

2.10 | Disprósio, Dy (Z = 66)

Disprósio é mais comumente usado em ímãs permanentes de alta resistência de neodímio-ferro-boro, sendo estes considerados os ímãs permanentes mais fortes do mundo. Soma-se a isso a alta resistência magnética e menor peso. São usados em motores eletrônicos para produzir maior potência e torque com muito menor tamanho e peso (Gupta & Krishnamurthy, 1992).

Embora tenha um dos maiores momentos magnéticos entre todas as terras raras, o disprósio não pode substituir o neodímio nas aplicações. É, no entanto, um aditivo essencial na produção dos ímãs de NdFeB. Os ímãs permanentes com disprósio também são utilizados em veículos elétricos e híbridos, na geração de energia eólica, em miniaturização dos discos rígidos e em muitos aparelhos eletrônicos (HURST, 2010).

Se misturado a cádmio e enxofre pode ser usado como fonte de radiação infravermelha em dispositivos que usam essa radiação para obter informações sobre a composição e estrutura de substâncias. Um óxido misto de disprósio e níquel forma materiais que absorvem os nêutrons, não se contrai e não se dilata sob bombardeio prolongado de nêutrons, por isso é usado em barras de esfriamento em reatores nucleares. Em conjunto com outras terras raras e vanádio, disprósio tem sido utilizado como componente de materiais para laser (Gupta & Krishnamurthy, 1992; HURST, 2010). A abundância do disprósio na crosta terrestre é de 5,2 mg/Kg e no oceano de $1,4 \times 10^{-7}$ mg/L (HURST, 2010). Nas Tabelas 11 e 11a são apresentados compostos de disprósio disponíveis no mercado, suas características e um resumo de suas aplicações.

Tabela 11. Compostos de disprósio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Acetato de disprósio	$Dy(CH_3COO)_3 \cdot xH_2O$ (Branco cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, materiais luminescentes;
Brometo de disprósio	$DyBr_3$ (Pó branco)	Eletrônicos;
Carbonato de disprósio	$Dy_2(CO_3)_3 \cdot xH_2O$ (Material branco)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, materiais luminescentes, dopante de cristal, cerâmicas;
Cloreto de disprósio	$DyCl_3 \cdot xH_2O$ (Branco cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, materiais luminescentes, dopante de cristal, cerâmicas.

Tabela 11a. Compostos de disprósio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Fluoreto de disprósio	DyF ₃ (Material branco)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, materiais luminescentes, dopante de cristal, cerâmicas;
Hidróxido de disprósio	Dy(OH) ₃ .xH ₂ O (Branco cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, materiais luminescentes;
Iodeto de disprósio	DyI ₃ (Amarelo escuro)	Eletrônicos;
Disprósio metálico	Dy (Cinza metálico)	Ímãs de NdFeB, superligas, área nuclear;
Nitrato de disprósio	Dy(NO ₃) ₃ .6H ₂ O (Branco cristalino)	Catalisador, lâmpadas de haletos, fibra ótica, materiais luminescentes, dopante de cristal, cerâmicas;
Oxalato de disprósio	Dy ₂ (C ₂ O ₄) ₃ .xH ₂ O (Branco cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, materiais luminescentes, dopante de cristal, cerâmicas;
Óxido de disprósio	Dy ₂ O ₃ (Pó branco)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, materiais luminescentes, dopante de cristal, cerâmicas;
Sulfato de disprósio	Dy ₂ (SO ₄) ₃ .xH ₂ O (Branco cristalino)	Dopante de cristal, cerâmicas, materiais luminescentes.

Fonte: Adaptado de www.metall.com.cn.

2.11 | Hólmio, Ho (Z = 67)

Hólmio tem o maior momento magnético entre todos os elementos que ocorrem naturalmente. Por isso, tem sido utilizado para criar os maiores campos magnéticos conhecidos,

colocando-o dentro de ímãs de alta intensidade como uma peça de pólo ou concentrador de fluxo magnético. Esta propriedade magnética também é importante em lasers de ítrio-ferro-granada (YIG) para uso em equipamentos de micro-ondas. Os lasers de hólmio de estado sólido de ítrio-alumínio-granada (YAG) e lantânio-ítrio-fluoreto (YLF) são utilizados numa variedade de aplicações médicas e dentárias (Gupta & Krishnamurthy, 1992; HURST, 2010). Hólmio é um dos elementos terras raras menos abundantes. Hólmio apresenta abundância na crosta terrestre de 1,3 mg/Kg e no oceano de $2,2 \times 10^{-7}$ mg/L (HURST, 2010). Nas Tabelas 12 e 12a são apresentados compostos de hólmio disponíveis no mercado, suas características e um resumo de suas aplicações.

Tabela 12. Compostos de hólmio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Acetato de hólmio	$\text{Ho}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica;
Carbonato de hólmio	$\text{Ho}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Material branco)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal, materiais luminescentes;
Cloreto de hólmio	$\text{HoCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal, cerâmicas, materiais luminescentes;
Fluoreto de hólmio	HoF_3 (Pó amarelo claro)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal;
Hidróxido de hólmio	$\text{Ho}(\text{OH})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, materiais luminescentes.

Tabela 12a. Compostos de hólmio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Iodeto de hólmio	HoI_3 (Amarelo claro)	Eletrônicos;
Hólmio metálico	Ho (Cinza prateado)	Superligas, área nuclear;
Nitrato de hólmio	$\text{Ho}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Catalisador, lâmpadas de haletos, fibra ótica, opante de cristal, cerâmicas, materiais luminescentes;
Oxalato de hólmio	$\text{Ho}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal, cerâmicas, materiais luminescentes;
Óxido de hólmio	Ho_2O_3 (Pó amarelo claro)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal, cerâmicas, materiais luminescentes;
Sulfato de hólmio	$\text{Ho}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Dopante de cristal, materiais luminescentes.

Fonte: Adaptado de www.metall.com.cn.

2.12 | Érbio, Er (Z = 68)

Erbium tem aplicação na coloração de vidro, como um amplificador de fibra ótica, e em lasers para usos médico e odontológico. O íon érbio tem uma banda de absorção muito estreita para colorir os sais de érbio de rosa. Por isso, é usado em vidro para lentes e em peças de vidro decorativas. O érbio pode neutralizar impurezas descolorantes como íons férricos e

produzir um tom de cinza neutro. Esse elemento é utilizado em uma variedade de produtos de vidro com essa finalidade. Além de ser particularmente útil como um amplificador para a transferência de dados via fibra óptica. Lasers baseados em Er:YAG são ideais para aplicações cirúrgicas devido à sua capacidade de fornecer energia térmica, sem que esta se acumule no tecido. Esta terra rara também tem sido usada na área nuclear e em metalurgia (Gupta & Krishnamurthy, 1992; HURST, 2010). A abundância do érbio na crosta terrestre é de 3,5 mg/kg e no oceano, de $8,7 \times 10^{-7}$ mg/L (HURST, 2010). Nas Tabelas 13 e 13a são apresentados compostos de érbio disponíveis no mercado, suas características e um resumo de suas aplicações.

