

ESTUDO DA LIXIVIAÇÃO ÁCIDA DOS TERRAS RARAS DE IMÃS DE NdFeB PÓS-CONSUMO

STUDY OF ACID LEACHING RARE EARTH ELEMENTS FROM NdFeB POST-CONSUMER MAGNETS

Paola de Albuquerque Maranhão Gonçalves

Aluna de Graduação da Engenharia Química, 8º período, UFRJ
Período PIBIC/CETEM: outubro de 2024 a agosto de 2025
paollagoncalves@icloud.com

Ysrael Marrero Vera

Orientador, Eng. Químico, D.Sc.
yvera@cetem.gov.br

Marcelo de Luccas Dourado

Coorientador, Eng. Químico, M.Sc.
mdourado@cetem.gov.br

RESUMO

O aumento do consumo e a rápida obsolescência de dispositivos eletrônicos intensificaram a geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), que contêm elevadas concentrações de elementos terras raras (ETRs), tornando-se fontes promissoras para sua recuperação. Este projeto teve como objetivo estudar a lixiviação ácida de ETRs a partir de ímãs pós-consumo, utilizando os ácidos clorídrico (HCl) e sulfúrico (H₂SO₄), em diferentes concentrações. Foram analisadas duas amostras de ímãs com distintos níveis de corrosão (preservada e oxidada), visando (1) identificar as condições mais eficientes e seletivas para extração dos ETRs e (2) minimizar a co-lixiviação do ferro (Fe). Os resultados mostraram que os ETRs são mais eficientemente e seletivamente lixiviados da amostra preservada, especialmente com o uso de HCl. A condição mais adequada foi de 2,92 g de HCl por grama de amostra preservada, permitindo a extração de 100% dos ETRs e 74% do Fe. Para a amostra oxidada, a melhor condição foi 4,38 g de HCl/g, com extração de 84% de ETRs e 57% de Fe. Devido à alta concentração de ferro nos lixiviados, torna-se necessária uma etapa posterior de purificação, a fim de viabilizar a recuperação seletiva dos ETRs.

Palavras-chave: Terras raras, lixiviação ácida, ímãs pós-consumo.

ABSTRACT

The increased consumption and rapid obsolescence of electronic devices have intensified the generation of waste electrical and electronic equipment (WEEE), which contains high concentrations of rare earth elements (REEs), making it a promising source for their recovery. This project aimed to study the acid leaching of REEs from post-consumer magnets using hydrochloric acid (HCl) and sulfuric acid (H₂SO₄) at different concentrations. Two magnet samples with different levels of corrosion (preserved and oxidized) were analyzed to identify the most efficient and selective conditions for REE extraction, minimizing co-leaching of iron (Fe). The results showed that REEs were more efficiently and selectively leached from the preserved sample, particularly with HCl. The optimal condition was 2.92 g of HCl per gram of preserved sample, enabling the extraction of 100% of the REEs and 74% of Fe. For the oxidized sample, the best condition was 4.38 g of HCl/g, resulting in 84% REE and 57% Fe extraction. Due to the high concentration of iron in the leachates, a subsequent purification step is necessary to enable the selective recovery of REEs.

Keywords: Rare earth elements, acid leaching, post-consumer magnets.

1. INTRODUÇÃO

Um ímã permanente é um material que mantém um campo magnético constante sem necessidade de corrente elétrica. Ímãs como os de neodímio-ferro-boro (NdFeB) são essenciais em tecnologias modernas devido à sua alta resistência à desmagnetização e produto magnético superior, sendo usados em HDs, equipamentos de ressonância magnética, motores, celulares, turbinas eólicas e veículos híbridos. Ao fim da vida útil, esses dispositivos tornam-se resíduos eletroeletrônicos (REEE), cujo volume cresce anualmente devido ao consumo e obsolescência acelerada (ONGONDO, WILLIAMS E CHERRETT, 2011).

O descarte inadequado gera impactos ambientais, incentivando a reciclagem, reutilização e recuperação de terras raras (ETRs), como neodímio, disprósio e praseodímio, presentes nos REEE. A mineração urbana surge como alternativa sustentável à extração convencional, com a hidrometalurgia destacando-se na recuperação eficiente desses metais (MÜNCHEN, 2021).

