

# FLOTAÇÃO DE CALCOPIRITA UTILIZANDO CÉLULA MECÂNICA EM ESCALA CONTÍNUA SIMULANDO APLICAÇÃO DA JAMESON CELL

## CHALCOPYRITE FLOTATION USING MECHANICAL CELL IN CONTINUOUS-SCALE SIMULATING JAMESON CELL APPLICATION

**Gabriel Dutra de Oliveira**

Aluno de Graduação da UFRJ, 10º período do curso de Química Industrial  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Estagiário de agosto de 2023 a agosto de 2024

**Hudson Jean Bianquini Couto**

Orientador, Engenheiro Químico, D.Sc.  
hcouto@cetem.gov.br

### RESUMO

Visando melhorar a eficiência na flotação diversas células de flotação do tipo reator-separador foram desenvolvidas, entre elas a *Jameson Cell*. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do minério de cobre comparando o circuito com células mecânicas em com o circuito simulando a *Jameson Cell*. A amostra proveniente de um depósito localizado no Pará passou pelo processo de cominuição obtendo  $P_{80}$  em 106  $\mu\text{m}$  seguindo para a etapa de concentração por flotação em célula mecânica. Ambas as etapas foram alimentadas com teores de 0,8% para o Cu, 3,3% de S e 29,4% de Si. No primeiro circuito avaliado, RG/CL/SCV/RCL foi obtido um concentrado *releaner* com 22% de teor de Cu, 35% de S, 3% de Si (principal contaminante) e recuperação metalúrgica global de Cu de 80%. Em relação a flotação de pirita, foram obtidos afundados com teor de S entre 0,18-0,20% e concentrado da ordem de 7% de S. Aplicando o circuito RG/3CL/2SCV, foi obtido teor de cobre no concentrado final de 30% e teor de Si da ordem de 2% para uma recuperação global de Cu de 81%. E na flotação de pirita, foram obtidos afundados com teor de S de 0,4% e concentrado da ordem de 33% de S. A utilização do circuito simulando a *Jameson Cell* (RG/3CL/2SCV) demonstrou melhorar o desempenho na flotação de calcopirita e pirita apresentando teor e recuperação superiores ao circuito convencional (RG/CL/SCV/RCL), como evidenciado pelo grau de enriquecimento encontrado na etapa *cleaner* demonstrando sua eficiência na etapa de limpeza da flotação de calcopirita.

**Palavras-chave:** flotação; calcopirita; pirita; pH; *Jameson Cell*.

### ABSTRACT

Aiming to improve flotation efficiency, several reactor-separator flotation cells were developed, including the Jameson Cell. In this context, the objective of this work was to evaluate the performance of copper ore by comparing the circuit with mechanical cells and the circuit simulating the Jameson Cell. The sample from a deposit located in Pará went through the comminution process, obtaining  $P_{80}$  in 106  $\mu\text{m}$ , followed by the concentration stage by flotation in a mechanical cell. Both stages were fed with levels of 0.8% for Cu, 3.3% for S and 29.4% for Si. In the first circuit evaluated, RG/CL/SCV/RCL, a releaner concentrate with 22% was obtained. Cu content, 35% S, 3% Si (main contaminant) and overall Cu metallurgical recovery of 80%. In relation to pyrite flotation, sinks with S content between 0.18-0.20% and concentrates of the order of 7% S were obtained. Applying the RG/3CL/2SCV circuit, copper content was obtained in the final concentrate of 30% and Si content of around 2% for an overall Cu recovery of 81%. And in pyrite flotation, sinks with a S content of 0.4% and concentrates of the order of 33% S were obtained. The use of the circuit simulating the Jameson Cell (RG/3CL/2SCV) demonstrated improved performance in the flotation of chalcopyrite and pyrite presenting higher content and recovery than the conventional circuit (RG/CL/SCV/RCL), as evidenced by the degree of enrichment found in the cleaner stage, demonstrating its efficiency in the cleaning stage of chalcopyrite flotation.

