

ESTUDO DO USO DE FLOTAÇÃO EM COLUNA PARA PROCESSAMENTO DE LAMAS DE MINÉRIO DE FERRO

STUDY ON THE USE OF COLUMN FLOTATION FOR PROCESSING IRON ORE TAILINGS SLURRY

Eloisa Maria Fonseca Pereira

Aluna de Graduação de Engenharia de Minas, 10º período

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Estágio: abril de 2025 a outubro de 2025

eloisafonseca80@gmail.com

Elves Matiolo

Orientador, Engenheiro de Minas, D.Sc.

ematiolo@cetem.gov.br

Gabriel Dutra de Oliveira

Coorientador, Químico Industrial.

gabrieldutr.o@gmail.com

RESUMO

A mineração de ferro gera grandes volumes de rejeitos finos e ultrafinos, cuja disposição representa desafios ambientais e operacionais. Este estudo avaliou a viabilidade da flotação em coluna para o reaproveitamento de lamas de minério de ferro, com amostras do Quadrilátero Ferrífero. Foram analisados os tipos e dosagens de reagentes, a porcentagem de sólidos e velocidades superficiais do ar (J_g) e da água (J_w). Na flotação em bancada, a melhor condição foi obtida com 300 g/t do coletor Flotinor 16939 a pH 10,5, alcançando 76,4% de recuperação e 56,2% de teor de ferro. Na flotação em coluna, utilizando os parâmetros otimizados da bancada, obteve-se 96% de recuperação e 54,8% de teor de ferro, com J_g de 1,5 cm/s e J_w de 0,1 cm/s. A variação na porcentagem de sólidos não afetou significativamente o desempenho. Os resultados indicam que a flotação em coluna é a alternativa mais eficiente e viável para o reaproveitamento de rejeitos ultrafinos de minério de ferro, quando comparada à flotação em bancada.

Palavras chave: Flotação em coluna; rejeitos ultrafinos; quadrilátero ferrífero.

ABSTRACT

Iron ore mining generates large volumes of fine and ultrafine tailings, whose disposal poses significant environmental and operational challenges. This study evaluated the feasibility of column flotation for the recovery of iron ore slimes, using samples from the Quadrilátero Ferrífero region. The effects of reagent types and dosages, solids percentage, and superficial air (J_g) and water (J_w) velocities were investigated. In bench-scale flotation, the best condition was achieved with 300 g/t of the collector Flotinor 16939 at pH 10.5, resulting in 76.4% recovery and 56.2% iron grade. In column flotation, using the optimized bench parameters, 96% recovery and 54.8% iron grade were obtained, with J_g of 1.5 cm/s and J_w of 0.1 cm/s. Variations in solids content did not significantly affect performance. The results indicate that column flotation is a more efficient and viable alternative for the recovery of ultrafine iron ore tailings compared to bench flotation.

Keywords: Column flotation; ultrafine tailings; quadrilátero ferrífero;

1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade essencial para o desenvolvimento econômico global, sendo o minério de ferro um dos recursos mais utilizados, principalmente na produção de aço. No Brasil, o setor mineral ocupa posição estratégica, tanto em termos de produção quanto de exportação, com grande relevância socioeconômica (SANTOS, 2021). De acordo Segundo a ANM (2024), em 2023 o Brasil exportou US\$ 43,3 bilhões em produtos de ferro, sendo o minério de ferro responsável por 89,2% desse total. A produção nacional foi de 436,8 milhões de toneladas, concentrada em Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul. Os principais destinos foram China, EUA, Argentina e Malásia, reforçando a importância do setor no comércio exterior brasileiro.

Entretanto, o processamento de minérios de baixo teor gera volumes expressivos de rejeitos. O descarte desses materiais em barragens, ainda comum na indústria mineral brasileira, apresenta sérios riscos ambientais e sociais, como mostram os rompimentos ocorridos em Mariana e Brumadinho. Apesar do baixo custo, esse método pode causar contaminação do solo e da água, desmatamento e outros impactos significativos (CARVALHAIS, 2018).

