

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA REMOAGEM NA CONCENTRAÇÃO DE COBRE EM ESCALA PILOTO

EVALUATION OF THE EFFECT OF REGRINDING ON COPPER CONCENTRATION IN PILOT SCALE

Gabriel dos Santos da Silva

Aluno de Graduação de Engenharia Química, 8º período, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Período PIBITI/CETEM: agosto de 2024 a agosto de 2025
gabriel0401@eq.ufrj.br

Elves Matiolo

Orientador, Engenheiro de Minas, D.Sc.
ematiolo@cetem.gov.br

Gabriel Dutra de Oliveira

Coorientador, Químico Industrial, D.Sc.
gabrieldutr.o@gmail.com

RESUMO

O cobre é um elemento amplamente beneficiado por flotação, porém, a oxidação da calcopirita (CuFeS_2) compromete a adsorção dos coletores na superfície do mineral, reduzindo a eficiência da flotação. Assim, a remoagem torna-se fundamental, pois promove a liberação da calcopirita, aumentando sua exposição superficial e otimizando a recuperação de Cu. O objetivo desse trabalho foi analisar o efeito da remoagem às etapas de flotação visando concentrado final com um maior teor e recuperação de Cu. Os resultados foram avaliados a partir da comparação entre dois circuitos com etapas *rougher/cleaner/recleaner/scavenger* com a coluna de flotação de 2", sendo realizados testes com a remoagem previamente à etapa *cleaner*. No circuito sem remoagem, foi obtido teor de cobre no concentrado final de 20 a 22% com recuperação média de 90%. Com a aplicação da remoagem, obteve-se teor de cobre de 29 a 30% com recuperação média de 79%. Foi verificado que a remoagem auxilia na liberação da calcopirita do mineral de ganga tornando-a mais apta à flotação e consequentemente, alcançando um produto final com um maior teor e recuperação de cobre.

Palavras chave: Cobre, calcopirita, remoagem, flotação.

ABSTRACT

Copper is a metal widely beneficiated by flotation; however, the oxidation of chalcopyrite (CuFeS_2) hinders the adsorption of collectors on the mineral surface, reducing the efficiency of the process. Thus, regrinding becomes essential, as it promotes the liberation of chalcopyrite, increases its surface exposure and optimizes Cu recovery. This study aimed to analyze the effect of regrinding on the flotation stages, targeting a final concentrate with higher copper grade and recovery. The results were evaluated by comparing two circuits composed of rougher/cleaner/recleaner/scavenger stages using a 2" flotation column, with tests performed including regrinding prior to the cleaner stage. In the circuit without regrinding, the final concentrate showed a copper grade of 20–22% with an average recovery of 90%. With regrinding, the copper grade increased to 29–30%, with an average recovery of 79%. It was observed that regrinding assists in liberating chalcopyrite from the gangue minerals, making it more amenable to flotation and, consequently, resulting in a final product with improved copper grade and recovery.

Keywords: Copper, chalcopyrite, regrinding, flotation.

1. INTRODUÇÃO

O cobre é usualmente encontrado associado a outros elementos químicos formando minerais que podem ser classificados como sulfetados e oxidados (ANDRADE et al., 2021). Dentre os minerais sulfetados, destaca-se a calcopirita (CuFeS_2), que é o mineral portador de cobre mais abundante e também sua principal fonte comercial, correspondendo a 70% da produção mundial desse elemento (FAIRTHORNE et al, 1997). Do ponto de vista econômico, o Brasil no primeiro trimestre de 2025, encontra-se em décimo quarto lugar no quesito referente à produção mundial de cobre e em décimo segundo lugar em reservas mundiais de cobre, sendo exportados nesse período, aproximadamente 321 mil toneladas desse elemento. (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2025).

A concentração de calcopirita ocorre a partir do processo de flotação, através da modificação da superfície do mineral, a qual permite a adsorção dos coletores, usualmente xantatos, tornando a superfície hidrofóbica, possibilitando assim, a aderência dos minerais nas bolhas geradas, enquanto os minerais de ganga permanecem na fração afundada devido ao seu caráter hidrofílico. (RIOS et al, 2025). Uma das problemáticas associadas à flotação de cobre é a oxidação da calcopirita que pode gerar espécies hidrofílicas como $(\text{Cu}(\text{OH})_2)$ ou $(\text{Fe}(\text{OH})_2)$ que cobrem a superfície do mineral e impedem a adsorção do coletor xantato, impactando negativamente na recuperação de Cu (EKMEKÇI & DEMIREL, 1997).