Tabela 13. Compostos de érbio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Acetato de érbio	$\text{Er}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Rosa cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica;
Carbonato de érbio	$\text{Er}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Material rosa)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal, material luminescente;
Cloreto de érbio	$\text{ErCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Rosa cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal, cerâmicas, material luminescente;
Fluoreto de érbio	ErF_3 (Pó rosa)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal;
Hidróxido de érbio	$\text{Er}(\text{OH})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Roxo cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, material luminescente.

Tabela 13a. Compostos de érbio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Iodeto de érbio	ErI_3 (Rosa)	Eletrônicos;
Érbio metálico	Er (Cinza metálico)	Superliga, área nuclear;
Nitrato de érbio	$\text{Er}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Rosa cristalino)	Catalisador, lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal, material luminescente, cerâmicas;
Oxalato de érbio	$\text{Er}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Rosa cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal, material luminescente, cerâmicas;
Óxido de érbio	Er_2O_3 (Pó rosa)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal, material luminescente, cerâmicas;
Sulfato de érbio	$\text{Er}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Rosa cristalino)	Dopante de cristal, material luminescente.

Fonte: Adaptado de www.metall.com.cn.

2.13 | Túlio, Tm (Z = 69)

Produtos com túlio são utilizados principalmente na fabricação de cristais e lasers. Uma aplicação importante deste metal na área médica é a produção de fontes de raios-x portáteis. Estas fontes apresentam vida útil de cerca de um ano, e são utilizadas como ferramentas auxiliares de diagnóstico médico e dentário, bem como para a detecção de defeitos em

componentes mecânicos e eletrônicos. Este tipo de fonte não precisa de proteção excessiva, em geral uma pequena tampa de chumbo é suficiente. Túlio também pode ser utilizado em materiais magnéticos e em cerâmicas (Gupta & Krishnamurthy, 1992).

Sendo o túlio o mais raro entre os elementos terras raras, seu custo é muito elevado, resultando em poucas aplicações práticas. Sua abundância na crosta terrestre é de $5,2 \times 10^{-1}$ mg/kg e no oceano de $1,7 \times 10^{-7}$ mg/L (HURST, 2010). Nas Tabelas 14 e 14a são apresentados compostos de túlio disponíveis no mercado, suas características e um resumo de suas aplicações.

Tabela 14. Compostos de túlio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Acetato de túlio	$Tm(CH_3COO)_3 \cdot xH_2O$ (Branco cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal;
Carbonato de túlio	$Tm_2(CO_3)_3 \cdot xH_2O$ (Material branco)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal, cerâmicas;
Cloreto de túlio	$TmCl_3 \cdot xH_2O$ (Branco cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal, material luminescente, cerâmicas;
Fluoreto de túlio	TmF_3 (Pó branco)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal;
Iodeto de túlio	TmI_3 (Amarelo claro)	Eletrônicos.

Tabela 14a. Compostos de túlio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Túlio	Tm (Cinza prateado)	Superliga, área nuclear;
Nitrato de túlio	$Tm(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ (Branco cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal, material luminescente, cerâmicas;
Oxalato de túlio	$Tm_2(C_2O_4)_3 \cdot xH_2O$ (Material branco)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, material luminescente, cerâmicas;
Óxido de túlio	Tm_2O_3 (Pó branco)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, opante de cristal, material luminescente, cerâmicas;
Sulfato de túlio	$Tm_2(SO_4)_3 \cdot xH_2O$ (Branco cristalino)	Dopante de cristal, material luminescente.

Fonte: Adaptado de www.metall.com.cn.

2.14 | Itérbio, Yb (Z = 70)

Itérbio está sendo usado em amplificador de fibras óticas e em várias aplicações de lasers. Este elemento apresenta uma única banda de absorção em 985nm no infravermelho, tornando-o útil em fotocélulas de silicone para converter diretamente a energia radiante em eletricidade. O itérbio metálico tem sua resistência elétrica aumentada quando submetido a tensões muito elevadas. Esta propriedade é usada em medidores de tensão para monitorar as deformações do solo e explosões nucleares. É também usado em sistema de

barreira térmica em ligas de níquel, ferro e outras ligas de metais de transição (Gupta & Krishnamurthy, 1992). Este elemento terra rara tem aplicação metalúrgica, sendo útil na melhoria do refinamento do grão, na força, e em outras propriedades mecânicas do aço inoxidável. Apresenta abundância na crosta terrestre de 3,2 mg/Kg e no oceano $8,2 \times 10^{-7}$ mg/L (HURST, 2010). Nas Tabelas 15 e 15a são apresentados compostos de itérbio disponíveis no mercado, suas características e um resumo de suas aplicações.

Tabela 15. Compostos de itérbio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Acetato de itérbio	$\text{Yb}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal;
Carbonato de itérbio	$\text{Yb}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Material branco)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, cerâmicas, dopante de cristal;
Cloreto de itérbio	$\text{YbCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, cerâmicas, dopante de cristal, material luminescente;
Fluoreto de itérbio	YbF_3 (Pó branco)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal;
Hidróxido de itérbio	$\text{Yb}(\text{OH})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Pó branco)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, dopante de cristal;
Iodeto de itérbio	YbI_3 (Amarelo claro)	Eletrônicos;
Itérbio metálico	Yb (Cinza prateado)	Superliga, área nuclear.

Tabela 15a. Compostos de itérbio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Nitrato de itérbio	$\text{Yb}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, cerâmicas, dopante de cristal, material luminescente;
Oxalato de itérbio	$\text{Yb}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Material branco)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, cerâmicas, material luminescente;
Óxido de itérbio	Yb_2O_3 (Pó branco)	Lâmpadas de haletos, fibra ótica, cerâmicas, dopante de cristal, material luminescente;
Sulfato de itérbio	$\text{Yb}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Dopante de cristal, material luminescente, cerâmicas.

Fonte: Adaptado de www.metall.com.cn.

2.15 | Lutécio, Lu (Z = 71)

Lutécio é o último membro da família dos lantanídeos. Diferente da maioria dos demais elementos, não possui um momento magnético. Apresenta também o menor raio metálico dentre as terras raras. Ele é o componente ideal para fósforos de raios-x, pois produz o material branco conhecido mais denso, o tantalato de lutécio (LuTaO_4). Em função da falta de um momento magnético, o lutécio é utilizado em substrato de granada para determinar parâmetros da rede cristalina de cristais como índio-gálio-granada (IGG) (Gupta & Krishnamurthy, 1992).

