



## CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO COM ALTO TEOR DE DOLOMITA VIA FLOTAÇÃO REVERSA

**BICALHO, L.S.<sup>1</sup>, BRANDAO, P.R.G.<sup>2</sup>, ROLLO, P.A.<sup>3</sup>, SILVA, W.C.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Clariant Mining Solutions & Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia de Minas, e-mail: leandro.bicalho@clariant.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia de Minas, e-mail: pbrandao@demin.ufmg.br

<sup>3</sup>Clariant Mining Solutions, e-mail: Pedro.rollo@clariant.com

<sup>4</sup>Clariant Mining Solutions, e-mail: Wagner.silva@clariant.com

### RESUMO

O Quadrilátero Ferrífero é uma importante província mineral localizada no estado de Minas Gerais, responsável por grande parte da produção de minério de ferro no Brasil. Dentre os métodos de concentração de minério de ferro utilizados pelas empresas com atividade nesta região, destaca-se a flotação reversa de minério de ferro. Neste processo, utilizam-se o amido gelatinizado como depressor de hematita e a éteramina como coletor de quartzo. Formações ferríferas dolomíticas, com presença de hematita, quartzo e dolomita, estão presentes em diversas áreas de mineração e, com o aprofundamento das jazidas de minério de ferro, este tipo de minério de baixo teor e com mineralogia mais complexa é cada vez mais recorrente. Estudos de caracterização mineral e testes de flotação em bancada foram realizados com o objetivo de alcançar uma condição seletiva para concentrar a hematita dos minerais de ganga quartzo e dolomita. Utilizando o coletor FLOTIGAM 16424 para flotação de quartzo e FLOTINOR 16551 para flotação de dolomita foi possível reduzir os teores de SiO<sub>2</sub>, MgO e CaO no concentrado final, maximizando o teor de ferro para até 66%.

**PALAVRAS-CHAVE:** Minério de ferro, dolomita, flotação

### ABSTRACT

Quadrilátero Ferrífero is an important mineral province located in Minas Gerais state, responsible for the greatest part of iron production in Brazil. Among the concentration methods of iron ore used by the companies with activities in this region, the most important is the reverse cationic flotation. In this method, gelatinized starch is used as depressant for hematite and etheramine as collector for quartz. Dolomite iron formations, with the presence of hematite, quartz and dolomite, are present in several mining areas and, with the deepening of the iron ore deposits, this type of ore with low iron content and more complex mineralogy is increasingly recurring. Mineral characterization and bench flotation tests were performed with the objective of achieving a selective condition to concentrate hematite from quartz and dolomite gangue minerals. Using the collectors FLOTIGAM 16424 to float quartz and FLOTINOR 16551 to float dolomite it was possible to reduce the grades of SiO<sub>2</sub>, MgO and CaO in the final concentrate, maximizing the iron grade for up to 66%.

**KEYWORDS:** Iron ore, flotation, dolomite

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo LELIS (2014) o minério de ferro encontrado nos principais depósitos do Brasil é constituído de óxidos de ferro com presença majoritária de hematita e teores mais baixos de magnetita, goethita e limonita. A ganga silicosa é composta de quartzo e menores proporções de caulinita, clorita e talco. Com a exaustão dos depósitos de alto teor e o aprofundamento das jazidas do Quadrilátero Ferrífero, minérios mais complexos em mineralogia, com a presença de minerais carbonáticos como dolomita e calcita, passam a ser uma realidade nas usinas de processamento mineral, apresentando um desafio para a concentração por flotação.

SPIER (2005) descreve o itabirito dolomítico como uma das formações encontradas na Mina de Águas Claras, presente em uma camada contínua com espessura de 150 a 400 metros. O autor evidencia que há uma transição entre os corpos ricos em itabirito dolomítico para corpos massivos de minério de ferro, existindo assim uma zona de contato entre as formações. Nos corpos de minério de ferro encontram-se ainda traços de dolomita porosa. MAGALHÃES (2013), em seu estudo sobre os itabiritos presentes na Mina Casa de Pedra, pertencente à Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), cita o itabirito dolomítico entre os tipos composicionais que ocorrem nesta região.