A flotação em coluna surge como alternativa promissora para o reaproveitamento de partículas finas de ferro presentes nos rejeitos. Esse processo difere da flotação convencional por não utilizar agitação mecânica e incluir água de lavagem em contracorrente na parte superior da coluna, promovendo uma separação mais eficiente e seletiva dos minerais de interesse (ROCHA et al., 2009). De acordo com Somasundaran (1980), as partículas presentes nas lamas podem ser classificadas em finos (10 µm a 100 µm), ultrafinos (1 µm a 10 µm) e coloides (menores que 1 µm), sendo estas últimas caracterizadas por sua sedimentação extremamente lenta.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como foco o aproveitamento da lama de minério de ferro proveniente do Quadrilátero Ferrífero por meio da flotação em coluna. Foram avaliados parâmetros operacionais como tipo e dosagem de reagentes, porcentagem de sólidos e velocidades superficiais de ar e água. O objetivo é obter uma recuperação eficiente de ferro, promovendo uma solução sustentável para o setor mineral.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é otimizar a flotação em coluna para reaproveitar a lama de minério de ferro, analisando parâmetros operacionais além de comparar os resultados da flotação em bancada e em coluna, avaliando a qualidade do concentrado.

3. METODOLOGIA

3.1. Preparação da Amostra

A amostra de lama de minério de ferro, oriunda do Quadrilátero Ferrífero, foi recebida em forma de polpa com 50% de sólidos, sendo diluída a 28% sólidos para flotação. Sua caracterização incluiu difração a laser para análise granulométrica, picnometria a gás hélio para determinação da densidade e FRX para quantificação dos principais óxidos.

3.2. Ensaios de Flotação – Escala de Bancada

Inicialmente, foram realizados ensaios em bancada como testes exploratórios, com o objetivo de avaliar as condições mais promissoras para os testes em coluna. Com isso, foram testados quatro coletores da Clariant (Flotinor 16939, Flotinor 5530, CADM 22-381 e CADM 22-382) e hidróxido de sódio (NaOH) como regulador de pH, em células mecânicas modelo D12 (Denver), com volumes de 3 e 5 L, nas etapas rougher e flotação reversa. Avaliaram-se dosagens de coletor (150–450 g/t), pH (9,0; 10,0 e 10,5) e porcentagem de sólidos (35% no condicionamento e 27% na flotação), com vazão de ar de 9,0 L/min e rotação de 1050 RPM. Realizaram-se 15 testes: os 12 primeiros com Flotinor 16939, variando dosagem e pH; os três finais (13-15), com pH 10,5 e 300 g/t fixos, para comparar os coletores.

3.3. Ensaios de Flotação em Coluna – Escala Mini Planta Piloto

Os ensaios de flotação em coluna foram realizados em colunas de 3" (*rougher*) e 2" (*scavenger*), com 2 m de altura. A polpa foi previamente condicionada em três células mecânicas, com pH 10,5, 300 g/t de Flotinor 16939 e taxa de alimentação de 10 kg/h. Na etapa *rougher*, a velocidade superficial do ar (J_g) variou de 0,9 a 1,5 cm/s e da água (J_w) de 0,1 a 0,2 cm/s; no *scavenger*, mantiveram-se constantes em 0,6 cm/s (ar) e 0,1 cm/s (água). A alimentação teve 15% a 20% de sólidos, com camada de espuma de 28 cm e tempo de residência de 5 minutos por etapa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização da Amostra

A amostra de alimentação apresentou 47,8% de ferro como principal constituinte (Tabela 1) com densidade de 3,77 g/cm³. A distribuição granulométrica indicou P_{80} de 33 µm, com 50% das partículas abaixo de 10 µm.

Tabela 1. Composição química da amostra alimentação da flotação.

| Fe (%) | SiO ₂ (%) | P (%) | Al ₂ O ₃ (%) | MnO (%) |
|--------|----------------------|-------|------------------------------------|---------|
| 47,8 | 17 | 0,1 | 5,7 | 0,1 |

4.2. Ensaios de Flotação – Escala de Bancada

A Figura 1 mostra que dosagem de 300 g/t do Flotinor 16939, em pH 10,5, apresentou os melhores resultados globais entre as condições testadas, com teor de ferro de 54,7% e recuperação metalúrgica de 67,1%. Os resultados indicaram que o teor de ferro aumentou com a elevação do pH, variando de aproximadamente 44,2% a 46,2% no pH 9; de 46,6% a 51,6% no pH 10; e de 50,4% a 54,7% no pH 10,5. Em contrapartida, a recuperação apresentou tendência oposta, diminuindo com o aumento do pH: de cerca de 66,8% a 56,1% no pH 9; 63,4% a 54,0% no pH 10; e 61,6% a 50,4% no pH 10,5. Assim, verifica-se um comportamento inversamente proporcional entre teor e recuperação. Nesse contexto, a dosagem de 300 g/t se destaca por promover um bom equilíbrio entre ambos os parâmetros, diferentemente de outras dosagens que resultaram em alto teor com baixa recuperação ou, inversamente, alta recuperação com teor mais baixo no concentrado.

