

APLICAÇÃO DA MINI PLANTA PILOTO DE FLOTAÇÃO PARA MINÉRIO SULFETADO DE COBRE DO PROJETO FURNAS

APPLICATION OF A MINI PILOT PLANT FOR FLOTATION OF SULFIDE COPPER ORE FROM THE FURNAS PROJECT

Henrique Moreno Ribeiro Alves

Aluno de Graduação de Engenharia de Petróleo, 4º período

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Período PIBIC ou PIBITI/CETEM: fevereiro de 2026 a agosto de 2026

henriquemoreno2659@gmail.com

Elves Matiolo

Orientador, Engenheiro de Minas, D.Sc.

ematiolo@cetem.gov.br

Thalia Lopes de Sousa

Coorientador, Engenheira de Minas

thaialoopes@outlook.com

RESUMO

O desenvolvimento de projetos minerais em fases iniciais frequentemente enfrenta a limitada disponibilidade de amostras para ensaios em escala piloto. A Mini Planta Piloto (MPP) surge como uma alternativa para simular circuitos contínuos de flotação utilizando quantidades reduzidas de material, da ordem de centenas de quilogramas. Este trabalho avaliou a aplicabilidade da MPP para o minério sulfetado de cobre do Projeto Furnas (ERO Copper), localizado na Província Mineral de Carajás (PA). A amostra, com teor médio de 0,7% Cu, foi submetida a uma campanha de flotação contínua de dois dias, utilizando aproximadamente 250 kg de material, em um circuito composto pelas etapas *Rougher*, *Scavenger* da *Rougher*, *Cleaner* 1, *Scavenger* da *Cleaner* 1, *Cleaner* 2 e *Cleaner* 3, com remoagem do concentrado *Rougher*. Os ensaios alcançaram teores de concentrado final entre 20 e 30% Cu e recuperação metalúrgica média de 80%. O monitoramento contínuo permitiu correlacionar as variações no teor do concentrado com ajustes operacionais realizados, como dosagem de coletor, rotação do moinho de remoagem e porcentagem de sólidos, demonstrando a flexibilidade da MPP para otimização de parâmetros. A MPP mostrou-se uma ferramenta estratégica para projetos *greenfield*, viabilizando a obtenção de balanços de massa, água e consumo de reagentes com reduzida demanda de amostra, gerando dados confiáveis para validação de circuitos e redução de incertezas em etapas posteriores de engenharia.

Palavras chave: Flotação, mini planta piloto, minério de cobre, projeto *greenfield*.

ABSTRACT

The development of mineral projects in early stages often faces limited sample availability for pilot-scale testing. The Mini Pilot Plant (MPP) emerges as an alternative to simulate continuous flotation circuits using reduced amounts of material, in the order of hundreds of kilograms. This study evaluated the applicability of the MPP for the sulfide copper ore from the Furnas Project (ERO Copper), located in the Carajás Mineral Province (PA). The sample, with an average grade of 0.7% Cu, was submitted to a two-day continuous flotation campaign, using approximately 250 kg of material, in a circuit comprising the *Rougher*, *Rougher Scavenger*, *Cleaner* 1, *Cleaner* 1 *Scavenger*, *Cleaner* 2, and *Cleaner* 3 stages, with regrinding of the *Rougher* concentrate. The tests achieved final concentrate grades between 20 and 30% Cu and an average metallurgical recovery of 80%. Continuous monitoring allowed correlating variations in concentrate grade with operational adjustments performed, such as collector dosage, regrinding mill speed, and solids percentage, demonstrating the flexibility of the MPP

for parameter optimization. The MPP proved to be a strategic tool for greenfield projects, enabling the obtainment of mass, water, and reagent consumption balances with reduced sample demand, generating reliable data for circuit validation and uncertainty reduction in subsequent engineering stages.

Keywords: Flotation, mini pilot Plant, copper ore, greenfield project.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de projetos minerais depende da realização de estudos tecnológicos que permitam definir e otimizar rotas de beneficiamento antes da implantação de uma unidade industrial. Quando há disponibilidade de amostra e recursos, os ensaios em escala piloto representam a etapa de maior representatividade no desenvolvimento de processos, uma vez que permitem reproduzir as condições operacionais de uma planta de beneficiamento e gerar informações para o dimensionamento de equipamentos e validação do circuito (MACDONALD; HELLYER; HARPER, 1985). Entretanto, em projetos *greenfield*, a disponibilidade de amostras normalmente é restrita aos testemunhos de sondagem ou a pequenas quantidades de minério, tornando inviável a realização de campanhas em escala piloto convencional, que demandam dezenas a centenas de toneladas de material (SEPPÄLÄ et al., 2016).

Buscando reduzir essa lacuna entre os ensaios de bancada e as plantas piloto convencionais, foi desenvolvida a Mini Planta Piloto (MPP), originalmente pela *Canadian Process Technologies* (CPT), posteriormente incorporada pela Eriez. A MPP foi concebida para simular circuitos contínuos de flotação utilizando reduzidas quantidades de amostra, possibilitando a obtenção de parâmetros de processo, como tempos de residência, distribuição da carga circulante e balanços de massa e metalúrgicos, normalmente associados a ensaios em escala piloto (SEPPÄLÄ et al., 2016; OHENOJA et al., 2023). Estudos recentes demonstram que ensaios em mini-piloto são capazes de fornecer resultados representativos do comportamento contínuo do processo, com recuperações comparáveis às obtidas em escala industrial (MATIOLO et al., 2025).

