



## FLOTAÇÃO DE MINÉRIO SULFETADO DE COBRE ENRIQUECIDO EM SÍLICA UTILIZANDO POLIACRILATO DE SÓDIO COMO REAGENTE AUXILIAR

QUEIROZ, H. S.<sup>1</sup>, HENRIQUES, A.B.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas - Mestrado Profissional. e-mail: henrique\_sq@yahoo.com.br

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

### RESUMO

No depósito de cobre Sossego, há dois corpos minerais maiores que já vêm sendo extraídos desde o início do projeto em 2004. Um terceiro corpo mineral denominado Pista, está em operação desde 2017. A calcopirita, principal mineral minério do depósito, encontra-se de forma mais disseminada no Pista em função da diferente formação geológica. O Pista é formado principalmente por rocha de litologia metavulcânica ácida, com elevado teor de sílica. O minério do Pista quando alimentado na usina de tratamento de minério, apresenta baixa recuperação metalúrgica. Foram realizados nesse estudo, análise da resistência do minério a moagem, análise de liberação e performance na flotação. O minério apresentou maior resistência a moagem e liberação da calcopirita mais fina. Para atingir o mesmo  $P_{80}$  de 212 $\mu$ m, foram necessários 23 e 15 minutos de moagem com os minérios Pista e padrão, respectivamente. A flotação do minério Pista é de baixa recuperação metalúrgica com os reagentes utilizados usualmente, sendo aproximadamente 5 pontos percentuais abaixo com mesma granulometria de alimentação. No entanto com a utilização de um dispersante como reagente auxiliar apresentou um aumento significativo de recuperação no ensaio de flotação e o melhor resultado foi de 94,95% com dosagem de 25 g/t do reagente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sulfeto de cobre; Dispersante; Poliacrilato de sódio; Flotação; Liberação.