Nuclídeos estáveis de lutécio emitem radiação beta pura depois da ativação térmica de nêutrons. Por isso, esses nuclídeos podem ser utilizados como catalisadores em craqueamento, alquilação, hidrogenação e polimerização. Cério dopado com oxitortosilicato de lutécio (LSO) é atualmente usado em detectores na tomografia de emissão de pósitrons (PET). A abundância do lutécio na crosta terrestre é de 8×10^{-1} mg/kg e no oceano $1,5 \times 10^{-7}$ mg/L (HURST, 2010). Nas Tabelas 16 e 16a são apresentados compostos de lutécio disponíveis no mercado, suas características e um resumo de suas aplicações.

Tabela 16. Compostos de lutécio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Acetato de lutécio	$\text{Lu}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Laser para cristal, fibra ótica, dopante ótico;
Carbonato de lutécio	$\text{Lu}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Material branco)	Laser para cristal, fibra ótica, dopante ótico, cerâmicas;
Cloreto de lutécio	$\text{LuCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Laser para cristal, fibra ótica, dopante ótico.
Fluoreto de lutécio	LuF_3 (Pó branco)	Laser para cristal, fibra ótica, dopante ótico, cerâmicas;
Hidróxido de lutécio	$\text{Lu}(\text{OH})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Pó branco)	Fibra ótica, dopante ótico, cerâmicas;
Lutécio metálico	Lu (Cinza prateado)	Superliga, área nuclear;
Nitrato de lutécio	$\text{Lu}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Fibra ótica, dopante ótico; cerâmicas, material luminescente.

Tabela 16a. Compostos de lutécio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Oxalato de lutécio	$\text{Lu}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Material branco)	Laser para cristal, fibra ótica, dopante ótico;
Óxido de lutécio	Lu_2O_3 (Pó branco)	Laser para cristal, fibra ótica, dopante ótico, material luminescente, cerâmicas;
Sulfato de lutécio	$\text{Lu}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Fibra ótica, cerâmica, material luminescente.

Fonte: Adaptado de www.metall.com.cn.

2.16 | Ítrio, Y (Z = 39)

O elemento ítrio apresenta a maior afinidade termodinâmica pelo oxigênio dentre todos os elementos, esta característica é a base para muitas das suas aplicações (Gupta & Krishnamurthy, 1992). O óxido de ítrio é o óxido mais frequentemente utilizado. Todo veículo usa materiais à base de ítrio para ajudar a melhorar a eficiência dos combustíveis e eliminar a poluição (HURST, 2010).

Algumas das aplicações de ítrio incluem a sua utilização em cerâmica como cadinhos para fundição de metais reativos, em fósforos de iluminação fluorescente, monitores de computador e sensores de consumo de combustíveis automotivos. Óxido de zircônio estabilizado com ítrio é usado em aplicações a temperaturas elevadas, como por exemplo em pulverizadores térmicos de plasma para proteção de superfícies de componentes aeroespaciais expostos a altas temperaturas. Cristais de ítrio-ferro-granada (YIG) são essenciais para

equipamentos de comunicações que utilizam micro-ondas. O fósforo Eu: Y_2O_2S cria a cor vermelha em televisores. Os cristais de ítrio-alumínio-granada (YAG) são utilizados juntamente com neodímio em uma série de aplicações de laser. Ítrio também pode aumentar a força das ligas metálicas (Gupta & Krishnamurthy, 1992).

Ítrio também é usado em dispositivos de comunicação por micro-ondas para a defesa e em satélites industriais. O ítrio apresenta abundância na crosta terrestre de $3,3 \times 10^1$ mg/kg e no oceano de $1,3 \times 10^{-5}$ mg/L (HURST, 2010). Nas Tabelas 17 e 17a são apresentados compostos de ítrio disponíveis no mercado, suas características e um resumo de suas aplicações.

Tabela 17. Compostos de ítrio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Acetato de ítrio	$Y(CH_3COO)_3 \cdot xH_2O$ (Branco cristalino)	Material luminescente, laser para cristal, cerâmicas;
Carbonato de ítrio	$Y_2(CO_3)_3 \cdot xH_2O$ (Material branco)	Vidro ótico, laser para cristal, cerâmicas;
Cloreto de ítrio	$YCl_3 \cdot xH_2O$ (Branco cristalino)	Material luminescente, laser para cristal, cerâmicas, vidro ótico;
Fluoreto de ítrio	YF_3 (Material branco)	Vidro, metalurgia, laser para cristal;
Hidróxido de ítrio	$Y(OH)_3 \cdot xH_2O$ (Branco cristalino)	Vidro, catalisador, laser para cristal;
Ítrio metálico	Y (Cinza prateado)	Liga de Y-Al, Y-Mg, ligas especiais.

Tabela 17a. Compostos de ítrio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Nitrato de ítrio	$Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ (Branco cristalino)	Material luminescente, laser para cristal, vidro ótico, cerâmicas;
Octoato de ítrio	$Y(C_8H_{15}O_2)_2$ (Branco cristalino)	Vidro, catalisador, laser para cristal, material luminescente;
Oxalato de ítrio	$Y_2(C_2O_4)_3 \cdot xH_2O$ (Branco cristalino)	Laser para cristal, material luminescente, vidro ótico, cerâmicas;
Óxido de ítrio	Y_2O_3 (Pó branco)	Material luminescente para lâmpadas, TV, R- X, etc., laser para cristal, vidro ótico, cerâmicas, atalisador;
Sulfato de ítrio	$Y_2(SO_4)_3 \cdot xH_2O$ (Branco cristalino)	Eletrônicos, cristais, cerâmicas.

Fonte: Adaptado de www.metall.com.cn.

2.17 | Escândio, Sc (Z = 21)

Existem dois usos primários para escândio. Em primeiro lugar, devido à sua luminescência e às propriedades de condutividade elétrica, escândio é utilizado em iluminação, lasers e em eletrônicos. Em segundo lugar, é usado como uma liga com alumínio para produzir materiais de alto desempenho na indústria aeroespacial e de artigos esportivos. Atualmente não há substitutos para o escândio em suas aplicações para lasers e indústria de iluminação. No entanto, ligas de titânio e alumínio e de fibras de carbono podem ser usadas para

substituir as ligas de escândio e alumínio em alguns casos, especialmente na indústria de equipamentos esportivos. A abundância do escândio na crosta terrestre é de $2,2 \times 10^1$ mg/kg e no oceano de 6×10^{-7} mg/L (HURST, 2010). Nas Tabelas 18 e 18a são apresentados produtos disponíveis no mercado, suas características e um resumo de suas aplicações.