**Keywords:** flotation; chalcopyrite; pyrite; Ph; *Jameson Cell*.

## 1. INTRODUÇÃO

O projeto em desenvolvimento é um depósito de cobre localizado na Província Mineral de Carajás (PA), com investimento estimado de US\$ 310 M. Projetado para tratar 4 Mt de minério anualmente, o circuito de processo proposto envolve três estágios de britagem, moagem e flotação, envolvendo células mecânicas convencionais e *Jameson Cell*.

O principal mineral portador de cobre, neste depósito, é a calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). A presença de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) associada ao mineral de interesse ocasiona a diminuição no desempenho da flotação, devido as interações galvânicas entre os dois minerais, formando espécies hidrofóbicas e ativando a superfície da pirita diminuindo a recuperação de calcopirita (CHEN; PENG, 2022;). Em razão das dificuldades na separação entre estes minerais, diversos métodos foram desenvolvidos visando deprimir a pirita na flotação de calcopirita, entre eles o aumento no pH da polpa (~11,5) usando hidróxido de cálcio e ditiofosfato como coletor de calcopirita (LEE; CHEN; PENG, 2022).

Visando aumentar a eficiência da coleta de partículas pelas bolhas de ar, na década de 90, foram desenvolvidas células de flotação do tipo reator-separador, como a *Jameson Cell*. Estudos apontaram que até 30% das partículas finas de uma planta foram recuperados usando este tipo de reator (BATTERSBY et al., 2011). A grande vantagem em relação as células mecânicas convencionais, está na alta eficiência na coleta de partículas no *downcomer*, na geração de grandes quantidades de bolhas finas (200-700  $\mu\text{m}$ ) e no elevado *holdup* presente nesse tipo de reator (HASSANZADEH et al., 2022), propiciando um melhor desempenho na flotação de finos.

O que restringe a aplicabilidade deste tipo de células é a possibilidade de reduzir a escala e realizar ensaios laboratoriais, uma vez que o dimensionamento em escala industrial se baseia nos dados laboratoriais fornecidos pelas células mecânicas. Tabosa et al. (2020) descreveram o procedimento para dimensionar em escala industrial a célula *Jameson* com base em testes de flotação em escala de bancada. De acordo com os autores, a célula *Jameson* pode ser modelada usando dados experimentais obtidos através de testes com três estágios da etapa *cleaner* em células mecânicas utilizando uma polpa diluída (~10% $\text{s}$  (p/p)) (HASSANZADEH et al., 2022).

## 2. OBJETIVO

Avaliar o desempenho do minério de cobre sulfetado e de pirita, em termos de teor e recuperação de Cu e S, aplicando o circuito de processo proposto utilizando células mecânicas e, de forma comparativa, avaliar um novo circuito com intuito de simular a performance da máquina de flotação *Jameson Cell*.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Preparo da Amostra

Foi recebido no CETEM cerca de 350 kg de amostra em forma de furos de sonda, divididas em 14 bombonas de 50L, provenientes do depósito localizado no PA. A amostra passou pelas etapas de britagem e moagem, e o produto gerado com  $P_{80}$  em 106  $\mu\text{m}$  foi homogeneizado e alíquotas foram retiradas para caracterização física (granulometria por peneiramento), química (fluorescência de raios X) e para alimentar os ensaios de flotação. A remoagem durante a flotação foram realizados em moinho de pinos fabricados pela *Eriez*, usando como corpo moedor esferas de cerâmica.

### 3.2 Ensaios de Flotação em Escala Piloto

Os ensaios de flotação foram realizados em células mecânicas em escala contínua na Mini Planta Piloto (MPP). A MPP é composta por dois tanques pulmão (50L) com agitadores e bombas peristálticas de recirculação, doze células de flotação com volume útil de 1,3L operadas

em escala contínua, medidores de vazão e pH, agitadores, bombas controladoras de pH e bombas dosadoras de reagentes.