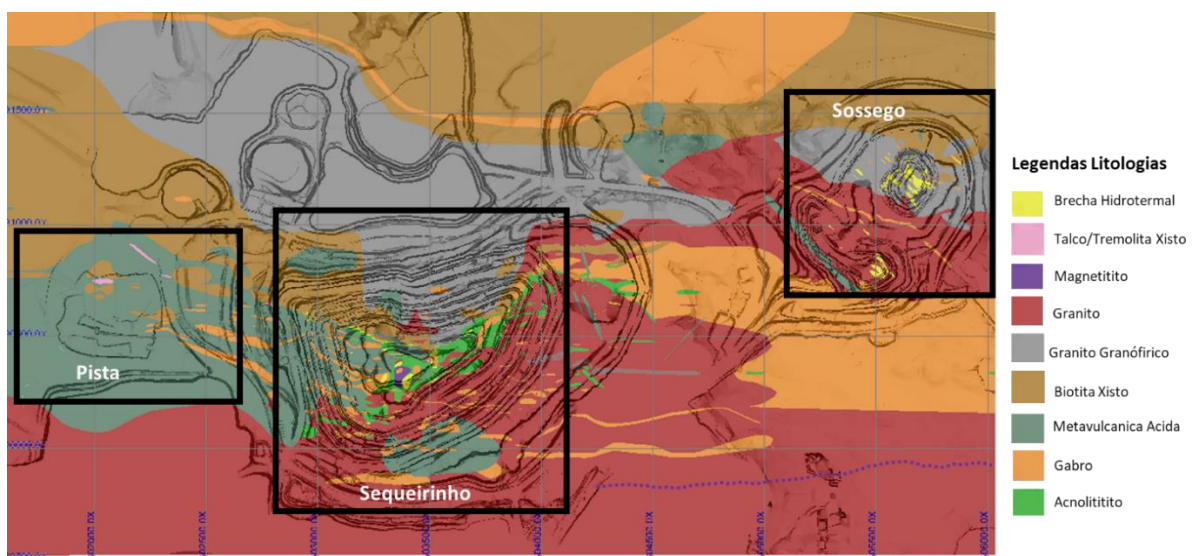
### ABSTRACT

On Sossego's copper deposit, there are two major mineral bodies that have been mined since the project beginning on 2004. A third mineral body called Pista has been in operation since 2017. Chalcopyrite, the main ore-mineral deposit, is more disseminated at Pista due to the different geological formation. The Pista is formed mostly by a lithology classified as acid metavolcanic rock, with high content of silica. Pista ore when fed at the beneficiation plant, presents low metallurgical recovery. In this study, analysis of the ore resistance to milling, liberation analysis and flotation performance were performed. The ore presented higher resistance to milling and finer liberation of chalcopyrite. To achieve approximately the same  $P_{80}$  of 212 $\mu$ m, were necessary 23 and 15 minutes of testing with the Pista and Standard ore respectively. The flotation of this ore has low metallurgical recovery with the reagents usually used, approximately 5 percentage points below with the same feed size. However, with the use of a dispersant as auxiliary reagent showed a significant increase in recovery in the flotation assay and the best result was 94.95% with 25 g/t dosage of reagent.

**KEYWORDS:** Copper sulfide; Dispersant; Sodium Polyacrylate; Flotation; Liberation.

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo de décadas a indústria mineral vem extraindo minério de cobre no mundo todo. Com o tempo os minérios de maior teor e mais fáceis de extrair estão exaurindo, sendo necessário a lavra e processamento de minérios com teores mais baixos e com características menos favoráveis a concentração. O presente trabalho consiste na avaliação da performance, em relação a moagem e flotação, de um minério presente no depósito mineral Sossego proveniente do corpo mineral denominado Pista, com ocorrência do mineral-minério mais disseminada quando comparada aos principais corpos minerais do depósito (Sossego e Sequeirinho). O Pista é formado principalmente por rocha de litologia metavulcânica ácida (MVA), apresentado na figura 1, e é composto por mais de 70% de quartzo enquanto os demais corpos possuem ~25% de quartzo e ocorrem principalmente em granitos e granófiros. O principal mineral minério presente do depósito é a calcopirita, mas há pequenas porções de bornita e calcocita.



**Figura 1 - Mapa litológico do complexo Sossego (2017)**

Cada mineral apresenta uma superfície única, resultante de uma composição química e estrutura cristalográfica própria. A superfície é formada a partir da ruptura de ligações ocorridas durante o processo de moagem. A ruptura de ligações fortes (covalentes ou iônicas) dá origem a sítios com bastante energia livre, formando superfícies polares. Por sua vez, a ruptura de ligações frágeis gera sítios que são pouco energéticos e superfícies apolares. O processo de flotação baseia-se no fato de que alguns minerais apresentam superfície polar e, portanto, têm facilidade de hidratação (hidrofílica), enquanto outros, com superfície apolar, têm preferência pelas bolhas de ar (hidrofóbica). Em geral estão em ordem decrescente de hidrofobicidade: sulfetos, carbonatos, fosfatos, óxidos e silicatos (Baltar, 2010).

A Flotação é um processo complexo, parcialmente governado pelo tamanho de partícula e sua topografia, pela composição e a natureza da superfície da partícula. Recuperação seletiva, contudo, é conduzida pela química das espécies presentes na superfície mineral. O agregado mineral partícula-bolha e sua estabilidade resultante é regida pelo equilíbrio da relação hidrofóbica/hidrofílica na superfície da partícula. Considerando que numerosas espécies minerais podem coexistir em uma superfície mineral simultaneamente, variações nesse balanço podem ter significativas consequências na recuperação (Chelgani e Hart, 2013).

