

AVALIAÇÃO DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA COMO ROTA ALTERNATIVA NO BENEFICIAMENTO DE BAUXITA

EVALUATION OF MAGNETIC SEPARATION AS AN ALTERNATIVE ROUTE FOR BAUXITE BENEFICIATION

Júlio César Borges Taveira

Aluno de Graduação da Escola Politécnica, 8º período

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Período PIBIC ou PIBITI/CETEM: setembro de 2025 a agosto de 2026

julio20231@poli.ufrj.br

Gabriel Kamilo Pantoja Barrios

Orientador, Eng Químico, D.Sc.

gbarrios@cetem.gov.br

RESUMO

Este trabalho avaliou a separação magnética como rota alternativa de pré-concentração de bauxita, buscando aumentar o teor de alumina disponível ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Av}$) e reduzir a sílica reativa ($\text{SiO}_2\text{-R}$). Foram estudadas duas amostras, A1 (Pará) e F1 (Minas Gerais), usando um separador de correia com ímã permanente de terras raras (rota seca) e um separador de alta intensidade "Boxmag Rapid" (rota úmida), em diferentes faixas de tamanho. Os resultados, obtidos por DRX e FRX, mostraram que na faixa intermediária (1,18 a 0,038 mm), a rota úmida superou a seca, mostrando viabilidade econômica. Na faixa fina (<0,038 mm), a rota úmida foi ineficiente, divergindo da literatura, por causa da inadequação da matriz de separação. Na faixa grossa (4,75 a 1,18 mm), a rota seca recuperou bem o Fe_2O_3 , mas com perdas de Al_2O_3 . Em geral, o aumento de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Av}$ e a redução de $\text{SiO}_2\text{-R}$ ficaram abaixo do esperado, apontando necessidade de ajustes nos parâmetros operacionais.

Palavras chave: Bauxita, separação magnética, processo bayer.

ABSTRACT

This study evaluated magnetic separation as an alternative route for the pre-concentration of bauxite, aiming to increase the available alumina content ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Av}$) and reduce reactive silica ($\text{SiO}_2\text{-R}$). Two bauxite samples were investigated, A1 (Pará State) and F1 (Minas Gerais State), employing a rare-earth permanent magnet belt separator (dry route) and a high-intensity Boxmag Rapid magnetic separator (wet route), using different narrow particle size fractions. The results, obtained by X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF), demonstrated at the intermediate size fraction (1.18 to 0.038 mm), the wet route outperformed the dry route, showing economic viability. In the fine fraction (<0.038 mm), the wet route shows inefficiency, contrary to findings reported in the literature, most likely due to the inadequacy of the separation matrix. In the coarsest fraction (4.75 to 1.18 mm), the dry route achieved good Fe_2O_3 recovery but with significant Al_2O_3 losses. Overall, the increase in available alumina ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-AV}$) and the reduction in reactive silica ($\text{SiO}_2\text{-R}$) were below the expected levels, indicating the need for further optimization of the operational parameters.

Keywords: Bauxite; magnetic separation; bayer process.

1. INTRODUÇÃO

O alumínio é o segundo metal mais utilizado na indústria (MASSOLA, 2008; RHANDHANI, et. al, 2013), sendo essencial na transição energética (JOWITT e MCNULTY, 2021), com demanda crescente e que não poderá ser suprida apenas pela reciclagem (BALOMENOS, 2011). Um dos grandes desafios que enfrenta a indústria do alumínio é a queda no teor dos minérios, incluindo a bauxita (ARENARE, 2009; GRACE, 2026, SENYUTA et. al, 2013).

Devido a sua alta afinidade com o oxigênio, o alumínio não se encontra isolado na natureza, e a rocha bauxita é hoje o único minério de alumínio economicamente viável em escala industrial (FERREIRA, 2016, MASSOLA, 2008). Ela é composta principalmente por hidróxidos e oxi-hidróxidos de alumínio (gibbsita, boehmita, diásporo) e por impurezas como óxidos de ferro (hematita, goethita), sílicas (caulinita, quartzo) e óxidos de titânio (rutilo, anatásio) (AUTHIER-MARTIN et. al, 2001, FERREIRA, 2016). Em zonas tropicais (como o Brasil), predominam depósitos gibbsíticos (SILVA, 2011). Atualmente, o beneficiamento da bauxita restringe-se à britagem, peneiramento e classificação (ARENARE, 2009).