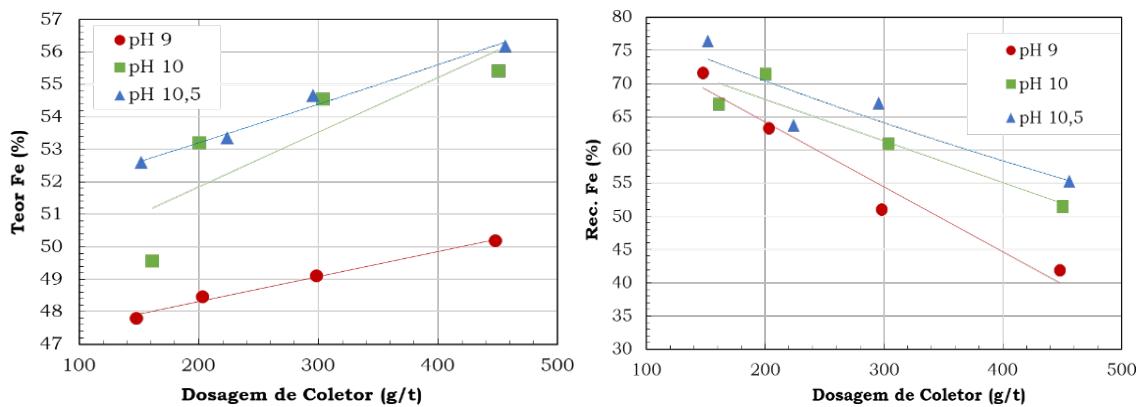


Figura 1: Efeito da dosagem do Flotinor 16939.

O coletor CADM 22-382 apresentou os melhores resultados, com recuperação de cerca de 74% e teor de ferro acima de 55%, conforme comparado entre os coletores na Figura 2. Ainda assim, os testes subsequentes foram conduzidos com o Flotinor 16939, em atendimento às diretrizes técnicas previamente estabelecidas pela empresa.

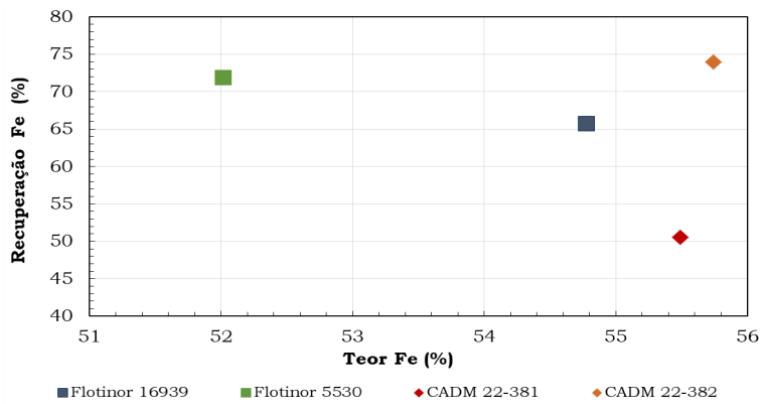


Figura 2: Curva teor versus recuperação de Fe em função do coletor.

4.3. Ensaios de Flotação em Coluna – Escala Mini Planta Piloto

A análise dos resultados apresentado nas Figuras 3 e 4 indica que o melhor desempenho da flotação em coluna foi alcançado com velocidade superficial do ar (J_g) de 1,5cm/s e da água (J_w) de 0,1 cm/s, resultando em teor de ferro de 54,8% e recuperação metalúrgica de 96%.

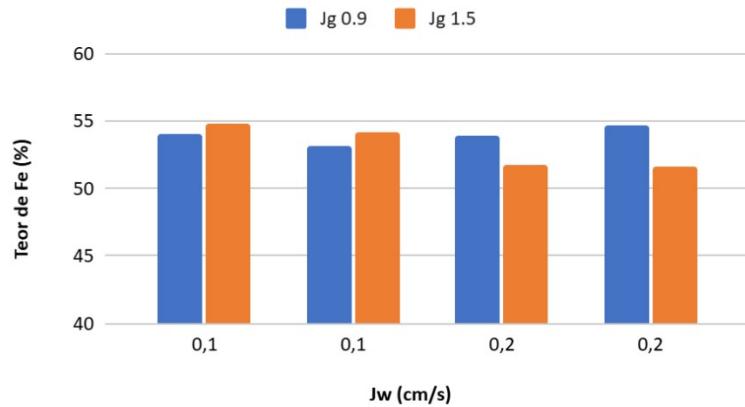


Figura 3: Teor de Fe em função das variáveis J_g e J_w .

