

**Microflotação de hematita e quartzo com óleo de manga***Microflotation of hematite and quartz with mango oil*Felipe de Orquiza Milhomem<sup>1</sup>, Bruna de Oliveira Gomes<sup>2</sup>, José Aurélio Medeiros da Luz<sup>3</sup>**RESUMO**

A flotação é uma das técnicas mais empregadas no processamento mineral, e no caso do minério de ferro, é utilizada amina como coletor de ganga. Um dos problemas desse reagente é a baixa tolerância a finos, tornando difícil o processamento de minérios mais complexos ou da tentativa de recuperação de minerais-minério presentes em rejeitos. Assim, este estudo verificou o comportamento de hematita e quartzo na microflotação com uso de sabão de óleo de manga como coletor, nas concentrações de 2,0; 5,0 e 75,0 mg/L. Ensaios dos minerais separados foram realizados em célula de Fuerstenau, com 11,00 g de amostra e em pH 7,0; sem deslamagem. Além dos valores de recuperação dos minerais, também foi estudada a cinética do processo, através do modelo retangular de Klimpel. O quartzo teve recuperação próxima a 25 % nas três concentrações estudadas, e a hematita apresentou recuperação de 65,85 %, na concentração de 75,0 mg/L de coletor. Quanto à cinética, o parâmetro cinético da hematita em 75,0 mg/L teve valor de 3,19 [1/min], e o quartzo teve valor de 1,48 [1/min] na mesma concentração. Isso demonstra potencial do óleo de manga como coletor de hematita.

**Palavras-chave:** Microflotação. Hematita. Quartzo. Óleo vegetal. Cinética de flotação.

**ABSTRACT**

Flotation is one of the most used techniques in mineral processing, and in the case of iron ore, amine is used as a gangue collector. One of the problems with this reagent is its low tolerance to fines and slimes, making it difficult to process more complex ores or to attempt to reprocess tailings. Thus, this study verified the behavior of hematite and quartz in microflotation using saponified mango oil as a collector, at concentrations of 2.0, 5.0 and 75.0 mg/L. Tests of the separated minerals were carried out, in a Fuerstenau cell, with 11.00 g of sample and at pH 7.0, without desliming. In addition to the mineral recovery values, the kinetics of the process were also studied using the Klimpel's rectangular model. Quartz had recovery close to 25 % at the three concentrations, and hematite had recovered 65.85 % at the concentration of 75.0 mg/L of collector. The kinetic parameter of hematite at 75 mg/L had a value of 3.19 [1/min], and quartz had a value of 1.48 [1/min] at the same concentration. This demonstrates the potential of mango oil as a hematite collector.

**Keywords:** Microflotation. Hematite. Quartz. Vegetable oil. Flotation kinetic.

<sup>1</sup> Doutor em Engenharia Mineral. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral — Universidade Federal de Ouro Preto. <http://orcid.org/0000-0002-9830-8374>

E-mail:

[felipe.milhomem6@gmail.com](mailto:felipe.milhomem6@gmail.com)

<sup>2</sup> Mestranda em Engenharia Mineral do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral — Universidade Federal de Ouro Preto. <https://orcid.org/0000-0003-0627-5542>

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral — Universidade Federal de Ouro Preto. <https://orcid.org/0000-0002-7952-2439>

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil e no mundo, a principal rota de flotação de minérios de ferro é através da flotação catiônica reversa, com uso de aminas (monoaminas, diaminas, ou combinação delas, com parcial neutralização empregando ácido etanoico) como coletor de minério e amido de milho (ou, eventualmente, de mandioca), como depressor. Nesta rota, a ganga silicática é flotada enquanto remanescem na polpa as partículas dos minerais-minério, primacialmente hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), e goethita ( $\text{FeO.OH}$ ) coletados no afundado da máquina (ARAUJO; VIANA; PERES, 2005; LUZ, 2016). Todavia, tal técnica é pouco tolerante a finos e ultrafinos, sendo usual a necessidade de deslamagem prévia à flotação.

