

FÁBIO CHIEREGATI PASSARELLI

EXTRAÇÃO METÁLICA POR BIOLIXIVIAÇÃO

São Paulo

2009

EPMI
TF-2009
P266e

FÁBIO CHIEREGATI PASSARELLI

EXTRAÇÃO METÁLICA POR BIOLIXIVIAÇÃO

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Minas do curso de graduação do Departamento
de Engenharia de Minas e de Petróleo da
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves

São Paulo

2009

TF-2009
P266e
syms 1818704

M2009F

DEDALUS - Acervo - EP-EPMI



31700005905A

EXTRAÇÃO METÁLICA POR BIOLIXIVIAÇÃO

Fabio Chieregati Passarelli

E-mail: fabio.passarelli@poli.usp.br

Professor Orientador: Arthur Pinto Chaves

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

São Paulo, Novembro de 2009

RESUMO

A biolixiviação ocupa uma posição cada vez mais forte entre as tecnologias de hidrometalurgia disponíveis. Não se trata mais de uma tecnologia promissora, mas sim de uma alternativa econômica e tecnicamente competitiva para tratar certos tipos de minério em determinadas situações, além de apresentar vantagens ambientais. Os microorganismos utilizados catalisam a reação de oxidação dos sulfetos, gerando ácido sulfúrico e solubilizando o metal de minério, que é coletado na lixívia e tratado por eletrodeposição.

Nos países emergentes a biolixiviação é ainda mais expressiva devido ao seu baixo custo de aplicação e de operação. Existem operações no Brasil, na Mina Cerro Colorado, no Chile, na Talvivaara Mine, na Finlândia, na Obuasi Mine, em Ghana, entre outras.

São três os principais métodos para realizar a biolixiviação: em pilhas, que é geralmente usado para materiais de baixo teor e rejeitos e tem baixa taxa de recuperação; in situ, que minimiza custo de escavação; e em tanques, que possui alta taxa de recuperação, porém requer material fino e gera custos mais elevados, justificando seu uso apenas em materiais de alto teor e concentrados.

A escolha do método de aplicação da biolixiviação depende do teor do minério, do valor do investimento, do grau de controle desejado e do tempo disponível para a recuperação do metal. Este trabalho questiona o peso que estes parâmetros têm na limitação da escolha do método ideal para biolixiviação.

PALAVRAS-CHAVE: biolixiviação; hidrometalurgia; minério.

ABSTRACT

The bioleaching process is becoming stronger among the available technologies for hydrometallurgy. It is no longer a promising technology but a feasible alternative presenting economic, technical and environmental advantages to process ore in specific scenarios. The microorganisms used in the process, which are found in the atmosphere, catalyze the oxidation reaction of the sulfates, resulting in sulphuric acid and dissolved metal, which is collected in the leachate and sent to electrowinning.

In developing countries the technology is even more favorable due to low investment and reduced operational costs. There are currently bioleaching operations in Mina Cerro Colorado, in Chile; in Talvivaara Mine, Finland; Obuasi Mine, in Ghana, and many others.

There are three main methods to apply the bioleaching process: heap leaching, which is mostly used for low grade ore and dumps and can have long periods of retention; *in situ* leaching, that reduce excavation costs; and tank leaching, that has higher maintenance and operational costs and requires fine material in exchange of long retention time, justifying its use mostly in high grade ore and concentrates.

The choice of an appropriate application method depends on the grade of the ore, size of investment, desired control over the process and available time for metal recovery. This paper questions the weight that these parameters have in limiting the ideal methods for bioleaching.

KEY-WORDS: bioleaching, hydrometallurgy, ore

1. INTRODUÇÃO

O processo de biolixiviação vem sendo usado há muito tempo para a extração de metais de minérios sulfetados, com registros da época do Império Romano, mas foi apenas no século passado, em 1947, que foi reconhecido o caráter biológico do processo, quando foi identificado que a bactéria *Thiobacillus ferrooxidans* participava da lixiviação e tinha papel de catalisador da reação que formava íons metálicos na drenagem ácida das pilhas. Esta descoberta foi feita por Colmer e Hinkle, quando estes isolaram e caracterizaram bactérias contidas na água ácida da mina de Rio Tinto, no sudoeste da Espanha.