Tabela 18. Compostos de escândio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Acetato de escândio	$\text{Sc}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Lâmpada de haleto, fibra ótica, dopante para cristal, materiais luminescentes, cerâmicas;
Liga de alumínio e escândio	ScAl (Cinza prateado)	Superliga, liga para aviação;
Carbonato de escândio	$\text{Sc}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Material branco)	Lâmpada de haleto, fibra ótica;
Cloreto de escândio	$\text{ScCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Lâmpada de haleto, fibra ótica, dopante para cristal, cerâmicas, laser;
Fluoreto de escândio	ScF_3 (Pó branco)	Lâmpada de haleto, fibra ótica, dopante para cristal;
Hidróxido de escândio	$\text{Sc}(\text{OH})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Lâmpada de haleto, fibra ótica, materiais luminescentes;
Iodeto de escândio	ScI_3 (Amarelo)	Eletrônicos;
Escândio metálico	Sc (Cinza prateado)	Superliga, área nuclear, liga para aviação.

Tabela 18a. Compostos de escândio disponíveis no mercado, fórmula molecular, descrição e principais áreas de aplicação.

Nome	Fórmula molecular	Principais aplicações
Nitrato de escândio	$\text{Sc}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Lâmpada de haleto, fibra ótica, materiais luminescentes, dopante para cristal;
Oxalato de escândio	$\text{Sc}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Lâmpada de haleto, fibra ótica, materiais luminescentes;
Óxido de escândio	Sc_2O_3 (Branco cristalino)	Lâmpada de haleto, fibra ótica, materiais luminescentes, dopante para cristal, cerâmicas;
Sulfato de escândio	$\text{Sc}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Branco cristalino)	Materiais luminescentes, dopante para cristal.

Fonte: Adaptado de www.metall.com.cn.

3. | RECICLAGEM DE ELEMENTOS TERRAS RARAS

O consumo de terras raras aumenta ano após ano com a aplicação das mesmas em diferentes áreas, assim como a geração de resíduos sólidos que contêm estes elementos. Sabendo que se tratam de recursos não renováveis, a recuperação de terras raras de artigos descartados é essencial para a implementação da economia de reciclagem. Este aproveitamento irá reduzir o volume de lixo produzido e possibilitar a utilização sustentável dos recursos minerais, escolha inevitável ao desenvolvimento da sociedade (Xu e Peng, 2009).

A seguir, serão apresentadas, de modo simplificado, soluções desenvolvidas na área da reciclagem de materiais usados contendo terras raras, assim como os desafios existentes. Os materiais apresentados são os ímãs, baterias de hidreto metálico de lítio - NiMH, lâmpadas luminescentes, fósforos de tubos de raios catódicos (CRTs) e monitores de computador e pós para polimento de vidro. Os três primeiros itens somados representam mais de 80% do mercado de terras raras em termos de valor - 38% para ímãs, 32% para lâmpadas e 13% para as ligas metálicas- (Binnemans et al., 2013), sendo assim, estes temas foram mais explorados que os demais.

3.1 | Ímãs Permanentes de Elementos Terras Raras

Os ímãs de elementos terras raras mais comuns são aqueles em cujas ligas estão presentes os elementos neodímio, ferro e boro ($Nd_2Fe_{14}B$) e pequenas adições de praseodímio, gadolínio, térbio e especialmente disprósio.

Apresentam também em sua constituição elementos como cobalto, vanádio, titânio, zircônio, molibdênio ou nióbio (Gutfleisch *et al.*, 2011; Buschow, 1994; Yu e Chen, 1995; Croatas *et al.*, 1984). O disprósio é adicionado aos ímãs para aumentar a sua estabilidade a altas temperaturas e evitar a desmagnetização. Esses ímãs perdem seu magnetismo em temperaturas acima de 120°C. A concentração de disprósio nos ímãs de NdFeB varia de acordo com sua aplicação (Bounds, 1994; Tanaka *et al.*, 2013).

Um outro ímã comum baseado em terras raras é constituído por ligas de samário-cobalto (SmCo). Este ímã apresenta alta resistência a desmagnetização, boa resistência à corrosão e excelente estabilidade térmica. Existem duas ligas de SmCo usadas para ímãs permanentes, SmCo₅ e Sm₂Co₁₇. Estes ímãs podem conter outros metais, como o Fe, Zr e Cu. Para aplicações específicas, por exemplo – para uso em aeronaves, a estabilidade a altas temperaturas e a resistência à corrosão de ímãs de SmCo apresentam-se como vantagens em relação a ímãs de NdFeB. No entanto, devido ao baixo poder de magnetização e ao custo mais elevado, os ímãs de SmCo apresentam uma participação no mercado menor que 2% (Bounds, 1994; Tanaka *et al.*, 2013).

A reciclagem direta e a reutilização só são relevantes para os grandes ímãs. Em todos os outros casos, as ligas de ímãs de ETRs têm que ser processadas posteriormente. Para aplicações onde há uma distribuição muito estreita na composição dos ímãs de terras raras entre os diferentes fabricantes (como no caso de discos rígidos, unidades de disco rígido), pode-se considerar o uso direto da Liga pelo processamento do pó ou por refusão dos ímãs reciclados para ligas mestres de ETRs para a produção de novos ímãs de

terras raras. Em outros casos, é aconselhável separar as terras raras dos metais de transição e outros elementos (por exemplo, boro) presentes em ligas de ímãs. As misturas de ETRs recicladas são então separadas nas terras raras individuais (em geral, na forma de óxidos). Estes óxidos podem ser transformados em novas ligas de terras raras para a produção de ímã, ou podem ser usados em outras aplicações. O processo de fabricação de ímãs de terras raras produz grandes quantidades de sucata e outros resíduos, por causa do corte, moagem e operações de polimento.

Até 30% da liga de partida pode ser perdida durante o processo de fabricação. A reciclagem da sucata está sendo feita pelas empresas de fabricação de ímã, mas apenas alguns detalhes sobre os processos de reciclagem foram divulgadas (Bounds, 1994; Tanaka *et al.*, 2013).

Por um longo tempo, a reciclagem de sucata da produção de ímã era a única forma de reciclagem de elementos terras raras.

3.1.1 | Vantagens e desvantagens das diferentes rotas de reciclagem de ímãs de terras raras

De acordo com Binnemans e colaboradores, a reciclagem de elementos terras raras de ímãs permanentes pode ser realizada pelo reuso direto na forma em que se encontra, por métodos hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos ou por extração em fase gasosa (Binnemans *et al.*, 2013).

O reuso direto na forma em que se encontra é a maneira mais econômica de reciclagem por apresentar baixo consumo de energia e não fazer uso de reagentes, conseqüentemente não gera de resíduos. A desvantagem é que esta rota só pode ser

utilizada para grandes ímãs facilmente acessíveis (turbinas de vento, grandes motores elétricos e geradores em veículos híbridos e elétricos), não disponíveis em grandes quantidades na sucata hoje.

