

# ESTUDOS DE CONCENTRAÇÃO POR FLOTAÇÃO COM INJEÇÃO DE MBs DE FAD EM AMOSTRA DE LAMA DE MINÉRIO FERRO

## CONCENTRATION STUDIES BY FLOTATION WITH INJECTION OF DAF MBS IN IRON ORE SLIME SAMPLE

**Rahija Lopes Silva Gomes Garcia**

Aluna de Graduação em Processos Químicos, 6º período,  
Instituto Federal de Educação, Ciência, e Tecnologia do Rio de Janeiro  
Período PIBITI/CETEM: agosto de 2023 a julho de 2024  
rahijalsgomes@gmail.com

**Amanda Soares de Freitas**

Orientador, Engenheira de Minas, D.Sc.  
ematiolo@cetem.gov.br

**Elves Matiolo**

Orientador, Engenheiro de Minas, D.Sc.  
ematiolo@cetem.gov.br

### RESUMO

De forma geral, as lamas de minério de ferro são constituídas por partículas minerais finas e ultrafinas ("F-UF" < 45 µm). Dentre as alternativas para o aproveitamento destas partículas minerais está o aumento da distribuição do tamanho de bolhas proporcionando maior eficiência de colisão bolha-partícula na flotação, e a aplicação de novos reagentes do tipo amina, devido à complexidade mineralógica destas lamas. Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da injeção de microbolhas de flotação por ar dissolvido (MBs-FAD) em conjunto com as bolhas geradas nos sistemas convencionais, e a aplicação do coletor alternativo do tipo amida-amina (F5530), sobre o desempenho metalúrgico da flotação. Foram realizados ensaios de flotação em escala piloto com uma amostra de lama de minério de ferro, utilizando coluna de 4", circuito *rougher*, mantendo dosagem média de 380 g/t de F5530, em pH 10,5, sem adição de depressor. Foi alcançado concentrado com 59% de teor de Fe, 8% de SiO<sub>2</sub> e 3% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e recuperação de 66%, a partir de uma amostra com 22% de Fe e 65% de SiO<sub>2</sub>. Os ensaios com a injeção de MBs-FAD atuando como água de diluição não apresentaram diferença em termos de teor e recuperação de Fe, comparado aos ensaios sem a injeção de MBs-FAD.

**Palavras-chave:** flotação; lama; ferro; microbolhas de FAD; amida-amina; coluna.

### ABSTRACT

In general, iron ore slimes are composed of fine and ultrafine mineral particles ("F-UF" < 45 µm). Among the alternatives for the use of these mineral particles is the increase of the bubble size distribution, providing greater bubble-particle collision efficiency during flotation, and the application of new type amine reagents, due to the mineralogical complexity of these slimes. This work aims to evaluate the effect of the injection of dissolved air flotation microbubbles (DAF- MBs) together with the bubbles generated in conventional systems, and the application of the alternative amide-amine collector (F5530), on the performance flotation metallurgy. Flotation tests were carried out on a pilot scale with a sample of iron ore slime, using a 4" column, rougher circuit, maintaining an average dosage of 380 g/t of F5530, at pH 10.5, without adding depressant. A concentrate with 59% Fe content, 8% SiO<sub>2</sub> and 3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and recovery of 66% was achieved, from a sample with 22% Fe and 65% SiO<sub>2</sub>. The tests with the injection of DAF-MBs acting as dilution water showed no difference in terms of Fe content and recovery, compared to the tests without the injection of DAF-MBs.

**Keywords:** flotation; slime; iron; DAF microbubbles; amide-amine; column.

## 1. INTRODUÇÃO

As lamas de minério de ferro são compostas, principalmente, por óxidos e hidróxidos de ferro, hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e goethita ( $\text{FeOOH}$ ), e minerais silicatados sendo eles quartzo, caulinita e gibbsita. Estas são constituídas por partículas minerais finas e ultrafinas (“F-UF”  $< 45 \mu\text{m}$ ) normalmente descartadas tanto no overflow da deslamagem, etapa precedente à flotação, quanto provenientes do fluxo que representa o rejeito de uma operação unitária de concentração, como a separação magnética (HAGEMANN et al., 2016)

A flotação catiônica com configuração reversa é frequentemente utilizada para concentrar minérios oxidados com baixo teor de ferro, assim como para tratar lamas originadas desses depósitos (FILIPPOV; SEVEROV; FILIPPOVA, 2014). Tradicionalmente, éter-aminas e éter-diaminas são aplicados como coletores de silicatos, enquanto o amido de milho gelatinizado é usado comodepressor dos minerais que possuem ferro. Atualmente estudos vêm sendo realizados sobre o uso de coletores catiônicos alternativos do tipo amida-amina, como as aminas estruturadas de forma diferente, com intuito de aumentar a biodegradabilidade e solubilidade devido ao aumento do número de grupos hidrofílicos, tornando-os ainda mais seletivos na separação dos minerais de Fee minerais de ganga (ARAUJO et al., 2020).