A flotação é um processo de grande relevância para a concentração de minério de ferro, especialmente nos depósitos de minério itabirítico do Quadrilátero Ferrífero, uma vez que viabiliza o aproveitamento de minérios com liberação em faixa de granulometria fina, normalmente com P95 abaixo de 150  $\mu\text{m}$ , baixo teor de ferro e alto teor de ganga silicatada.

Segundo PERES e ARAUJO (2009) a técnica de flotação amplamente utilizada no Brasil é a flotação reversa de minério de ferro, que explora as características de superfície dos minerais que se deseja separar. Com o emprego de um agente depressor, reforça-se a natureza hidrofílica dos minerais de ferro, enquanto a superfície da ganga silicatada, majoritariamente quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), é hidrofobizada com o emprego de um coletor catiônico, normalmente a éteramina, alcançando-se assim a característica diferenciadora entre os minerais.

Ainda são poucos os estudos para concentração por flotação de minério de ferro com a presença de dolomita. O uso de coletores catiônicos para flotação de dolomita foi estudado por ZHANG et al. (2018) que utilizou como coletor uma dodecilamina (DDA). No estudo o autor encontrou uma condição de alta flotabilidade em pH 8. LOPES (2013) avaliou o potencial zeta e a microflotação de dolomita utilizando como coletor o FLOTIGAM EDA, uma éteramina comercial da empresa Clariant. Os resultados indicam que há interação deste tipo de coletor com a superfície da dolomita, porém a flotabilidade alcançada nos ensaios de microflotação foi baixa. COSTA (2009) também avaliou a flotabilidade da dolomita utilizando amina como coletor, e mesmo na dosagem de 1500 g/t, considerada alta para sistemas de flotação, a flotabilidade alcançada foi menor que 50%.

Em um estudo mais recente de RASO, LAMEIRAS e ALBUQUERQUE (2018), foi avaliada a separação seletiva entre hematita e dolomita. Os autores utilizaram análises de potencial zeta e testes de microflotação em tubo de Hallimond para avaliar a flotação seletiva utilizando óleo de soja como coletor. Os testes de microflotação indicaram uma condição seletiva para separar os dois minerais em pH 6 com 2 mg/l de óleo de soja. Nesta condição a flotabilidade

da dolomita alcançou valor de aproximadamente 80% enquanto a hematita apresentou flotabilidade de 20%.

O presente trabalho estudou um minério de ferro amostrado na alimentação da flotação de uma usina de processamento de minério de ferro. O objetivo do trabalho foi avaliar a concentração da hematita em ensaios de flotação em bancada utilizando os coletores FLOTIGAM 16424 e FLOTINOR 16551, disponibilizados pela empresa Clariant. Ensaios de caracterização foram realizados com o objetivo de identificar os principais minerais de ganga presente na amostra.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A parte experimental envolveu o estudo de uma amostra de minério de ferro, proveniente da alimentação da flotação de uma usina de processamento mineral. A amostragem foi realizada durante o período em que se identificou altos teores de CaO e MgO no circuito de flotação. Para caracterização da amostra de minério foram realizadas as seguintes análises:

- Análise granulométrica por peneiramento a úmido
- Análise química por fluorescência de raios-X (FRX)
- Análise mineralógica por difração de raios-X (DRX)
- Análise de liberação por microscopia de luz refletida (MLR)

Os ensaios de flotação foram realizados em célula de flotação de bancada, marca DENVER, modelo D12 auto-aerada, instalada no laboratório de flotação do Centro de Aplicação e Desenvolvimento para Mineração da Clariant localizado em Belo Horizonte. Os parâmetros de flotação utilizados nos ensaios estão descritos na tabela 1.

