

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS
OPERACIONAIS – VELOCIDADE DE RPM, pH E PORCENTAGEM DE
SÓLIDOS – NA FLOTAÇÃO DE MINÉRIO SULFETADO**

**STUDY OF THE INFLUENCE OF OPERATIONAL VARIABLES – RPM
SPEED, pH AND SOLIDS PERCENTAGE – ON THE FLOTATION
OF SULFIDE ORE**

Rahija Lopes Silva Gomes Garcia

Aluna de Graduação em Processos Químicos, 7º período, Instituto Federal de
Educação, Ciência, e Tecnologia do Rio de Janeiro
Período PIBITI/CETEM: agosto de 2024 a agosto de 2025
rahijalsgomes@gmail.com

Hudson Jean Bianchini Couto

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

Luiz Felipe Alves dos Santos

Co-orientador, Engenheiro de Minas, B.Sc.
lfsantos@cetem.gov.br

RESUMO

De modo geral, os minerais do grupo da platina (*Platinum Group Minerals* - PGM) são encontrados em baixas concentrações, geralmente associados a sulfetos, com a presença frequente de ouro e minerais de ganga, em especial os silicatos. Entre eles o talco se destaca, por ser naturalmente hidrofóbico, o que prejudica a concentração do PGM por flotação, tornando necessário conhecer os parâmetros ideais para a obtenção do concentrado desejado. Este trabalho avalia a influência das variáveis operacionais – velocidade de rotação por minuto do impelidor, pH e porcentagem de sólidos – sobre o desempenho metalúrgico da flotação de um minério sulfetado rico em talco, utilizando célula mecânica Denver modelo D12. Os ensaios foram realizados com amostra a P80 \approx 28 μ m, teor de 2,8 g/t de 4E (Au, Pd, Pt, Rh) e cerca de 14% de talco. Os resultados indicaram que a rotação de 1050 rpm e pH 9,0 (alcalino) proporcionaram maiores teores e recuperações metalúrgicas e a 30% de sólidos observou-se o aumento no teor sem reduzir drasticamente a recuperação metalúrgica. O estudo reafirma que os parâmetros de agitação e pH alcalino favorecem a flotação seletiva em minérios PGM, e que a porcentagem de sólidos deve ser equilibrada para otimizar o processo.

Palavras-chave: Flotação, PGM, talco, pH, RPM, porcentagem de sólidos.

ABSTRACT

In general, the platinum group minerals (*Platinum Group Minerals* – PGM) are found in low concentrations, generally associated with sulfides, with the frequent presence of gold and gangue minerals, especially silicates. Among them, talc stands out due to its naturally hydrophobic nature, which hinders the concentration of PGM by flotation, making it necessary to determine the ideal parameters to obtain the desired concentrate. This work evaluates the influence of operational variables – impeller rotation speed per minute, pH, and solids percentage – on the metallurgical performance of the flotation of a talc-rich sulfide ore, using a Denver mechanical cell, model D12. The tests were conducted with a sample at P80 \approx 28 μ m, grade of 2.8 g/t of 4E (Au, Pd, Pt, Rh), and about 14% talc. The results indicated that the rotation of 1050 rpm and pH 9.0 (alkaline) provided higher grades and metallurgical recoveries, and at 30% solids an increase in grade was observed without drastically reducing the metallurgical recovery. The study reaffirms that agitation parameters and alkaline pH favor selective flotation in PGM ores, and that the solids percentage must be balanced to optimize the process.

Keywords: Flotation, PGM, talc, pH, RPM, solids percentage.

1. INTRODUÇÃO

O grupo platina, PGM, inclui metais como platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), rutênio (Ru), irídio (Ir) e ósmio (Os). Os minerais portadores destes elementos possuem propriedades físico-químicas únicas exigentes, sendo encontrados em baixas concentrações, associados a ouro, sulfetos de níquel e cobre, e em alguns casos, com grandes quantidades de talco. Essa associação apresenta um grande desafio e exige rotas de beneficiamento seletivas para sua concentração. Além disso, o talco, por ser naturalmente hidrofóbico, flota de forma não seletiva, arrastando impurezas para o concentrado e interferindo nos teores de PGM (BAZAR et al., 2021).

A flotação é o método amplamente utilizado no processamento de minérios complexos e de granulometria fina, sendo predominante na concentração de PGM. No entanto, sua eficiência depende de variáveis operacionais, como a velocidade do impelidor (rotação por minuto – rpm), que é responsável pela dispersão de bolhas e influencia o contato partícula-bolha; pH, que determina a carga superficial dos minerais e a eficácia dos reagentes; e a porcentagem de sólidos, que indica a concentração da polpa e impacta no comportamento do fluxo, viscosidade da polpa e cinética de flotação. (YANG & ALDRICH, 2006; AZIZI et al., 2020; MCFADZEAN et al., 2023).