A fim de otimizar o beneficiamento mineral por meio de flotação por espuma, uma avaliação detalhada da química da superfície de ambos minerais valiosos e não valiosos, é essencial. Idealmente, a avaliação da superfície deve ser pesada no contexto da flotação (teor e recuperação), juntamente com outras significativas contribuições para o processo de recuperação: química da solução, espécies minerais e grau de liberação. A abordagem para a melhoria do processo torna-se integrada, identificando potenciais controles da recuperação conectando vários fatores contribuidores prioritários como moagem, qualidade da água, controle de reagentes e dosagem (Chelgani e Hart, 2013).

Tradicionalmente os coletores aniônicos sulfídricos são aplicados na flotação dos sulfetos, em virtude de sua afinidade química com esses minerais. Trata-se de reagentes que tem a superfície ativa fraca na interface ar/líquido, o que exige espumantes para estabilizar o processo. Além disso, os minerais sulfetados possuem um grau de hidrofobicidade que é inferior somente aos naturalmente hidrofóbicos e aos metais nativos. Em virtude dessas características físico-químicas, os reagentes utilizados como coletores de sulfetos possuem cadeia hidrocarbônica relativamente curta, com no máximo cinco carbonos, mas há tiocompostos com até oito carbonos (Rosa e Rodrigues, 2013).

Reagentes dispersantes são basicamente modificadores e a grande maioria também são depressores ou ativadores. Em resumo, eles possuem múltiplas funções. Dispersantes podem ser compostos inorgânicos ou polímeros orgânicos. Os polímeros orgânicos utilizados como depressores, tem a mesma estrutura molecular que os reagentes utilizados como dispersantes e podem ser utilizados como reagentes de dupla função. A dispersão deve ser entendida com uma ação preventiva para a agregação de ultrafinos e evitar que argilominerais recubram a superfície do mineral. Do ponto de vista da flotação, a presença de ultrafinos podem inibir a flotação de vários minerais através da adsorção dos coletores pelos finos (Bulatovic, 2007).

A ação de dispersão dos polímeros orgânicos não está associada a adsorção do polímero em partículas maiores (isto é, quartzo, óxidos, etc.). Na verdade, esses polímeros fornecem condições no sistema sob as quais argila ou partículas ultrafinas são mantidas em um estado disperso. Se o recobrimento de finos no mineral é um resultado de forças eletrostáticas, então a ação do polímero como dispersante é diferente daquela de uma ação de um depressor pois o mecanismo de adsorção é diferente. Exemplo disso são os amidos modificados que são bons dispersantes para lamas de silicato, mas não são eficazes para a dispersão de argilas de caulinita e mica (Bulatovic, 2007).

A ação dispersante dos polímeros está associada ao número de grupos polares presentes, tais como (-COOH). Os polímeros podem desenvolver o papel de floculante, dispersante e depressor, havendo uma diferença na estrutura de cada um deles (SHIJIE, 1984). Segundo Costa (2014), A principal função do dispersante é induzir e aumentar a interação repulsiva entre as partículas, aumentando o valor absoluto do potencial de superfície das partículas (elevar a repulsão da dupla camada elétrica), fortalecer a repulsão estérica através da adsorção de macromoléculas sobre a superfície da partícula e repelir as películas de hidratação em torno da partícula em solução aquosa.

O efeito do tamanho e da liberação de partículas sobre o desempenho metalúrgico no processo de flotação é bem conhecido, tendo sido reportado logo nos primeiros estudos da área. (Gaudin, 1939, 1957 apud Santos, 2018). A estimativa visual da liberação de um minério em lupa e microscópio de luz refletida é um dos métodos mais simples da medição dessa

grandeza. O método desenvolvido por Gaudin (1975), consiste no exame minucioso dos produtos em faixas granulométricas estreitas.

O objetivo do presente trabalho é checar a performance do minério em relação sua resistência a moagem, liberação e flotação. Esta última será testada utilizando um reagente atípico para a rota original de beneficiamento que é a utilização de um dispersante, o Poliacrilato de sódio.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia do trabalho está resumidamente apresentada na Figura 2, através de diagrama com os principais ensaios envolvidos no trabalho laboratorial. Para comparação de performance com o minério em estudo, os ensaios foram realizados também com uma amostra de minério “Padrão” como referência que foi composta pelos dois corpos minerais principais do depósito, Sossego e Sequeirinho.