A flotação direta apresenta-se como rota com grande potencial de processamento de material mais fino, seja do ponto de vista das reservas de difícil processamento, seja da recuperação de rejeitos ferríferos (os quais são de baixo teor ou de granulação excessivamente fina para operação convencional).

A atuação de ácidos carboxílicos, ou graxos, na flotação de minérios é conhecida desde as primeiras décadas do século XX, sendo que muitos estudos têm sido realizados sobre o uso de sabões de óleos vegetais na flotação. Alonso, Castaño e Garcia (2000), por exemplo, utilizaram óleo de soja e azeite de oliva como coletores na flotação de finos de carvão mineral, e segundo eles, os mesmos se mostraram viáveis para flotação de carvão.

Silva *et al.* (2014) utilizaram, por sua vez, óleo de pequi como coletor na microflotação de apatita em pH 8, verificando o potencial do mesmo na flotação do mineral.

Oliveira *et al.* (2019) estudaram uso de sabão de óleo de pataúá como coletor de apatita, e encontraram seletividade entre apatita (de fórmula variável, mas canonicamente expressa por  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$ ) e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) em ambiente alcalino com dosagem de coletor de 0,3 mg/g.

Wen-Hao e colaboradores (2019), por outro lado, verificaram o desempenho de óleos vegetais de colza, soja e farelo de arroz na flotação de scheelita ( $\text{CaWO}_4$ ). Eles foram misturados e comparados com ácido oleico puro (com nome oficial da IUPAC: ácido octadecenóico, de fórmula  $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$ ), e os autores verificaram que o efeito sinérgico dos óleos vegetais traz melhor desempenho do que o ácido oleico sozinho.

Assim, como muitos estudos têm demonstrado a viabilidade do uso de óleos vegetais na flotação, neste estudo, foram realizados estudos de microflotação em célula de Fuerstenau com minerais separados de hematita e quartzo. Também foi feito estudo da

cinética do processo, uma vez que a mesma pode ser de grande valia na seleção de novos reagentes (KLIMPEL, 1980).

Assim, este estudo procurou contribuir para o conhecimento acerca do uso de óleos vegetais em flotação, mais especificamente, no uso de óleo de manga na flotação de minérios de ferro.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas amostras de quartzo e hematita provenientes do Quadrilátero Ferrífero. Tais amostras passaram por processos para aumentar sua pureza: hematita foi purificada em separador magnético, utilizando alto gradiente de campo magnético. O concentrado magnético foi usado nos ensaios de microflotação. O quartzo, por seu turno, foi lixiviado em solução mista de 0,4 N de ácido oxálico (ácido etanodioico, com fórmula:  $\text{HO}_2\text{C}-\text{CO}_2\text{H}$ ) e 0,2 N de ácido cítrico (ácido 2-hidroxi-1,2,3-propanotricarboxílico, de fórmula:  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ), durante 24 horas, para sequestro de cátions metálicos contaminantes, em especial o ferro férrico, que se solubiliza como complexos de oxalato e citrato. Após esse tempo, o líquido sobrenadante foi descartado e o quartzo passou por sucessivas lavagens com água de torneira, tomando-se cuidado para não eliminar finos no processo. Medidas de potencial hidrogeniônico (pH) eram tomadas até se verificar que não havia mais acidez no meio. Então, o quartzo era deixado em água destilada por mais 24 horas para reidratação de sua superfície. O tamanho das amostras era menor que 150 micrômetros, sendo que os ensaios de microflotação foram feitos sem deslamagem, para verificar como seria o comportamento do sistema em presença de finos.