Estudos como de Bruckard, Sparrow, Woodcock (2011) apontam que a remoagem previamente a flotação é usualmente aplicada no beneficiamento de minérios de sulfetos de cobre. O processo de remoagem consiste na redução do tamanho da partícula, que culmina na liberação da calcopirita e posterior exposição da nova superfície mineral aos reagentes. Contudo, o processo de moagem excessiva, pode acarretar problemas como carreamento da polpa, devido ao surgimento de partículas ultrafinas (PEASE et al., 2006).

A presença de partículas finas (40 até 13 μm) e ultrafinas (Abaixo de 13 μm) é um dos desafios na flotação atualmente, a qual estima-se que 1/6 de cobre é perdido nessa granulometria (SUBRAHMANYAM & FORSSBERG, 1990). A flotação em coluna é amplamente utilizada para mitigar esse problema, pois o contato bolha e mineral é favorecido por meio do escoamento contracorrente, além de reduzir o arraste hidráulico devido à água de lavagem (FINCH, 1995).

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o efeito da remoagem sobre a recuperação de cobre a partir da flotação de calcopirita em escala mini planta piloto em associação à coluna de duas polegadas (2").

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da Amostra

A amostra passou pelas etapas de britagem e moagem, o produto gerado foi homogeneizado (pilha cônica e alongada) e foram retiradas alíquotas para realizar a caracterização física (distribuição granulométrica por peneiramento a úmido e determinação de densidade por picnometria a gás hélio), química (fluorescência de raios X).

3.2. Ensaios de Flotação

Os ensaios de flotação foram realizados em células mecânicas na Mini Planta Piloto (MPP) em associação com a coluna de flotação de 2". O primeiro circuito de flotação avaliado (circuito 1) foi definido com as seguintes etapas: *roughe/cleaner/scavenger/recleaner*, sendo a etapa *cleaner* realizada na coluna de 2". O segundo circuito de flotação teve o intuito de analisar o efeito da remoagem na recuperação de calcopirita, neste circuito foi mantida as etapas supracitadas com a adição da remoagem do concentrado *roughe*.

A flotação sucedeu-se a partir do armazenamento e recirculação da polpa com 50% de sólidos que posteriormente, foi diluída a 35% de sólidos com adição de água de processo com o auxílio de dois tanques pulmão de 50 L, através do uso de uma bomba peristáltica, a polpa foi direcionada para a primeira célula mecânica da MPP para o condicionamento. Os reagentes utilizados foram: Hidróxido de cálcio 1% ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para ajuste de pH em 11,5, INT 238 (0,05%) como coletor e INT 102 (0,02%) como espumante. As etapas de condicionamento ocorreram em uma faixa de 3 a 4 minutos e o ar na flotação foi injetado com auxílio de rotâmetros de ar.

Foram realizados 10 testes de flotação na MPP, sendo 5 testes para cada circuito com os parâmetros descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros da flotação.

Parâmetros	Rougher	Scavenger	Cleaner	Recleaner
Rotação (RPM)	890	538	-	350
Velocidade superficial do ar - J_{ar} (cm/s)	0,3	0,3	0,8	0,1
Velocidade superficial da água - J_{al} (cm/s)	-	0,1	-	-
Tempo de residência (min)	25	5 – 11	7 – 25	2 – 6
Dosagem coletor ((INT 238) (g/t)	53	9	9	-
Dosagem de espumante ((INT 102) (g/t)	21	-	-	0 – 4
pH (faixa), controlado por $\text{Ca}(\text{OH})_2$	11,5	11,5	11,5	11,5

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade da amostra medida por picnometria a gás hélio foi de 3,00 g/cm³. A distribuição granulométrica da alimentação da flotação, apresentou um P_{80} de 94 μm com 60% abaixo de 44 μm . A Figura 1 apresenta a composição química presente no produto pós-moagem classificado em suas diferentes granulometrias, a qual é possível observar que abaixo de 44 μm apresenta um maior teor de Cu (1,5%), enquanto Fe tem um aumento a medida que a granulometria diminui de 10,1% a 14,1%. Já o Ni e S se mantiveram constante conforme a diminuição da granulometria.

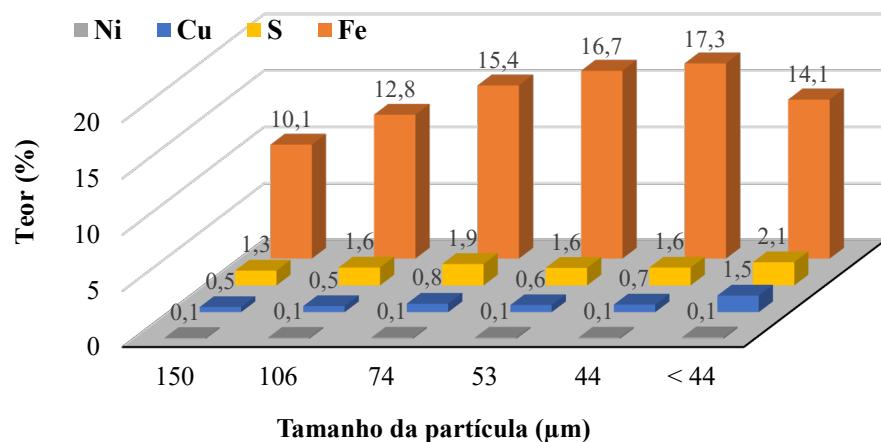


Figura 1: Composição química do ROM em diferentes faixas granulométricas.