A produção industrial de alumínio combina dois processos (AUTHIER-MARTIN et. al, 2001, BALOMENOS, et. al, 2011; MASSOLA, 2008, SILVA, 2011): o processo Bayer (PB), que digere a bauxita em soda cáustica para extrair a alumina disponível ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Av}$), gerando como rejeito a lama vermelha (LV), que concentra as impurezas, sendo a caulinita a mais prejudicial em depósitos gibbsíticos, por consumir soda e Al-D, o que leva a indústria a adotar a razão mínima de 10:1 entre $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Av}$ e sílica reativa ($\text{SiO}_2\text{-R}$); e o processo Hall-Héroult, que isola o alumínio metálico por eletrólise ígnea. O PB gera grande volume de LV (razão próxima de 1:1 com a alumina), com riscos ambientais associados às bacias de rejeito, além de alto consumo energético (BALOMENOS, 2011).

2. OBJETIVOS

Avaliar duas rotas de separação magnética – a seco (ímã permanente de terras raras) e a úmido (Boxmag Rapid) – como processo alternativo de beneficiamento de bauxita, visando o aumento da alumina disponível e a redução da sílica reativa no produto final.

3. METODOLOGIA

No presente estudos foram utilizadas duas amostras: A1- Amostra de alimentação do processo, proveniente do estado do Pará, e F1- Amostra de frente de lavra, proveniente de Minas Gerais.

Na Tabela 1 se apresenta um resumo das principais variáveis operacionais dos equipamentos de separação magnética utilizados nos experimentos do presente estudo.

Tabela 1: Parâmetros de operação dos separadores magnéticos.

Parâmetro	Boxmag Rapid Alta intensidade	Correia e ímã Ímã de terras raras
Alimentação (umidade)	30% sólidos	Partículas secas
Faixas de tamanhos (mm)	-1,18 +0,038 / -0,038	-4,75 +1,18 / -1,18 +0,038
Campo magnético (Gauss)	13335	5260
Amperagem (A) / Voltagem (V)	19 / 140	-
Velocidade da correia	-	105 (10 Hz)
Matriz (mm / mm)	2 / 4 e 1,5 / 3	-
Produto magnético	Retido na matriz	Misto + magnético

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a distribuição do teor dos minerais obtidos por DRX, sendo os difratogramas refinados pelo método de Rietveld.

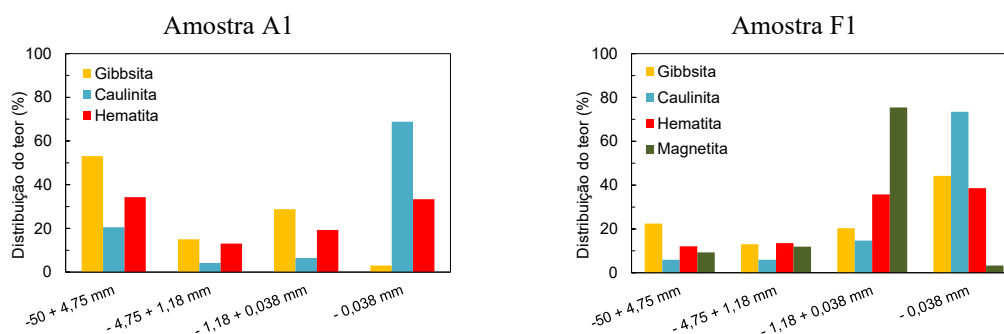


Figura 1: Distribuição do teor dos minerais obtidos por DRX, de A1 e F1.

Os resultados mostram que para a A1, a caulinita se encontra concentrada na faixa -0,038 mm, a gibbsita se encontra preferencialmente na faixa -50 +4,75 mm, e a hematita se concentra nas faixas -50 +4,75 mm e -0,038 mm. Para F1 a caulinita e a gibssita se encontram concentradas na faixa -0,038 mm, a hematita se concentra nas faixas -1,18 mm e existe uma concentração importante de magnetita na faixa de -1,18 +0,038 mm.

A Figura 2 apresenta a distribuição do teor dos elementos Al_2O_3 , e SiO_2 , obtidos por FRX, junto com os valores de Al_2O_3 -Av e SiO_2 -R.