O tipo de reator mais utilizado na flotação de partículas F-UF é a coluna, que foi desenvolvida para maximizar a colisão partícula-bolha devido ao fluxo menos turbulento e minimizar o arraste de partículas hidrofílicas para a fração flotada, devido à utilização de uma camada de espuma mais profunda e água de lavagem na parte superior da célula (FINCH, 1995). Embora a técnica de flotação em coluna seja um dos métodos mais eficientes para concentrar partículas F-UF, algumas variações da prática convencional de flotação são necessárias para melhorar seu desempenho metalúrgico (YOON et. al., 1992).

A aplicação de técnicas/tecnologias em conjunto com o reator em coluna, como a injeção de microbolhas ( $\sim 70 \mu\text{m}$ ) associadas a bolhas convencionais ( $\sim 300\text{-}2000 \mu\text{m}$ ), já foram extensivamente estudadas em escala de bancada e indicam um aumento da eficiência da colisão partícula-bolha que, conseqüentemente leva a um aumento da eficiência da flotação. Desse modo, a flotação catiônica de configuração reversa, juntamente à injeção de MBs de FAD, combinada aos novos coletores do tipo amida-amina, representam uma proposta inovadora para otimizar a concentração de minerais de ferro (CALGAROTO et al., 2015).

## 2. OBJETIVO

Avaliar o desempenho metalúrgico, em termos de teor e recuperação de Fe,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , da concentração de uma amostra de lama de minério de ferro via flotação em coluna em escala piloto, através da injeção de MBs FAD e aplicação de um coletor alternativo do tipo amida-amina.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1. Preparação da amostra

A lama de minério de ferro, oriunda do Quadrilátero Ferrífero (MG), foi recebida em polpa a 78%*s*. Esta representa o fluxo de rejeito da separação magnética do *overflow* da deslamagem. Para caracterização tecnológica foram feitas as análises mineralógicas, via DRX (Refinamento *Rietveld*), químicas, através do método FRX e físicas, por difração laser.

### 3.2. Ensaios de flotação

Os estudos experimentais foram realizados na Planta Piloto, utilizando a coluna de 4” de diâmetro e 6 metros de altura, com borbulhador do tipo poroso, considerando circuito *rougher*, além detestes com a injeção de microbolhas de FAD em combinação às bolhas convencionais geradas naprópria coluna. Nos ensaios, o pH foi mantido fixo e a dosagem média do coletor 5530 foi de 384g/t (360 - 411 g/t). Foram avaliadas as variáveis de velocidade superficial do ar ( $J_{\text{ar}}$ ) de 0,4

,0,6, 0,8 e 1 (cm/s), água de lavagem ( $J_a$ ) de 0,1 a 0,2 cm/s e a vazão de diluição ( $Q_{dil.}$ ), variando entre 0,8, 1,0 e 2,0 L/min.

A injeção de MBs de FAD deu-se através de um sistema formado por um vaso saturador projetado para ensaios contínuos, com capacidade para 10 L/min, tipo leito de percolação de 70 cm com *Pall rings*. Este sistema também inclui um vaso de pressão de aço de carbono, manômetro de controle de pressão, válvula de segurança e de alívio do excesso de ar (PSV), além de sistema de depressurização do fluxo (válvula agulha de 1/4"). No vaso saturador, o ar comprimido foi injetado com pressão ( $P_{sat}$ ) de 4 kgf/cm<sup>2</sup>, controlada por um filtro-regulador (Bell air). Os ensaios com injeção de MBs-FAD seguiram o procedimento padrão e as microbolhas foram adicionadas através da injeção de água saturada diretamente na base do segundo tanque de condicionamento, juntamente com a polpa previamente condicionada com os reagentes, diluindo a polpa para alimentação da coluna de flotação.

