

A influência de distintas operações de processamento mineral na bio-oxidação de sulfetos minerais

The influence of different mineral processing operations on the bio-oxidation of mineral sulfides

Andriela Dutra Norberto de Oliveira

Bolsista PCI, Bióloga

Luís Gonzaga Santos Sobral

Supervisor, Eng Químico, PhD.

Resumo

A presença de sulfetos minerais em minérios auríferos representa um grande desafio nesses processos extrativos de ouro, uma vez que reagem com agentes lixivantes com o seu conseqüente consumo, levando a uma redução na eficácia dos referidos processos causando problemas operacionais. O processo biológico pré-oxidativo tem sido investigado como uma solução potencial para este desafio. O processo de bio-oxidação visa solubilizar os referidos sulfetos minerais, utilizando microrganismos autotróficos endógenos, como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, linhagem LR, *Acidithiobacillus thiooxidans* (FG-01) e *Leptospirillum ferrooxidans* (ATCC 53992), reduzindo, posteriormente, o consumo dos agentes lixivantes supramencionados. Nesse estudo foram utilizadas diferentes operações de britagem, tais como o uso de britador de mandíbulas, moinhos de rolos de alta pressão (HPGR- high pressure grinding rolls) e fragmentação por pulso de alta voltagem (HVPF – high voltage pulse fragmentation), visando averiguar a influência dessas operações no processo bio-oxidativo dos sulfetos minerais presentes, que antecede o processo de extração do ouro encapsulado nas matrizes dos referidos sulfetos, diminuindo, substancialmente, o consumo dos agentes lixivantes do ouro presente, evitando, com isso, a operação de moagem que se configura como a mais dispendiosa da metalurgia extrativa.

Palavras-chave: bio-oxidação; minério de ouro; microrganismos; operações de moagem.

Abstract

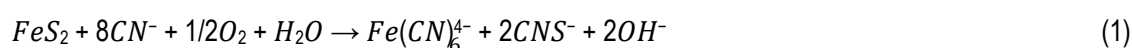
The presence of sulphide minerals in gold ores represents a major challenge in the gold extraction processes, as they react with leaching agents with their consequent consumption, leading to a reduction in the effectiveness of such processes, causing operational problems. The pre-oxidative biological process has been investigated as a potential solution to this challenge. The bio-oxidation process aims at solubilizing the aforementioned sulphide minerals, using endogenous autotrophic microorganisms, such as *Acidithiobacillus ferrooxidans*, LR strain, *Acidithiobacillus thiooxidans* (FG-01) and *Leptospirillum ferrooxidans* (ATCC 53992), subsequently reducing the consumption of the aforementioned leaching agents. In this study, different crushing operations were used, such as jaw crushers, high pressure grinding rolls (HPGR) and high voltage pulse fragmentation (HVPF), aiming at determining the influence of these operations on the bio-oxidative process of the sulphide minerals, preceding the gold extracting processes, reducing the consumption of leaching agents, thus avoiding the grinding operation which is considered the most expensive in extractive metallurgy.

Keywords: bio-oxidation; gold ore; microorganisms; grinding operations.

