

ESTUDO DA LIXIVIAÇÃO SELETIVA DO NEODÍMIO EM IMÃS NdFeB

STUDY OF THE SELECTIVE LEACHING OF NEODYMIUM FROM NdFeB MAGNETS

Júlia Gama Pires

Aluno de Graduação de Engenharia Metalúrgica 5º período
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Período PIBITI/CETEM: outubro de 2025 a agosto de 2026

Rodrigo Ferreira Gomes

Coorientador, Eng. Metalúrgico, M.sc
@rfgomes@cetem.gov.br

Ysrael Marrero Vera

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

RESUMO

A crescente demanda por elementos terras raras, em especial o neodímio (Nd), associada à elevada concentração da produção global na China e aos baixos índices de reciclagem dos ímãs permanentes de NdFeB, torna imperativo o desenvolvimento de rotas tecnológicas eficientes para a recuperação desses elementos a partir de resíduos. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da calcinação prévia sobre a eficiência e seletividade da lixiviação ácida de Nd e Fe a partir de ímãs NdFeB descartados. Utilizou-se um Planejamento Composto Central com 17 experimentos, variando-se a temperatura de calcinação (398-902°C), temperatura de lixiviação (36-103°C) e concentração de HCl (1,31-4,68 mol.L⁻¹). Os resultados demonstraram que a temperatura de calcinação exerce efeito negativo e altamente significativo sobre a extração de ambos os elementos, com destaque para o Nd. As condições otimizadas permitiram extrações de Nd superiores a 95% e razões Nd/Fe superiores a 3,0, evidenciando a seletividade do processo. Concluiu-se que a calcinação controlada é uma ferramenta eficaz para direcionar a formação de fases favoráveis à lixiviação seletiva do neodímio, contribuindo para o reaproveitamento sustentável desse recurso estratégico.

Palavras chave: Neodímio, ímãs NdFeB, reciclagem, calcinação, lixiviação seletiva.

ABSTRACT

The growing demand for rare earth elements, especially neodymium (Nd), along with the high concentration of global production in China and the low recycling rates of NdFeB permanent magnets, makes it essential to develop efficient technological methods to recover these elements from waste. This study aimed to evaluate the effect of prior calcination on the efficiency and selectivity of acid leaching of Nd and Fe from discarded NdFeB magnets. A Central Composite Design with 17 experiments was used, varying calcination temperature (398-902°C), leaching temperature (36-103°C), and HCl concentration (1.31-4.68 mol.L⁻¹). The results showed that calcination temperature has a negative and highly significant effect on the extraction of both elements, especially Nd. The optimized conditions allowed Nd extractions higher than 95% and Nd/Fe ratios above 3.0, showing the selectivity of the process. It can be concluded that controlled calcination is an effective tool to direct the formation of phases favorable for the selective leaching of neodymium, contributing to the sustainable reuse of this strategic resource.

Keywords: Neodymium, NdFeB magnets, recycling, calcination, selective leaching.

1. INTRODUÇÃO

O avanço acelerado da transição energética e da eletrônica tem impulsionado fortemente a demanda por Elementos Terras Raras (ETRs), em especial o neodímio (Nd), praseodímio (Pr), disprosio (Dy) e térbio (Tb). Esses elementos são matérias-primas essenciais para a fabricação dos ímãs permanentes de NdFeB. A cadeia produtiva desses materiais é altamente concentrada na China, respondendo por mais de 85% da produção global de ETRs (Rademaker et al., 2013), o que expõe os demais países a vulnerabilidades relacionadas a sobretaxas e restrições de exportação. Além disso, a mineração convencional desses elementos gera rejeitos ácidos e substâncias tóxicas, com significativos impactos ambientais. Apesar desse cenário, as taxas de reciclagem de ímãs de NdFeB permanecem baixas, inferiores a 5% em escala global (Schulze e Buchert, 2016).

