cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Avaliação do potencial de recuperação de ferro em rejeitos de mineração por separação magnética

Paulo Henrique Santana França[1]; Luís Felipe Rodrigues Costa[2]; Sávio Eduardo Oliveira Miranda[1]; Bárbara Gonçalves Rocha[1]; Leila Moreira Bittencourt Rigueira[1]; Patrícia Xavier Baliza[1]; Rogério Alves Santana[3]; Alisson Mendes Rodrigues[1]; José Antonio Huamaní Coaquira[4]; Edivaldo dos Santos Filho[5]; Nelson de Abreu Delvaux Júnior[2]; Ricardo Alves da Silva[1]; Luciano Pereira Rodrigues[1]*

[1]Instituto de Engenharia, Ciência e Tecnologia, UFVJM, Janaúba-MG; [2]Depto. de Ciências Agrárias, UNIMONTES, Janaúba-MG; [3]Fac. de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas, UFVJM, Teófilo Otoni-MG; [4]Instituto de Física, UnB, Brasília-DF; [5]Instituto de Ciência e Tecnologia, UFVJM, Diamantina-MG
* Autor correspondente: luciano.rodrigues@ufvjm.edu.br

Introdução

- O Brasil detém cerca de 13% das reservas mundiais de minério de ferro. Em Minas Gerais, o teor médio (cerca de 40% de Fe) é menor que no Pará (acima de 65%), o que exige mais beneficiamento e gera maior volume de rejeito, cujos riscos ficaram evidentes nos rompimentos de barragens de 2015 e 2019 (cerca de 300 mortes) [1,2].
- Lacuna: poucos estudos integram caracterização avançada e viabilidade econômica para rejeitos do Quadrilátero Ferrífero [1].

JÁ ESTÁ ACONTECENDO NA INDÚSTRIA: a Vale reaproveita rejeitos das barragens de Itabira (MG), com cerca de 37% de Fe, em seu programa de mineração circular. Em 2025, produziu mais de 20 milhões de toneladas de minério de ferro a partir de rejeitos e estéril [3,4].

Vídeo: rejeitos da Vale em Itabira

Objetivos

Avaliar a recuperação de Fe em rejeito do Quadrilátero Ferrífero (Mariana, MG) por separação magnética.

- Caracterizar a morfologia, a composição química e as fases minerais do rejeito;
- Quantificar o teor de ferro nas frações obtidas;
- Comparar o custo-benefício da abertura de uma mina do zero com o reaproveitamento do rejeito.

Metodologia

- Rejeito de Mariana (MG), seco a 100 °C por 24 h; alíquota de 10 g.
- Separação com ímã de neodímio (4200 G) em 7 ciclos de 3 min, gerando: Amostra 1 (Am. 1), rejeito bruto; Amostra 2 (Am. 2), fração não magnética; e Amostra 3 (Am. 3), fração magnética.



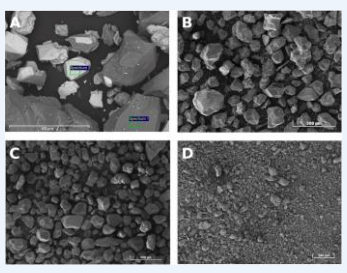
Rota seca
MEV/EDS: Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia de Energia Dispersiva;
FRX: Fluorescência de Raios X;
DRX: Difração de Raios X;
Mössbauer: Espectroscopia Mössbauer.

Rota úmida
Após digestão em água régia:
AG: Análise Gravimétrica;
UV-Vis: Espectrofotometria UV-Vis;
EAA: Espectroscopia de Absorção Atômica.

Figura 1. Amostras após sete ciclos de separação magnética (esquerda) e técnicas das rotas seca e úmida (direita). Adaptado de França et al. (2026).

Resultados e Discussão

Composição (% atômica) MEV/EDS



	Fe	Si
Am. 1	7,79	47,07
Am. 2	3,19	46,70
Am. 3	**44,92**	23,11

% atômica dos elementos (EDS)

Razão Fe/Si de 0,17 (Am. 1) para 1,94 (Am. 3): enriquecimento de Fe de 5,77 vezes. Grãos claros são ricos em Fe; cinza, em Si.