Os métodos hidrometalúrgicos são, em geral, aplicáveis a todos os tipos de ímãs e a ligas oxidadas e não-oxidadas. As etapas de processamento são semelhantes àquelas utilizadas na extração das terras raras de minerais. A desvantagem encontra-se no consumo de grande quantidade de reagentes e geração de grande volume de água a ser descartada.

Os métodos pirometalúrgicos apresentam a vantagem de serem aplicáveis, em geral, a todos os tipos de ímãs. Não geram água como resíduo. Utilizam um número menor de etapas de processamento quando comparados aos métodos hidrometalúrgicos. A fusão direta do material permite obter as ligas e a extração do metal líquido permite a obtenção de elementos terras raras em estado metálico.

Os métodos pirometalúrgicos apresentam como desvantagem alto consumo de energia, a fusão direta e a extração de metal líquido não podem ser aplicadas a ímãs oxidados e também o fato de que o refino de escória eletrocondutora e o método de escória de vidro geram grandes quantidades de resíduos sólidos.

A extração em fase gasosa é geralmente aplicável a todos os tipos de ímãs, a ligas oxidadas e não oxidadas e não há geração de águas residuais. A desvantagem deste método é devido ao consumo de grandes quantidades de gás cloro.

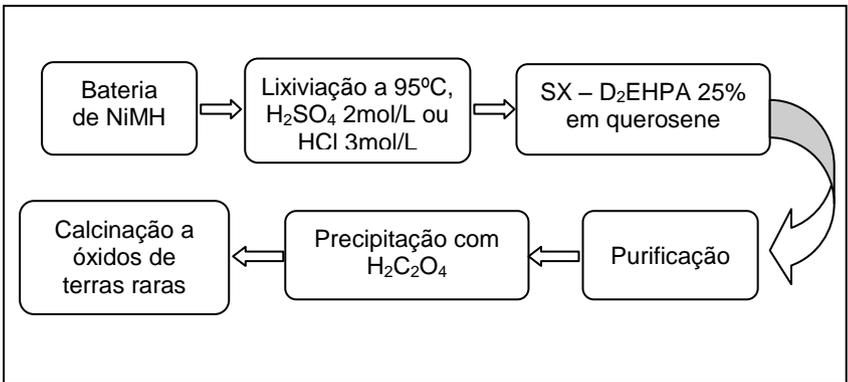
3.2 | Baterias de Hidreto Metálico de Níquel (NiMH)

O uso de ligas de elementos terras raras em baterias recarregáveis de hidreto metálico de níquel (NiMH) é devido a suas propriedades de armazenamento de hidrogênio. Um representante deste tipo de material é o LaNi_5 , capaz de absorver quantidades consideráveis de gás hidrogênio, resultando no hidreto metálico, LaNi_5H_6 . O preço dessas ligas é elevado porque deve ser usado como matéria-prima o lantânio de alta pureza. Com o intuito de reduzir o preço da liga, utiliza-se mischmetal em substituição ao lantânio puro, formando uma família de ligas para armazenamento de hidrogênio constituídas por mischmetal- Ni_5 . Mischmetal é uma mistura de elementos terras raras leves (La, Ce, Pr e Nd) no estado metálico, sendo que sua composição pode variar dependendo da origem dos minerais de terras raras utilizados e de seu processamento (Binnemans *et al.*, 2013).

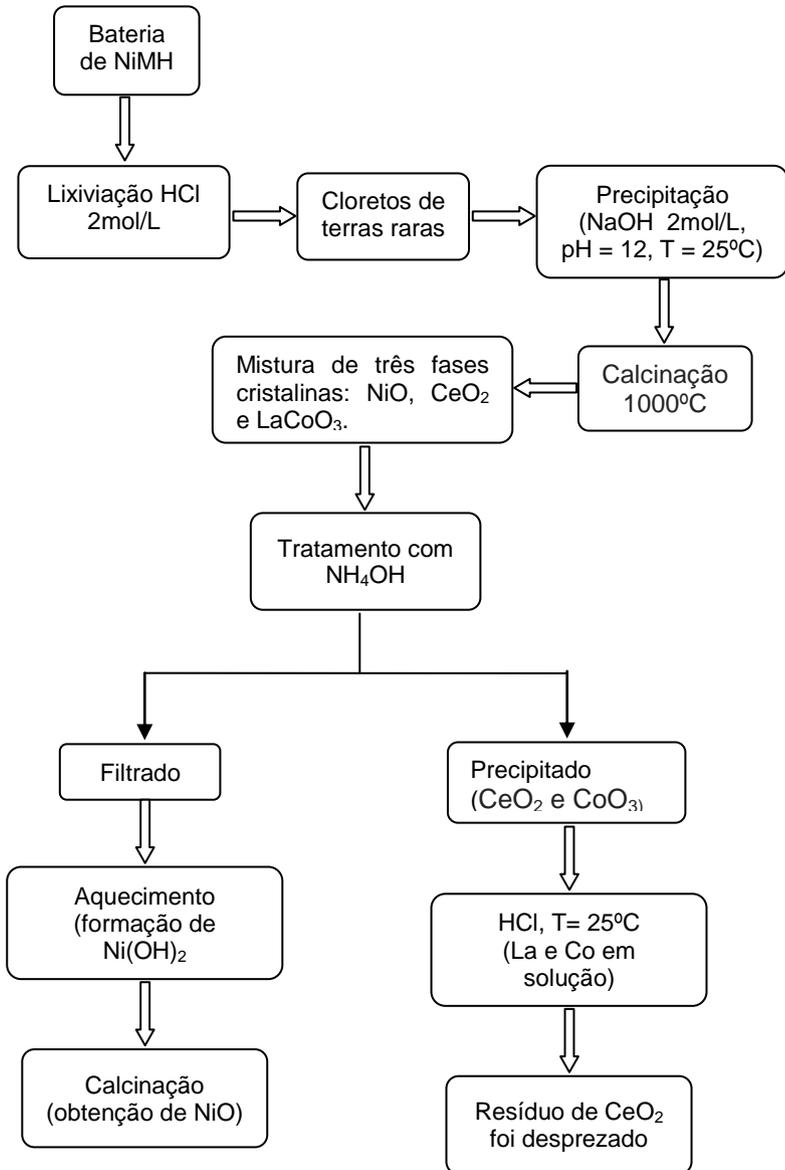
O níquel pode ser substituído por elementos como Al, Mn, Cr, Fe, Co, Cu e Si. Na bateria de hidreto metálico de níquel, o eletrodo negativo é constituído por uma liga de armazenamento de hidrogênio, substituindo o cádmio na antiga bateria recarregável composta por Ni-Cd. Nas baterias atuais de NiMH, ligas multicomponentes como $\text{La}_{0,8}\text{Nd}_{0,2}\text{Ni}_{2,5}\text{Co}_{2,4}\text{Si}_{0,1}$, $\text{La}_{0,8}\text{Nd}_{0,2}\text{Ni}_{2,5}\text{Co}_{2,4}\text{Al}_{0,1}$, $\text{MmNi}_{3,55}\text{Co}_{0,75}\text{Mn}_{0,4}\text{Al}_{0,3}$ ou $\text{MmNi}_{3,5} - \text{Co}_{0,7}\text{Al}_{0,8}$ (Mm = mischmetal) são usadas em substituição a LaNi_5 . Carros elétricos híbridos representam mais da metade do uso de baterias NiMH (57%). Cada carro modelo Toyota Prius, por exemplo, contém cerca de 2,5 kg de ETRs (mischmetal) em sua bateria. Baterias de hidreto metálico de níquel usadas contém 36-42 % de níquel, 3-4 % de cobalto e 8-10 % de mischmetal constituído por lantânio, cério, praseodímio e neodímio. Por muito tempo, a reciclagem