1. Introdução

Os processos extrativos de bens metálicos, a partir de minérios intemperizados ou de minérios contendo sulfetos minerais, são precedidos de etapas de processamento mineral (*i.e.*, britagem e moagem) para, em seguida, se optar pela melhor rota na obtenção dos bens metálicos em suas formas elementares com elevadas purezas. No caso dos minérios intemperizados a rota convencional é a lixiviação sulfúrica do minério disposto em uma pilha, utilizando partículas grosseiras oriundas das operações de britagem primária e secundária. No caso de minérios contendo sulfetos minerais é comum se utilizar a ustulação ou lixiviação sob pressão quando se trata de minérios auríferos, que visam disponibilizar as partículas de ouro, originalmente encapsuladas nas matrizes de algumas espécies minerais (*i.e.*, sulfetos minerais, sílica etc.) para, em seguida, serem solubilizadas por ação de soluções alcalinas de cianeto com formação dos respectivos ciano-complexos dos metais preciosos (*i.e.*, $Au(CN)_2^-$, $Ag(CN)_2^-$ etc.) de onde são eletrorrecuperados ou precipitados com zinco em pó (*i.e.*, processo *Merrill Crowe*). As distintas formas de processamento dos minérios supramencionados além de produzirem tamanhos distintos de partículas, podem, ainda, dependendo da técnica utilizada, produzir microfissuras propiciando o acesso de microrganismos autotróficos, responsáveis pela oxidação de sulfetos minerais, e agentes químicos oxidantes, a exemplo de íons férricos, como resultado da oxidação de sulfetos contendo esse elemento (*i.e.*, pirita, arsenopirita, bornita, calcopirita etc.). Este projeto se propôs a realizar testes bio-oxidativos comparativos visando acenar para a efetividade do processo extrativo de ouro, a partir de amostras do minério aurífero, contendo calcopirita – $CuFeS_2$, pirita – FeS_2 e pentlandita – $(Fe, Ni)_9S_8$, submetidas, primeiramente, a três formas distintas de britagem: britagem convencional, em britador de mandíbulas, britagem em moinho de rolos de alta pressão (*i.e.*, HPGR – *High Pressure Grinding Rolls*) e fragmentação eletrodinâmica – *High Voltage Pulse Fragmentation*).

Os processos de pré-tratamento, como pré-aeração, lixiviação sob pressão e ustulação, são benéficos como etapas prévias à cianetação, pois reduzem o consumo de cianeto e oxigênio (SRITHAMMAVUT, 2008). Li et al., (2006) relataram que a pré-oxidação de minério de ouro contendo pirita aumentou a recuperação de ouro de 20% para 70%. Ao mesmo tempo, o consumo de cianeto diminuiu de 2,5 kg/t para 1,5 kg/t de minério. Kondoset al., (1995) relataram que a moagem muito fina do minério aumenta o consumo de cianeto e não melhora a extração de ouro. Os processos de pré-tratamento visam minimizar o efeito de cianicidas, que são causadores de um consumo excessivo de cianeto, como pode ser observado na reação de cianetação da pirita a seguir.



Considerando que o processo de cianetação pode apresentar baixas eficiências de dissolução de ouro, causadas, sobretudo, pela baixa solubilidade do oxigênio na água pura, da ordem de 8 mg/L a 25°C, e que decresce com o aumento da força iônica do meio aquoso contribuindo, conseqüentemente, para a diminuição da eficiência desse processo. Neste estudo, a bio-oxidação foi o pré-tratamento proposto. Além disso, foi realizada a britagem do minério a partir de técnicas modernas de processamento que prometem aumentar a área superficial e, conseqüentemente, incrementar a eficiência do processo de solubilização dos sulfetos minerais,

presentes no minério aurífero em estudo, durante o referido pré-tratamento e, na segunda etapa, aumentar a eficiência da extração de ouro via cianetação.

A utilização das operações unitárias de processamento mineral supramencionadas tem por objetivo a geração de microfissuras nas partículas minerais resultantes dessas operações possibilitando um contato mais íntimo dos agentes lixiviantes com as espécies minerais carreadoras de partículas de ouro, quer na forma oxidada (*i.e.*, óxidos, carbonatos, silicatos, sulfatos etc.) ou como sulfetos, podendo acarretar uma maior efetividade do processo bio-oxidativo.

2. Objetivos

Realizar testes comparativos visando acenar para a efetividade do processo extrativo de ouro, a partir de amostras do minério aurífero submetidas a três formas distintas de processamento mineral: britagem convencional, em britador de mandíbulas, britagem em moinho de rolos de alta pressão (*i.e.*, HPGR – High Pressure Grinding Rolls) e fragmentação eletrodinâmica (*i.e.*, HVPF - High Voltage Pulse Fragmentation).

3. Materiais e Métodos

Os ensaios de bio-oxidação foram realizados em colunas de acrílico de 10 cm de diâmetro e 60 cm de altura. As colunas foram carregadas com uma massa de 3,5 kg de minério (Figura 1 A), por um período de 30 dias, para cada tipo de processamento mineral (*i.e.*, britagem convencional, em britador de mandíbulas, britagem em moinho de rolos de alta pressão (*i.e.*, HPGR – High Pressure Grinding Rolls) e fragmentação eletrodinâmica (*i.e.*, *High Voltage Pulse Fragmentation*)).