As amostras secas de hematita e quartzo foram homogeneizadas e quarteadas em quarteador de rifles (tipo Jones), até se obterem massas de 11,0 g para os ensaios de microflotação em célula de Fuerstenau. Como esse equipamento permite ensaios com maior massa de material, em comparação com tubo de Hallimond (tipicamente 1,0 g), efetuou-se coleta das amostras em intervalos de tempo de 30 s. Com isso, foi possível também verificar a cinética do processo, mesmo que os parâmetros cinéticos não possam ser escalonados de modo direto para a flotação convencional em células mecânicas, células pneumáticas, ou em colunas. Na Figura 1, é possível ver detalhe da célula em funcionamento e a raspagem da espuma mineralizada na mesma. As concentrações utilizadas foram de 2, 5 e 75,0 mg/L de coletor e os ensaios foram realizados em pH 7,0.



**FIGURA 1.** Célula de Fuerstenau, com espuma levemente escurecida, devido à presença de hematita.

O óleo de manga precisou ser saponificado para uso como coletor na microflotação. Ele é extraído da semente da manga (*Mangifera indica*) por prensagem a frio e foi adquirido da Gran Oils S/A. Como todo óleo vegetal, o óleo de manga é, basicamente, um triacilglicerol, o qual — ao reagir com base forte (usualmente NaOH) —, resulta sais de ácidos graxos (sabões) e glicerol. Em relação aos ácidos graxos esterificados na molécula do triacilglicerol, esse óleo é composto principalmente por ácido oleico (43,71%) e ácido esteárico (39,97 % segundo Vieira *et al.* (2009), embora esse valor possa variar de acordo com a variedade de manga, podendo se atingirem valores de ácido oleico de até 52,69 % (LIMA *et al.*, 2019). A saponificação (hidrólise alcalina) do óleo de manga foi realizada em balão volumétrico, através da adição de 20,0 mL de solução alcoólica de NaOH em 1,00 g de óleo, e sob aquecimento (75 °C) com refluxo por aproximadamente 1 h. O método de saponificação adotou etanol no lugar de água, uma vez que, assim, se requer menos tempo de conversão, já que o álcool possibilita maior contato do óleo com o hidróxido (MORAES *et al.*, 2015). Posteriormente, a solução foi aquecida por 30 min, a fim de retirar o restante de álcool remanescente. Por fim, uma solução base de 0,1 % foi preparada.

A caracterização dos reagentes foi feita por meio da determinação do índice de acidez e índice de saponificação, de acordo com metodologia preconizada por Oliveira, Luz e Ferreira (2006).

Na Tabela 1 a seguir, estão as condições dos ensaios.

**Tabela 1.** Configuração dos ensaios de microflotação.

Tempo de condicionamento	Tempo de flotação	Coleta	pH	Vazão de ar	Vazão de reposição
180 s	150,0 s	a cada 5,0 s	7,0	34 mL/s	20 mL/min

A vazão de reposição é relacionada com água que era repostada na célula, para que o nível de água não variasse muito, uma vez que a espuma, naturalmente, carrega uma fração ponderável de líquido. Antes do começo do tempo de flotação, 1 gota de óleo de pinho (mescal de álcoois terpênicos e hidrocarbonetos terpênicos) era adicionada na célula, para auxiliar na espumação e, por conseguinte, na estabilidade da espuma, durante seu transbordo.

A cinética da flotação foi avaliada com base no modelo retangular, apresentado na equação 1, proposta por Klimpel (BRAGA; LUZ; MILHOMEM, 2019; KLIMPEL, 1980).