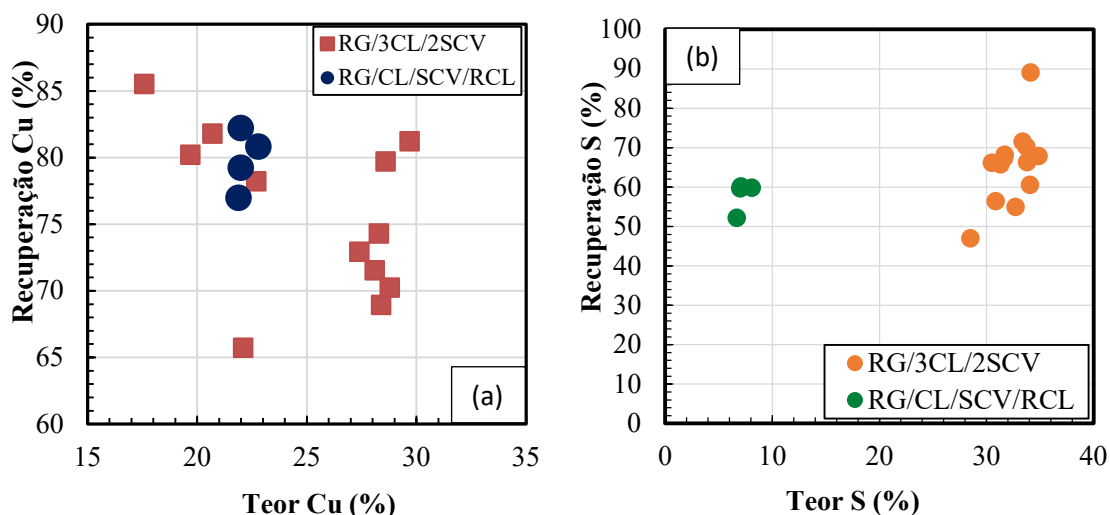
O primeiro circuito de flotação testado foi o definido em fases anteriores do projeto que inclui flotação *rougher* de Cu, remoagem do concentrado *rougher*, *cleaner*, *scavenger* do *cleaner*, *re-cleaner* e flotação de pirita. O segundo circuito avaliado foi definido com o objetivo de simular a aplicação da célula de flotação *Jameson Cell* que será aplicada na etapa *cleaner* em escala industrial, em escala MPP. Este é composto pela flotação *rougher* de Cu, remoagem do concentrado *rougher* (~25 µm), três etapas *cleaner*, duas etapas *scavenger* da *cleaner* e por fim a flotação de pirita. Na flotação de calcopirita foi utilizado o ditiofosfato como coletor (~35 g/t); o metil-isobutil-carbinol (MIBC) como espumante (~20 g/t) e soluções de hidróxido de cálcio (leite de cal) como regulador de pH para o valor de 11,5. Na flotação de pirita Amil Xantato de Potássio (PAX) como coletor (~ 55 g/t); 20 g/t de MIBC e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para o ajuste de pH em 7.

Foram realizados 21 testes de flotação na MPP, sendo 4 testes com circuito RG/CL/SCV /RCL e 17 realizados com circuito RG/3CL/2SCV simulando a utilização da célula Jameson. Na etapa *rougher* foi usado rotação de 1155 (rpm), com velocidade superficial de ar (Jar) de 0,3 cm/s e tempo de residência de 18 e 21 minutos. Nas etapas *scavenger* 1 e 2 a rotação foi de 926 rpm, com Jar entre 0,1 - 0,2 cm/s e tempo de residência de 4-7 e 16 minutos. As *cleaner* 1,2 e 3 tiveram rotação de 848 rpm, com Jar de 0,1 - 0,2 cm/s. Por fim, na flotação de pirita os parâmetros definidos foram 913 rpm de rotação, 0,2 cm/s de Jar e tempo de residência de 8 e 15 minutos.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