Nos dias de hoje a crescente preocupação ambiental e a tendência de se esgotarem os minérios de alto teor intensificam a busca por tecnologias alternativas que possam cumprir os requisitos das legislações ambientais, além de reduzir custos de produção e aumentar a recuperação dos metais processados. A biolixiviação é uma proposta que atende aos fatores anteriores porém com algumas restrições de utilização. Este trabalho propõe uma explicação do método, assim como uma análise dos diferentes cenários onde pode ser aplicado.

1.1 Histórico

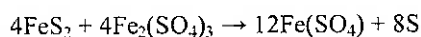
As minas do Rio Tinto no sudoeste da Espanha são consideradas o berço da biohidrometalurgia. Explotadas desde antes do Império Romano devido aos depósitos de ouro, prata e cobre, foram forçadas a adotar outra metodologia para concentração de minérios devido ao banimento da ustulação em 1878 em Portugal. Além deste fato, redução de custos de operação era outro incentivo às pesquisas de hidrometalurgia. Técnicas de lixiviação em pilhas permitiam reduzir custos de transporte através da instalação um sistema ferroviário para este e outros serviços. Os esforços para introduzir a biolixiviação começaram no início da década de 1890, quando pilhas de aproximadamente 10 m de altura com minério então de baixo teor (com 0.75% de Cu contido, que atualmente é considerado minério de alto teor) foram deixadas em repouso por um a três anos para “decomposição natural”. Era estimado que 20% a 25% do cobre das pilhas era recuperado por ano. A partir de 1900 não havia mais ustulação nas operações da Rio Tinto. Desde então a tecnologia foi sendo desenvolvida, e em 1947 foi reconhecida a ação do microorganismo *Thiobacillus ferrooxidans*, posteriormente renomeado para *Acidithiobacillus*.

A primeira patente referente a processos de biolixiviação veio em 1958, quando foi definido o processo cíclico em que uma solução lixiviadora de sulfato férrico era usada para extração metálica e regenerada por aeração (oxidando íons férricos) e reutilizada em um novo estágio de lixiviação.

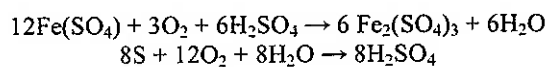
O desenvolvimento desta tecnologia foi acelerado na década de 1980, levando ao surgimento da primeira instalação comercial de biolixiviação em taque na Fairview Gold Mine nas proximidades de Barbeton, na África do Sul. A mina está em operação até os dias de hoje, processando minérios refratários de ouro de diversas minas da região.

1.2 O Processo

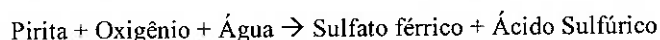
A química do processo de biolixiviação é relativamente simples. Os microorganismos biolixivadores catalisam a oxidação do ferro e do enxofre, acelerando o processo em aproximadamente 500 000 vezes (Valdivia, 2003), produzindo íons de ferro e ácido sulfúrico de acordo com a seguinte reação, tomando como exemplo a pirita:



O sulfato férrico e o enxofre formados são então oxidados com ajuda dos microorganismos de acordo com as seguintes reações:



De forma geral, a reação é dada por:



O resultado é a solubilização do metal de minério, além da geração de ácido sulfúrico, que é um potente agente lixiviante adicional. A figura 1 ilustra o contato entre minério e bactérias na solução lixiviadora.