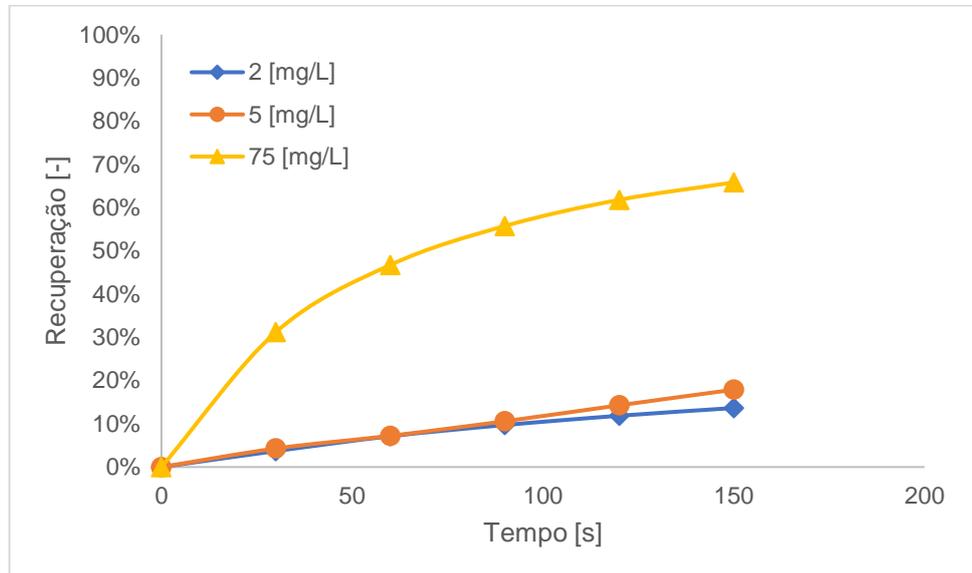
$$R = R_{\infty} \left\{ 1 - \left( \frac{1}{k \times t} \right) [1 - \exp(-k \times t)] \right\} \quad (1)$$

Onde: R — recuperação do mineral [-];  $R_{\infty}$  — recuperação máxima possível do mineral [-]; k — parâmetro cinético [1/min]; t — tempo de operação [min]

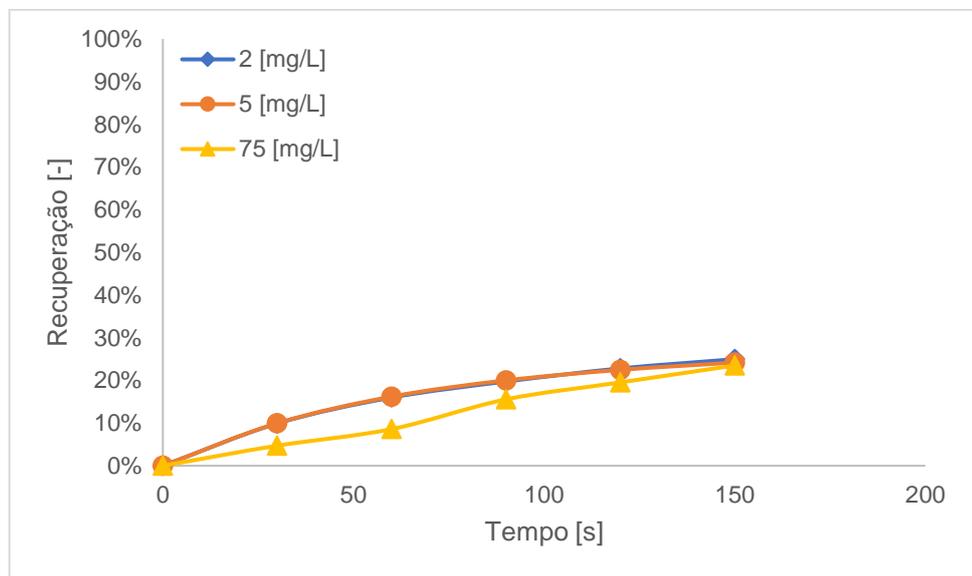
### 3. RESULTADOS

O óleo de manga apresentou índice de acidez de 3,46 mg de NaOH/mg de óleo. Tal índice demonstra a quantidade de miligramas de NaOH necessária para neutralizar 1,00 g de amostra, podendo indicar o seu grau de conservação. Um valor elevado demonstra a chamada rancidez do óleo (DOS SANTOS *et al.*, 2017). Além disso, esse índice indica se os ácidos graxos estão livres em grande quantidade ou não, e um valor baixo pode indicar a necessidade da saponificação (SILVA *et al.*, 2014). O grau de saponificação, por sua vez, teve valor de 115,94 mg de NaOH/g de amostra.