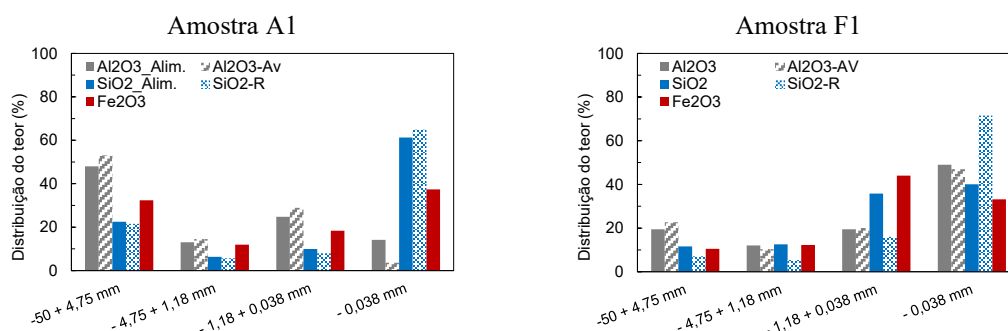


Figura 2: Distribuição do teor dos minerais obtidos por FRX, de A1 e F1.

Confirmando as análises de DRX, a distribuição do teor de A1 mostra maior concentração de SiO_2 e SiO_2 -R na faixa -0,038 mm, AlO_3 e Al_2O_3 -R na faixa de -50 +4,75 mm e Fe_2O_3 nas faixas -50 +4,75 mm e -0,038 mm. Para a amostra F1 se tem maior concentração de SiO_2 e SiO_2 -R na faixa -0,038 mm, AlO_3 e Al_2O_3 -R na faixa de -0,038 mm e Fe_2O_3 na faixa -1,18 mm.

A Figura 3 apresenta a recuperação mássica dos produtos magnético e não magnético para cada faixa de tamanho e tipo de separador magnético. A amostra F1 apresenta maiores recuperações mássica de produto magnético, principalmente pelo alto teor de minerais magnéticos com presença de Fe_2O_3 (hematita e magnetita), entretanto a amostra A1 tem uma concentração menor minerais magnéticos.

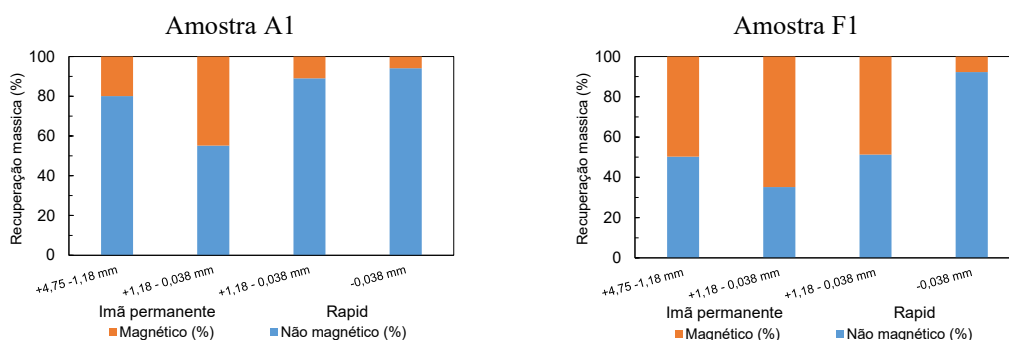


Figura 3: Recuperação mássica dos produtos magnético e não magnético para cada faixa de tamanho e tipo de separador magnético, de A1 e F1.

A Figura 4 apresenta a recuperação metalúrgica de Al_2O_3 , SiO_2 , e Fe_2O_3 no produto magnético para cada faixa de tamanho e tipo de separador magnético.

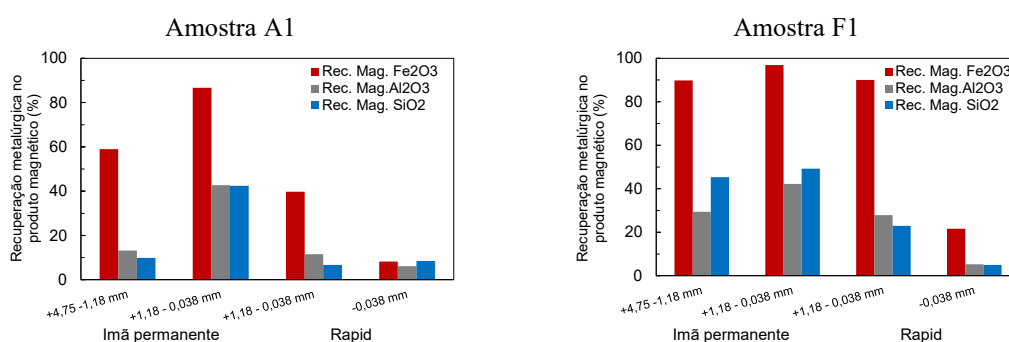


Figura 4: Recuperação metalúrgica de Al_2O_3 , SiO_2 , e Fe_2O_3 no produto magnético para cada faixa de tamanho e tipo de separador magnético, de A1 e F1.