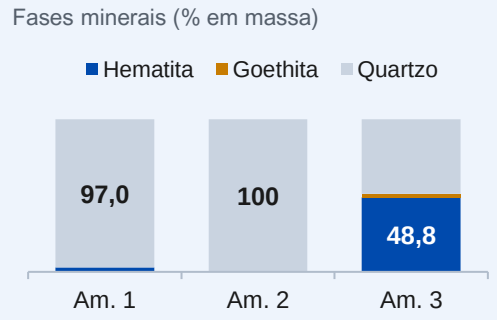
Composição química (%) FRX

Óxido	Am. 1	Am. 2	Am. 3
SiO_2	73,60	**90,86**	7,71
Fe_2O_3	25,12	8,09	**91,13**
Al_2O_3	1,08	0,82	0,86

Concentrado **91,13% Fe_2O_3** | Subproduto **90,86% SiO_2**

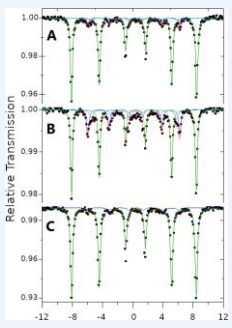
Uma única separação gera dois produtos comercializáveis.

Fases minerais (DRX)



Quartzo predomina nas Am. 1 (97%) e Am. 2 (100%); a Am. 3 concentra hematita (48,8%) e goethita (2,4%).

Mössbauer (^{57}Fe)

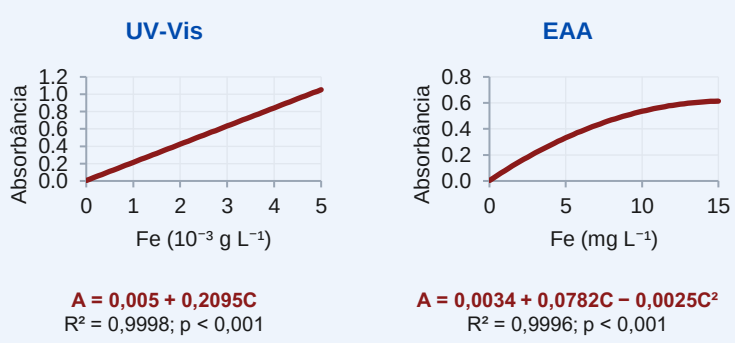


93%

de hematita na fração magnética; todo o Fe como Fe^{3+}

Hematita predomina em todas as frações: Am. 1 (89%), Am. 2 (67%) e Am. 3 (93%).

Teor de ferro: curvas analíticas



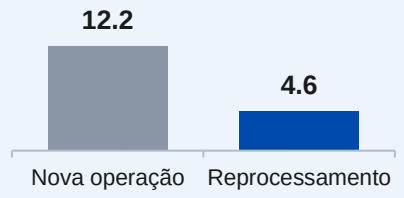
A = 0,005 + 0,2095C
R^2 = 0,9998; p < 0,001

A = 0,0034 + 0,0782C − 0,0025C²
R^2 = 0,9996; p < 0,001

Teor de Fe (AG): 17,82% (Am. 1) → 56,64% (Am. 3); UV-Vis (51,53%) e EAA (44,50%) confirmam o enriquecimento.

Custo-benefício

Investimento para produzir **1 Mt/ano** (US$ milhões)



Para a mesma capacidade, o investimento é mais de 2,5 vezes menor (estimativa preliminar).

Conclusões

- A separação magnética gerou concentrado com 91,13% de Fe_2O_3 (56,64% de Fe) e subproduto com 90,86% de SiO_2.
- Para a mesma capacidade (1 Mt/ano), o reprocessamento exige investimento mais de 2,5 vezes menor que uma nova operação (estimativa preliminar).
- Próximos passos: otimizar frações de baixa cristalinidade, medir P e S e testar em escala piloto.

Artigo completo (acesso aberto)

Referências e Agradecimentos

[1] FRANÇA, P. H. S. et al. Evaluation of the potential for iron recovery in mining tailings by magnetic separation. Results in Engineering, v. 29, 109273, 2026. DOI: 10.1016/j.rineng.2026.109273.

[2] IBRAM. Data and analysis of the Brazilian mineral industry 2024. Brasília: IBRAM, 2024. Disponível em: https://www.ibram.org.br. Acesso em: 28 jun. 2025.

[3] VILA DE UTOPIA. Vale responde dúvidas sobre impactos ambientais com movimentação de rejeitos no Pontal e Codema aprova anuência. Itabira, 13 mar. 2026. Disponível em: https://viladeutopia.com.br/vale-responde-duvidas-sobre-impactos-ambientais-com-movimentacao-de-rejeitos-no-pontal-e-codema-aprova-anuencia/. Acesso em: 12 nov. 2026.

[4] TRADEMAP. Vale (VALE3) mira ouro e terras raras em rejeitos de mineração. Disponível em: https://trademap.com.br/noticias/news-8236360. Acesso em: 12 nov. 2026.

Agradecimentos: CNPq, CAPES, FAPEMIG, UFVJM/CICT, LMMA/UFVJM, UFCG (MEV/EDS e FRX) e UFMG (EAA).