O concentrado *rougher*, que alimentou o moinho, constatou P_{80} de 50 μm ao passo que o produto dessa remoagem, que foi direcionado à etapa *cleaner*, apresentou em média, P_{80} de 27 μm .

A Tabela 2 apresenta a composição química da amostra cabeça que foi realizada através do método FRX.

Tabela 2. Composição química da amostra cabeça.

Cu (%)	Fe (%)	Ni (%)	S (%)
1,15	14,2	0,13	1,9

A Figura 2 apresenta a curva de teor versus recuperação de cobre no concentrado final a partir dos circuitos realizados. A partir do gráfico, no circuito 1, o teor de cobre no concentrado manteve-se em uma faixa de 20 a 22%, enquanto a sua recuperação variou de 91 a 94%. Já no circuito 2, com a remoagem, o teor variou de 27 a 30%, com recuperação de 83 a 90%.

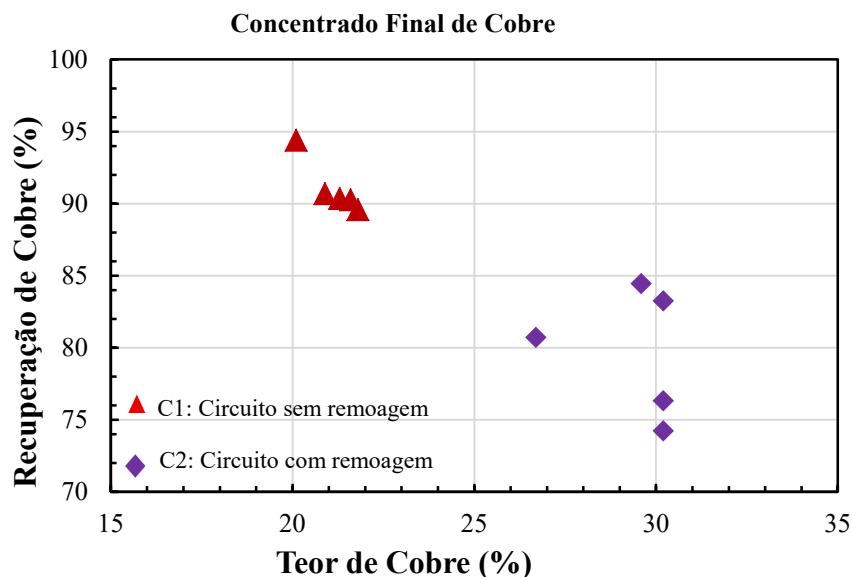


Figura 2: Curva de teor versus recuperação de cobre no concentrado final.

A Figura 3 apresenta o gráfico de comparação de teores ao decorrer das etapas de flotação entre o circuito 1 e 2 para avaliar o efeito da remoagem. Na alimentação, o teor de Cu foi de 1,15% aproximadamente. O circuito 1 apresentou um teor de 19,5% de cobre no concentrado *rougher*, com enriquecimento de 15 vezes e evidenciou-se um decréscimo em relação à etapa sucessiva de 14,1% no concentrado *cleaner*. Na etapa *scavenger*, obteve-se um teor de 19,6% de cobre, enquanto na última etapa, *recleaner*, alcançou-se um teor de 21,8% de Cu. No circuito 2, na etapa *rougher*, o teor de cobre teve um aumento significativo para 20,4 %, já na etapa *scavenger*, apresentou um teor de 20,5%. Nas etapas *cleaner* e *recleaner*, registraram uma elevação no teor de cobre, com 24,2% e 30,3% respectivamente.