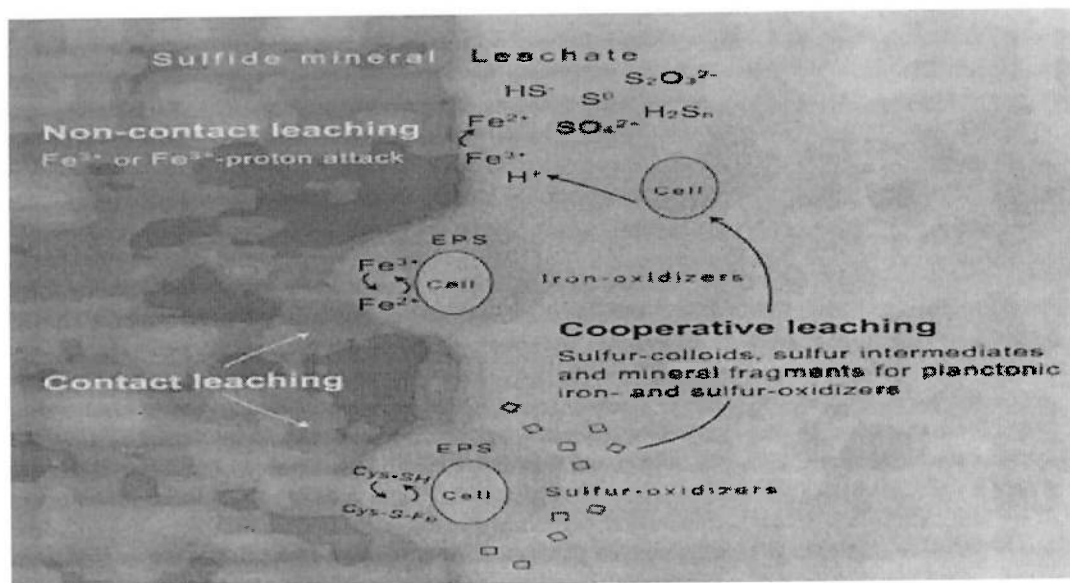


Figura 1 -- Contato entre minério e bactérias na solução lixiviadora

A solução aquosa do metal é submetida a uma separação de fases para purificar e concentrar a solução, para posterior separação por deposição. É misturado à solução um extrator capaz de se aderir aos íons metálicos. O extrator possui uma longa cadeia de hidrocarbonetos, tornando-o insolúvel em fase orgânica. Após esta etapa, uma fase orgânica como querosene é misturada à solução, permitindo a separação de fases, concentrando os íons metálicos.

A solução concentrada de íons metálicos é então levada para um tanque de eletrólise contendo cátodos e ânodos alternados dispostos verticalmente. O cátodo é geralmente composto por uma folha de alumínio, aço inoxidável, titânio ou uma fina placa do próprio metal a ser depositado. O ânodo é geralmente um material inerte e oxidado como dióxido de chumbo, titânio platinizado ou óxidos de metais preciosos. Uma diferença de potencial é aplicada entre o cátodo e o ânodo para que se inicie uma reação eletroquímica, fazendo com que os íons metálicos se depositem no cátodo.

Um dos principais parâmetros para classificação destes microorganismos é a faixa de temperatura em que estes conseguem atuar. O primeiro grupo é dos mesófilos, que trabalham na faixa de 30 a 40 °C. É neste grupo que se inclui a *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Depois temos o grupo dos termófilos moderados, trabalhando entre 45 e 55 °C, e por último os termófilos extremos, agindo em temperaturas que vão de 60 °C até 90 °C. Estes últimos podem ser encontrados nas piscinas termais do Parque Nacional de Yellowstone, nos Estados Unidos, e também nos *burning coal dumps* próximos de Witbank, na África do Sul.

A maioria destes organismos é caracterizada como sendo autotróficas e acidofílicas, isto é, são capazes de fixar o CO₂ da atmosfera para promover seu crescimento e toleram ambientes que apresentam baixo pH. São capazes de oxidar o ferro ou enxofre, sendo que em muitos casos são capazes de oxidar ambos.

1.3 Métodos

A biolixiviação é uma operação unitária de extração de metais em determinados minérios. O processo é influenciado por uma série de fatores físico-químicos e biológicos. Primariamente ele é determinado pela condição mineralógica do material a ser tratado e das condições de operação, que incluem: granulometria do minério, temperatura, pH, disponibilidade de oxigênio, agitação e tempo de residência. Sua aplicação pode ser feita de diversos métodos, como será visto a seguir.

