



## O IMPACTO DA MORFOLOGIA DE HEMATITAS NA EFICIÊNCIA DA FLOTAÇÃO

**MOREIRA, D.S.<sup>1</sup>, FIGUEIREDO, T.D.<sup>2</sup>, DE SÃO JOSÉ, F.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Departamento de Minas e Construção Civil. E-mail: douglassoaresmoreira@gmail.com.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia de Minas.  
E-mail: thiagoduarte1926@hotmail.com.

<sup>3</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Departamento de Minas e Construção Civil. E-mail: fabio.sao.jose@hotmail.com.

### RESUMO

O minério de ferro é o principal insumo mineral na produção brasileira, sendo explorado em elevadas quantidades e a partir de diferentes minerais, dentre os quais se destaca a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), mineral responsável pela maior parte da produção nacional de minério de ferro. A hematita apresenta diferentes morfologias, ocorrendo na forma compacta ou especular, o que influencia diretamente a eficiência dos processos de beneficiamento, como cominuição e concentração. Sabendo disso, este trabalho busca, por meio de testes de microflotação, avaliar a influência das morfologias da hematita especular e hematita compacta nos processos de flotação. As condições ótimas de operação foram determinadas variando parâmetros como pH do sistema, vazão de gás nitrogênio, dosagem de reagentes e mecanismo de fragmentação da amostra. Por fim, confirmou-se a influência da morfologia da hematita no processo de flotação da mesma, observando que, além dessa contribuição morfológica, alguns fatores também interferem no resultado, como por exemplo, o tipo de fragmentação no qual a amostra foi submetida.

**PALAVRAS-CHAVE:** Flotabilidade, Microflotação, Reagentes, Hematita, Vazão.

### ABSTRACT

Iron ore is the main mineral in Brazilian mining, being exploited in large quantities and from various minerals, such as hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), mineral responsible for most of the national iron production. The hematite presents different morphologies, occurring in compact or specular form, which directly influences the beneficiation processes effectiveness, such as comminution and concentration. Knowing this, this work seeks, through microflotation tests, to evaluate the influence of the morphology of specular hematite and compact hematite in flotation processes. Changing parameters such as pH, nitrogen gas distribution, reagents dosage and sampling fragmentation mechanism type, the optimum operating conditions were determined. Finally, the influence of the hematite morphology on the flotation process was confirmed, observing that besides this morphological contribution, other factors also influence the result, such as the type of fragmentation in which the sample was submitted.

**KEYWORDS:** Flotability, Microflotation, Reagents, Hematite, Flow.

## **1. INTRODUÇÃO**

O Brasil é um dos maiores produtores de minério de ferro do planeta, sendo este o principal insumo mineral em termos de quantidade e representatividade econômica no país. Atualmente o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de minério de ferro do planeta, com produção de aproximadamente 430 Mt, distribuída em sua maior parte nos estados de Minas Gerais (82,9% das reservas nacionais), Pará (9,9%) e Mato Grosso do Sul (2,3%) (Jesus e Joaquim, 2017).

O minério de ferro no Brasil é encontrado predominantemente na forma de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), ocorrendo também em menor quantidade em minerais como a ilmenita ( $\text{FeTiO}_2$ ), goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) e magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) (Gomes et al., 2013). A hematita, mineral mais explorado para produção de ferro no país, apresenta variadas morfologias, dentre elas a hematita especular e a hematita compacta. Essas diferentes morfologias para o mesmo mineral se destacam principalmente nos parâmetros físicos e mecânicos, como planos preferenciais de fratura, resistência mecânica, forma e distribuição de cristais. Segundo Gomes et al. (2013), a hematita compacta apresenta resistência mecânica mais elevada, assim como porosidade e redutibilidade reduzidas em relação a hematita especular.