**Tabela 1. Parâmetros utilizados nos testes de flotação em bancada**

| Parâmetro                                   | Valor          |
|---|----------------|
| Teor de sólidos da flotação (%)             | 50%            |
| Volume da cuba (l)                          | 1              |
| Rotação (rpm)                               | 800            |
| Tipo de depressor                           | Amido de milho |
| Concentração da solução de depressor        | 1%             |
| Relação amido:NaOH                          | 6:1            |
| Dosagem de depressor (g/t)                  | 600            |
| pH da flotação                              | 9,8            |
| Tempo de condicionamento do depressor (min) | 3              |
| Tempo de condicionamento do coletor (min)   | 1              |
| Tempo de flotação                           | Exaustão       |

Os ensaios de flotação foram realizados em diferentes circuitos com o objetivo de avaliar a condição de melhor seletividade para concentração do minério de ferro. Foram realizados ensaios rougher e rougher-cleaner variando os coletores e dosagens. Para todos os

ensaios o depressor amido de milho foi dosado na etapa rougher da flotação. A tabela 2 indica a variação dos coletores para cada circuito estudado.

Os coletores avaliados foram disponibilizados pela empresa Clariant. O FLOTIGAM 16424 é um coletor catiônico, tipicamente utilizado na concentração reversa de minério de ferro para flotar o quartzo. O coletor FLOTINOR 16551 é um coletor aniônico que será avaliado para flotação da dolomita presente na amostra.

**Tabela 2. Variação na dosagem dos coletores para os circuitos avaliados**

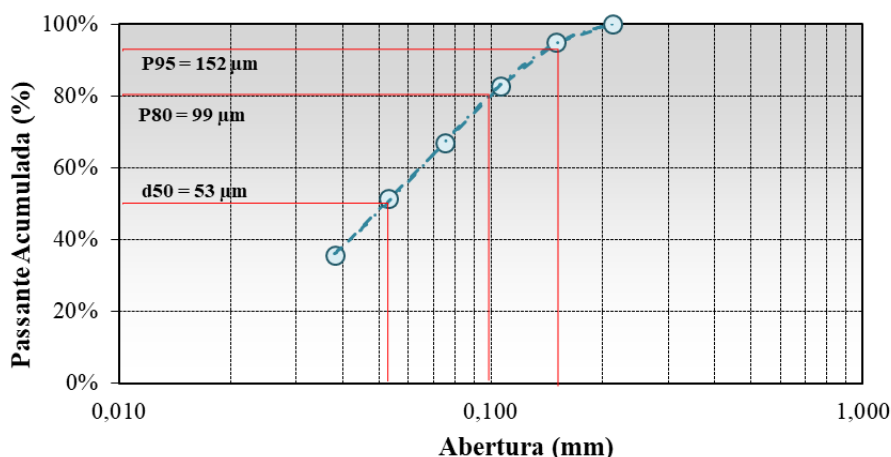
| Circuito    | Etapa rougher                                     | Etapa cleaner                        |
|-------------|---|--------------------------------------|
| Circuito 01 | FLOTIGAM 16424<br>(50 – 75 – 100 – 150 – 200) g/t | ---                                  |
| Circuito 02 | FLOTINOR 16551<br>(10 – 30 – 50) g/t              | FLOTIGAM 16424<br>100 g/t            |
| Circuito 03 | FLOTIGAM 16424<br>100 g/t                         | FLOTINOR 16551<br>(10 – 30 – 50) g/t |

Os parâmetros de resposta avaliados para os ensaios de flotação foram o teor de  $\text{SiO}_2$ , teor de Fe, teor de MgO e CaO no concentrado. Os valores targets considerados para os testes de flotação em bancada foram teor de ferro no concentrado superior a 65%,  $\text{SiO}_2$  inferior a 2%, CaO e MgO inferior a 1%.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização da amostra de minério

O gráfico da figura 1 indica a granulometria do minério de ferro. A amostra apresentou um top size em 212 micrometros, diâmetro médio de 53 micrometros e um P95 em aproximadamente 152 micrometros. Os valores são considerados típicos para uma amostra da alimentação da flotação.