Heap Leaching, ou lixiviação em pilhas, é o método mais comum para este processo. É um método planejado para que as condições de lixiviação na pilha sejam otimizadas. Sucintamente, o minério é empilhado e a cultura bacteriana é distribuída pela superfície da pilha para que percole o minério.

A pilha geralmente é disposta em terreno previamente compactado com inclinação de 3° a 5°, sobre algum material que impermeabilize a pilha do solo, como uma camada de asfalto ou um plástico apropriado. O ROM é britado e então levado até a pilha. Os finos gerados pela britagem, quando constatado que prejudicam a operação, são aglomerados para aumentar permeabilidade e reduzir entupimentos, e só então são levados à pilha. A percolação do caldo de cultura solubiliza o metal de interesse, que escorre em direção ao ponto de coleta do licor, para que possa ser encaminhado para a recuperação de metais. A figura 1 ilustra o processo de lixiviação em pilhas.

Este processo pode levar alguns meses para atingir a recuperação desejada, que pode ser de até 90% em alguns casos. Existe também a desvantagem de favorecer heterogeneidades nas condições da pilha, tanto do topo para a base quanto do centro para a superfície, que acaba prejudicando a recuperação. Além disso, é importante garantir boa permeabilidade da pilha, pois alguns precipitados como a gipsita, óxidos ferrosos ou materiais argilosos podem impedir a percolação adequada da solução. O pH da pilha deve ser monitorado em diversos pontos distintos para determinar se as condições de operação estão homogêneas.

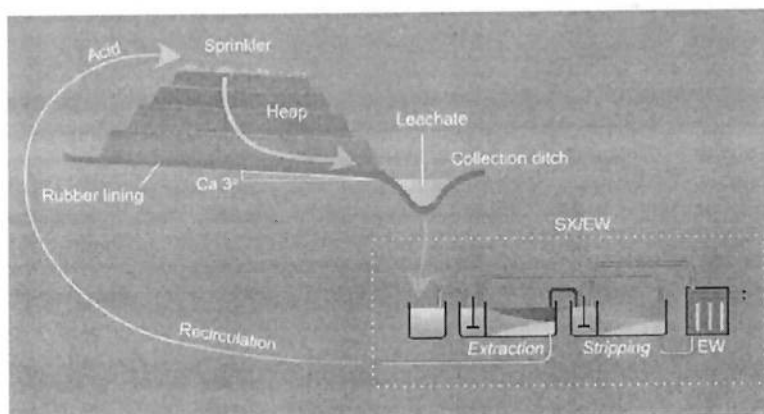


Figura 1 – Esquema de lixiviação em pilha.

Lixiviação em tanque agitado é um método mais utilizado em minérios refratários de ouro, onde o metal está ocluído na matriz pirita/arsenopirita. O minério requer moagem fina para poder ser alimentado no tanque por meio de polpa e então é misturado com o caldo de cultura.

O processo pode ser feito em bateladas, mas geralmente é feito de modo contínuo em uma série de tanques, para maximizar o tempo de exposição ao agente lixiviador. Em um reator contínuo de tanques agitados a mistura polpa + solução lixiviadora é bombeada para um primeiro tanque que permite que o material transbordado siga para os tanques seguintes da série. No caso de biolixiviação de sulfetos é necessário que haja aeração do meio, e isto é possível através do bombeamento de ar para dentro do misturador. Para otimizar a capacidade de homogeneização do tanque a agitação é feita para baixo, e são usadas palhetas simetricamente posicionadas na parede do tanque para evitar a formação de vortex. Um exemplo de tanque utilizado neste método é ilustrado na figura 2.