Uma das técnicas mais empregadas na concentração de minérios de ferro é a flotação, consistindo na adesão de partículas hidrofóbicas na superfície de bolhas de ar induzidas em polpas (Martins, Lima e Filho, 2012). Para que a flotação ocorra com eficiência, diversas variáveis são levadas em consideração, necessitando serem condicionadas de acordo com parâmetros ótimos, determinados através de ensaios em laboratório. De acordo com Aguiar (2014), nos últimos 40 anos a flotação catiônica reversa se tornou um dos principais métodos utilizados para se concentrar esse mineral, utilizando a amina como principal coletor de ganga silicática e amido como reagente depressor do óxido de ferro.

A definição dos parâmetros ótimos de flotação da hematita, portanto, depende diretamente de sua morfologia. Para isso, um dos métodos para análise do comportamento destes minerais em processos de beneficiamento se dá por meio de ensaios de flotabilidade, como por exemplo, testes de microflotação em tubos de Hallimond. Através destes ensaios, é possível comparar diferentes parâmetros para uma etapa de flotação, definindo as melhores condições operacionais, seja para a recuperação de hematitas com caráter especular ou compacto.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

Os procedimentos realizados durante o presente estudo estão descritos neste tópico. Os ensaios de caracterização das amostras se deram nos laboratórios de materiais do CEFETMG Campus II e da UFMG, enquanto os testes restantes se realizaram no laboratório de química do CEFET-MG Campus Araxá e no Laboratório de flotação da UFOP.

### **2.1. Caracterização das amostras**

Este trabalho consistiu na análise de amostras representativas de hematita especular e compacta, ambas fornecidas pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) – Mina Casa de Pedra, com granulometria acima de 150  $\mu\text{m}$ .

Para os ensaios de caracterização tecnológica das amostras, uma pequena porção das amostras de hematita foi cominuído via Grau de Ágata, atingindo uma granulometria inferior a 38 µm. Em seguida, o material restante foi fragmentado até atingir a faixa granulométrica entre 150 µm e 75 µm, faixa de tamanho ideal para a realização de ensaios de microflotação.

Visando analisar a influência do meio de fragmentação nas características do minério, uma fração de hematita especular foi fragmentada por moinhos de barras e outra por moinho de discos. O mesmo procedimento foi realizado para a fração de hematita compacta, permitindo assim, a comparação entre os efeitos causados por diferentes tipos de moagem na estrutura dos grãos do minério e em seu comportamento durante os ensaios.

Na etapa de caracterização tecnológica das amostras, suas características físicas e morfológicas foram determinadas e comparadas através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Além disso, as amostras de hematita foram caracterizadas por ensaios de Difração de raios-X, buscando a determinação da composição mineralógica das amostras e a confirmação da pureza das mesmas, parâmetro importante para os ensaios de microflotação.

## 2.2. Microflotação

Os ensaios de microflotação foram realizados por meio do tubo de Hallimond modificado, equipamento de bancada que apresenta um extensor de altura que reduz o arraste hidrodinâmico de finos durante o processo. Este equipamento permite analisar a flotabilidade da hematita utilizando pequenas amostras do mineral (alíquotas de 1 a 2g). Para tanto, um artefato matemático é aplicado, capaz de determinar o grau de flotabilidade da partícula mineral. Desta forma, a tendência da amostra mineral em ser coletada é representada pela Equação 1.

$$Flotabilidade = \frac{\text{Massa de amostra flotada (g)} \times 100}{\text{Massa de amostra flotada (g)} + \text{Massa de amostra afundada (g)}} \quad (1)$$

O primeiro ensaio de análise de flotabilidade das hematitas compactas e especulares buscou avaliar o comportamento dos minerais em relação à variação de vazão de gás nitrogênio no sistema. Para isso, o pH da solução foi fixado em 10,5, valor que, segundo Viana (2006), se encontra na faixa ideal de pH para flotação de minério de ferro.