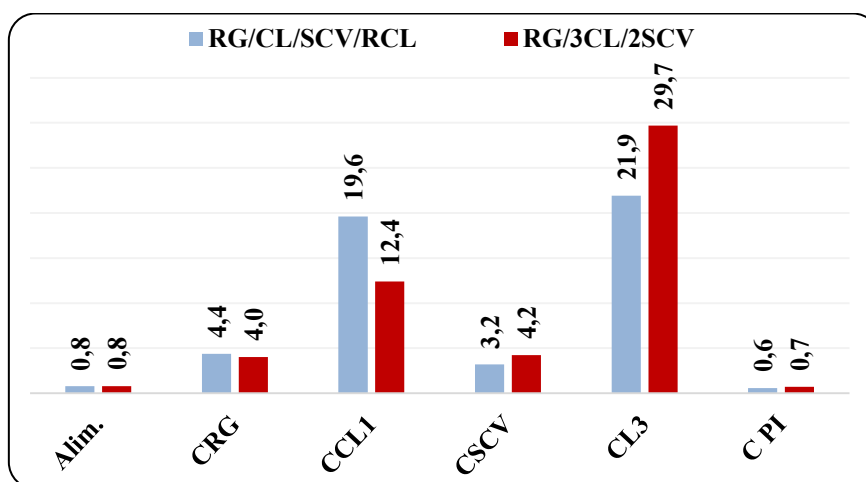
A Figura 1a representa o gráfico da recuperação *versus* o teor de Cobre no concentrado *cleaner*. Ambos os circuitos foram alimentados com teores de 0,8% para o Cu, 3,3% de S (enxofre) e 29,4% de Si. O circuito definido em etapas anteriores do projeto (RG/CL/SCV/RCL) apresentou teores de 22% e recuperações variando de 76% a 83%. Ao analisar a granulometria antes e após a remoagem do concentrado *rougher* foi possível verificar que tal remoagem não apresentou efeitos relevantes na granulometria, pois a alimentação do moinho analisou P<sub>80</sub> em 28 µm e o produto P<sub>80</sub> em 25 µm. Os testes com o circuito simulando a célula *Jameson* (RG/3CL/2SCV) apresentaram teores entre 17% e 28% com recuperações que variam de 65% a 86%.

A Figura 1b apresenta o gráfico de teor *versus* recuperação na flotação de pirita, que foi alimentada com os rejeitos da etapa *rougher* e *scavenger*, apresentando teor de 0,15% de Cu, 2,1-3,3% de S e 30% de Si. A etapa 1 apresentou teor de enxofre de 6,7-8,1% com recuperações na faixa de 60%. O circuito simulando a *Jameson* apresentou teor de enxofre entre 29% e 38% com recuperações de 46-90%, assim a segunda etapa apresentou um desempenho superior na flotação de pirita.



**Figura 1:** (a) Teor versus recuperação de Cobre e (b) Teor S versus recuperação de enxofre.

A Figura 2 ilustra o comparativo dos teores de Cu nos dois circuitos avaliados, nas etapas de concentração dos testes que apresentaram o melhor desempenho metalúrgico. A partir de um teor de Cu na alimentação de 0,8%, foi obtido 4% de teor de Cu, na etapa *rougher* para ambos os circuitos sendo esse o maior grau de enriquecimento com 5 vezes. Aplicando o circuito RG/3CL/2SCV, o concentrado *rougher* enriqueceu cerca de 2,4 vezes nas etapas *cleaner* atingindo o teor de 29,7%. Já aplicando o circuito RG/CL/SCV/RCL o grau de enriquecimento foi de 1,1 vezes na etapa *releaner* em relação ao concentrado *cleaner* 1. O grau de enriquecimento dos concentrados *scavenger* 1 e 2 foram de 1,1 e 2,8 vezes em relação ao rejeito das três etapas *cleaner*.