Este método tem um tempo de retenção de material muito inferior ao método citado anteriormente, podendo levar de algumas horas até 5 dias para atingir a recuperação desejada. Tem também a vantagem de permitir um controle muito mais preciso

dos parâmetros de operação, otimizando a recuperação do metal. Pelo fato de requerer moagem fina do minério e de ter maior custo de operação e manutenção, a lixiviação em tanques é usada para minérios com teores mais elevados.

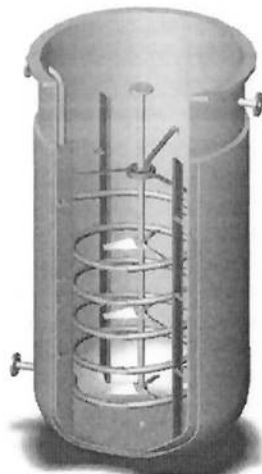


Figura 2 – Corte de tanque utilizado na lixiviação.

Lixiviação *in situ* como o próprio nome já diz, é a lixiviação do minério diretamente na frente de lavra. Pode ser usado tanto para minas a céu aberto quanto para subterrâneas. Nas minas a céu aberto o processo é relativamente mais simples, sendo necessário apenas bombear a solução lixiviante para o local desejado, coletando o material lixiviado por canaletas ou bacias de coleta.

No caso de minas subterrâneas a aplicação é ligeiramente mais restrita. A solução lixiviante é bombeada para o corpo de minério e percola até uma central coletora que bombeará o material lixiviado para a superfície para dar continuidade ao processamento. Isso exige que o corpo de minério tenha permeabilidade e porosidade adequadas, caso contrário é necessário criar estas condições com o auxílio de explosivos.

Os corpos de minério adequados para este método geralmente se situam abaixo do nível freático, como já foi observado em minérios de cobre, urânio e sais solúveis como a halita, potássio, magnésio e boro. A figura 3 ilustra o método subterrâneo.

Este método possui a vantagem de permitir a exploração de locais inacessíveis, assim como de reduzir a necessidade de desenvolvimento de galerias. O custo de escavação também é reduzido, os gastos com infra-estrutura e de mineração são relativamente menores e o impacto visual é amenizado. Porém existem algumas desvantagens, como o fato de requerer permeabilidade adequada, seja natural ou artificialmente; a precipitação de minérios secundários pode comprometer a permeabilidade do corpo, a percolação integral do corpo não é garantida, dependendo da direção do fluxo da solução lixiviante, e pode ocorrer a contaminação de lençóis freáticos.

De modo geral, este método permite pouco controle sobre a operação, sendo mais adequado para baixos teores, baixo investimento e longo tempo de lixiviação.

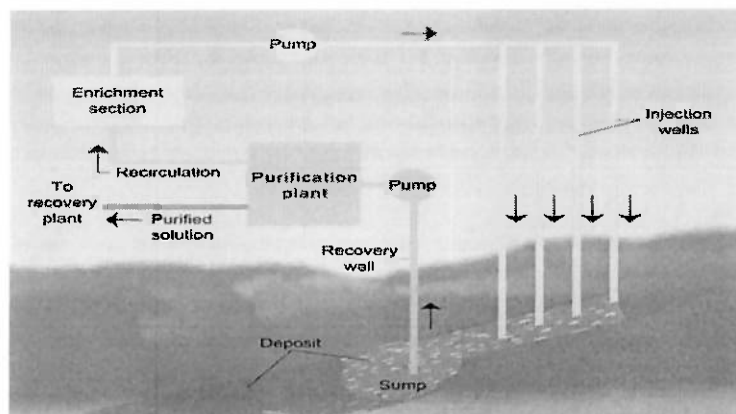


Figura 3 – Lixiviação *in situ* subterrânea.

Os demais métodos de biolixiviação são variações dos métodos citados.

1.4 Vantagens

As vantagens do processo de biolixiviação são diversas:

Econômicas: Minérios de baixo teor ou marginais podem ser tratados de modo econômico, permitindo que o processo de extração seja encerrado antes do que seria pelos métodos convencionais, reduzindo perda de valor agregado do metal ao longo do processo. Também permite exploração de depósitos menores em locais remotos devido ao baixo custo de infraestrutura.