A aplicação da flotação em escala bancada é uma alternativa para a otimização do processo. Estudos indicam que a otimização dessas variáveis maximiza a recuperação de sulfetos como demonstrado por Holtse et al. (2023) em seu estudo de recuperação de platina em rejeito de cromita. Da mesma forma, Azizi et al. (2020) relata o aumento na recuperação minério de cobre sulfetado, ao otimizar pH e rpm. Entretanto, os efeitos da combinação de rpm, pH e % de sólidos em minérios PGM com alto teor de talco, ainda não foram totalmente. Desse modo, este estudo utiliza a flotação em escala bancada, a fim de compreender a influência de rpm, pH e porcentagem de sólidos de um minério de PGM rico em talco, contribuindo para o beneficiamento de minérios complexos.

2. OBJETIVO

Avaliar a influência das variáveis operacionais – velocidade de rotação por minuto, pH e porcentagem de sólidos – na flotação de minério de PGM, em termos de recuperação metalúrgica e teor de Au, Pd, Pt e Rh (4E) no concentrado final, por meio de flotação em célula mecânica em escala de bancada.

3. METODOLOGIA

3.1. Preparação da Amostra

A amostra Blend Fase I, preparada no CETEM a partir de materiais da Fase 01 do projeto, é constituída de furos de sonda, homogeneizada, britada, moída em moinho de barras, para atingir um P_{80} de aproximadamente 28 μm e quarteada em alíquotas de 1 kg. A amostra foi caracterizada através das análises mineralógicas, via DRX (Refinamento *Rietveld*), químicas, e físicas, por difração laser. Esta representa um minério sulfetado com teor médio de 2,8 g/t de platinóides (4E: Au, Pd, Pt, Rh), aproximadamente 14% de talco e densidade aparente de 1936,8 kg/m^3 .

3.2. Ensaios de Flotação

Os ensaios experimentais foram realizados através de flotação em bancada, em triplicata, utilizando a célula mecânica Denver, modelo D12, com inversor de frequência, controlador de rotação, cubas de 3L – usadas para as etapas de flotação *rougher flash*, *rougher* estagiada – e 1L – usada para a etapa de limpeza *cleaner flash* além de ar comprimido, com vazão de 3L/min, medida por rotâmetro da marca OMEL.

O sistema de flotação ocorreu inicialmente com uma etapa rápida de limpeza (*rougher flash*) – na qual o afundado seguiu para a *rougher* estagiada e o flotado para a etapa *cleaner flash*, obtendo como produto afundado o CF2 e flutuado CF1 – seguida por seis etapas *rougher* estagiada com duração de cinco minutos cada – obtendo como flutuado CF3 e afundado o rejeito final. A dosagem de reagentes foi mantida fixa, sendo a total do processo de 500 g/t de CMC, 40 g/t MIX (DTF e A3894), 125 g/t de PAX e 40 g/t de MIBC. Foram avaliadas as variáveis de velocidade de rotação (900, 1050 e 1200 RPM), pH (4,5; 7,5; 9,0 e 11,5) e porcentagem de sólidos (20%; 30% e 40%). As frações dos concentrados obtidas nos ensaios foram secadas, pesadas e enviadas para análise química para a quantificação dos teores de 4E para posteriormente serem utilizados nos cálculos dos balanços de teor e recuperação acumulada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização da Amostra

A análise mineralógica da amostra cabeça apresentou pentlandita 0,2%, magnetita 4,1%, cromita 0,3%, hiperstênio 0,9%, calcita 0,4%, actinolita 19,0%, tremolita 26,8%, clinocloro 23,4%, chamosita 4,4%, lizardita 1T 6,4% e talco 14,2%. A análise química resultou em Au (8,9 ppm), Pd (124,0 ppm), Pt (14,9 ppm), Rh (0,9 ppm). A análise granulométrica da amostra indicou as distribuições com diâmetros médios D32, D20, D50 e D80 de 5,5 μm , 4,3 μm , 11,9 μm e 25,2 μm , respectivamente.

4.2. Ensaios de Flotação

As figuras abaixo são a representação gráfica dos teores e a recuperação metalúrgica dos 4E (Au, Pd, Pt e Rh) acumulada, em função das variáveis operacionais testadas: rotação por minuto (Fig. 1a), pH (Fig. 1b) e porcentagem de sólidos (Fig. 1c).