Na rota chinesa de produção primária de neodímio a partir do minério de Bayan Obo, são empregadas etapas de britagem, moagem, separação magnética, flotação, ustulação sulfúrica, lixiviação, precipitação, extração por solventes e calcinação (Schreiber et al., 2020). No entanto, essa rota convencional apresenta limitações importantes: é energeticamente custosa, demanda infraestrutura complexa e, principalmente, não foi projetada para recuperar o neodímio de forma seletiva, o que resulta em perdas significativas do elemento e baixa pureza do produto final (Schreiber et al., 2020).

Diante dessas limitações, a literatura recente tem investigado a influência das etapas térmicas em especial da calcinação sobre a distribuição das fases formadas e a consequente eficiência da lixiviação ácida. Nesse contexto, a calcinação prévia dos ímãs tem sido avaliada como uma estratégia para favorecer a formação de óxidos de neodímio facilmente lixiviáveis (como o Nd_2O_3) em detrimento de fases refratárias, como o NdFeO_3 , que comprometem a recuperação do elemento. Seo et al. (2024) avaliaram o efeito da temperatura de calcinação sobre a composição de fases em resíduos de ímãs NdFeB e verificaram que, sob condições controladas, é possível direcionar a formação preferencial de Nd_2O_3 e Fe_2O_3 , suprimindo a geração de NdFeO_3 . Como resultado, os autores obtiveram um aumento significativo na eficiência de lixiviação do neodímio em meio ácido, atingindo valores superiores a 90% de extração. Apesar desses avanços, ainda são escassos na literatura estudos que relacionam sistematicamente as condições de calcinação com a seletividade da lixiviação do neodímio em relação ao ferro.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar o efeito da calcinação prévia sobre a eficiência e seletividade da recuperação de neodímio a partir de ímãs NdFeB descartados, visando à definição de parâmetros operacionais que maximizem a razão Nd/Fe no licor lixiviado.

3. METODOLOGIA

A amostra de ímãs permanentes de NdFeB utilizada neste estudo foi fornecida pelo Laboratório de Materiais Magnéticos (Magma/UFSC) previamente moída. A quantificação dos elementos químicos presentes na amostra inicial foi realizada anteriormente pelo grupo de pesquisa do CETEM, por meio da técnica de Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), evidenciando uma matriz constituída majoritariamente por Fe (59,40%) e elevado teor de elementos de terras raras, com destaque para Nd (26,45%), seguido por Pr (7,20%), Dy (1,86%) e Gd (1,73%).

Para o pré-tratamento térmico, alíquotas da amostra moída foram pesadas, transferidas para cadinhos de alumina e submetidas à calcinação em forno mufla (marca Jung®, modelo 2120), com aquecimento controlado pela rampa intrínseca do equipamento. Uma vez atingida a temperatura desejada, as amostras permaneceram em patamar isotérmico por 2 horas, seguidas de resfriamento interno no forno por aproximadamente 18 horas antes da retirada. O material calcinado foi então macerado e novamente pesado para utilização nos ensaios de lixiviação. Os ensaios de lixiviação ácida em meio clorídrico (HCl) foram conduzidos em reatores de vidro

vedados, acoplados a condensadores para evitar perdas por evaporação, mantendo-se o volume total da solução em 100 mL com uma porcentagem fixa de 2,0% de sólidos (relação sólido/líquido m/v). As amostras foram mantidas sob agitação magnética constante (aproximadamente 300 rpm) e aquecidas em chapa aquecedora com controle de temperatura. Após cada ensaio, o lixiviado foi filtrado, por gravidade e em papel filtro qualitativo, separado do sólido resultante e armazenado para análises químicas posteriores.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A matriz experimental e os resultados de extração de Nd e Fe para os 17 ensaios, incluindo as triplicatas do ponto central (ensaio 15 a 17), foram avaliados estatisticamente para determinação dos efeitos principais e interações entre as variáveis estudadas. Os valores de extração de Fe variaram entre 3,35% e 107,74% e os de Nd entre 46,90% e 102,77% conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Matriz de Planejamento experimental e porcentagens de extração de Fe e Nd.