Os REEE têm concentração metálica maior que minérios naturais, e sua recuperação reduz a necessidade de novas jazidas, alinhando-se à economia circular. Isso minimiza impactos ambientais, gera empregos e promove inovação tecnológica (ABRÃO, 1994; XAVIER & OTTONI, 2021).

Estudos, como os de München (2016), propõem rotas hidrometalúrgicas para extração de ETRs de ímãs pós-consumo, utilizando H_2SO_4 e HCl para dissolução, seguida de lixiviação ácida em batelada para otimizar a recuperação dos metais.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo estudar a lixiviação ácida de elementos terras raras (ETRs) visando sua recuperação a partir de ímãs pós-consumo. Foram avaliadas diferentes condições experimentais, variando o tipo de ácido (H_2SO_4 e HCl), suas concentrações e o grau de corrosão das amostras. A comparação entre essas variáveis permitiu identificar as condições mais seletivas para a extração dos ETRs, minimizando a coextração de ferro.

3. METODOLOGIA

Neste estudo, foram utilizadas duas amostras de ímãs de NdFeB fornecidas pelo Laboratório de Materiais Magnéticos (Magma/UFSC), sendo uma preservada e outra oxidada. As amostras foram submetidas a ensaios de lixiviação com ácido sulfúrico e clorídrico em diferentes concentrações. (Tabela 1).

Tabela 1: Condições dos ensaios de lixiviação de cada amostra de ímã lixiviada.

Tipo de amostra	Ácido	Intervalo de concentração (mol/L)	Intervalo do consumo específico de ácido (g/g)
Preservada	H_2SO_4	0,072 - 1,50	0,28 - 5,88
Preservada	HCl	0,072 - 4,00	0,10 - 5,84
Oxidada	H_2SO_4	0,072 - 5,00	0,28 - 19,60
Oxidada	HCl	0,14 - 5,00	0,21 - 7,30

Os ensaios de lixiviação foram realizados em reator de vidro de 250 mL contendo 100 mL de solução lixiviante e 2,5 g de amostra por 1 hora, sob agitação magnética constante e sem controle de temperatura ou pressão. As amostras sólidas foram caracterizadas por Fluorescência de Raios X (FRX), e os licores obtidos após filtração foram analisados por Espectrometria de Emissão Óptica e de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS) para quantificação dos ETRs e impurezas como o ferro.

Com base nas concentrações dos elementos nos ímãs e nos lixiviados, foi calculado o percentual de lixiviação (Equação 1). A seletividade dos ETRs em relação ao ferro foi avaliada pela razão entre os teores extraídos, permitindo analisar a competitividade entre as espécies metálicas sob diferentes condições de ataque ácido (Equação 2).

$$\% \text{ Lixiviação} = \frac{C(x).Vs}{\% \left(\frac{m}{m}\right) \cdot m_{\text{amostra}}} \quad (1)$$

$$\text{Seletividade} = \frac{\% \text{ Lixiação total ETR}}{\% \text{ Lixiviação Fe}} \quad (2)$$

Nas Equações 1 e 2, C(x) representa a concentração do elemento lixiviado (mg/L); Vs, o volume da solução (0,1 L); o $\% \left(\frac{m}{m}\right)$, a composição do elemento na amostra; m_{amostra} , a massa da amostra (2,5g); o % Lixiviação; o percentual total de metal (ETR, Fe) lixiviado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise Química das Amostras Preservada e Oxidada

As análises mostraram que a amostra preservada continha 49,87% Fe, 22,21% Nd, 6,04% Pr, 1,6% Dy, 1,5% Gd e 0,7% Ho, enquanto a amostra oxidada, 52,75% Fe, 20,40% Nd, 5,72% Pr, 1,49% Dy, 1,51% Gd e 0,58% Ho.

4.2 Lixiviação da Amostra Preservada

Na Figura 1 e 2 são apresentados gráficos com os valores de lixiviação dos ETRs e do ferro em função do consumo específico dos ácidos sulfúrico e clorídrico.