Todas as colunas (Figura 1 A) foram alimentadas pelo topo a partir de recipientes contendo uma solução de sais básicos do meio MKM, numa vazão de 10 litros por hora por metro quadrado (10 L/h/m²), e essa solução foi recirculada ao longo de todo o período de duração do experimento. O leito mineral foi aerado através de um fluxo ascendente de ar umidificado, numa vazão de 0,5 litros por minuto (0,5 L/min). O volume de solução lixiviante foi de 3 litros de meio de cultivo MKM (*i.e.*, Modified Kelly Medium – com a seguinte composição: (NH₄)₂SO₄: 0,08 g.L⁻¹; MgSO₄.7H₂O: 0,08 g.L⁻¹; K₂HPO₄: 0,008 g.L⁻¹) em pH 1,8, ajustado, sempre que necessário, com a adição de solução de ácido sulfúrico 5M, com a temperatura da solução em 30°C, mais o cultivo misto de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans* em uma densidade populacional de 10⁷ células/mL de cada cultivo.

i. Teste de cianetação

Para o processo extrativo de ouro, o material, após os testes de bio-oxidação como pré-tratamento bio-oxidativo, devidamente isentado de resíduo de solução ácida, por sucessivas lavagens aquosas, foi colocado em uma coluna de vidro por onde passava um fluxo descendente de solução cianídrica aerada, em distintas concentrações de cianeto livre (*i.e.*, essa concentração pode variar em função da massa do minério aurífero a ser tratada e do teor de ouro da mesma, variando, normalmente, de 3 a 10 g.L⁻¹), proveniente de um reator

de vidro, com volume útil de 5 litros (Figura 1B). Cessada a cianetação, a lixívia foi analisada por espectrometria de absorção atômica para se aferir a extração de ouro.

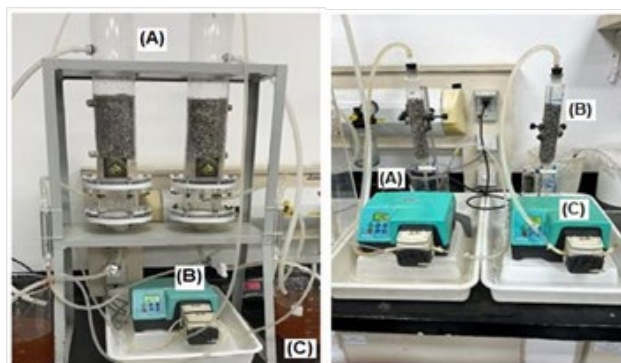


Figura 1. **A** Sistema de bio-oxidação em colunas sob temperatura ambiente, onde: A: coluna de lixiviação; B: Bomba peristáltica; e C: reservatório de lixívia. **B**: Sistema reacional, constituído por: reator de vidro pirex[®], coluna de vidro preenchida com o minério aurífero; bomba peristáltica; tubulação para injeção de ar.

4. Resultados e Discussão

Os gráficos das Figuras 2 e 3 abaixo se referem aos experimentos envolvendo diferentes operações de britagem (BM, HVPF e HPGR) e suas eficácias de extração de cobre (Cu) e níquel (Ni), provenientes dos respectivos sulfetos, ao longo de 30 dias de teste. É possível notar que durante a análise dos respectivos resultados algumas tendências foram identificadas.

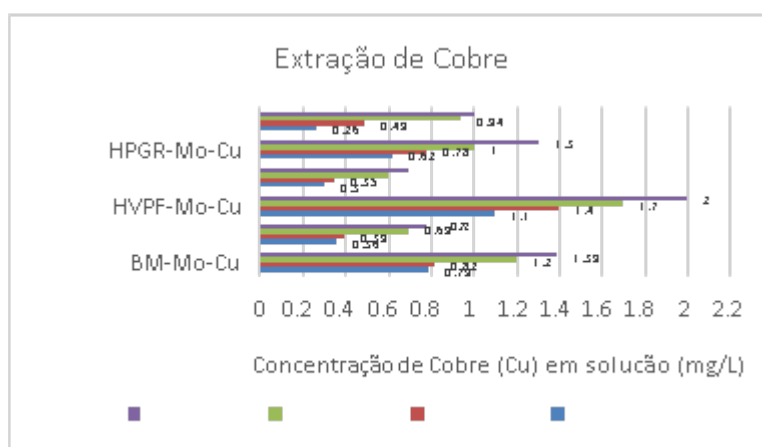


Figura 2. Extração de cobre a partir do minério aurífero com a utilização das distintas operações de processamento mineral.