Ensaio	T Calcinação (°C)	T Lixiviação (°C)	Concentração HCl (mol/L)	Extração Fe (%)	Extração Nd (%)	%Nd/%Fe
1	500	50	2	88,5	89,21	1,01
2	500	50	4	97,29	94,76	0,97
3	500	90	2	82,32	97,82	1,19
4	500	90	4	107,74	101,27	0,94
5	800	50	2	22,58	72,40	3,21
6	800	50	4	32,65	86,28	2,64
7	800	90	2	33,81	89,11	2,64
8	800	90	4	82,58	90,15	1,09
9	398	70	3	103,74	102,77	0,99
10	902	70	3	12,52	88,46	7,07
11	650	36	3	82,58	90,66	1,10
12	650	103	3	97,94	93,58	0,96
13	650	70	1,31	46,71	89,55	1,92
14	650	70	4,68	79,61	91,97	1,16
15 (PC)	650	70	3	60,65	94,07	1,55
16 (PC)	650	70	3	64,26	93,78	1,46
17 (PC)	650	70	3	62,45	91,91	1,47

4.1. Análise dos Efeitos Padronizados para a Extração do Neodímio (Nd)

A Figura 1 apresenta o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a variável resposta extração de Nd (%), considerando um nível de significância ($p=0,05$).

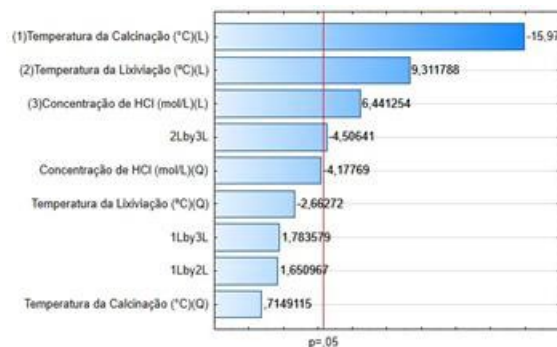


Figura 1: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a extração de Neodímio (Nd) em função da Temperatura de Calcinação, Temperatura de Lixiviação e Concentração de HCl.

Conforme demonstrado na Figura 1, a Temperatura de Calcinação (L) apresentou o efeito padronizado mais expressivo sobre a extração de Nd, com valor de -15,97, superando amplamente a linha de referência de $p=0,05$. Esse resultado indica que a calcinação exerce um efeito negativo e altamente significativo sobre a recuperação do neodímio, sugerindo que o aumento da temperatura de calcinação tende a reduzir a extração do elemento. Esse comportamento está associado à formação de fases mais estáveis e refratárias durante o tratamento térmico. Estudos conduzidos por Seo et al. (2024) demonstraram que a formação da fase complexa NdFeO_3 em temperaturas elevadas de calcinação (acima de 800°C) é a principal responsável por essa redução na extração, pois esta fase apresenta alta resistência à dissolução em meio ácido. Resultados similares foram observados por Önal et al. (2017), que reportaram que o excesso de oxidação, que pode ser observado com o aumento da temperatura de calcinação, leva à formação de NdFeO_3 , comprometendo a recuperação do Nd.

Os efeitos da Temperatura de Lixiviação (L) e da Concentração de HCl (L) também se mostraram estatisticamente significativos, com efeitos padronizados de 9,31 e 6,44, respectivamente. Diferentemente da Temperatura de Calcinação (L), ambos os fatores apresentaram efeitos positivos, indicando que o incremento tanto da temperatura de lixiviação quanto da concentração do ácido favorece a extração do Nd, o que está em consonância com os princípios da cinética química de lixiviação. Yingnakorn et al. (2020) confirmam que o aumento da temperatura de lixiviação e da concentração de ácido favorecem a cinética de dissolução do Nd, uma vez que maiores temperaturas e maiores concentrações de íons H^+ aumentam a força motriz da reação de lixiviação.

4.2. Análise dos Efeitos Padronizados para Extração do Ferro (Fe)

A Figura 2 exibe o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a extração de Fe (%), permitindo a comparação dos fatores que influenciam a extração do ferro, considerado um contaminante indesejado.