industrial de baterias de NiMH esteve vinculada a sua utilização na produção de aço inoxidável como uma fonte barata de níquel, sendo as terras raras perdidas nas escórias fundidas (Muller e Friedrich , 2006).

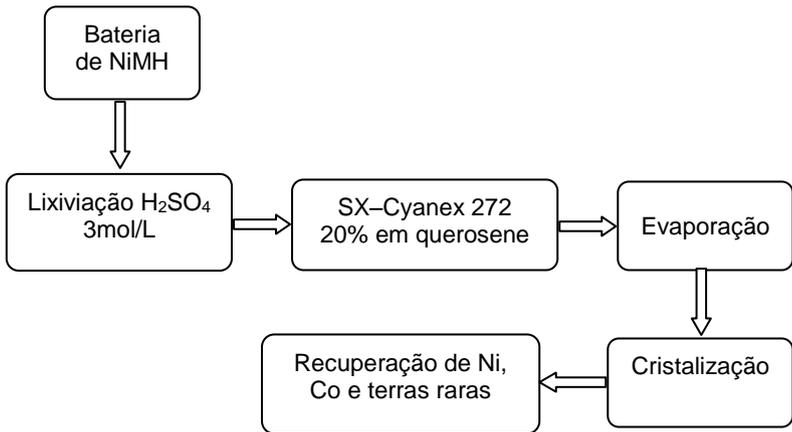
A seguir, são apresentadas algumas metodologias desenvolvidas para a recuperação hidrometalúrgica de níquel, cobalto e terras raras de baterias NiMH e pilhas domésticas.



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.*, 1999.



Fonte: Adaptado de Provazi *et al.*, 2011.



Fonte: Adaptado de Kanamori *et al.*, 2009.

3.2.1 | Vantagens e desvantagens das diferentes rotas de reciclagem de terras raras de baterias NiMH

A reciclagem de elementos terras raras de baterias de NiMH pode ser realizada por métodos hidrometalúrgicos ou pirometalúrgicos. Entre as vantagens do primeiro tipo pode-se citar o baixo custo de investimento, a possibilidade de reciclagem de diferentes frações de descarte como materiais do catodo e anodo, podendo ser comercializados separadamente. Entre as desvantagens encontram-se a necessidade de muitas operações manuais para realizar a separação dos componentes das baterias e o alto consumo de produtos químicos (Binnemans *et al.*, 2013).

Os métodos pirometalúrgicos apresentam como vantagem uma tecnologia bem desenvolvida, o aproveitamento da energia de embalagens plásticas e outros componentes orgânicos e as

etapas de processamento usadas para recuperar elementos terras raras de escórias são as mesmas utilizadas para extrair as terras raras dos minérios. As desvantagens destes métodos são o custo de investimento elevado para fornalha, os elementos terras raras precisam ser extraídos das escórias e as terras raras são obtidas como misturas e, posteriormente, faz-se necessário realizar uma separação (Binnemans *et al.*, 2013).

3.3 | Lâmpadas luminescentes

A reciclagem de elementos terras raras de fósforos de lâmpadas é mais simples que a reciclagem destes elementos de outros materiais como os ímãs permanente. Fósforos de lâmpadas luminescentes usadas apresentam-se como uma fonte importante de terras raras pesadas como európio, térbio e ítrio. A pesquisa em relação ao aproveitamento destes elementos a partir de lâmpadas luminescentes é restrita às lâmpadas luminescentes grandes e às compactas. Até o presente momento não há estudos sobre a recuperação de terras raras de lâmpadas luminescentes pequenas usadas em iluminação de tela de cristal líquido ou de fósforos brancos usados em LEDs (Buchert *et al.*, 2012).

3.3.1 | Vantagens e desvantagens das diferentes rotas de reciclagem de terras raras de lâmpadas lumnescentes

Segundo Buchert e colaboradores, há três opções para a reciclagem do fósforo de lâmpadas luminescentes utilizadas: a reutilização direta do fósforo em novas lâmpadas luminescentes, a reciclagem dos componentes individuais do

fósforo por meio de métodos físico-químicos de separação para reutilização em novas lâmpadas e o ataque químico do fósforo para recuperar os elementos terras raras (Buchert *et al.*, 2012).

A reutilização direta do fósforo apresenta-se como o método muito simples, uma vez que não necessita de processamento químico. Quanto às desvantagens, pode-se citar que esta opção é aplicável somente a um único tipo de lâmpada luminescente, porque diferentes lâmpadas utilizam diferentes misturas de fósforos.

A segunda opção de reciclagem das lâmpadas apresenta a vantagem de utilizar um processo relativamente simples e baixo consumo de reagentes. E como desvantagem, a dificuldade de obtenção de frações de fósforos de alta pureza e a mudança no tamanho da partícula do fósforo.

As vantagens do ataque químico do fósforo são: o método pode ser aplicável em geral a todos os tipos de misturas de fósforos, as etapas de processamento usadas são as mesmas que se faz uso para extrair as terras raras de minérios e se obtém óxidos de terras raras que também podem ser usadas em outras aplicações. Já as desvantagens consistem em necessidade de muitas etapas no processo antes da obtenção de uma nova lâmpada luminescente, grande consumo de reagentes e produção de grande quantidade de água de descarte.

O maior desafio na reciclagem destas lâmpadas é a remoção completa do mercúrio presente nas mesmas, um perigo em potencial.

3.4 | Fósforos de Tubos de Raios Catódicos (CRTs) e Monitores de Computador

As pesquisas relacionadas à reciclagem de fósforos em tubos de raios catódicos (CRTs) usados em televisores coloridos e monitores de computador têm recebido pouca atenção em decorrência deste tipo de aplicativo estar em declínio, devido à substituição de telas que utilizam tubos de raios catódicos por outras que apresentam tela de cristal líquido, LED/LCD e descarga de plasma. Como resultado, existe um aumento considerável de computadores e outros equipamentos eletrônicos em aterros (Binnemans *et al.*, 2013; Resende e Morais, 2010).