Os resultados de recuperação para hematita e quartzo estão nas Figuras 2 e 3, respectivamente.



**Figura 2.** resultados da microflotação de hematita



**Figura 3.** Resultados da microflotação de quartzo

Percebe-se que a recuperação da hematita para concentração de 2,0 e 5,0 mg/L de óleo de manga apresentaram valores máximos próximos a 20 % e recuperação máxima de aproximadamente 65 % em 75,0 mg/L de coletor. O quartzo, por sua vez, apresentou valores próximos a 25% nas três concentrações. Embora o valor de 65 % de recuperação

não seja elevado, deve-se levar em conta que há presença de finos. Nascimento, Souza e Lima (2014) realizaram estudos de flotação com minério de ferro com oleato de sódio como coletor e, entre outros achados, pontuaram a influência da deslamagem na recuperação de ferro.

Uma vez que tais minerais se encontram usualmente juntos, espera-se que o óleo de manga tenha mais afinidade à hematita em relação ao quartzo. Assim, percebe-se potencial no uso do óleo de manga coletor de hematita, principalmente pela baixa recuperação do quartzo. Estudos mais detalhados, com misturas entre hematita e quartzo, ou mesmo do óleo de manga misturado a outro coletor podem demonstrar a viabilidade do seu uso em sistemas de flotação.

O comportamento cinético pode ser visto na Tabela 2 (com os coeficientes de determinação estatística,  $R^2$ , explicitados). De forma geral, a equação de Klimpel apresentou boa aderência estatística aos dados experimentais. Quanto ao parâmetro cinético, o do quartzo foi maior que o da hematita, nas concentrações de 2,0 e 5,0 mg/L; mas inferior, na concentração de 75 mg/L. Isso corrobora a aplicabilidade da flotação em maiores concentrações, dada a maior cinética da hematita.

**Tabela 2.** Comportamento cinético da microflotação de hematita e quartzo

Parâmetro	Concentração					
	2 mg/L		5 mg/L		75 mg/L	
	k [1/min]	$R^2$	k [1/min]	$R^2$	k [1/min]	$R^2$
Hematita	1,78	0,900	1,52	0,830	3,19	0,951
Quartzo	2,76	0,912	2,75	0,937	1,48	0,823

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o uso de óleo de manga como coletor em microflotação, foi possível obter recuperação de até 65,85% na concentração de 75 mg/L. Para o quartzo, a recuperação em todas as três concentrações foi inferior a 25%. Quanto à cinética, o modelo de Klimpel apresentou boa aderência estatística, e valores do parâmetro cinético para a hematita sob 75 mg/L foi de 3,19 [1/min] e de 1,48 [1/min] para o quartzo, sob a mesma concentração.

Assim, o óleo de manga apresenta certo potencial como coletor de minérios de ferro. Mais estudos se fazem necessários, com sistemas binários hematita/quartzo ou mesmo com uso do óleo de manga como coletor auxiliar de flotação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, FAPEMIG e UFOP, pelo apoio para elaboração do trabalho.

## REFERÊNCIAS

ALONSO, M. I.; CASTAÑO, C.; GARCIA, A. B. Performance of vegetable oils as flotation collectors for the recovery of coal from coal fines wastes. **Coal Preparation**, v. 21, n. 4, p. 411–420, 2000. DOI: 10.1080/07349340008945628. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07349340008945628>. Acesso em: 20 de novembro de 2021.

ARAUJO, A. C.; VIANA, P. R. M.; PERES, A. E. C. Reagents in iron ores flotation. **Minerals Engineering**, v. 18, n. 2 SPEC. ISS., p. 219–224, 2005. DOI: 10.1016/j.mineng.2004.08.023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S089268750400295X?via%3Dihub>. Acesso em: 05 de dezembro de 2021.