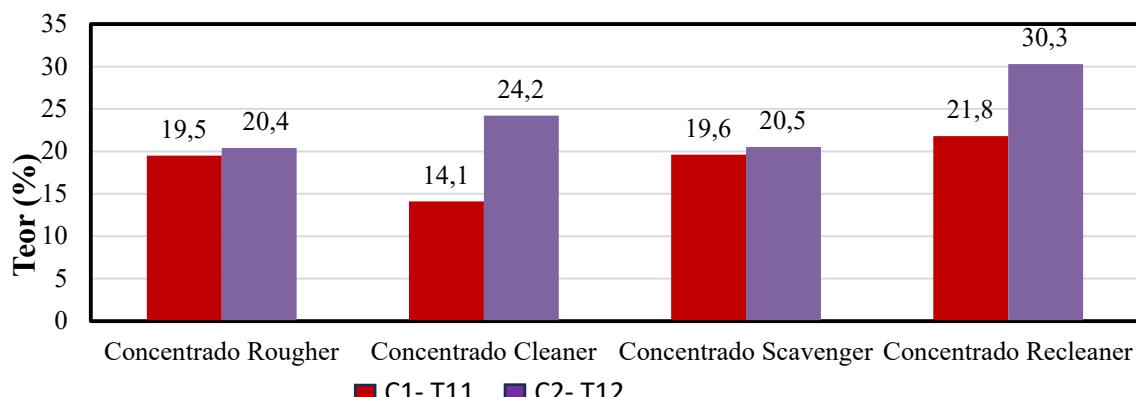


Figura 3: Comparativo de teor de cobre nas etapas de concentração da flotação.

5. CONCLUSÃO

Os testes realizados do circuito 1 e 2 mostraram um maior teor de cobre obtido a partir da utilização da remoagem, alcançando um concentrado final com teor em média de 28,5% e recuperação em média de 87%, enquanto o circuito sem essa etapa crucial obteve em média um teor de 21% com recuperação de 93%. Assim, é possível concluir que após a remoagem do concentrado *rougher* (P_{80} de 27 μm), ocorre a liberação da calcopirita associado a minerais de ganga, o que consequentemente, torna a flotação mais efetiva com resultados melhores em quesito de teor. Diante desses resultados, torna-se notório a relevância da remoagem para atingir altos teores de cobre.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Elves Matiolo pelo apoio, ao CETEM/MCTI e seus servidores pela estrutura e suporte, e ao CNPq pela concessão da bolsa de Iniciação Científica (IC).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Balanço Mineral Brasileiro: Cobre – 2001.** Rio de Janeiro: ANM, 2001. Atualizado em 22 jan. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/anm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-cobre>.

ANDRADE, M.L.A.; CUNHA, L.M.S. de.; GANDRA, G.T. **O cobre brasileiro em ascensão no cenário mundial.** Banco Nacional de Desenvolvimento Social. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n° 13, p. 65-94, mar. 2001

BRUCKARD, W.J.; HILL, R.J.; LASKOWSKI, J.S. **A review of the effects of the grinding environment on the flotation of sulphide minerals.** International Journal of Mineral Processing, v. 100, p. 1-13, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.04.001>.

EISTNER, T.; PEUKER, U. A.; RUDOLF, M. **How gangue particle size can affect the recovery of ultrafine and fine particles during froth flotation.** Minerals Engineering, v. 109, p. 1 - 9, fev. 2017. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.02.005.

EKMEKÇİ, Z.; et al. **Effects of galvanic interaction on the collectorless flotation of chalcopyrite and pyrite.** International Journal of Mineral Processing, v. 50-51, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(97\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(97)00050-1).

FAIRTHORNE, G.; FORNASIERO, D.; RALSTON, J. **Effect of oxidation on the collectorless flotation of chalcopyrite.** International Journal of Mineral Processing, v. 49, p. 31-48, 1997.

FINCH, J. A. **Column flotation: A selected review – Part IV: Novel flotation devices.** Minerals Engineering, v. 8, n. 6, p. 587 - 602, jun. 1995. DOI: 10.1016/0892-6875(95)00023-J.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Setor Mineral – 1º trimestre de 2025 – 1T25. Brasília: IBRAM, 2025.** Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2025/05/Setor-Mineral-1o-trimestre-2025-%E2%80%93-1T25_v2.pptx.pdf.

PEASE, J.D.; CURRY, D.C.; YOUNG, M.F. **Designing flotation circuits for high fines recovery.** Minerals Engineering, v. 19, n. 6-8, p. 831-840, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.09.056>.

RIOS, Luis A.; BARRAZA, Melanny J.; ROBLES, Pedro A.; QUEZADA, Gonzalo R. **Chalcopyrite flotation, molecular design and smart industry: a review.** International Journal of Molecular Sciences, v. 26, n. 8, p. 3613, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms26083613>.

SUBRAHMANYAM, T. V.; FORSSBERG, K. S. **Fine particles processing: shear-flocculation and carrier flotation – a review.** International Journal of Mineral Processing, v. 30, n. 3, p. 265 -286, 1990. DOI: 10.1016/0301-7516(90)90019-U.