Os equipamentos eletrônicos citados acima apresentam como revestimento um pó constituído por uma mistura de óxidos e sulfetos que contém elementos terras raras, principalmente európio e ítrio, e outros metais como chumbo, zinco, estrôncio, zircônio e índio. Sendo assim, a recuperação das terras raras e dos demais metais, faz-se importante tanto do ponto de vista econômico quando em relação às questões ambientais (Resende e Morais, 2010).

Innocenzi e colaboradores estudaram a recuperação de ítrio e zinco a partir do pó fluorescente de tubo de raio catódico (CRT) (Innocenzi *et al.*, 2013). Os metais foram extraídos por ácido sulfúrico, na presença de peróxido de hidrogênio. Testes de lixiviação foram realizados e os maiores rendimentos de extração de ítrio e zinco (100%) foram observados com ácido sulfúrico 3 mol/L, 10% v/v de peróxido de hidrogênio 30%, temperatura de 70°C e tempo de reação de 3h.

3.5 | Pós para Polimento de Vidro

O óxido de cério (céria, CeO_2) é a base de um pó para polimento muito utilizado para polimento de vidro. Quando a capacidade de polimento diminui, o pó é removido da suspensão por floculantes como policloreto de alumínio, sendo em seguida descartado em aterros (Bünzli e Pecharsky, 2013).

O mecanismo de polimento é uma combinação de abrasão mecânica e decapagem química da superfície do vidro. O óxido de cério é muito utilizado em aplicações de alta tecnologia, como o polimento de vidros para telas de cristal líquido (LCD), vidros de carros, espelhos, lentes óticas, mas também para vários tipos de pedras preciosas. Pós de polimento de alta qualidade precisam cumprir exigências muito rigorosas em relação a sua distribuição de tamanho de partícula. Este requisito dificulta a reutilização de pós de polimento provenientes da reciclagem em aplicações de alta qualidade. O pó para polimento usado é contaminado por pequenas partículas de sílica provenientes da superfície do vidro polido, bem como de partículas de alumina referente à hidrólise do policloreto de alumínio, adicionado como floculante (Binnemans *et al.*, 2013).

A reciclagem de pó de polimento usado por tratamento com álcali foi estudada por Kato e colaboradores (2000a, b). O pó foi regenerado após remoção de suas maiores impurezas, sílica e alumina nas temperaturas entre 50-60°C com solução de hidróxido de sódio 4 mol/kg pelo período de 1h. Depois de dissolvidas, a sílica e a alumina podem ser recuperadas como uma zeólita a 80°C ou hidroxisodalita a 80-100°C. A capacidade de polimento do produto regenerado é a mesma de um pó para polimento novo.

Na Tabela 19 é apresentada a composição química de um pó para polimento novo e após ser utilizado.

Tabela 19. Composição típica de pó de polimento novo e usado.

Óxido	Pó de polimento novo	Pó de polimento usado
La ₂ O ₃	34,2	17,8
CeO ₂	43,8	22,1
Pr ₆ O ₁₁	3,4	2,3
Nd ₂ O ₃	10,9	5,1
BaO	2,62	0,67
SiO ₂		12,6
Al ₂ O ₃		24,8

3.6 | Catalisadores de Craqueamento de Fluidos

A indústria petroquímica depende basicamente de catalisadores contendo zeólitas para realizar a separação dos vários componentes do petróleo por destilação. O uso pioneiro de zeólitas no craqueamento de petróleo ainda continua sendo a mais importante aplicação prática desses materiais (Mendonça, 2005).

Em termos químicos, as zeólitas abrangem os aluminossilicatos cristalinos hidratados, de estrutura aberta, constituída por tetraedros TO₄ (T = Si, Al, B, Ge, Fe, P, Co) ligados entre si através de átomos de oxigênio. Nas zeólitas mais comuns, na fórmula TO₄, T representa o Si ou o Al. A fórmula química por célula unitária é: M x/n [(AlO₂)_x (SiO₂)_y]. m H₂O, onde M é o

cátion de valência n , m é o número de moléculas de água e $(x + y)$ é o número de tetraedros por célula unitária. (Luna e Schuchardt, 2001).

Os catalisadores de craqueamento catalítico (FCC) contêm cerca de 3,5% em peso de terras raras principalmente, óxidos de lantânio, e pequenas quantidades de cério, praseodímio e neodímio. Os íons terras raras ajudam a estabilizar a estrutura de zeólita do catalisador. Esta aplicação consome cerca de 50% da produção mundial de lantânio (Binnemans *et al.*, 2013).

4. | CONCLUSÕES

As aplicações de elementos terras raras são muito abrangentes, englobando do uso na medicina à aplicações aeroespaciais, estando cada vez mais presentes no nosso dia a dia.

A demanda global por esses elementos tende a aumentar significativamente nos próximos anos e a preocupação global com o abastecimento das terras raras é evidente.

A reciclagem destes elementos tem o potencial de compensar uma parcela significativa da extração de terras raras, além de minimizar problemas ambientais presentes na mineração e no seu processamento.

Muitas pesquisas a respeito de reciclagem foram desenvolvidas nos últimos anos e a tendência é que a reutilização de metais terras raras, a partir de produtos usados, aumente significativamente.

5. | AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao Centro de Tecnologia Mineral – CETEM pela infraestrutura, aos profissionais da Coordenação de Processos Metalúrgicos e Ambientais (CPMA) e ao Conselho Nacional de Pesquisa, CNPq, pela concessão da bolsa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRÃO, A. Química e tecnologia das terras-raras, Série Tecnologia Mineral n° 66, 1994.
- ALBANEZ, N. E. F. K. Obtenção de óxido de cério com alta área superficial específica. São Paulo: Área de Tecnologia Nuclear Básica, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia Associada a Universidade de São Paulo, (Dissertação de Mestrado), 1996.
- BINNEMANS, K., JONES, P. T., BLANPAIN, B., GERVEN, T. V., YANG, Y., WALTON, A. E. BUCHERT, M. Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production* 51 (2013) 1- 22.
- BOUNDS, C. O., 1994. The recycle of sintered magnet swarf. In: Liddell, K.C., Bautista, R.G., Orth, R.J. (Eds.), *Symposium on Metals and Materials Waste Reduction, Recovery and Remediation, at the 1994 Materials Week Meeting Location: Rosemont, IL, October 03e06, 1994. The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, Pennsylvania*, pp. 173 e 186.
- BUCHERT, M., MANHART, A., BLEHER, D., PINGEL, D., 2012. Recycling Critical Raw Materials from Waste Electronic Equipment. *Oeko-Institut e.V, Darmstadt, Germany*. Buschow, K.H.J., 1994. Trends in rare-earth permanent-magnets. *IEEE Trans. Magn.* 30, 565 e 570.
- BUSCHOW, K. H. J., 1994. Trends in rare-earth permanent-magnets. *IEEE Trans. Magn.* 30, 565 e 570.
- CURTIS, N., 2012. Rare earths, we can touch them everyday. In: *Lynas Presentation at the JP Morgan Australia Corporate, New York*.
- CROAT, J. J., HERBST, J. F., LEE, R. W., PINKERTON, F. E., 1984. High-energy product Nd-Fe-B permanent-magnets. *Appl. Phys. Lett.* 44, 148 e 149.