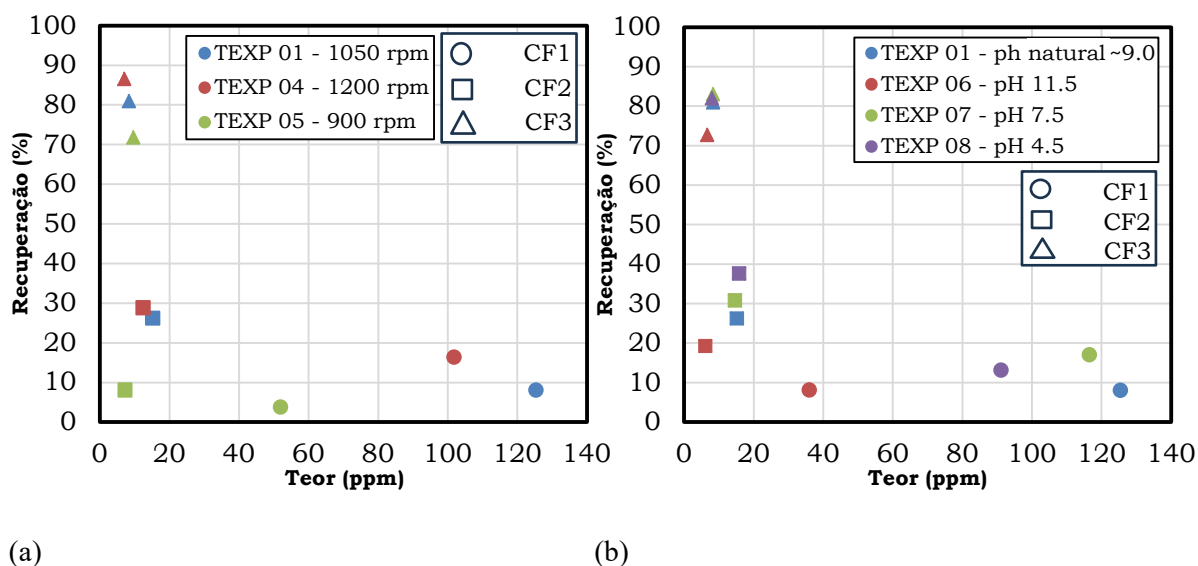


Figura 1a: Influência da velocidade de RPM no teor e na recuperação acumulada dos 4E no concentrado. **1b:** Avaliação do pH no teor e na recuperação acumulada dos 4E no concentrado.

De acordo com a Fig. 1(a), considerando a dosagem total do processo de 500 g/t de CMC, 40 g/t MIX (DTF e A3894), 125 g/t de PAX e 40 g/t de MIBC. Com as variáveis testadas RPM variando entre 900 – 1050, pH entre 4,5 – 11,5 (sendo o valor normal 9,0) e a porcentagem de sólidos com valores entre 20%-40%, a velocidade de 1050 rpm apresentou teor entre 8 ppm e 125 ppm com recuperação metalúrgica entre 8% e 81%. A 1200 rpm, foi obtido concentrado

com teor variando de 7 ppm a 102 ppm e recuperação metalúrgica entre 16% e 87%. Enquanto, 900 rpm resultou em teor entre 7 ppm e 52 ppm com recuperação metalúrgica com valores entre 4% e 72%.

Esse comportamento é observado por Yang e Aldrich (2006), que apontam que rotações intermediárias, ou seja, não muito elevadas proporcionam maior contato partícula-bolha, em contrapartida rotações mais altas podem reduzir o teor devido ao arraste de ganga.

A Fig. 1(b) apresenta o gráfico da influência dos diferentes valores de pH na flotação. De forma geral, o desempenho da flotação em pH ácido resultou em menores teores de PGM no concentrado. O pH 11,5 resultou em teor variando entre 6 ppm e 36 ppm, e recuperação entre 8% e 73%. Para pH 4,5, os teores obtidos foram de 8 ppm a 91 ppm, com recuperação entre 13% e 82%. O pH neutro, 7,5, apresentou teores de 8 ppm a 117 ppm e recuperação entre 17% e 83%. Enquanto o pH alcalino, 9,0 (natural da polpa), apresentou o maior teor de PGM, com valores entre 8 ppm e 125 ppm, e recuperação de 8% a 81%.

Observa-se, então, que o fluxo de concentrado CF3, apresentou maiores valores de recuperação metalúrgica, porém menores teores. Já o CF2 obteve valores intermediários de teor e recuperação metalúrgica. Enquanto, o CF1 concentrou os maiores teores em relação às demais frações.

Portanto, o desempenho da flotação condiz com a literatura, que indica que minérios sulfetados são favorecidos em condições alcalinas com pH entre 9 e 12, favorecendo os xantatos e outros coletores (Bulatovic, 2007).