**Figura 1. Granulometria da amostra de minério**

A composição química e mineralógica do minério está indicada nas tabelas 3 e 4, respectivamente. Os dados indicam que a hematita é o principal mineral minério presente na amostra. A ganga é composta majoritariamente por quartzo. Ocorre ainda um teor estimado de 6% de dolomita, indicada na análise química pelos teores de CaO e MgO. Considerando uma amostra da alimentação da flotação de usinas do Quadrilátero Ferrífero, os teores de CaO e MgO são considerados atípicos e acima de valores observados por outros autores como MAGALHÃES (2013).

Tabela 3. Análise química da amostra de minério por FRX

| SiO <sub>2</sub><br>(%) | Fe<br>(%) | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub><br>(%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(%) | Na <sub>2</sub> O<br>(%) | MgO<br>(%) | MnO<br>(%) | TiO <sub>2</sub><br>(%) | CaO<br>(%) | K <sub>2</sub> O<br>(%) | PPC<br>(%) |
|-------------------------|-----------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|------------|------------|-------------------------|------------|-------------------------|------------|
| 25,6                    | 45,9      | 0,07                                 | 0,65                                  | <0,1                     | 1,48       | 0,17       | 0,08                    | 2,21       | 0,01                    | 3,93       |

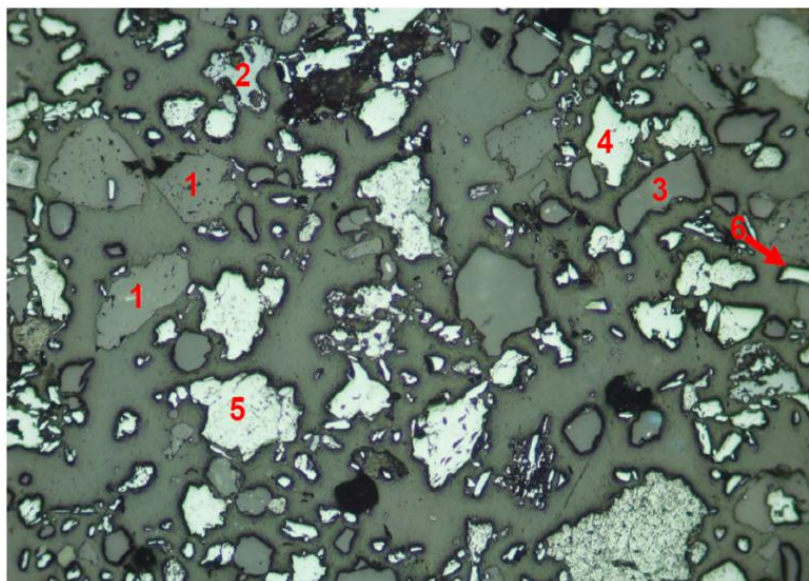
Tabela 4. Análise mineralógica por DRX

| Mineral  | Fórmula Química                     | % Estimada |
|----------|-------------------------------------|------------|
| Hematita | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | 64         |
| Quartzo  | SiO <sub>2</sub>                    | 24         |
| Dolomita | CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | 6          |
| Goethita | FeO(OH)                             | 6          |

A tabela 5 indica os resultados da análise de grau de liberação por MLR. O resultado indica uma boa liberação seja para os óxidos e hidróxidos de ferro ou para ganga. A figura 2 ilustra os minerais identificados na análise de liberação.