Após o ajuste do sistema, os testes para flotabilidade natural da hematita foram realizados, elevando a vazão de nitrogênio injetado no sistema em 10 cm<sup>3</sup>/min a cada medição, com valor inicial de 20 cm<sup>3</sup>/min até a vazão máxima de 110 cm<sup>3</sup>/min. Foi possível então, determinar a vazão ótima para a flotação de cada morfologia de hematita.

O valor de vazão ideal foi fixado, sendo aplicado nos testes seguintes, que buscavam avaliar a dosagem ideal de reagentes para a flotação da hematita. Foram preparadas soluções de reagente coletor (Amina Flotigam EDA 3) com 0,1% (p/v). A dosagem de coletor teve seu valor mínimo definido em 0,5 mg/L, sendo alterada para 1 mg/L, 1,5 e 2 mg/L. Em seguida, os valores de dosagem foram elevados gradativamente em 2 mg/L e testados até o valor final de 12 mg/l.

Por fim, com os valores ótimos de dosagem de reagentes e de vazão de gás para flotação definidos, foram realizados testes para verificar os valores ótimos de pH do sistema. Variando os valores de pH a partir de água destilada (pH 8) foi possível comparar os resultados ótimos encontrados com os valores sugeridos pela literatura, e determinar se o comportamento da hematita durante a flotação segue os preceitos já definidos em pesquisas anteriores. Com a utilização de NaOH e HCl como moduladores de pH, os testes de microflotação da hematita ocorreram em pH inicial de 2, com variação de 2 unidades até o valor máximo de pH 12, no qual o último teste foi realizado.

Todos os ensaios realizados nesta etapa foram feitos em triplicata. Desta forma, são considerados resultados representativos os valores médios entre os 3 resultados obtidos para cada condição operacional.

### 2.3. Potencial Zeta

Os ensaios para cálculo de potencial Zeta, cujo equipamento utilizado foi o Zeta Meter 4.0, foram realizados visando determinar o Ponto de Carga Zero (PCZ) e o Ponto Isoelétrico (PIE) do mineral. Para os ensaios, realizados em duplicata, foi utilizado uma solução de KNO<sub>3</sub> como eletrólito. Os valores de pH analisados foram de 2, 4, 6, 8 e 10, sendo ajustados por moduladores de pH (NaOH e HCl) em concentração de 1% (p/v).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização dos ensaios de caracterização e de microflotação, seus respectivos resultados foram analisados. O comportamento das diferentes amostras de hematita foi discutido, assim como as condições operacionais ótimas para a flotação foram definidas, sendo exibidas neste tópico.

### 3.1. Caracterização dos minerais

Inicialmente os ensaios de difração de raios-X avaliaram o grau de pureza das amostras, como ilustrado pela Figura 1. Nela é possível observar a presença apenas de hematita para as amostras compactas (a), enquanto juntamente com as hematitas especulares (b), observou-se a presença de quartzo.

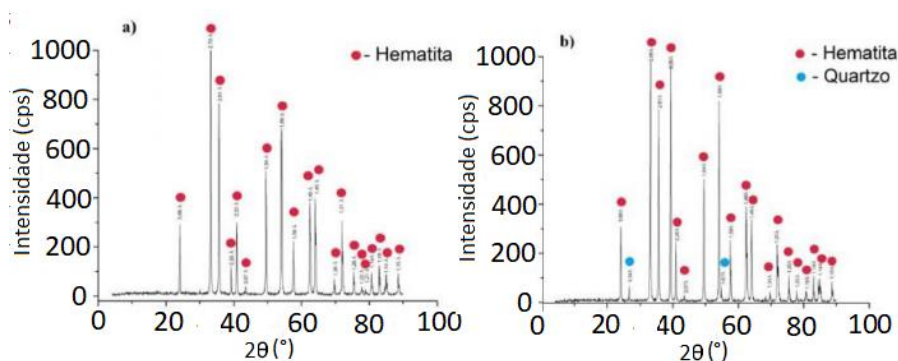


Figura 1 - Resultados de análise mineralógica por difração de raios-X.