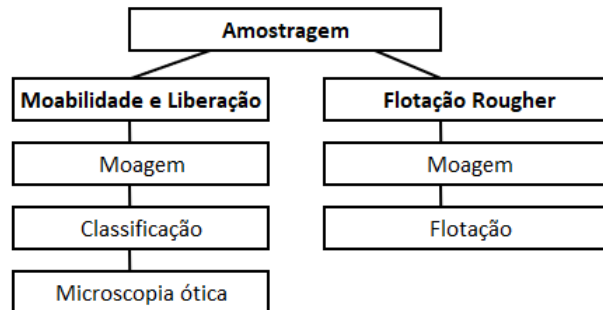


Figura 2 - Diagrama das principais etapas dos ensaios

### 2.1 Amostragem

Para o desenvolvimento deste estudo, foram selecionadas e coletadas amostras compostas de um furo de sonda representativo do minério uma vez que esse furo de sonda projetava para o pit final do corpo mineral. A escolha das amostras pelos critérios geológicos priorizou um teor médio de 0,78% Cu e litologia predominante sendo a Meta Vulcânica Ácida (MVA) com >70% de sílica. Essa é a característica mais abrangente do corpo mineral em estudo. A amostra foi feita a partir de incrementos de testemunhos com um intervalo contínuo com alta recuperação no avanço de lavra. Antes dos ensaios toda a amostra foi britada em 100% passante em 1mm e homogeneizada.

### 2.2 Ensaio de moabilidade e grau de liberação

Utilizou-se os tempos de 15, 17, 19, 21, 23 e 30 minutos para cada ensaio no moinho de barras (200 x 300 mm) e com 10 kg de corpos moedores (20 e 25mm de diâmetro). Foi feita a granulometria em peneira vibratória nas malhas: 425, 212, 150, 106, 75, 45 e 38µm. O grau de liberação foi realizado com auxílio de microscópio ótico através da contagem de grãos manual em secções polidas com o produto de cada moagem.

### 2.3 Ensaio de flotação rougher

Os reagentes utilizados nos testes de flotação foram: coletores PAX e DTP (amil xantato de potássio e ditiofosfato de sódio), espumantes MIBC e PPG (metil-isobutil-carbinol e polipropileno glicol) e NaOH como modificador de pH. As dosagens e os parâmetros do ensaio estão apresentados na tabela 1. O modificador foi utilizado para ajustar o pH para 9,5 em cada ensaio. Os ensaios foram realizados em triplicata.

#### 2.4 Ensaio de flotação Rougher com Poliacrilato de sódio

Foram realizados testes de flotação rougher com dosagem padrão dos reagentes além do teste de polímero orgânico em diferentes dosagens realizados em duplicata, em função da restrição de massa da amostra. Os testes foram realizados com os mesmos parâmetros apresentados na tabela 1. A única diferença é a dosagem do dispersante junto aos coletores nas concentrações de 25, 50, 75, 100, 125 e 150 g/t. Segundo informações do fabricante, o reagente tem como natureza química o Policarboxilato solúvel em água. O componente principal desse reagente é o Poliacrilato de Sódio (nº CAS 9003-04-7) e possui de 44-46% de concentração.