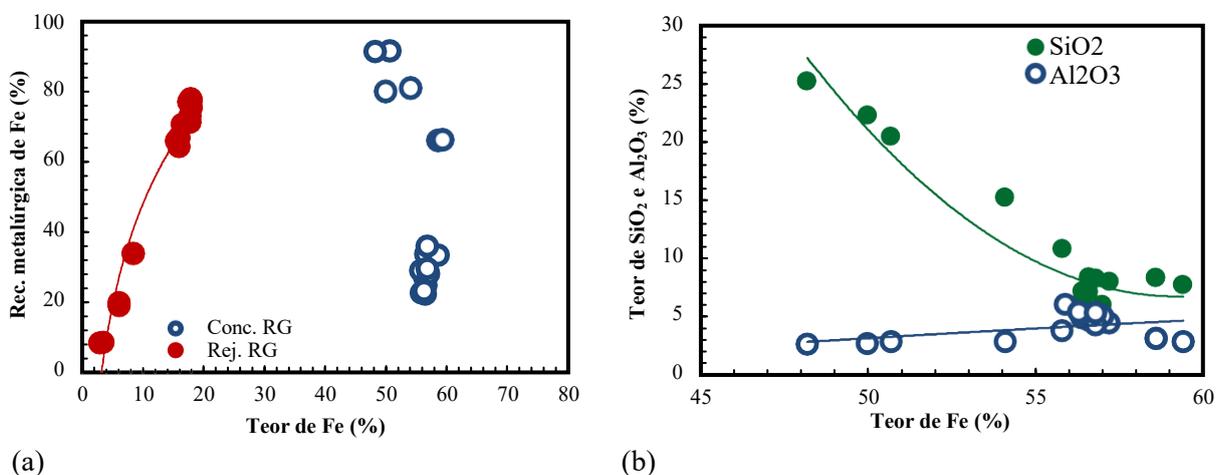
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Caracterização da Amostra

A análise mineralógica da amostra cabeça apresentou hematita (24,8%), quartzo (65,3%), caulinita (3,8%), goethita (2,6%), gibbsita (1,5%) e muscovita (1,9%). A análise química resultou em Fe (21,5%), e como impurezas SiO<sub>2</sub> (64,7%) e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2,6%). A análise granulométrica indicou as distribuições com diâmetros D32, D10, D50 e D90 de 12,2 µm, 7,7 µm, 27,5 µm e 90,9 µm, respectivamente.

### 4.2. Ensaios de Flotação

A Fig. 1a é a representação gráfica do teor em função da recuperação metalúrgica de ferro. Enquanto, a figura 1b demonstra a relação gráfica do teor de ferro e o teor de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que são as principais impurezas nas amostras.

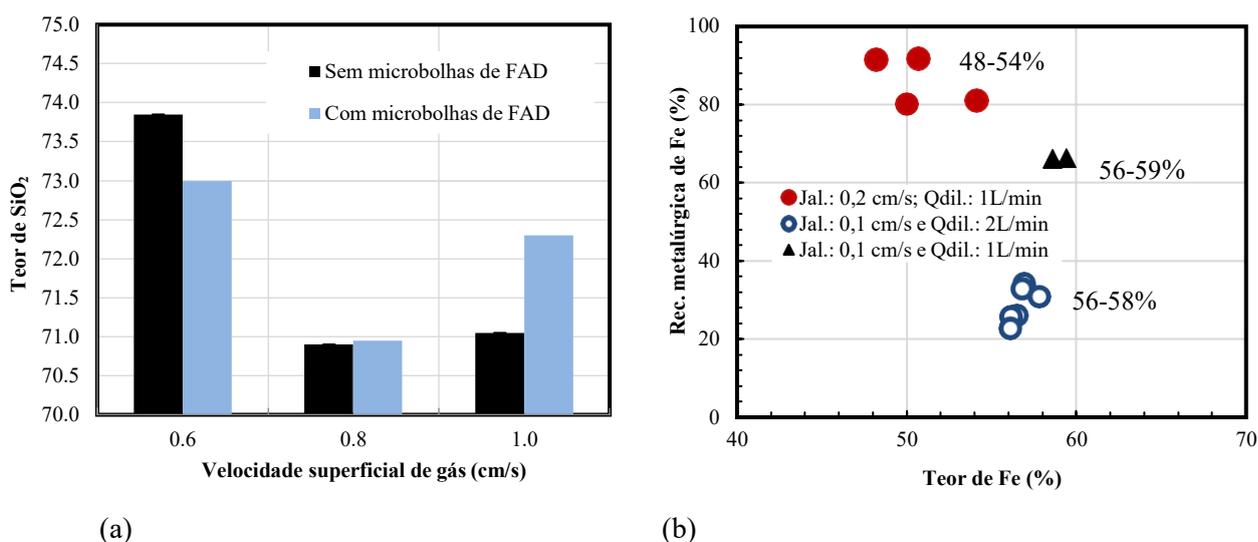


**Figura 1a:** Curva teor versus recuperação metalúrgica de Fe. **1b:** Correlação entre o teor de Fe e os teores das impurezas de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nos concentrados finais de flotação