As amostras de hematita compacta analisadas possuem elevado grau de pureza, enquanto as hematitas especulares apresentam pequena contaminação por quartzo. Isto implica principalmente na redução da massa específica dos cristais de hematita especular, facilitando seu arraste em granulometria mais fina. O tubo de Hallimond modificado atua justamente para reduzir estes efeitos, validando assim o procedimento.

A análise dos resultados de MEV, representada na Figura 2, permite observar que as hematitas fragmentadas via moinho de discos (B e D) possuem maior homogeneidade em relação as amostras cominuídas por moinhos de barras (A e C), apresentando maior regularidade no tamanho e no formato dos grãos.

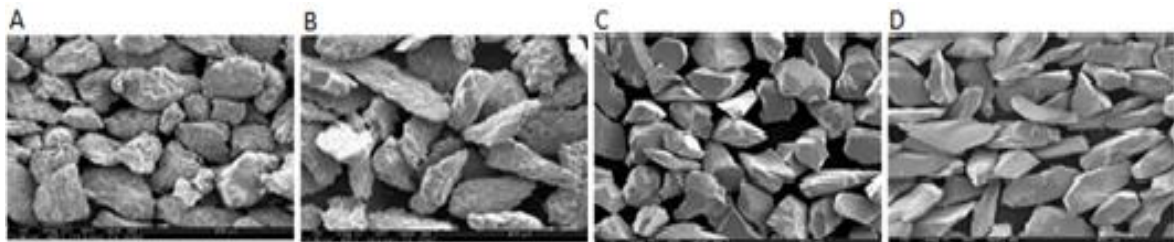


Figura 2 - Hematita especular cominuída por moinho de barras (A) e de discos (B). Hematita compacta cominuída por moinhos de barras (C) e de discos (D).

Foi possível também observar uma diferença entre as hematitas especulares (A e B) e as compactas (C e D). As imagens sugerem que a hematita especular apresenta maior rugosidade superficial e porosidade, possuindo, portanto, menor massa específica em relação às hematitas compactas, além de uma maior propensão à flotabilidade.

### 3.2. Microflotação

Os ensaios de flotação permitiram avaliar a flotabilidade das hematitas em diversos cenários. O primeiro teste buscou a determinação das condições ótimas de vazão de gás no sistema, cujos resultados estão representados pela Figura 3.

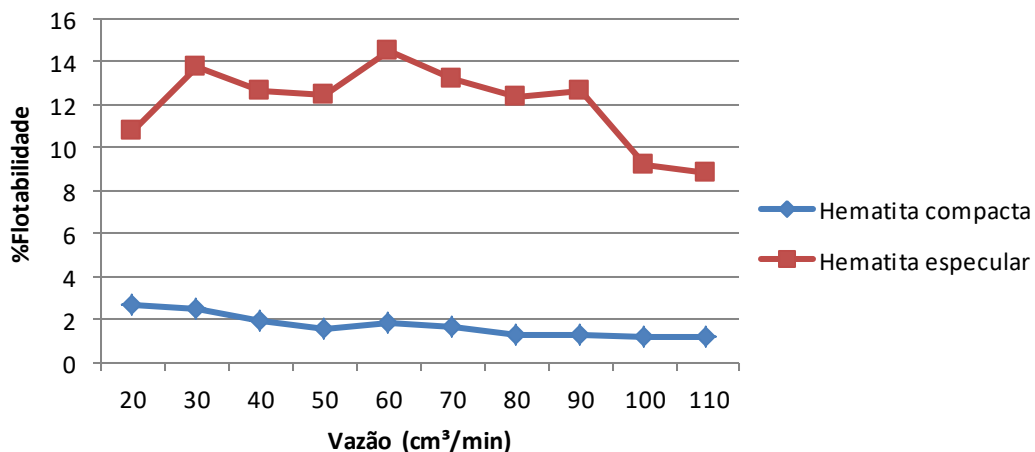


Figura 3 - Relação flotabilidade x vazão de nitrogênio.