**Tabela 1 - Variáveis e parâmetros da Flotação**

Sequência	Variáveis	Etapa Rougher
Moagem	P <sub>80</sub>	*
	Massa	1600
	Rotação do jarro	45 rpm
	Dosagem PAX	4,8 g/t (60%)
	Dosagem DTP	6,0 g/t
	Tempo de moagem	*
Flotação	Volume cuba	3,3 L
	% sólidos	40%
	Rotação do rotor	1500 rpm
	Dosagem de MIBC	7,5 g/t
	Dosagem de PPG	7,5 g/t
	Condicionamento	1 min
	Flotação	5 min
	Dosagem de PAX	3,2 g/t (40%)
	Vazão de ar na cuba	7,3 NL/min
	Condicionamento	2 min
	Dosagem de MIBC	7,5 g/t
	Dosagem de PPG	7,5 g/t
	Condicionamento	1 min
	Flotação	4 min

\*Varia a granulometria de alimentação de acordo tempo de moagem do item 2.2

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 3, observa-se que o minério do Pista possui maior resistência a moagem. Para o mesmo tempo de moagem e nas mesmas condições o minério em estudo obteve um produto com o dobro de massa retida na malha de 212µm. O percentual retido na malha 212µm foi obtido com 23 minutos de moagem com o Pista e em 15 minutos com o Padrão.

Na tabela 2 estão apresentados os valores de P<sub>80</sub> obtidos com a moagem em diferentes tempos e calculados por interpolação linear e na figura 4 as curvas granulométricas dos ensaios de moabilidade.

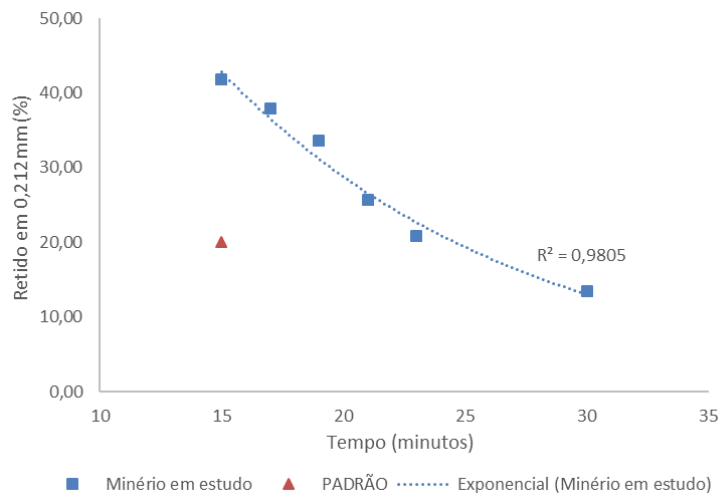


Figura 3- Tempo de moagem e percentual retido na malha 65#

Tabela 2 - Resultado do teste de moabilidade

Tempo de moagem (min)	P <sub>80</sub> (μm)
15	347
17	330
19	306
21	261
23	218
30	190