Tabela 5. Grau de liberação da amostra de minério

| Óxidos / Hidróxidos de ferro | Ganga |
|------------------------------|-------|
| 97,15                        | 90,07 |



- 1- Mineral carbonático
- 2- Goethita botrioidal
- 3- Quartzo inteiro
- 4- Hematita recristalizada
- 5- Hematita martítica
- 6- Hematita lamelar

Figura 2. Fotomicrografia da amostra de minério

### 3.1 Ensaios de flotação

O gráfico da figura 3 apresenta o resultado alcançado para a curva de dosagem com o coletor catiônico FLOTIGAM 16424. Observa-se que o coletor FLOTIGAM 16424 apresentou um bom desempenho para redução do teor de quartzo no concentrado, porém não apresentou boa seletividade para redução nos teores de CaO e MgO. Desta forma, mesmo alcançando teor de SiO<sub>2</sub> de 1%, o teor de ferro no concentrado não ultrapassou 62,5%.

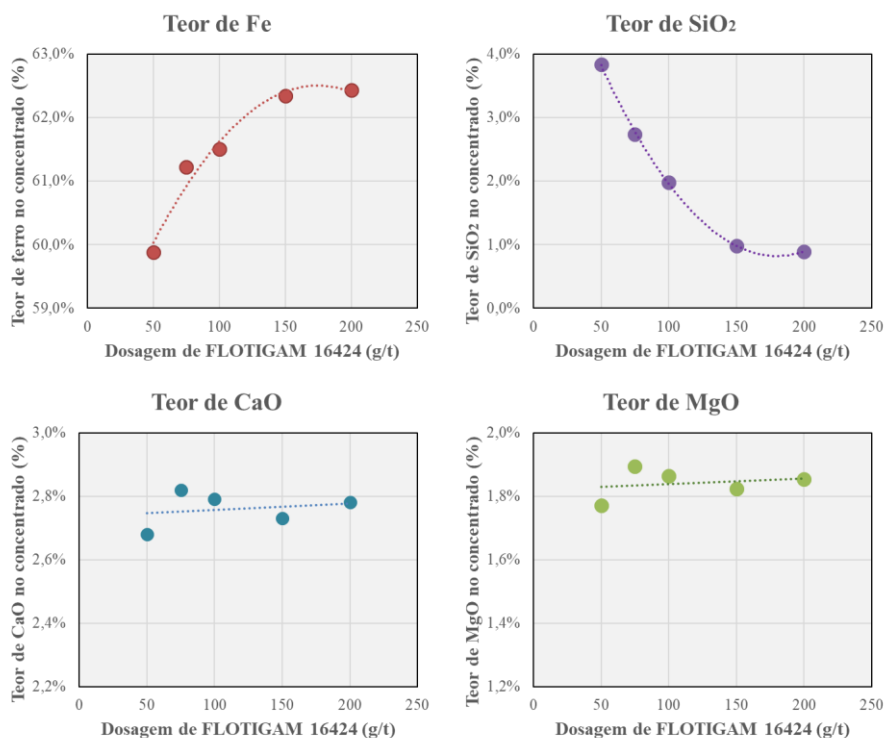


Figura 3. Resultados dos ensaios de flotação do circuito 01

Nos circuitos 02 e 03 o coletor FLOTINOR 16551 foi utilizado com o objetivo de flotar a dolomita. O gráfico da figura 4 apresenta a distribuição de CaO e MgO para o rejeito para os dois circuitos. Observa-se que o circuito 03, com a flotação de quartzo na etapa rougher e de dolomita na etapa cleaner apresentou melhores resultados para todas as dosagens avaliadas.