Técnicas: Permite tratar minérios refratários, isto é, minérios que não podem ser concentrados por métodos convencionais, como por exemplo ouro em matriz de pirita e calcopirita, além de tratar minérios com contaminantes que podem reduzir o valor do produto final como o arsênio, magnésia e bismuto removendo-os de forma estável e ambientalmente adequada. É um processo de manutenção barata e simples. O tempo de *start-up* é reduzido. Ocorre à pressão atmosférica e em extensa faixa de temperaturas.

Ambientais: Água é usada (e recirculada) na cultura de bactérias, deixando a pilha úmida e assim reduzindo emissão de poeiras. Não emite dióxido de enxofre, excluindo a necessidade de purificadores de gases e plantas de ácido sulfúrico.

1.5 Exemplos

Talvivaara: A Talvivaara Mining Company é um exemplo recente da aplicação da biolixiviação na concentração de metais. Localizada em Sotkamo, na Finlândia, a mina de Talvivaara possui dois depósitos, Kuusilampi e Kolmisoppi, de cobre, cobalto e uma das maiores reservas de níquel sulfatado da Europa, com 642 Mton de minério nas categorias medido e indicado, suficiente para 60 anos de produção. Em 2006 foram concluídos com sucesso os testes de recuperação metalúrgica, assegurando segurança financeira e em Outubro de 2008 iniciou-se a produção.

A mina é adequada a métodos a céu aberto por ter o corpo mineralizado próximo à superfície e conter pouco material de capeamento. O minério é de teor relativamente baixo, porém muito favorável à biolixiviação por conter alto teor de enxofre. Outra vantagem observada na mina de Talvivaara é que o processo de biolixiviação é exotérmico, garantindo a fase líquida da água mesmo em temperaturas subárticas.

Codelco: Outra empresa que usa da biolixiviação para concentração de minério desde 2002 é a Codelco, do Chile. Ela possui uma planta piloto de biolixiviação na mina de Andina, na região central do Chile que apresentou bons resultados na concentração de rejeito de baixo teor com custos de produção relativamente baixos.

Em um projeto um pouco mais ambicioso, a Codelco pretende instalar uma das maiores plantas de lixiviação conhecidas hoje na mina de Radomiro Tomic. Esta mina pertence ao ramo Codelco Norte, o maior do grupo, responsável por metade da produção dos primeiros três trimestres deste ano que foi de 1,2 Mton. A planta também irá produzir a partir de rejeito de baixo teor.

Mina São Bento: a mina de ouro situada em Minas Gerais foi fechada em 2007 por motivos econômicos, mas foi 100% vendida para a AngloGold Ashanti, que já fez projeções anuais de 200 mil onças de ouro para o grupo no Brasil. A São Bento Gold Ltd., novo nome para a Mina São Bento, utiliza a biolixiviação para extração metálica do ouro.

2. FATORES TÉCNICO-ECONÔMICOS

Os atributos econômicos relevantes do minério que afetam a receita do empreendimento e o custo de extração incluem o tamanho do depósito, o teor do minério, eventuais subprodutos, valor do metal na economia, assim como a existência de infra-estrutura na região do depósito.

A biolixiviação compete e completa com outros métodos de concentração de metais. A biolixiviação em pilhas é geralmente adequada para depósitos pequenos, com minério disseminado e/ou de baixo teor. A estrutura da pilha precisa ser mantida para que a aeração do minério e a percolação da solução lixiviante ocorram. Em corpos massivos de sulfetos, geralmente de origem vulcânica, o minério tem baixo mineral de ganga. Assim sendo, o processo de biolixiviação tende a lixiviar grande parte do minério, fazendo com que a pilha entre em colapso. A figura 4 apresenta um esquema generalizado para escolha de métodos de lixiviação baseado em parâmetros técnico-econômicos.