BRAGA, F. Y. A.; LUZ, J. A. M.; MILHOMEM, F. O. Size-dependent kinetics of iron ore reverse flotation. **Particulate Science and Technology**, v. 38, n. 4, p. 419–426, 2019. DOI: 10.1080/02726351.2018.1558319. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02726351.2018.1558319>. Acesso em: 05 de dezembro de 2021.

DOS SANTOS, G. M.; DE BRITO, M. M.; SOUSA, P. V. L.; BARROS, N. V. A. Determinação do índice de acidez em óleos de soja comercializados em supermercados varejistas. **Revista Ciência Saúde**, v. 2, n. 2, p. 11–14, 2017. Disponível em <https://revistaeletronicafunvic.org/index.php/c14ffd10/article/view/74>. Acesso em: 20 de novembro de 2021.

KLIMPEL, R. R. Selection of chemical reagents for flotation. *In*: MULAR, A. L.; BHAPPU, R. B. (org.). **Mineral Processing Plant Design**. 2. ed. Littleton, Colorado: Society of Mining Engineers, 1980. p. 907–934.

LIMA, J. R. *et al.* Amêndoas dos endocarpos de manga Keitt, Kent, Palmer e Tommy Atkins: rendimento na obtenção, composição centesimal e da fração lipídica. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento**. Fortaleza: Embrapa, 2019. 15 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1109147/amendoas-dos-endocarpos-de-manga-keitt-kent-palmer-e-tommy-atkins-rendimento-na-obtencao-composicao-centesimal-e-da-fracao-lipidica>. Acesso em: 03 de dezembro de 2021.

LUZ, J. A. M. Flotation of Iron Ore. *In*: COLÁS, R; TOTTEN, G. E. (org.). **Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys**. 1. ed. CRC Press, 2016. p. 1249–1288. DOI: 10.1081/E-EISA-120049089. Disponível em: <http://www.crcnetbase.com/doi/10.1081/E-EISA-120049089>. Acesso em: 05 de dezembro de 2021.

MORAES, I. L. A.; SILVA, A. C.; SILVA, E. M. S.; MORAIS, V. L.; SILVA FILHO, C. M. Microflotação de apatita utilizando óleo de pinhão manso como coletor. **Holos**, v. 7, p. 132–139, 2015. DOI: 10.15628/holos.2015.3716. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/3716>. Acesso em: 20 de novembro de 2021.

NASCIMENTO, D. R.; SOUZA, T. F.; LIMA, R. M. L. Flotação de minério de ferro com oleato de sódio e silicato de sódio. **Holos**, v. 4, p. 110-117, 2014. DOI: 10.15628/holos.2014.1872. Disponível em <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1872>. Acesso em: 05 de dezembro de 2021.

OLIVEIRA, J. A.; LUZ, J. A. M.; FERREIRA, E. E. Grau de saponificação de óleos vegetais na flotação seletiva de apatita de minério carbonatítico. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 59, n. 4, p. 385–390, 2006. DOI: 10.1590/S0370-44672006000400006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672006000400006>. Acesso em: 10 de novembro de 2021.

OLIVEIRA, P; MANSUR, H; MANSUR, A; SILVA, G; PERES, A. E. C. Apatite flotation using pataua palm tree oil as collector. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, p. 4612-4619, 2019. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.08.005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.08.005>. Acesso em: 10 de novembro de 2021.

SILVA, T. C.; SILVA, A. C.; SILVA, E. M. S.; ALVES, B. E. Aplicação do óleo de pequi como reagente coletor na microflotação de apatita. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 19, p. 99–107, 2014. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/2529>. Acesso em: 03 de dezembro de 2021.

VIEIRA, P. A. F. *et al.* Caracterização química do resíduo do processamento agroindustrial da manga (*Mangifera indica* L.) var. Ubá. **Alimentos e Nutrição**, v. 20, n. 4, p. 617–623, 2009. Disponível em: <http://serv-bib.fcfar.unesp.br/seer/index.php/alimentos/article/viewFile/1240/867>&gt;. Acesso em: 03 de dezembro de 2021.