Os resultados de recuperação metalúrgica, para a amostra A1 apresentam recuperações superiores a 80% no imã permanente na faixa de -1,18 +0,038 mm. A amostra F1 apresenta recuperação de Fe_2O_3 superior a 80% para as faixas acima de -0,038 mm. Entretanto, para a granulometria -0,038mm, o separador Rapid se mostrou ineficiente, provavelmente devido à escolha da matriz de separação.

Finalmente as Figuras 5 e 6 apresentam os valores inicial (alimentação) e final (produto não magnético) de teor de Al_2O_3 -Av e razão Al_2O_3 -Av/ SiO_2 -R.

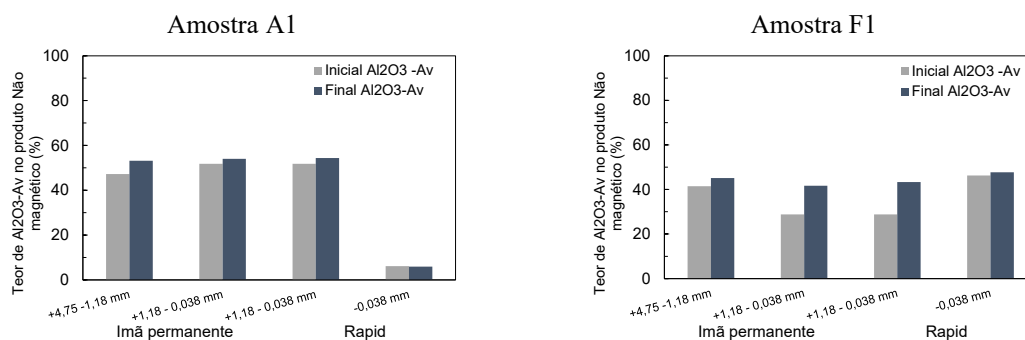


Figura 5: Valores inicial (alimentação) e final (produto não magnético) de teor de Al_2O_3 -Av, para as diferentes faixas de tamanho e tipos de separador, de A1 e F1.

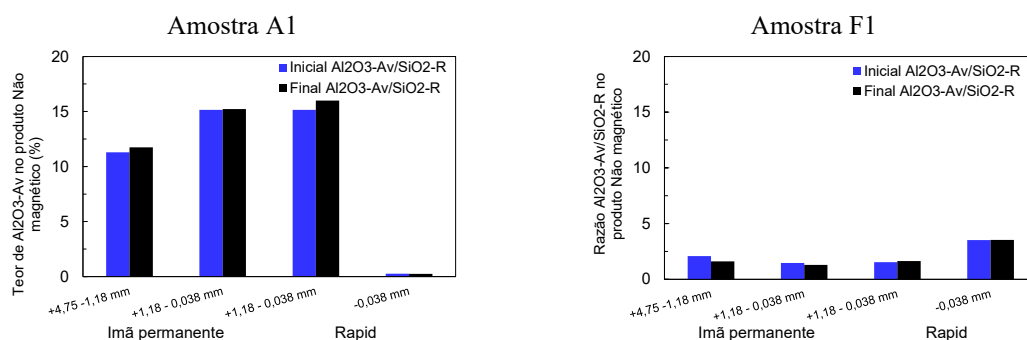


Figura 6: Valores inicial (alimentação) e final (produto não magnético) de Al₂O₃-Av/SiO₂-R, para as diferentes faixas de tamanho e tipos de separador, de A1 e F1.

Os resultados mostram que para a faixa +1,18 mm, existe um aumento do teor de Al₂O₃-Av entre 2,2 e 5,9 % para a A1, e de 3,6 e 14,4 % para a F1. Para a faixa -0,038 mm não tem aumento significativo de Al₂O₃-Av (menor a 1%) para ambas as amostras. Respeito à razão Al₂O₃-Av/SiO₂-R, os resultados mostram variações pequenas ($\pm 1\%$) para ambas as amostras, faixas de tamanho e tipos de separador magnético.