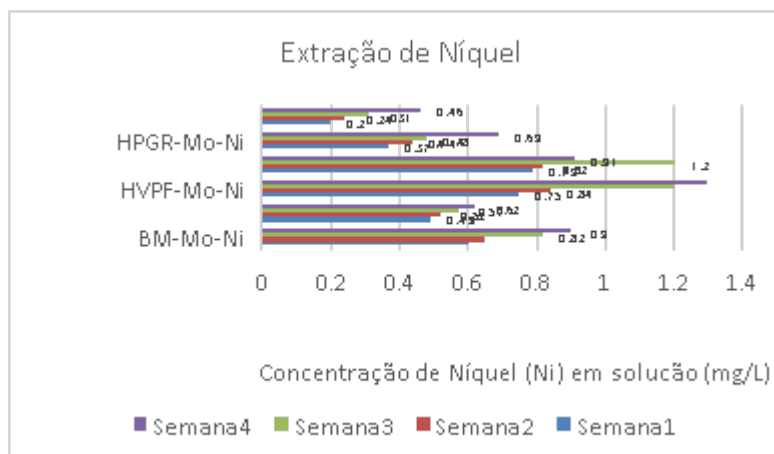


Figura 3. Extração de níquel a partir do minério aurífero com a utilização das distintas operações de processamento mineral.

Durante um teste de 30 dias de bio-oxidação em escala semipiloto, a operação de fragmentação por pulso de alta voltagem (HVPF) ocasionou um notável aumento nas concentrações de cobre e níquel na lixívia, em comparação com as outras operações unitárias utilizadas. Isso sugere que o HVPF foi eficaz na extração de cobre e níquel de amostras do minério aurífero devido à sua capacidade de geração de microfissuras entre as espécies minerais presentes, expondo os sulfetos minerais aos microrganismos presentes na solução ácida sulfúrica que percolava o referido leito mineral.

A operação unitária via HVPF se destacou, também, na liberação de níquel ao longo do período de teste, seguido pela britagem de mandíbulas, enquanto a britagem via HPGR mostrou menor solubilização de níquel. O HPGR não foi consistente e, em nenhum momento, superou as outras operações de britagem praticadas na disponibilização de cobre ou níquel, devido a várias razões possíveis, como configuração inadequada do equipamento. No caso destes experimentos, o HVPF mostrou ser a melhor opção. Esses resultados destacam a importância da otimização e adaptação contínuas das operações de britagem às condições específicas do minério em uso.

I. Teste de cianetação

Os resultados obtidos nos ensaios de cianetação, utilizando as fases sólidas provenientes dos processos de bio-oxidação das amostras do minério aurífero submetidas às diferentes formas de britagem, indicam, claramente, variações na eficiência do processo de cianetação, dependendo da operação de britagem utilizada (Figura 4).

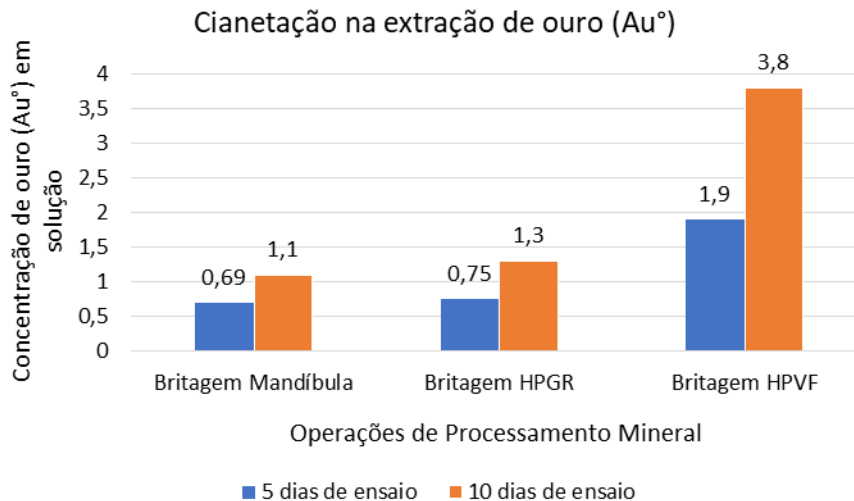


Figura 4. Resultado do processo de cianetação de ouro a partir das amostras minerais bio-oxidadas previamente.