**Figura 2:** Grau de enriquecimento de Cobre por etapa

Na primeira etapa do estudo foi avaliado o desempenho metalúrgico do minério de cobre sulfetado e de pirita aplicando o circuito RG/CL/SCV/RCL, que foi proposto em estudos de flotação anteriores em escala bancada, reproduzido em escala contínua na mini planta piloto (MPP), utilizando células mecânicas. Como consequência, foi obtido um concentrado *releaner* com 22% de teor de Cu, 35% de S, 3% de Si (principal contaminante) e recuperação metalúrgica global de Cu de 80%. Dos 20% do Cu perdido no circuito de flotação de cobre, 16% se reportam para o concentrado de pirita. Em relação a flotação de pirita, foram obtidos afundados com teor de enxofre entre 0,18-0,20% e concentrado da ordem de 7% de S.

A segunda etapa consistiu no desenvolvimento do circuito RG/3CL/2SCV, também em escala MPP utilizando células mecânicas, aplicando o procedimento proposto por Tabosa et al. (2020). O melhor teste obteve teor de cobre no concentrado final de 30% e teor de Si da ordem de 2% para uma recuperação global de Cu de 81%. Dos 19% do Cu perdido no circuito de flotação de cobre, 3% são no rejeito *rougher* e 16% do rejeito *scavenger 2*. Em relação a flotação de pirita, foram obtidos afundados com teor de enxofre de 0,4% e concentrado da ordem de 33% de S. A recuperação metalúrgica de Cu em torno de 81%, abaixo do esperado que seria em torno de 92%, pode ser explicada pelo baixo tempo de residência na etapa *scavenger 2* de 4 min, valor abaixo do planejado que foi de 14 min.

Os resultados encontrados demonstram que o circuito RG/3CL/2SCV, simulando a aplicação da *Jameson Cell* apresentou melhor desempenho na flotação de cobre apresentando tanto teor quanto recuperação maior que o encontrado no circuito RG/CL/SCV/RCL, corroborando o estudo de Moore (2021), no qual a utilização da *Jameson Cell* no tratamento de 900t/h de cobre apresentou uma melhora de 4% no teor quando comparado a célula convencional.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados de processo indicam que é possível produzir concentrados de calcopirita com as especificações químicas que atendam para a alimentação dos *smelters*. Também foi observado que o concentrado de pirita gerado pode atender as especificações para produção de ácido sulfúrico assim como o teor de S na fração afundada dessa flotação pode atingir valores abaixo de 0,3-0,4%. A utilização de 3 etapas *cleaner a 10%<sub>s</sub>* simulando a *Jameson Cell* demonstrou ser eficiente ao produzir concentrados de calcopirita com teor de 30% e recuperação de 81%.

## 6. AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientador e a toda equipe que auxiliou durante o trabalho, ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) pelo apoio e infraestrutura e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHENG, X.; IWASAKI, I. Pulp Potential and Its Implications to Sulfide Flotation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 11, n. 4, p. 187-210, 1 dez. 1992.

HASSANZADEH, A. et al. Technological assessments on recent developments in fine and coarse particle flotation systems. *Minerals Engineering*, vol. 180, p. 107509, 1 abr. 2022.

LEE, R.L.J.; CHEN, X.; PENG, Y. Flotation performance of chalcopyrite in the presence of an elevated pyrite proportion. *Minerals Engineering*, vol. 177, 1 fev. 2022.

LEE, R.L.J.; PENG, Y. Evaluate the Depression of High-Concentration Pyrite in Copper Flotation by High-Chromium Grinding Media. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2023.

Moore, P., 2021. Flotation factor, *International Mining*.

TABOSA, E. et al. Modeling pneumatic flotation cells for circuit design and optimization. In: 2020, Cape Town, South Africa. XXX International mineral Processing Congress (IMPC). Cape Town, South Africa: [s. n.], 2020. p. 3081-3091.