- GREENWOOD, N. M.; EARNSHAW, A.; Chemistry of the Elements, Pergamon Press: Great Britain, 1984.
- GUPTA, C. K., KRISHNAMURTHY, N. Extractive metallurgy of rare earths. *International Materials Reviews*, vol. 37 (5), p. 197-210, 1992.
- GUTFLEISCH, O., WILLARD, M. A., BRUCK, E., CHEN, C. H., SANKAR, S. G., LIU, J. P., 2011. Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient. *Adv. Mater.* 23, 821 e 842.
- HATCH, G. P. (2012, October). Dynamics in the global market for rare earths. *Elements*, 8(5), 341-346. Retrieved from <http://elements.geoscienceworld.org/content/8/5/341.full>.
- <http://www.northernminerals.com.au> - The supply/demand dynamics of rare earths. (2010).
- <http://www.metall.com.cn>, acesso em Setembro de 2013.
- HURST, C. (2010) – China’s Rare Earth Elements Industry: What can the west learn? Institute for the Analysis of Global Security – IAGS, Washington.
- INNOCENZI, V., DE MICHELIS, I., FERELLA, F., BEOLCHINI, F., KOPACEK, B. Recovery of yttrium from fluorescent powder of cathode Ray tube, CRT: Zn removal by sulphide precipitation. *Waste Management*, vol. 33, p. 2364-2371, 2013.
- KANAMORI, T., MATSUDA, M., MIYAKE, M., 2009. Recovery of rare metal compounds from nickel-metal hydride battery waste and their application to CH₄ dry reforming catalyst. *J. Hazard. Mater.* 169, 240 - 245.
- KATO, K., YOSHIOKA, T. AND OKUWAKI, A. Study for recycling of ceria-based glass polishing powder. *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 39, p. 943-947, 2000a.

- KATO, K., YOSHIOKA, T. AND OKUWAKI, A. Study for recycling of ceria-based glass polishing powder II – recovery of hydroxysodalite from the alkali waste solution containing SiO_2 and Al_2O_3 . *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 39, p. 4148-4151, 2000b.
- KILBOURN, B. T.; *A Lanthanide Lanthology*, Molycorp, Inc., White Plains: New York, 1993.
- KOERTH-BAKER, M. (2012, MAY). 4 rare earth elements that will only get more important. *Popular mechanics*, Retrieved from <http://www.popularmechanics.com/technology/engineering/new-s/important-rare-earth-elements>.
- LAPIDO-LOUREIRO, F. E., SANTOS, R. L. C. (Editor). *O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras*, Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013.
- LEE, J. D.; *Química Inorgânica não tão Concisa*; Tradução: Toma, H. E.; Rocha, R. C.; Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 1999, cap. 29.
- LUNA, F. J. and SCHUCHARDT, U. Modificação de zeólitas para uso em catálise. *Química Nova*, vol. 24, n° 6, p. 885-892, 2001.
- MARTINS, T. S.; ISOLANI, P. C. Terras raras: aplicações industriais e biológicas. *Química Nova*, vol. 28, Nn° 1, 111-117, 2005.
- MENDONÇA, L. A. DE, Estudo da viabilidade técnica de recuperação de metais a partir de zeólitas comerciais desativadas. Tese. Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Engenharia Metalúrgica e Materiais, Rio de Janeiro, 2005.
- MOLYCORP, Inc. (1993) *A Lanthanide Lanthology*, Molycorp, Inc. Mountain Pass, Ca, US.
- MORAIS, C. A., Terras Raras, XXIII Simpósio Mineralógico da UFMG, 17/10/2012.

- MULLER, T., FRIEDRICH, B., 2006. Development of a recycling process for nickel-metal hydride batteries. *J. Power Sources* 158, 1498 e 1509.
- PROVAZI, K., CAMPOS, B. A., ESPINOSA, D. C. R., TENORIO, J.A.S., 2011. Metal separation from mixed types of batteries using selective precipitation and liquidliquid extraction techniques. *Waste Manage.* 31, 59 e 64.
- TANAKA, M., OKI, T., KOYAMA, K., NARITA, H., OISHI, T., 2013. Recycling of rare earths from scrap. In: Bunzli, J.C.G., Pecharsky, V.K. (Eds.), *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, vol. 43. Elsevier, Amsterdam, pp. 159 e 212. Chapter 255.
- TIESMAN, J. (2010, October 28). Mining techniques, products, and shortages of rare earth elements. Suite 101, Retrieved from <http://suite101.com/article/mining-using-and-shortages-of-rare-earth-elements-a302130>.
- RESENDE, L. V. and MORAIS, C. A. Study of the recovery of rare earth elements from computermonitor scraps – Leaching experiments. *Minerals Engineering*, vol. 23, p. 277 – 280, 2010.
- YU, Z. S., CHEN, M. B., 1995. *Rare Earth Elements and Their Applications*. Metallurgical Industry Press, Beijing (P.R. China).
- XU, T., PENG, H. Q., 2009. Formation cause, composition analysis and comprehensive utilization of rare earth solid wastes. *J. Rare Earths* 27, 1096 e 1102.
- ZHANG, P. W., YOKOYAMA, T., ITABASHI, O., WAKUI, Y., SUZUKI, T. M., INOUE, K., 1999. Recovery of metal values from spent nickel-metal hydride rechargeable batteries. *J. Power Sources* 77, 116 e 122.
- ZINNER, L. B.; *Anais do VI Simpósio Anual da ACIESP*, 1982.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2010, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 200 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

Últimos números da Série Tecnologia Mineral

STM-90 – Moinho vertical de carga agitada: uma revisão.

Douglas B. Mazzinghy, Claudio L. Schneider e Roberto Galéry, 2013.

STM-89 – Reagentes depressoress de carbonatos: uma revisão. Aline Pereira Leite Nunes e Antônio Eduardo Clark Peres, 2011.

STM-88 – Avaliação da Utilização de Argila Calcificada em Pavimentação Asfáltica. Roberto Carlos da C. Ribeiro, Julio Cesar G. Correia e Peter Rudolf Seidl, 2007.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ

Geral: (21) 3867-7222

Biblioteca: (21) 3865-7218 ou 3865-7233

Telefax: (21) 2260-2837

E-mail: biblioteca@cetem.gov.br

Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.