Os resultados mostram que HPVF proporciona a maior extração de ouro, facilitando a liberação de partículas de ouro para o processo de cianetação. Além disso, essa operação ajudou na liberação do ouro encapsulado nos minerais de ganga, como a sílica, resultando em maior concentração de ouro na solução cianídrica. Portanto, os ensaios de cianetação indicam que essa forma de processamento é a operação mais eficaz, permitindo uma exposição mais eficiente das partículas de ouro à ação conjunta do cianeto, agente complexante, com o oxigênio, agente oxidante.

5. Conclusão

Diante dos resultados alcançados, em termos da bio-oxidação do minério em estudo, submetido previamente às distintas formas de processamento mineral, podemos afirmar que é possível diminuir o teor de enxofre, de forma diferenciada, em função da operação de processamento utilizada. Essa diminuição do teor de enxofre tem por objetivo a maximização da liberação das partículas de ouro, via extensão do processo bio-oxidativo e, ainda, minimizar o consumo de cianeto na etapa de extração do ouro, visto que algumas espécies minerais consomem cianeto. Por outro lado, a remoção dessas espécies cianídicas, os sulfetos minerais em particular, deve ser maximizada visando evitar o aumento da força iônica e, com isso, uma maior solubilização de oxigênio, agente oxidante no processo de cianetação.

O processo de bio-oxidação do minério processado pelo HPVF resultou em um aumento expressivo nas concentrações de cobre e níquel ao longo de 30 dias de ensaio, indicando a eficácia dessa operação unitária na bio-extração desses metais. O HPVF também se destacou na biodisponibilidade de níquel, seguido pelo britador de mandíbulas, enquanto o HPGR mostrou a menor solubilização desse metal. O HPGR não foi tão eficaz quanto as outras formas de processamento, devido a formação de precipitados que obstruíram o acesso dos microrganismos aos minerais, no interior das microfissuras.

Os testes de cianetação revelaram que o processamento via HVPF foi a operação unitária mais eficiente na liberação das partículas de ouro, seguido pelo HPGR e, por último, pelo britador de mandíbulas. Conclui-se que a operação de fragmentação por pulso de alta voltagem (HVPF) se destaca como a mais eficiente tanto no processo de bio-oxidação quanto no da cianetação do minério aurífero, proporcionando uma maior extração de ouro.

6. Agradecimentos

Agradeço ao MCTI pelo repasse dos recursos financeiros ao CNPq na concessão da bolsa PCI, ao CETEM pela oportunidade de realização desse estudo e ao meu supervisor Dr. Luis Sobral.

7. Referências Bibliográficas

LI, Y., et al. **A review of the structure, and fundamental mechanisms and kinetics of the leaching of chalcopyrite**. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 197/198, p.1-32, 2013; JENSEN, A. B.; WEBB, C. **Ferrous Sulphate Oxidation Using *Thiobacillus ferrooxidans*: a Review**. *Process Biochemistry*, Manchester, v. 30, n. 3, p. 225-236, Dez. 1995.

JONGLERTJUNYA, W. **Bioleaching of chalcopyrite**. Department of Chemical Engineering, School of Engineering, The University of Birmingham, United Kingdom, April, 2003.

JOHNSON, D. B. **Importance of microbial ecology in the development of new mineral technologies**. *Hydrometallurgy*, Bangor, v. 59, n. 2, p.147-157, Fev. 2001.

ZHAO, H. et al. **The dissolution and passivation mechanism of chalcopyrite in bioleaching: An overview**. *Minerals Engineering*, v. 136, p.140–154, 2019.

ZHU, XIAOHUA, et al. **On the mechanism of high-voltage pulsed fragmentation from electrical breakdown process**. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 54, no 9, p. 4593-4616, 2021.