De acordo com a Fig.1a, considerando que a alimentação apresenta 22% de Fe, aplicando dosagem do coletor entre 360 e 411 g/t, com média de 384 g/t e pH 10,5, com e sem injeção de MBs de FAD, foi obtido concentrados com o teor de Fe variando de 48% a 59%, com média de 55%, e a recuperação metalúrgica de 22 a 92%, com média de 45%. O rejeito apresentou teores de Fe de 3% a 18%, com média de 13%. No que se refere ao teor de Fe e às principais impurezas, percebe-se que o aumento do teor de Fe resulta na diminuição do teor de SiO<sub>2</sub> no concentrado,

enquanto para o teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , o enriquecimento não apresenta influência significativa, permanecendo constante.

A Fig. 2a apresenta o gráfico da variação de  $J_{\text{ar}}$  na flotação, entre os valores de 0,6; 0,8 e 1,0 cm/s, mantendo constante a  $J_{\text{al}}$  em 0,1 cm/s e a  $Q_{\text{dil}}$  em 2 L/min, realizando ensaios com e sem injeção de microbolhas de FAD. De forma geral, o aumento da  $J_{\text{ar}}$  resultou na redução de teores de  $\text{SiO}_2$  no flotado (rejeito). Enquanto para  $J_{\text{ar}}$  de 0,6 cm/s o teor de  $\text{SiO}_2$  foi entre 73-74%, os ensaios com  $J_{\text{ar}}$  de 0,8 cm/s, resultaram em teor de aproximadamente 71%. Nos testes com e sem injeção de microbolhas de FAD, verificou-se que os teores de  $\text{SiO}_2$  tiveram variações mínimas, não ultrapassando 1% de diferença entre eles. Com  $J_{\text{ar}}$  de 1 cm/s e injeção de microbolhas de FAD os teores foram 72% de  $\text{SiO}_2$  e sem injeção de microbolhas de 71%. Portanto, a aplicação de MBs de FAD como água de diluição não apresentou alterações consideráveis, levando a um teor de concentrado de Fe entre 56-58% e recuperação de 23-34%.



**Figura 2a:** Avaliação da velocidade superficial de ar e a injeção de MBs de FAD sobre o teor de  $\text{SiO}_2$  para o fluxo do flotado (rejeito) **2b:** Curva teor *versus* recuperação metalúrgica de Fe para os fluxos do concentrado

De acordo com a Fig.2b, a redução na  $Q_{\text{dil}}$  de 2 L/min para 1 L/min e aumento da  $J_{\text{al}}$  de 0,1 cm/s para 0,2 cm/s provocou a redução do teor de Fe no concentrado de 48-54% e recuperação ficou superior a 80%, além de levar a um aumento do tempo de residência de 26 min para 37 min e da %s (p/p) na polpa de alimentação saindo de 11% p/p, quando aplicado  $Q_{\text{dil}}$  de 2 L/min, para 14% p/p. O aumento na  $J_{\text{al}}$  indica que provavelmente houve arraste das partículas hidrofóbicas de  $\text{SiO}_2$  para o afundado (concentrado), por isso obteve-se maiores valores de teor, partindo de 7% para 15-25%, ocasionando a diluição do concentrado.

Devido ao melhor desempenho metalúrgico em termos de teor e recuperação de Fe e  $\text{SiO}_2$  no concentrado aplicando baixa  $J_{\text{al}}$ , foi avaliado para uma mesma  $J_{\text{ar}}$  de 0,6 cm/s e  $J_{\text{al}}$  de 0,1 cm/s, a aplicação de  $Q_{\text{dil}}$  de 1 L/min. Com isso, utilizando baixa vazão de água de lavagem e velocidade superficial do ar, associado a  $Q_{\text{dil}}$  de 1 L/min, foram atingidos os melhores resultados metalúrgicos chegando a teores de 59% de Fe, 8% de  $\text{SiO}_2$  e 3% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  no concentrado, com recuperações de 66%, 3% e 26%, respectivamente, recuperação mássica de 22%, aproximadamente, maior tempo de residência de 51 min e porcentagem de sólidos na alimentação da polpa de 17% p/p.