É possível perceber que a hematita compacta apresenta flotabilidade até sete vezes menor em relação à hematita especular. Tal fato se deve principalmente à maior porosidade da hematita especular, que diminui a massa específica das partículas e aumenta sua área superficial, o que facilita o carregamento das mesmas e eleva a área de contato para a adsorção partícula-bolha.

Além disso, nota-se que as vazões de nitrogênio que proporcionaram uma maior flotabilidade das hematitas se encontram na faixa entre 50 e 60 cm<sup>3</sup>/min, com a recuperação de aproximadamente 14,5% e 2% para hematitas especulares e compactas, respectivamente. Estes valores se justificam, consoantes a Baltar (2010), pelo fato de que vazões menores que 50 cm<sup>3</sup>/min não promovem uma interação efetiva entre as partículas minerais e as bolhas, assim como vazões elevadas promovem turbulências no sistema e impedem que a adsorção seja estável. Por tudo isso, foi possível definir a vazão ótima para a realização dos ensaios de microflotação subsequentes, sendo de 50 cm<sup>3</sup>/min.

Os ensaios de flotabilidade da hematita em função da dosagem de reagentes foram realizados com a vazão ótima de gás (50 cm<sup>3</sup>/min). Os resultados encontrados, expressos graficamente pela Figura 4 mostram que com a adição de coletor no sistema, a flotabilidade da hematita aumentou significativamente, alcançando em alguns cenários, valores acima dos 80% tanto para a hematita especular quanto para a compacta.

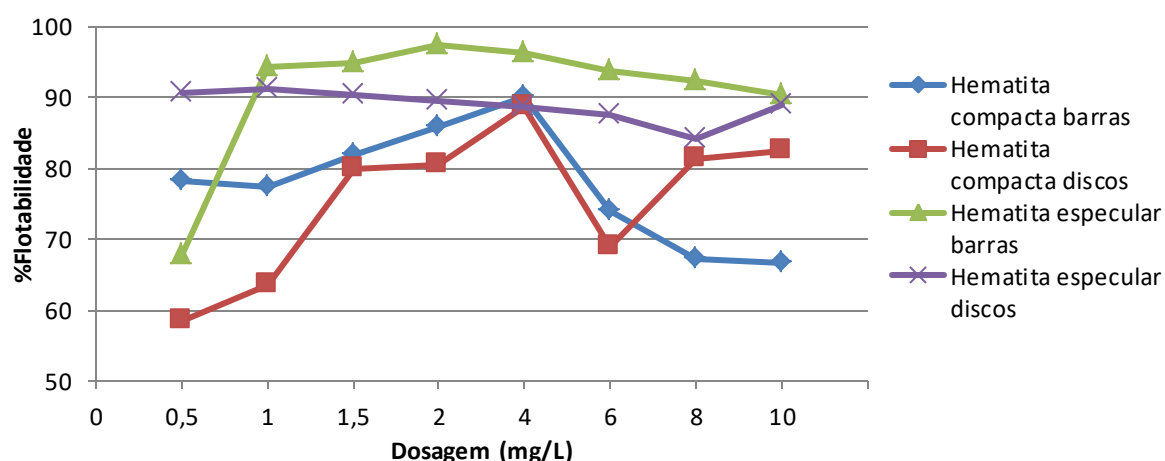


Figura 4 - Relação flotabilidade x dosagem de coletor.

É possível observar um rendimento superior das hematitas especulares, embora a variação da sua flotabilidade em relação a hematita compacta tenha reduzido significativamente. Isso se deve ao fato de que os minerais, ao serem adsorvidos pelos reagentes, adquirem características superficiais semelhantes a dos próprios reagentes, amenizando assim a influência de sua morfologia na flotabilidade.