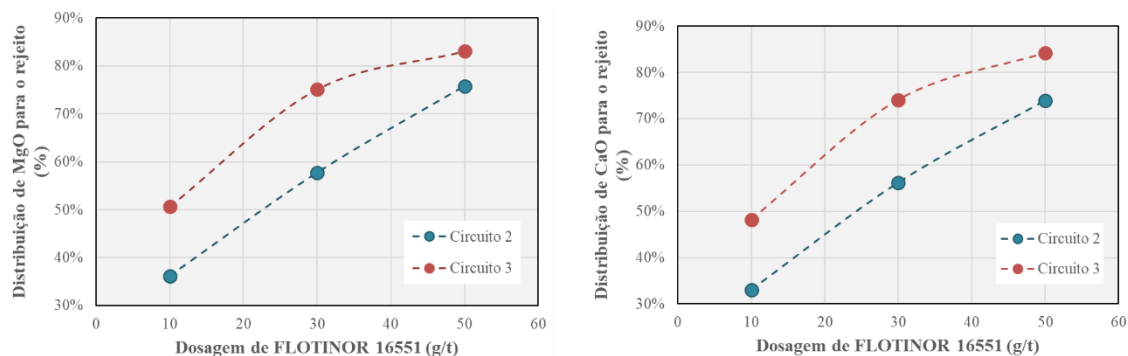


Figura 4. Distribuição de CaO e MgO para o rejeito para os circuitos 02 e 03

A figura 5 a seguir apresenta os resultados do circuito 03 em relação aos teores de Fe, SiO<sub>2</sub>, CaO e MgO. O ponto indicado no gráfico em 0 g/t corresponde ao resultado alcançado na flotação da etapa rougher com 100 g/t do FLOTIGAM 16424.