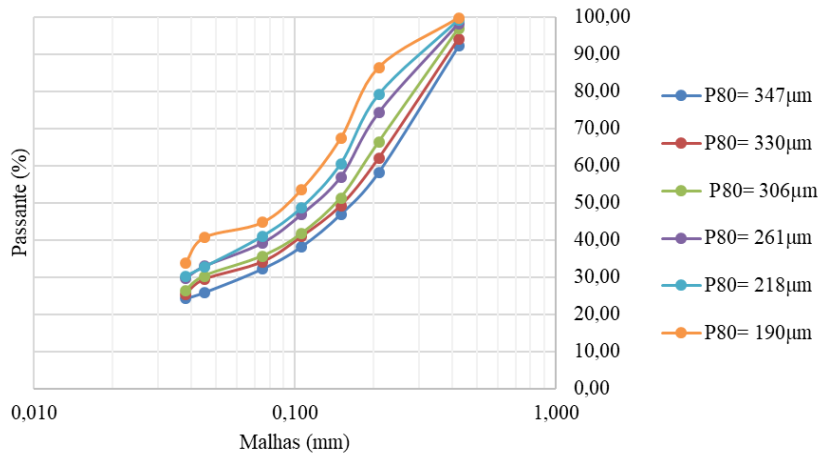
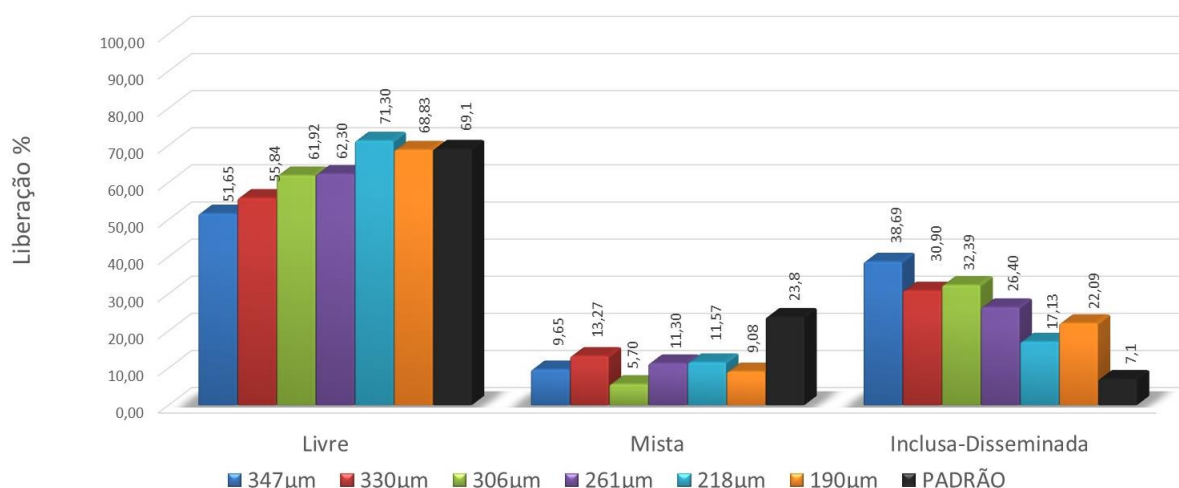


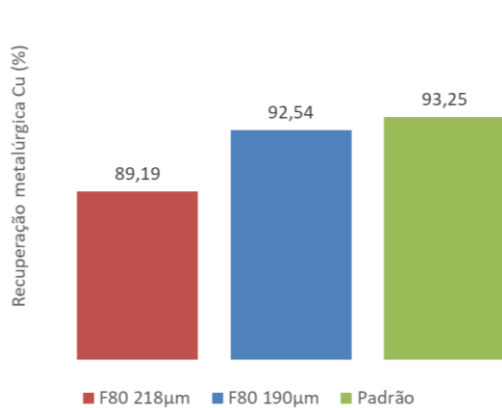
Figura 4 - Distribuição granulométrica dos produtos dos ensaios de moabilidade

Após a moagem em diferentes tempos, foi realizada a análise de liberação das partículas para cada produto, além da análise do minério padrão. Os resultados estão apresentados na figura 5. Para os tempos de moagem de 23 e 30 minutos, foram obtidos percentuais de partículas livres próximas e até maiores que no minério Padrão. No entanto, observa-se que a quantidade de partículas inclusas/disseminadas no minério em estudo é muito superior as do minério padrão.