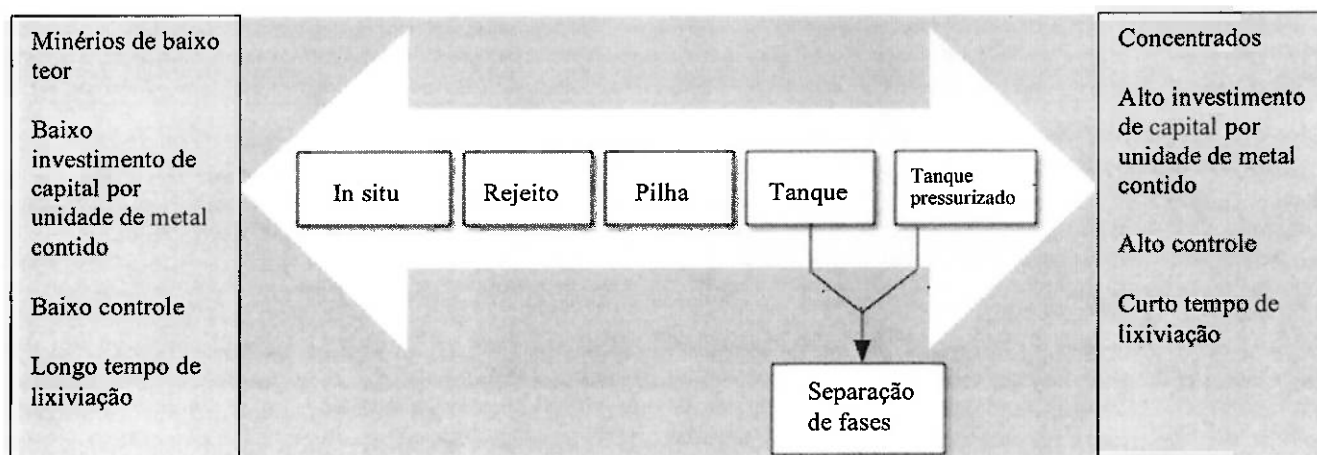


Figura 4 – Parâmetros controladores e métodos de lixiviação

2.1 Biolixiviação X Pirometalurgia

A biolixiviação tem tido certa dificuldade para se expressar no ramo da mineração no Brasil. Entre os motivos deste fato estão a falta de cobertura desta área de biometalurgia nos cursos de mineração, aliado à inércia dos métodos convencionais de Tratamento de Minérios e concentração metálica. Outro motivo é a predominância da exploração de minérios oxidados em relação a minérios sulfetados no território brasileiro. Os minérios oxidados se encontram mais próximos à superfície, onde sofrem oxidação pelas águas de chuva, que são abundantes no Brasil devido ao clima tropical.

A biolixiviação tem grande desvantagem em relação à pirometalurgia quanto ao tempo de recuperação do metal. Enquanto a pirometalurgia recupera o metal em algumas horas, a biolixiviação pode levar de alguns dias até meses, dependendo do tipo de lixiviação.

A maneira mais rápida de lixiviar um material é através de tanques, onde o processo é altamente controlado e otimizado, produzindo resultados em poucos dias. O impasse é que para que a lixiviação em tanque seja realizada com sucesso, é necessário que o minério seja submetido a moagem fina, aumentando o custo de produção. Além desse fator, a lixiviação em tanques tem alguns gastos adicionais, como por exemplo o consumo de energia dos agitadores e aeradores, neutralização da solução lixiviadora e também o resfriamento do reator. Isso faz com que seja necessário um estudo detalhado das possibilidades e resultados dos processos antes que seja definido o método de tratamento do minério em questão.

Uma alternativa para reduzir o alto consumo de energia exigido pela moagem fina do minério antes de ser submetido à biolixiviação em tanques é realizar um pré-tratamento do minério em pilhas com solução biolixiviadora, com a finalidade de aumentar a friabilidade do minério (redução do *Work Index*), além de realizar uma pré-concentração em um estágio antecipado do processo.