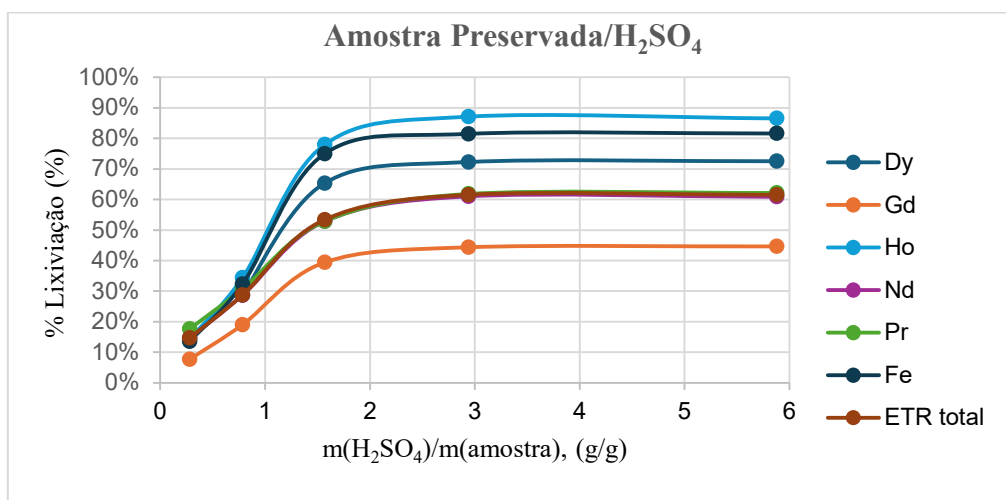


Figura 1: Percentuais de lixiviação de ETR e Ferro presentes em ímã preservado com H₂SO₄ em função do Consumo específico.

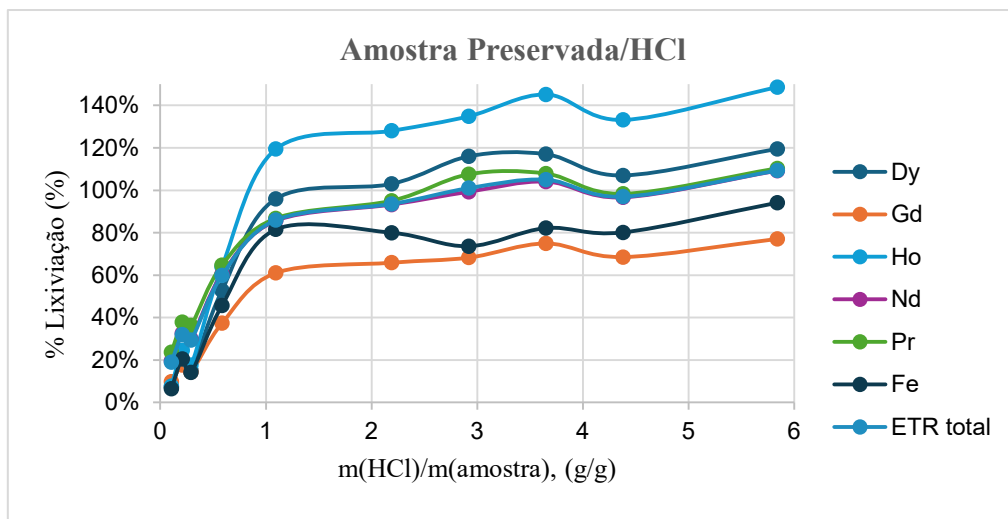


Figura 2: Percentual de lixiviação de ETR e Ferro presentes em ímã preservado com HCl em função do Consumo específico.

A análise dos gráficos demonstrou que, na amostra preservada, o incremento na concentração ácida elevou a lixiviação tanto dos ETRs quanto do ferro. Para o H_2SO_4 , o consumo específico ótimo foi de 2,94 g/g, resultando em 62% de lixiviação de ETRs e 81% de Fe, equilibrando seletividade e eficiência. Já com o HCl, o consumo ideal foi de 2,92 g/g, alcançando ~100% de recuperação de ETRs e ~74% de Fe.

A Figura 3 apresenta o gráfico com os valores de seletividade de lixiviação dos ETRs com relação ao ferro em função do consumo específico dos ácidos clorídrico e sulfúrico.