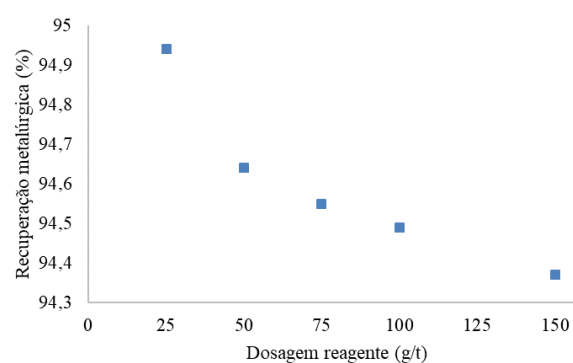


**Figura 5 - Classificação das partículas por distribuição de liberação**

O resultado da recuperação metalúrgica da Flotação com  $F_{80}$  de 218 e 190µm, apresentado na figura 6, mostrou que a flotação com menor granulometria é significativamente maior, mas mesmo assim é inferior a flotação do minério Padrão com  $F_{80}$  de 212µm. O resultado da flotação com  $F_{80}$  de 190µm é próximo do minério padrão, mas considerando que se trata de um minério mais tenaz e que tem que ser obtida uma granulometria mais fina, não é a alternativa mais atraente para processar o minério considerando o custo elevado da moagem em escala industrial. Pelo resultado da flotação de mesma granulometria e com os dados de liberação, pode-se afirmar que grande parte da diferença entre recuperações está associada as partículas mistas que são passíveis de flotação, presentes em maior quantidade no produto da moagem do minério padrão.



**Figura 6 - Flotação rougher sem dispersante**



**Figura 7 - Recuperação metalúrgica para diferentes dosagens do dispersante com  $F_{80}$  218µm**

A Figura 5 mostra que o minério está mais liberado em 218µm, ligeiramente maior que 190µm, e também com menos partículas inclusas-disseminadas. Na figura 6, a flotação foi realizada sem dispersante. Na figura 7, utilizou-se na flotação o dispersante; a dosagem de 25g/t foi a melhor. A utilização da fração granulométrica mais liberada (218µm) na flotação e o efeito da dispersão com a utilização do reagente reduzindo o slime coating favoreceram a melhor recuperação metalúrgica. O efeito da dispersão pode ter favorecido a adsorção do coletor na superfície da calcopirita.

#### 4. CONCLUSÕES

As condições naturais do minério Pista de maior resistência a moagem e liberação mais fina afetam significativamente a etapa da flotação. A presença do mineral minério de forma tão disseminada, mesmo que com granulometria mais fina na alimentação da flotação apresenta um desempenho pior que o minério padrão.

A utilização do dispersante Poliacrilato de sódio, junto ao condicionamento dos coletores, apresentou um aumento da recuperação metalúrgica de cobre para o minério em estudo e obteve melhor resultado para dosagem de 25g/t.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Vale e a toda a equipe de desenvolvimento de processo e geologia do Sossego pelo apoio no desenvolvimento deste estudo. Os autores agradecem também ao CPGEM e a Pró-reitoria de Pós-graduação da UFMG pela oportunidade e apoio.

#### 6. REFERÊNCIAS

Baltar, C. A. M., Flotação no tratamento de minérios. Recife: 2ª ed. UFPE. Fevereiro, 2010.

Bulatovic S M, Handbook of flotation reagentes. Chemistry, theory and practice: Flotation of sulfide ores. Vol 1. Elsevier Science & Technology Books, 2007.

Chelgani S. C., Hart B. TOF-SIMS studies of surface chemistry of minerals subjected to flotation separation – A review; Minerals Engineering 57, 1–11, 2014.

Costa, E. N. Peneiramento de partículas finas e ultrafinas com adição de dispersantes. Dissertação de mestrado. Universidade federal de Goiás – UFG. 2014.

Gaudin, A.M. Principles of mineral dressing. New Delhi: McGraw-Hill, 1975.

Rosa M. A. N. e Rodrigues W. J. Flotação de cobre em Sossego e Salobo. In. Chaves A. P. Teoria e Prática do tratamento de minérios; A flotação no Brasil – vol4. São Paulo: 3ª ed. Oficina de textos, p214-230, 2013.

Santos N. A., Galery R. Modelling flotation per size liberation class – Part 1 – Minimizing the propagation of experimental errors in the estimate of flotation recovery. Minerals Engineering nº128, p.254–265, 2018.

Shijie, T., Flotation of oxidized and complex lead-zinc ores: research and practice, International Conference Mineral Processing and Extractive Metallurgy, edited by Jones M. J.; Gill P., Yunnan Province, People's Republic of China, October to November, p. 541–552, 1984.