O Projeto Furnas, pertencente à ERO Copper e localizado na Província Mineral de Carajás (PA), corresponde a um depósito do tipo Iron Oxide Copper Gold (IOCG), cuja mineralização é composta predominantemente por calcopirita e bornita (RPM ADVISORY SERVICES, 2024). Assim como em diversos empreendimentos minerais em fase de desenvolvimento, a disponibilidade de amostras para estudos tecnológicos é limitada, tornando necessária a utilização de metodologias capazes de fornecer informações confiáveis para o desenvolvimento do circuito de beneficiamento sem demandar grandes quantidades de minério.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a aplicabilidade da Mini Planta Piloto de flotação para o minério sulfetado de cobre do Projeto Furnas, analisando os resultados metalúrgicos obtidos e discutindo as potencialidades e limitações dessa metodologia para o desenvolvimento de circuitos de flotação em projetos com disponibilidade restrita de amostra.

3. METODOLOGIA

3.1. Amostra

A amostra utilizada neste estudo é proveniente do localizado em Carajás (PA), e consiste em um minério sulfetado de cobre predominantemente composta por calcopirita e bornita como portadores de cobre. A amostra foi recebida na forma de testemunhos de furo de sonda, e posteriormente homogeneizada e caracterizada quanto à composição química em laboratório externo, e à distribuição granulométrica, por peneiramento a úmido.

3.2. Ensaios de flotação

Os ensaios de flotação contínua foram conduzidos no CETEM, utilizando uma Mini Planta Piloto. O circuito compreendeu as etapas *Rougher*, *Scavenger* da *Rougher*, *Cleaner 1*, *Scavenger* da *Cleaner 1*, *Cleaner 2* e *Cleaner 3*. Os parâmetros operacionais (tempo de flotação, % sólidos, pH, reagentes e dosagens) foram estabelecidos conforme rota definida para o projeto. Durante a operação, amostras foram coletadas a cada hora para monitoramento do desempenho e cálculo dos balanços de massa e metalúrgico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A amostra utilizada nos ensaios em MPP apresentou teor de 0,7% Cu, e tem como principais contaminantes o SiO_2 e Fe_2O_3 , com teores de, respectivamente, 53 e 33%. A amostra britada apresentou P_{90} de 2,8 mm, sendo que aproximadamente 24% da massa encontrava-se abaixo de 106 μm . Com base nos estudos preliminares realizados com essa amostra, definiu-se a etapa de moagem visando à redução de todo o material até uma granulometria de P_{80} igual a 106 μm , condição previamente estabelecida para os ensaios subsequentes.

Os ensaios foram conduzidos na Mini Planta Piloto do CETEM, utilizando aproximadamente 250 kg de amostra, com campanha operacional de dois dias. O circuito de flotação empregado compreendeu as etapas *Rougher*, *Scavenger* da *Rougher*, *Cleaner 1*, *Scavenger* da *Cleaner 1*, *Cleaner 2* e *Cleaner 3*, sendo o concentrado desta última tido como o concentrado final. O circuito incluiu ainda uma etapa de remoagem do concentrado *Rougher* antes da alimentação no *Cleaner 1*. Além disso, parâmetros como tempo de condicionamento e de flotação, % de sólidos, pH, reagentes e dosagens, foram mantidos iguais em ambos os métodos.

Os ensaios realizados na MPP apresentaram teores de cobre no concentrado final variando entre 20 e 30%, com recuperação metalúrgica média de aproximadamente 80%. A Figura 1 apresenta a evolução do teor de cobre no concentrado final (*Cleaner 3*) ao longo dos testes, evidenciando as variações ocorridas durante a campanha.