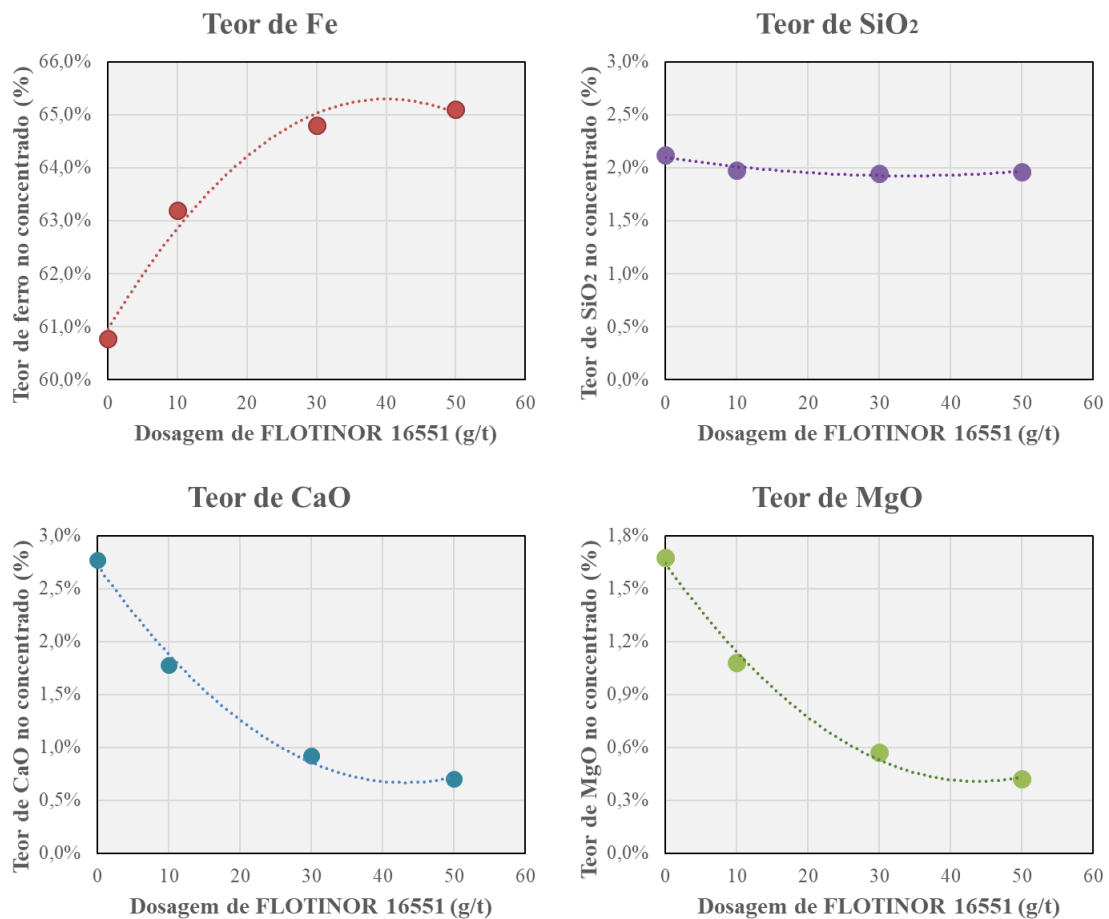


Figura 5. Distribuição de CaO e MgO para o rejeito para os circuitos 02 e 03

Os resultados indicam que, com a dosagem do coletor FLOTINOR 16551 na etapa cleaner, foi possível reduzir os teores de CaO e MgO no concentrado, evidenciando a seletividade deste coletor para flotação da dolomita presente na amostra de minério. O teor de ferro subiu de aproximadamente 61%, após flotação do quartzo na etapa rougher, para até 65%, alcançando o valor desejado para a flotação em bancada. O coletor FLOTINOR 16551 não apresentou redução no teor de quartzo do concentrado após a etapa cleaner.

A condição de 100 g/t do coletor FLOTIGAM 16424 na etapa rougher e 30 g/t de FLOTINOR 16551 na etapa cleaner possibilitou alcançar os teores desejados no concentrado com uma recuperação metalúrgica de 81,5%.

#### 4. CONCLUSÕES

As análises de caracterização mineral confirmaram a presença de aproximadamente 6% de dolomita na amostra da alimentação da flotação.

Considerando a flotação reversa de minério de ferro, utilizando apenas o coletor FLOTIGAM 16424 (éteramina), não foi possível flotar a dolomita com seletividade, limitando assim o teor de ferro do concentrado final (aproximadamente 62%).

Utilizando o coletor FLOTIGAM 16424 para flotar o quartzo na etapa rougher e o FLOTINOR 16551 para flotar a dolomita na etapa cleaner, foi possível alcançar resultados dentro dos valores desejados para o concentrado final: teor de ferro >65%, teor de quartzo <2% e teores de CaO e MgO <1%.

A condição de flotação proposta no presente trabalho apresenta-se como uma solução técnica viável para concentração de minério de ferro com a presença de dolomita

#### 5. REFERÊNCIAS

LELIS, D.F. **Influência dos cátions  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $Mn^{2+}$  na flotação catiônica de minério de ferro.** Ouro Preto. Escola de Minas, 2014, 89p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mineral).

SPIER, C.A. **Geoquímica e gênese das formações ferríferas bandadas e do minério de ferro da Mina de Águas Claras, Quadrilátero Ferrífero, MG.** Instituto de Geociências, USP, 2005. 298 p. (Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica)

MAGALHÃES, D.G. **Concentração do itabirito silicoso brando, da mina Casa de Pedra, visando à produção de pellet feed.** Escola de Minas, UFOP, 2013. 70 p. (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral)

PERES, A.E.C., ARAÚJO, A.A. **A flotação como operação unitária no tratamento de minérios.** In: chaves, a.p. (org.) Teoria e prática do tratamento de minérios: a flotação no brasil. Signus. V.4, 2ª ed., 484p., São Paulo, 2009.

COSTA, J.L. **Seletividade na flotação de minérios ferríferos dolomíticos.** Escola de Minas, UFOP, 2009. 136 p. (Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral)

ZHANG, H., LIU, W., HAN, C., WEI, D. **Intensify dodecylamine adsorption on magnesite and dolomite surfaces by monohydric alcohols.** Applied Surface Science. 2018, vol. 444, 729-738.

LOPES, G.M. **Coletores Potencialmente Seletivos na Separação de Apatita, Calcita e Dolomita.** Escola de Engenharia, UFMG, 2013. 165 p. (Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)

RASO, E.F., ALBUQUERQUE, R.O., LAMEIRAS, F.S., OLIVEIRA, M.F.M. **Estudo de flotabilidade para separação seletiva dolomita/hematita.** XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Belém, PA. Outubro, 2017.