A dosagem de reagente que apresentou maior flotabilidade foi de aproximadamente 4 mg/L, com resultados entre 85 e 95% de recuperação mineral. No entanto, é visto que uma pequena variação neste valor de dosagem acarreta na queda considerável de rendimento do sistema, principalmente para a hematita compacta. Com isso, a utilização desta faixa de dosagem se mostra demasiadamente complexa. Desta forma, a taxa ótima de dosagem de reagentes dentre aquelas utilizadas nos ensaios foi definida em 2 mg/L, visto que nesta faixa

operacional os resultados de flotabilidade se mantêm elevados e apresentam uma maior constância.

Com a vazão ótima (50 cm<sup>3</sup>/min) e a melhor dosagem a ser utilizada durante o processamento mineral (2 mg/L) já definidas, o pH ótimo para a flotação das hematitas foi determinado. Observa-se no gráfico da Figura 5, que os melhores resultados de flotabilidade foram obtidos em pH 8, onde as quatro amostras analisadas apresentam resultados semelhantes, na faixa de 90%. Com o aumento do pH, a flotabilidade das hematitas não se alterou significativamente. Em pH 10,5 os valores de recuperação da hematita se mantiveram elevados na flotação catiônica da hematita, corroborando com Viana (2010).

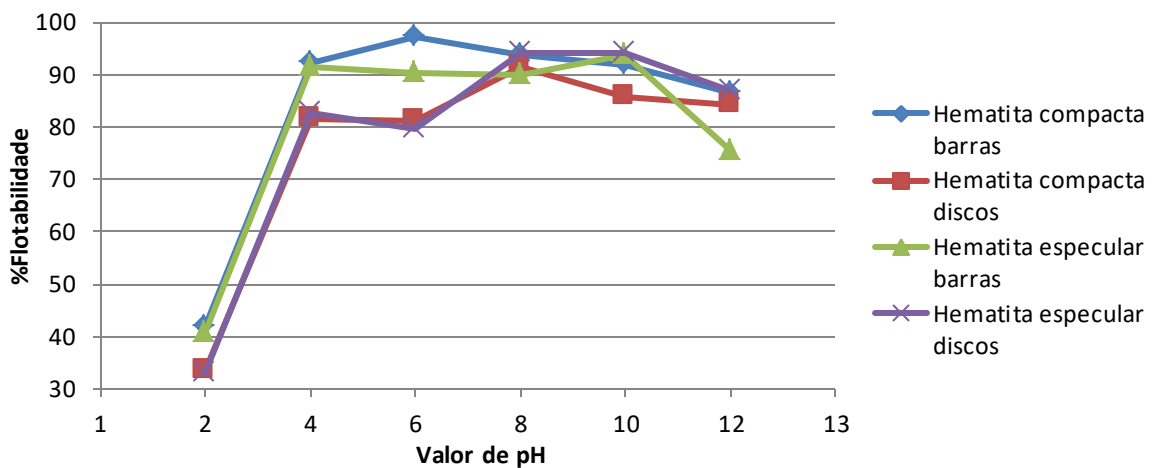


Figura 5 - Relação flotabilidade x variação de pH.

### 3.3. Potencial Zeta

Como é representado pela Figura 6, o Ponto Isoelétrico para a hematita compacta foi de aproximadamente 7,2, enquanto para a hematita especular foi de 6,8. Nota-se que em pH acima de 7, as cargas de superfície das hematitas são negativas, justificando, portanto, a utilização de coletores catiônicos.