Outra possibilidade é de aplicar a biolixiviação em pilha de concentrados. Ao invés de realizar tratamento convencional até atingir as especificações do cliente, pode-se produzir um concentrado simples, com apenas um estágio de flotação, por exemplo. Com isso a recuperação do metal se dá mais rapidamente, mesmo com a lixiviação em pilhas, e ainda permite uma redução de custos no processamento, com a redução de células de flotação e insumos.

A figura 5 mostra a diferença entre o minério antes e depois da exposição à solução biolixivante.

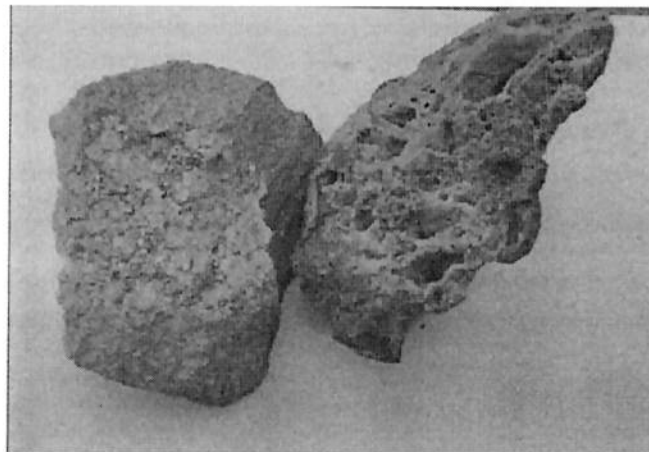


Figura 5 – Minério antes (esquerda) e depois (direita) da biolixiviação

3. Conclusão

O método de extração metálica por biolixiviação vem sendo cada vez mais estudado e utilizado em empreendimentos mineiros por todo o mundo. As vantagens que tornam esta tecnologia competitiva são tanto econômicas quanto ambientais. Existem diversas possibilidades de aplicação da tecnologia, adequando-se aos diferentes cenários existentes na mineração.

O método é limitado à existência de sulfetos em quantidade adequada dentro do minério. Para contornar esta restrição seria necessário fornecer os nutrientes necessários para a ação dos microorganismos, o que pode tornar o processo inviável.

O grande problema encontrado hoje na área de biolixiviação é que os tempos de recuperação do metal são muito elevados quando comparados com os tempos da pirometalurgia. Quanto se tenta reduzir este tempo através de modificações no processo da biolixiviação, este torna-se demasiadamente caro e aplicável apenas em situações específicas, como por exemplo minérios de alto teor ou concentrados. Este aumento de custo se deve principalmente à instrumentação adicional requerida (como tanques, aeradores e agitadores) e ao pré-tratamento necessário, como por exemplo a moagem fina do material.

É necessário dar continuidade às pesquisas na área da biolixiviação para encontrar uma solução competitiva para a sua aplicação em minérios ricos, com tempos de recuperação reduzidos e baixos custos de operação.

4. REFERÊNCIAS

Research and application of bioleaching and biooxidation technologies in China, disponível em <www.sciencedirect.com>, acessado em 09/11/2009

Acevedo, F- Present and Future of Bioleaching in Developing Countries, Escuela de Ingeniería Bioquímica Universidad Católica de Valparaíso, 2002

<http://wiki.biomine.skelleftea.se/wiki/> Tópicos:

- Techno-Economic Factors
- Talvivaara
- Bioleaching
- Bioleaching Reactions
- History of biohydrometallurgy
- Tank Leaching
- Dump Leaching
- In situ Leaching

Urenha, L.C. – Metodologia para Pesquisas de Lixiviação Bacteriana, Tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1991

Valdivia, D.N.U – Lixiviação Bacteriana de Minérios Refratários de Ouro, Tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, p. 1-18, 2003

Codelco to start bioleaching operation at Radomiro Tomic in 2010, disponível em <<http://www.bnamericas.com/news/mining>>, acessado em 09/11/2009

Neale, J. – Reactors for Bioleaching Processes; Mintek, Biotechnology Division, 2006