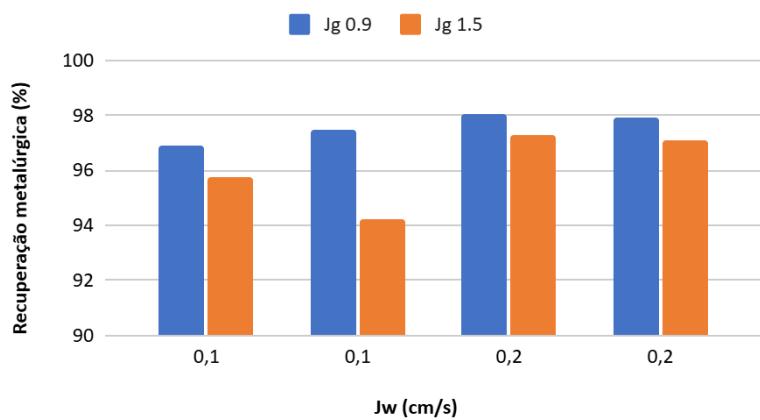


Figura 4: Recuperação metalúrgica em função das variáveis J_g e J_w .

A Figura 5 mostra que a flotação em coluna apresentou desempenho superior à bancada, com recuperações acima de 94% e teores de ferro entre 51,5% e 55%. Já os testes em bancada apresentaram maior variação, com teores entre 46,5% e 51% e recuperações de 10% a 36%. Esses resultados destacam a maior eficiência da flotação em coluna nas condições estudadas.

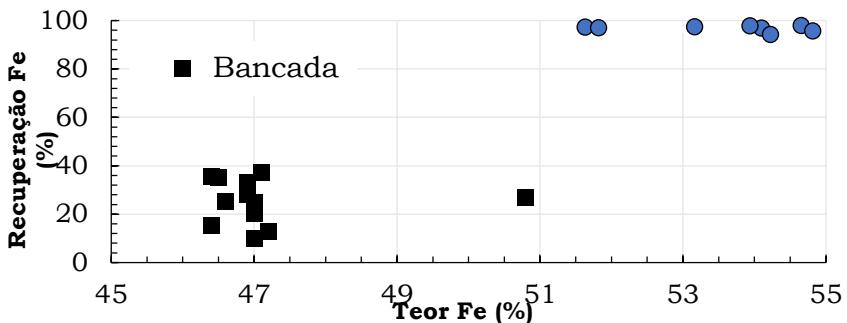


Figura 5: Curva de teor de ferro versus recuperação para os ensaios em célula e coluna.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou a viabilidade técnica da flotação em coluna na concentração de lama de minério de ferro, utilizando parâmetros otimizados a partir de ensaios preliminares em bancada. A seleção do coletor Flotinor 16939, na dosagem de 300 g/t e pH 10,5, mostrou-se eficaz, servindo de base para os testes em coluna. Os resultados em escala piloto evidenciaram desempenho superior, com recuperação metalúrgica acima de 94% e teores de ferro no concentrado entre 51,6% e 55,2%, mesmo sob variações operacionais. As melhores condições foram observadas com maior fluxo de ar (1,5 cm/s) e menor fluxo de água de lavagem (0,1 cm/s), enquanto a variação da porcentagem de sólidos não influenciou significativamente o processo. A comparação entre os métodos destacou a maior estabilidade e eficiência da flotação em coluna, consolidando sua aplicação como uma solução técnica eficaz e sustentável para o aproveitamento de rejeitos finos de minério de ferro.

6. AGRADECIMENTOS

Expresso minha eterna gratidão ao meu orientador, **Elves Matiolo**, pelo valioso conhecimento compartilhado, pela oportunidade de aprendizado e pelo constante incentivo ao meu crescimento acadêmico e profissional. Agradeço, também, a toda a equipe do **CETEM** pelo apoio técnico e pela infraestrutura disponibilizada, que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Sumário Mineral – Ferro 2024 (ano base 2023)**. Brasília: ANM, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2023>. Acesso em: 02 ago. 2025.

CARVALHAIS, A.L. **Avaliação da produção de rochas artificiais utilizando como carga mineral rejeito de minério de ferro**. 2018. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

ROCHA, L.; PERES, A.E.C. **Aproveitamento econômico das lamas de ferro**. REM – Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 62, n. 3, p. 291-295, set. 2009.

SANTOS, A.M.A. **Avaliação de reagentes na flotação direta de minério fosfático, utilizando planejamento fatorial completo**. 2021. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas., Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais Unidade Araxá, Araxá, 2021.

SOMASUNDARAN, P. (1980). **Principles of flocculation, dispersion and selective flocculation**. Em P. SOMASUNDARAN, Fine particles processing. Vol. II (pp. 947-976). New York.