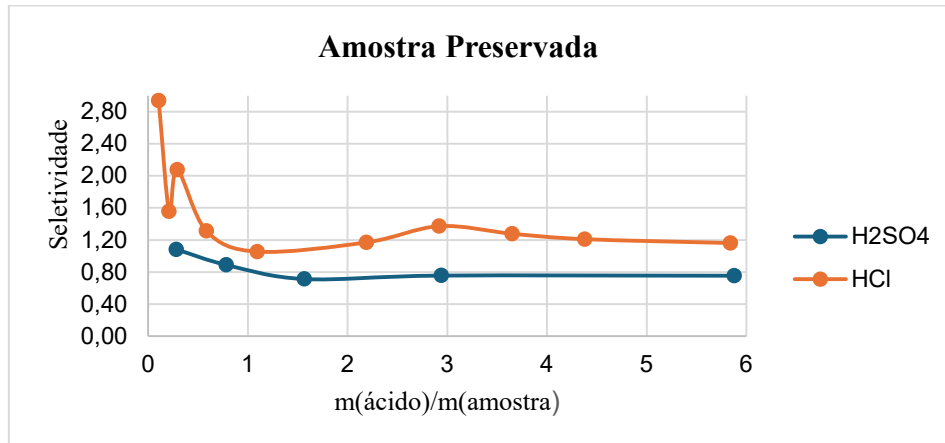


Figura 3: Seletividade da lixiviação de ETR em relação à lixiviação de ferro contidos no ímã preservado em função do Consumo específico dos ácidos sulfúrico e clorídrico.

De acordo com Figura 3, verificou-se que a seletividade da lixiviação de ETR com relação ao Fe obtida com HCl foi superior à obtida com H_2SO_4 .

4.3 Lixiviação da Amostra Oxidada

As Figuras 4 e 5 mostram os gráficos de % de Lixiviação dos ETR e do ferro da amostra de ímã oxidada em função do consumo específico dos ácidos sulfúrico e clorídrico.

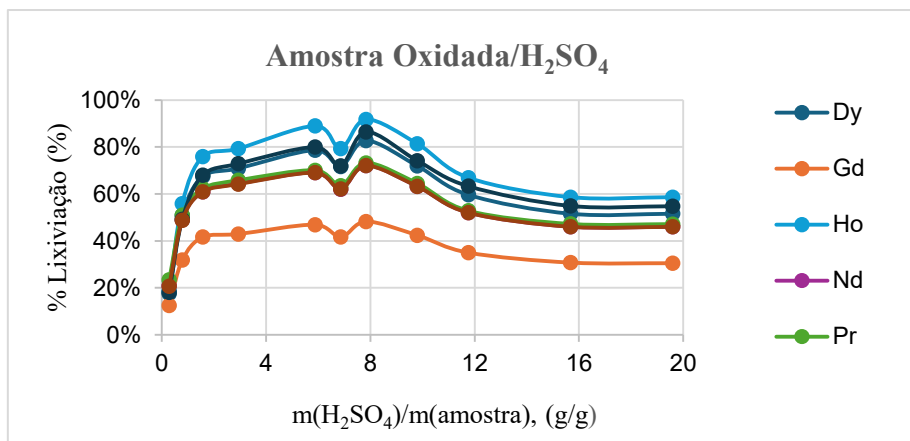


Figura 4: Percentual de lixiviação de ETR e Ferro presentes em ímã oxidado com H₂SO₄ em função do Consumo específico.

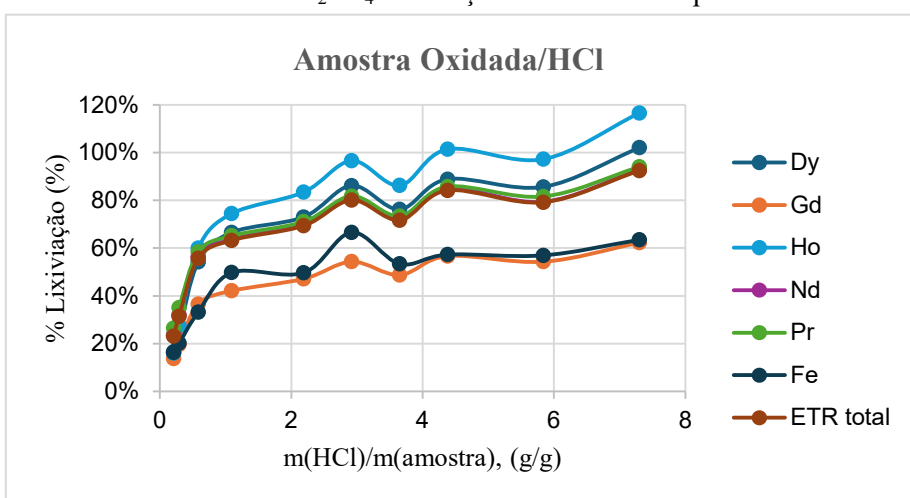


Figura 5: Percentual de lixiviação de ETR e Ferro presentes em ímã oxidado com HCl em função do Consumo específico.