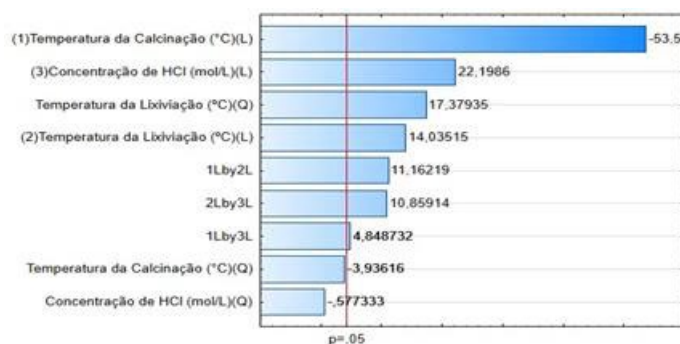


Figura 2: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a extração de Ferro (Fe) em função da Temperatura de Calcinação, Temperatura de Lixiviação e Concentração de HCl.

A análise da Figura 2 revela um comportamento semelhante ao observado para o Nd. Para a extração de Fe, o fator de maior efeito foi novamente a Temperatura de Calcinação (L), com valor de -53,54. Esse dado sugere que o aumento da temperatura de calcinação é eficaz na diminuição da extração de ferro. Em temperaturas de calcinação elevadas ($>720^{\circ}\text{C}$), o ferro se converte a Fe_2O_3 , que não se dissolve facilmente em ácidos diluídos e precipita no resíduo da lixiviação. Esse fenômeno pode ser fundamental para a seletividade do processo, pois permite que o Nd seja lixiviado enquanto o Fe permanece no resíduo. A Concentração de HCl (L) apresentou efeito padronizado de +22,20, enquanto a Temperatura de Lixiviação, em seus componentes linear (L) e quadrático (Q), apresentou efeitos de +14,04 e +17,38, respectivamente.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que a calcinação prévia exerce efeito determinante sobre a seletividade da recuperação de neodímio a partir de ímãs NdFeB descartados. Os resultados experimentais e a análise estatística evidenciaram que temperaturas de calcinação mais baixas (próximas a 500°C) favorecem a extração de Nd ($>95\%$), enquanto temperaturas elevadas (acima de 800°C) promovem a formação de fases refratárias, como NdFeO_3 , que comprometem a lixiviação do elemento. Simultaneamente, a calcinação em altas temperaturas reduz significativamente a extração de Fe, devido à conversão a Fe_2O_3 , contribuindo para a seletividade do processo. As condições otimizadas permitiram razões Nd/Fe na solução lixiviada superiores a 3,0, indicando a viabilidade técnica da rota proposta.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CETEM pelo suporte técnico e infraestrutura e ao laboratório MAGLEV pela disponibilização das amostras. Agradeço também ao CNPQ pela bolsa de iniciação científica, fundamental para a realização da pesquisa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KANARI, N.; MENAD N.E.; OSTROSI, E.; SHALLARI, S; DIOT, F.; ALLAIN, E.; YVON J. Thermal decomposition of iron sulfates. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 131, p. 251-260, 2018.

NABABAN, D. C. Effect of calcination temperature on the magnetic properties of recycled Nd-Fe-B magnets. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 883, p. 160-171, 2021.

ÖNAL, M. A. R.; BORRA, C.R.; GUO, M.; BLANPAIN, B.; VAN GERVEN, T. Recycling of NdFeB magnets: oxidative roasting and selective leaching. *Journal of Sustainable Metallurgy*, v. 3, p. 199-210, 2017.

RADEMAKER, J. H.; KLEIJN, R.; YANG, Y. Recycling as a strategy against rare earth element criticality: a systemic evaluation of the potential yield of NdFeB magnet recycling. *Environmental Science & Technology*, v. 47, n. 18, p. 10129-10136, 2013.

SCHREIBER, V. S. Recycling of rare earths from NdFeB magnets: a review. *Journal of Cleaner Production*, v. 256, p. 120-134, 2020.

SCHULZE, R.; BUCHERT, M. Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 113, p. 12-23, 2016.

SEO, B.; PARK, K. Effect of calcination temperature on phase composition and acid leaching efficiency of NdFeB magnet waste. *Hydrometallurgy*, v. 224, p. 106-118, 2024.

YINGNAKORN, T. Kinetics of neodymium leaching from NdFeB magnets in hydrochloric acid. *Minerals Engineering*, v. 149, p. 106-114, 2020.