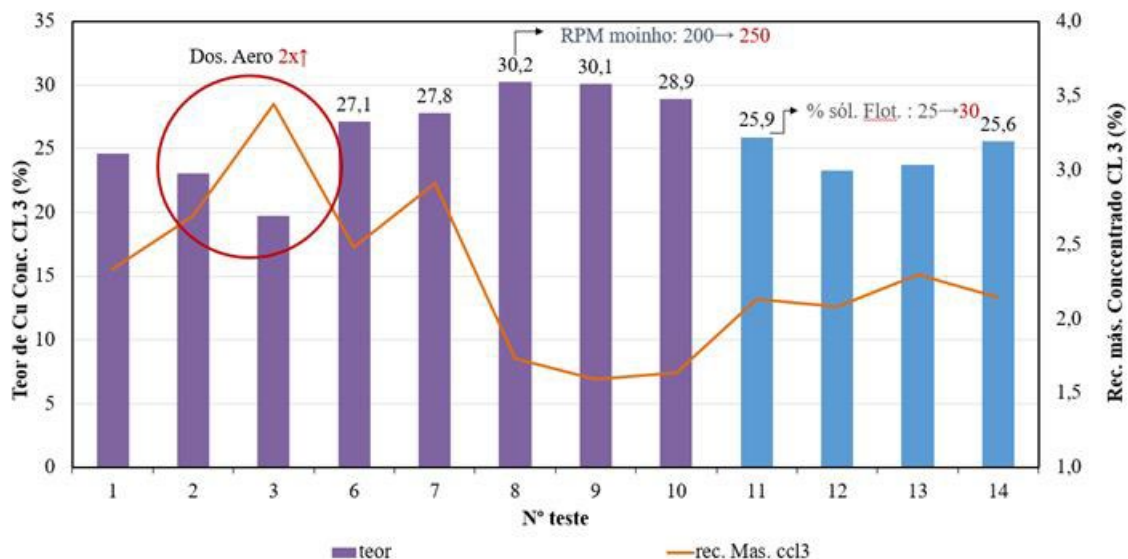


Figura 1: Teor de Cu no concentrado final (CL3) ao longo dos ensaios na MPP. Em roxo, testes correspondentes ao primeiro dia de operação; em azul, testes do segundo dia.

A Figura 1 permite correlacionar as variações no teor de cobre com as alterações nos parâmetros operacionais realizadas ao longo da campanha. No início do primeiro dia de operação, observou-se uma queda significativa no teor de cobre do concentrado (testes T1 a T3), esse comportamento foi atribuído à dosagem elevada de coletor utilizada nesse período. O excesso de coletor promoveu a perda de seletividade do processo, com o arraste de partículas não sulfetadas para o concentrado, reduzindo assim o teor do produto final. A partir do teste T6,

com a redução da dosagem de coletor, os teores começaram a se recuperar, atingindo valores entre 27 e 30% Cu. Simultaneamente, foi realizado o aumento da rotação do moinho de remoagem do concentrado *Rougher* de 200 para 250 RPM, promovendo maior liberação das partículas de calcopirita e bornita e refletindo diretamente no aumento do teor de cobre no concentrado final.

No segundo dia (testes T11 a T14), a porcentagem de sólidos na flotação foi elevada de 25 para 30%. Embora essa condição tenha favorecido a cinética de flotação e a formação de espuma, resultou em maior recuperação de massa, o que provocou uma leve queda no teor do concentrado final.

5. CONCLUSÕES

Os ensaios realizados na Mini Planta Piloto para o minério de cobre do Projeto Furnas demonstraram a viabilidade da rota de flotação estabelecida, com teores de concentrado final entre 20 e 30% Cu e recuperação metalúrgica média de 80%. O monitoramento contínuo ao longo da campanha de dois dias permitiu avaliar o efeito de diferentes parâmetros operacionais sobre o desempenho do circuito, como dosagem de coletor, rotação do moinho de remoagem e porcentagem de sólidos.

A MPP destacou-se como uma ferramenta estratégica para o desenvolvimento de projetos com disponibilidade restrita de amostra. Sua operação com aproximadamente 250 kg de material viabiliza ensaios contínuos utilizando apenas testemunhos de sondagem, eliminando a necessidade de abertura de galerias para retirada de amostras. A simulação do estado estacionário proporciona dados mais confiáveis que os obtidos em ensaios de bancada, com resultados equivalentes aos de plantas piloto convencionais, porém com menor necessidade de amostra. Além disso, a flexibilidade operacional da MPP permite ajustes em parâmetros como dosagem de reagentes, pH, inclusão de remoagem ao circuito e porcentagem de sólidos. Os balanços de massa, água e consumo de reagentes gerados ao longo da operação fornecem informações essenciais para o dimensionamento de plantas industriais, indisponíveis em ensaios descontínuos. Essas características tornam a MPP uma ferramenta fundamental para projetos *greenfield*, contribuindo para a validação de circuitos, redução de incertezas e geração de dados confiáveis para etapas posteriores de engenharia.

6. AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao orientador e coorientadora, pela oportunidade e conhecimentos repassados, à equipe envolvida na realização deste projeto, ao CETEM/MCTI pelo suporte para execução deste estudo, e ao CNPq pela bolsa de iniciação tecnológica concedida.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MACDONALD, R. D.; HELLYER, W. C.; HARPER, R. W. Process development testing. In: WEISS, N. L. (Ed.). SME Mineral Processing Handbook. New York: Society of Mining Engineers, 1985.

MATIOLO, E.; MENDES, F. D.; COUTO, H. J. B.; SOUSA, T. L. Aplicação da Mini Planta Piloto (MPP) de flotação para definição de circuitos de flotação. In: XXX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa (ENTMME), 2025.

OHENOJA, M. et al. Continuous adaptation of a digital twin model for a pilot flotation plant. *Minerals Engineering*, v. 198, 108081, 2023.

RPM ADVISORY SERVICES. NI 43-101 Technical Report – Furnas Copper Project, Pará, Brazil. Prepared for ERO Copper Corp. Toronto, 2024.

SEPPÄLÄ, P. et al. Development and calibration of a dynamic flotation circuit model. *Minerals Engineering*, v. 96-97, p. 168-176, 2016.