A lixiviação da amostra oxidada mostrou que os consumos específicos ideais para a extração foram de 4,38 g de HCl e 7,84 g de H₂SO₄ por grama de amostra, sendo que o HCl permitiu extrair 76% dos elementos terras raras e 57% do ferro (Fe), enquanto o H₂SO₄ apresentou eficiência de 72% na extração de ETRs e 86% de Fe, demonstrando um melhor desempenho do HCl no processo de lixiviação.

A Figura 6 apresenta o gráfico com os valores de seletividade de lixiviação dos ETRs com relação ao ferro em função do consumo específico dos ácidos clorídrico e sulfúrico.

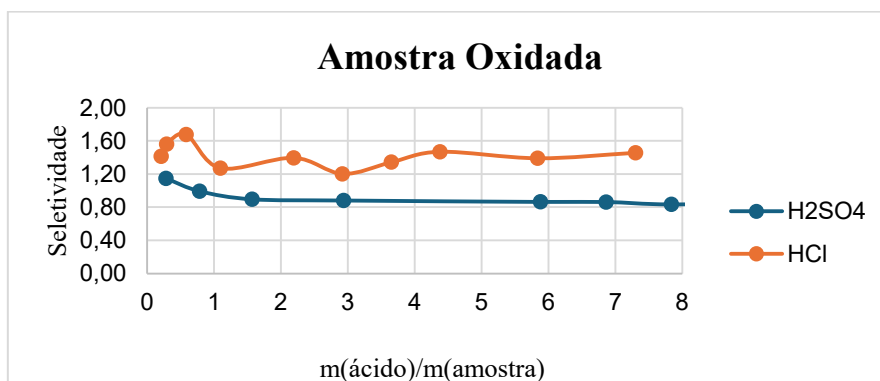


Figura 6: Seletividade da lixiviação de ETR em relação à lixiviação de ferro contidos no ímã oxidado em função do Consumo específico dos ácidos sulfúrico e clorídrico.

Da mesma forma, para a amostra oxidada, o ácido clorídrico também mostrou desempenho superior ao do ácido sulfúrico, tendo melhor seletividade e apresentando extrações mais significativas dos ETRs com menor consumo específico de ácido (Figura 6).

5. CONCLUSÕES

A análise dos ensaios de lixiviação com ímãs pós-consumo permitiu comparar o desempenho dos ácidos H_2SO_4 e HCl na extração de elementos terras raras, considerando diferentes concentrações e graus de corrosão das amostras. O ácido clorídrico mostrou-se mais eficiente e seletivo, especialmente nas amostras preservadas, promovendo maior extração de ETRs com menor coextração de ferro. Já nas amostras oxidadas, foi necessário maior consumo de reagente, com redução da seletividade e aumento dos custos. Assim, a lixiviação com HCl demonstrou ser a alternativa mais adequada para a recuperação eficiente de terras raras, tanto em amostras preservadas quanto oxidadas.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq pela bolsa de iniciação científica, ao CETEM pela infraestrutura e oportunidade, aos orientadores Ysrael Marrero Vera e Marcelo De Luccas Dourado e ao Engenheiro Químico Kleby Soares do Nascimento pelo apoio e orientação, à equipe técnica e de bolsistas pela colaboração, e ao Laboratório de Magma da UFSC pelo fornecimento dos ímãs.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, A. **Química e tecnologia das terras-raras**. CETEM/CNPq, Rio de Janeiro, 1994.

MÜNCHEN, D.D. **Recuperação de neodímio a partir de ímãs de neodímio-ferro-boro por meio de processos mecânicos hidrometalúrgicos**. 2016. 63 f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MÜNCHEN, D.D. **Estudo comparativo entre rotas de recuperação de elementos terras raras contidos em ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro (NdFeB) de hard disk drives**. 2021. 137 f. Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ONGONDO, F.O.; WILLIAMS, I.D.; CHERRETT, T.J. How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. **Waste Management**, v. 31, n. 4, p. 714-730, 2011.

XAVIER, L.H.; OTTONI, M. (org). **Mineração Urbana: Conceitos e análise do potencial dos resíduos eletroeletrônicos**. 1ª ed. Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia Mineral, CETEM/MCTI. 2021.