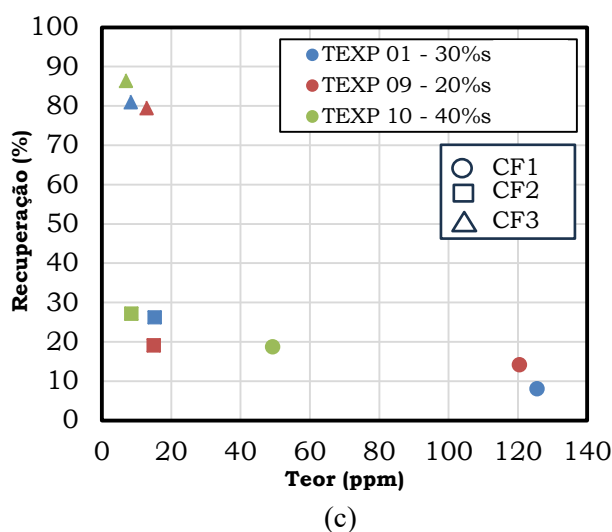


Figura 1c: Efeito da porcentagem de sólidos no teor e na recuperação acumulada dos 4E no concentrado.

De acordo com a Fig. 1c, a condição com 40% de sólidos obteve teores variando entre 7 ppm e 49 ppm, com recuperação metalúrgica entre 19% e 87%. A 30% de sólidos, os teores foram de 8 ppm a 125 ppm, e recuperação entre 8% a 81%. Para 20%, os resultados de teor foram entre 13 ppm a 120 ppm, com recuperação entre 14% a 80%.

Observa-se que o aumento na porcentagem de sólidos resultou em maiores índices de recuperação metalúrgica, embora tenha ocasionado a redução dos teores no concentrado, conforme apresentado por Mberi et al. (2018) na literatura. Complementando essa análise, Hlotse et al. (2023) destacam que a concentração de 30% de sólidos da polpa oferece a maximização do teor em flotação de PGMs, sem reduzir excessivamente a recuperação metalúrgica.

Em relação à tendência de aumento da recuperação com a elevação da porcentagem de sólidos, o estudo de McFadzean et al. (2023) indica que, embora esse comportamento ocorra, a maximização da porcentagem de sólidos pode estar associada à queda dos teores, especialmente para minérios sulfetados contendo PGM.

5. CONCLUSÕES

Observou-se que o efeito das variáveis operacionais da flotação de minério sulfetado de PGM com alto teor de talco indicou que a combinação de rotação por minuto intermediária, pH alcalino da polpa e concentração de sólidos adequada proporciona eficiência nos desempenhos metalúrgicos de teor e recuperação metalúrgica. As condições de 1050 rpm e pH 9,0, favoreceram a interação bolha-partícula, resultando em maiores teores e recuperações acumuladas de 4E. E a polpa a 30% de sólidos apresentou o melhor equilíbrio em termos de teor e recuperação metalúrgica. Os resultados obtidos confirmam a importância da otimização simultânea dos parâmetros de agitação, pH e porcentagem de sólidos potencializam o desempenho do processo de flotação dos minérios PGM. O comportamento identificado está de acordo com a literatura, que destaca a relevância das variáveis hidrodinâmicas e físico-químicas, em processos complexos que envolvem minerais hidrofóbicos. Em estudos futuros pretende-se avaliar dosagem de reagentes e circuito de flotação.

6. AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão aos meus orientadores Hudson Couto, Elves Matiolo e Felipe Alves ao CETEM pela infraestrutura e ao CNPq pela bolsa de iniciação tecnológica concedida.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZIZI, A. et al. Parametric optimization in rougher flotation performance of a sulfidized mixed copper ore. *Minerals*, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 660, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min10080660>.
- BAZAR, J.A. et al. Talc flotation-An overview. *Minerals*, [s. l.], v. 11, n. 7, p. 662, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min11070662>.
- BULATOVIC, S.M. Adsorption mechanism of flotation collectors. In: BULATOVIC, S. M. *Handbook of flotation reagents*. Amsterdam: Elsevier, 2007. cap. 7, p. 125-132. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-044453029-5.50016-2>.
- HLOTSE, D. et al. Optimization of flotation conditions in the beneficiation of PGMs tailings. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, [s. l.], v. 59, n. 6, art. 176859, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.37190/ppmp/176859>.
- MCFADZEAN, B. et al. Analysis of dispersant efficacy in overcoming challenges posed by alteration minerals in flotation. *Minerals Engineering*, [s. l.], v. 195, p. 108024, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108024>.
- NDLOVU, B. et al. A preliminary rheological classification of phyllosilicate group minerals. *Minerals Engineering*, [s. l.], v. 55, p. 190-200, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.10.018>.
- YANG, X.; ALDRICH, C. Effects of impeller speed and aeration rate on flotation performance of sulphide ore. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 185-190, 2006. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(06\)60034-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(06)60034-6).