A flotação com microbolhas (diâmetro médio de 70  $\mu\text{m}$ ) e mais recentemente com nanobolhas (<1  $\mu\text{m}$ ) emergiu como uma alternativa promissora para melhorar a eficiência da flotação de partículas F-UF nos últimos anos (Calgaroto *et al.*, 2015; Capponi *et al.*, 2023). A literatura demonstra benefícios com uso da injeção de microbolhas de FAD e destaca o aumento do teor e recuperação de Fe. Em ensaios em escala de bancada com diferentes minérios, como o quartzo,

foi observado o alcance de 80% de recuperação (Englert; Rodrigues; Rubio, 2011). Em contraste com os resultados relatados na literatura desenvolvidos em escala de bancada, de que as MBs podem favorecer o desempenho da flotação ou podem provocar arraste das partículas hidrofóbicas para o afundado, os estudos realizados em escala piloto com a amostra mostram que a injeção de MBs de FAD na vazão de 1 e 2 L/min, atuando como água de diluição não teve efeito no desempenho metalúrgico dos ensaios de flotação. Os resultados obtidos com e sem a injeção de MBs de FAD são praticamente os mesmos.

## 5. CONCLUSÃO

A otimização dos parâmetros hidrodinâmicos,  $J_{ar}$ ,  $Q_{dil}$  e  $J_a$  levou a melhores resultados de processo em termos de teor e recuperação de Fe, visto que foi identificado uma alta seletividade aplicando o coletor do tipo amida-amina F5530, sem adição depressor. O melhor resultado de processo foi obtido com a  $J_{ar}$  de 0,6 cm/s,  $J_a$  de 0,1 cm/s e  $Q_{dil}$  de 1L/min, produzindo um concentrado com 59% de Fe, 8% de  $SiO_2$  e 3% de  $Al_2O_3$  com recuperação de 66%, 3% e 26%, respectivamente. Os estudos realizados com a injeção de microbolhas de FAD na vazão de 1 e 2 L/min, atuando como água de diluição não teve efeito no desempenho metalúrgico dos ensaios de flotação. Os resultados obtidos com e sem a injeção de microbolhas de FAD são praticamente os mesmos. Os resultados de processo obtidos nesse estudo mostram que a aplicação do coletor do tipo amida-amina em substituição às aminas, associado a utilização na flotação em coluna, podem ser apontados como uma solução tanto do ponto de vista econômico quanto técnico para o tratamento de lamas de minério de ferro. Além disso, destaca-se o fato do Brasil ser o país com o maior número de colunas de flotação aplicadas na concentração de minério de ferro e ter histórico de aplicação com sucesso desse tipo de tecnologia para a concentração de partículas F-UF de minérios, com destaque para minérios de fosfato e de nióbio.

## 6. AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão aos meus orientadores Elves Matiolo e Amanda Freitas, ao CETEM pela infraestrutura e ao CNPq pela bolsa de iniciação tecnológica concedida.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAUJO, V. A. et al. Column reverse rougher flotation of iron bearing fine tailings assisted by HIC and a new cationic collector. *Minerals Engineering*, [s. l.], v. 156, p. 106531, 2020.
- CALGAROTO, S.; AZEVEDO, A.; RUBIO, J. Flotation of quartz particles assisted by nanobubbles. *International Journal of Mineral Processing*, [s. l.], v. 137, p. 64-70, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2015.02.010>.
- CAPPONI, F. et al. Column rougher flotation of fine niobium-bearing particles assisted with micro and nanobubbles. *Minerals Engineering*, [s. l.], v. 199, n. May, p. 108119, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108119>.
- ENGLERT, A. H.; RODRIGUES, R. T. ; RUBIO, J. Flotação de partículas ultrafinas: Estado da arte e contribuição técnica sobre o ponto de mínimo na eficiência de captura bolha-partícula. *Holos*, [s. l.], v. 5, p. 39-48, 2011.
- FILIPPOV, L. O.; SEVEROV, V. V.; FILIPPOVA, I. V. An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation. *International Journal of Mineral Processing*, [s. l.], v. 127, p. 62–69, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2014.01.002>.
- FINCH, J. A. Column flotation: A selected review part IV: Novel flotation devices \*. *Minerals Engineering*, [s. l.], v. 8, p. 587-602, 1995.
- HAGEMANN, S. G. et al. BIF-hosted iron mineral system: A review. *Ore Geology Reviews*, [s.l.], v. 76, p. 317-359, 2016.
- YOON, R. H. et al. Beneficiation of kaolin clay by froth flotation using hydroxamate collectors. *Minerals Engineering*, [s. l.], v. 5, p. 457-467, 1992.