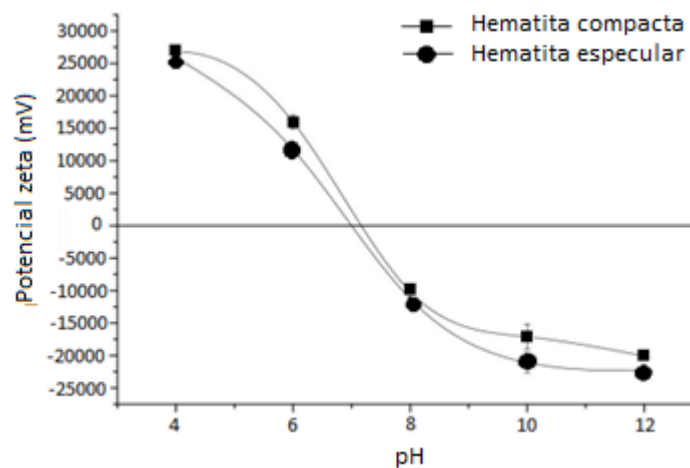


Figura 6 - Análise de potencial Zeta de hematita compacta e especular.

O gráfico de potencial zeta do sistema analisado apresenta resultados semelhantes aos obtidos por Alexandrino (2012) e Henriques (2009). Os autores realizaram testes semelhantes de potencial Zeta para diversos minerais de ferro, dentre eles a hematita compacta e especular, apresentando, assim como no presente artigo, valores de PIE compreendidos na faixa de pH entre 6 e 8, validando de certa forma os resultados obtidos neste trabalho.

#### 4. CONCLUSÕES

Após a análise do comportamento das hematitas compactas e especulares da Mina Casa de Pedra em processos de flotação, percebe-se que a morfologia dos minerais apresenta influência direta e significativa na eficiência da recuperação dos mesmos. Hematitas especulares por possuírem menor massa específica e porosidade mais elevada em relação às compactas, apresentaram maior flotabilidade.

Com a adição de coletores catiônicos, essa diferença foi reduzida, permitindo a recuperação mútua das amostras com eficiência na faixa de 85%. Os parâmetros operacionais ótimos para a flotação catiônica das hematitas foram definidos em: Vazão de gás injetado no sistema de 50 cm<sup>3</sup>/min, dosagem de coletor de 2 mg/L, faixa de pH  $\geq$  8. Por fim, o ensaio de potencial Zeta das amostras definiu valores de PIE para as hematitas especulares e compactas, sendo encontrados nos valores de pH 6,8 e 7,2, respectivamente.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Aguiar M.; Clatratos na Flotação Catiônica Reversa de Minério de Ferro. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Minas Gerais; 2014.
- Alexandrino J.; Correlação Entre Estado de Dispersão, Propriedades Eletrocínéticas e Flotabilidade de Hematita. [Tese de Doutorado]. Universidade Federal de Minas Gerais; 2013.
- Baltar A. Flotação no Tratamento de Minérios. 2a. ed. PERNANBUCO: UFPE; 2010.
- Gomes, O., Iglesias, J., Paciornik, S., Vieira, M. Morfometria e Classificação Automática de Hematita em Minérios de Ferro. In: 44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas & 4º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro & 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro. 2013; Belo Horizonte, Brasil.
- Henriques, A.; Caracterização e Estudo das Propriedades Eletrocínéticas dos Minerais de Ferro: Hematita, Goethita e Magnetita. [Tese de Doutorado]. Universidade Federal de Minas Gerais; 2012.
- Jesus C, Joaquim L. Sumário mineral 2016. vol.35. Brasília: DNPM; 2017. Chapter 25, Ferro, p. 64-65.
- Martins M, Lima N, Filho L. Depressão de minerais de ferro: influência da mineralogia, morfologia e pH de condicionamento. Revista Escola de Minas 2012; 65(3); 393-399.
- Viana P.; Flotação de Espodumênio, Microclina, Muscovita e Quartzo com Coletores Aniônicos, Catiônicos, Anfotéricos e Mistura de Coletores. [Tese de Doutorado]. Universidade Federal de Minas Gerais; 2006.