5. CONCLUSÕES

Para a faixa 1,18 x 0,038 mm, a rota a úmido apresentou desempenho superior à rota a seco, tanto na recuperação mássica quanto na metalúrgica, convergindo com os resultados de RIBEIRO e MELLO (2002), mostrando viabilidade econômica. Ambas as rotas se mostraram eficientes quanto à recuperação de Fe₂O₃ no concentrado magnético, embora o aumento de Al₂O₃ e a redução de SiO₂ no concentrado não-magnético tenham ficado abaixo do esperado.

Para a faixa -0,038 mm, a separação magnética a úmido mostrou-se ineficiente, com pouca recuperação mássica de concentrado magnético, divergindo de ARENARE (2009), indicando viabilidade técnica até 0,020 mm. Isso sugere uma inadequação das matrizes utilizadas e da preparação da polpa.

Na faixa de -4,75+1,18 mm, a rota a seco apresentou boa recuperação metalúrgica de Fe₂O₃ no concentrado magnético, mas com recuperação de Al₂O₃ baixa no concentrado não-magnético (indicando perdas de SiO₂ para o concentrado magnético).

Como pesquisas futuras se sugere: a ativação mecanoquímica associada à separação magnética; estudo da migração da caulinita ao concentrado magnético (LEONARDI, et. al, 2010); forte alcalinização do meio (baseado em relato de ZHOU (2023)), tanto para a polpa da separação magnética a úmido, quanto para a digestão Bayer; tratamento ácido (PRADO, 2012, ZHOU (2023)).

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à empresa de beneficiamento de bauxita pela parceria no projeto, ao CNPq pelo apoio financeiro, ao CETEM e à UFRJ pela viabilização técnica deste trabalho, e ao LTM pelo empréstimo de equipamentos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARENARE, D.S. Caracterização de amostras de bauxita visando a aplicação de métodos de concentração gravítica. 2009. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (Brasil).

AUTHIER-MARTIN, M.; FORTÉ, G.; OSTAP, S.; SEE, J. The Mineralogy of Bauxite for Producing Smelter-Grade Alumina. JOM, v.53, n.12, p.36-40, 2001.

BALOMENOS, E.; PANIAS, D.; PASPALIARIS, I. Energy and Exergy Analysis of the Primary Aluminum Production Processes: A Review on Current and Future Sustainability. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v.32, n.2, p.69-89, 2011.

FERREIRA, A.P. Caracterização tecnológica do rejeito da planta de beneficiamento de bauxita em Juruti-Pará. 2016. Dissertação (Mestrado) - Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação Tecnológica, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém (Brasil).

GRACE, W. Critical minerals and the energy transition. *Energy Strategy Reviews*, v.63, art.102039, 2026.

JOWITT, S.M.; MCNULTY, B.A. Battery and Energy Metals: Future Drivers of the Minerals Industry? *SEG Discovery*, n.127, p.11-16, 2021.

LEONARDI, F.A.; LADEIRA, F.S.B.; SANTOS, M. Perfis Bauxíticos do Planalto de Poços de Caldas SP/MG - Análise Geoquímica e Posição na Paisagem. *Revista de Geografia (Recife)*, n.especial 1, p.45-58, 2010.

MASSOLA, C.P. Flotação reversa da bauxita de Mirai, MG. 2008. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo (Brasil).

PRADO, C.M.R. et al. Estudo da ativação ácida e tratamento térmico de bauxita extraída de jazidas em Minas Gerais, Brasil. *Cerâmica*, v.58, n.345, p.111-117, 2012.

RIBEIRO, F.S.; MELLO, P.S.G. Aplicação de separação magnética para concentração de finos de bauxita. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 19, 2002, Recife. Anais... Recife: UFPE/MRN, 2002. p.1-6.

SENYUTA, A.; PANOV, A.; SUSS, A.; LAYNER, Y. Innovative Technology for Alumina Production from Low-Grade Raw Materials. In: LIGHT METALS, 2013, Warrendale. Proceedings of... Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 2013. p.23-28.

SILVA, F.A.N.G. Caracterização estrutural e estudo de reatividade de bauxita com alto teor de sílica reativa. 2011. Tese (Doutorado) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (Brasil).

ZHOU, G.T. et al. Toward sustainable green alumina production: A critical review on process discharge reduction from gibbsitic bauxite and large-scale applications of red mud. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v.11, n.2, p.109433, 2023.