

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

**Influência das Distintas Formas de Processamento
Mineral na Biolixiviação de Metais de Base**

PROVISÓRIA

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Dilma Vana Rousseff

Presidente

Michel Miguel Elias Temer Lulia

Vice-Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Clelio Campolina Diniz

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia e Inovação

Alvaro Toubes Prata

Secretário-Executivo

Kayo Julio Cesar Pereira

Coordenação-Geral das Unidades de Pesquisa

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Fernando Antonio Freitas Lins

Diretor

Arnaldo Alcover Neto

Coordenador de Análises Minerais

Claudio Luiz Schneider

Coordenador de Processos Minerais

Cosme Antônio de Moraes Regly

Coordenador de Administração

Francisco Wilson Hollanda Vidal

Coordenador de Apoio Tecnológico às Micro e Pequenas Empresas

Jackson de Figueiredo Neto

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação

Ronaldo Luiz Correa dos Santos

Coordenador de Processos Metalúrgicos e Ambientais

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

ISSN 0103-7374

ISBN 978-85-8261-021-3

STA - 74

Influência das Distintas Formas de Processamento Mineral na Biolixiviação de Metais de Base

André Luiz Ventura Fernandes

Engenheiro Químico, MSc.

Débora Monteiro de Oliveira

Bióloga, MSc.

Tatiane Franco Machado

Estudante de Engenharia de Bioprocessos.

Luis Gonzaga Santos Sobral

Engenheiro Químico, PhD em Hidrometalurgia.

CETEM/MCTI

2014

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

Luis Gonzaga Santos Sobral

Editor

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Subeditora

CONSELHO EDITORIAL

Mariza Bezerra de M. Monte (CETEM), Paulo Sergio M. Soares (CETEM), Saulo Rodrigues P. Filho (CETEM), Sílvia Gonçalves Egler (CETEM), Vicente Paulo de Souza (CETEM), Antonio Carlos A. da Costa (UERJ), Fátima Maria Z. Zotin (UERJ), Jorge Rubio (UFRGS), José Ribeiro Aires (CENPES), Luis Enrique Sánches (EPUSP) e Virginia S. Ciminelli (UFMG).

A Série Tecnologia Ambiental divulga trabalhos relacionados ao setor minerometalúrgico, nas áreas de tratamento e recuperação ambiental, que tenham sido desenvolvidos, ao menos em parte, no CETEM.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Valéria Cristina de Souza

Coordenação Editorial

Valéria Cristina de Souza

Editoração Eletrônica

Andreza Milheiro

Revisão

Fernandes, André L. Ventura

Influência das distintas formas de processamento mineral na biolixiviação de metais de base / Fernandes, André L. Ventura [et al.]. —Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

38p. (Série Tecnologia Ambiental, 74)

1. Biolixiviação. 2. Beneficiamento de minério. 3. Metais de base. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Fernandes, André L. Ventura. III. Oliveira, Débora Monteiro. IV. Machado, Tatiane Franco. V. Sobral, Luis Gonzaga Santos. VI. Série.

CDD – 669.0283

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Cominuição	11
1.2 Britagem	12
1.3 Mogem	13
1.4 Biolixiviação	14
2 OBJETIVO	18
3 EXPERIMENTAL	19
3.1 O Uso de Novas Tecnologias Visando a Cominuição das Rochas	19
3.2 HPGR (High Pressure Grinding Rolls)	20
3.3 Aplicação de Pulsos Elétrico de Alta Voltagem	29
4 CONCLUSÕES	34
5 AGRADECIMENTOS	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

RESUMO

Enquanto a demanda mundial de cobre é crescente (aumento de cerca de 3% ao ano), a indústria mineral enfrenta, cada vez mais, a necessidade de processar rejeitos e minérios de baixo grau contendo esse metal. Isso impõe a necessidade de extrair o metal a partir de minérios de baixos teores e de rejeitos. Para tanto são necessários processos que exijam baixos custos de investimento e operacionais para que a extração do cobre não se torne algo inviável economicamente.

Uma alternativa é a rota biohidrometalúrgica, que permite alcançar altos percentuais (?) de recuperação do metal com baixo custo operacional. Esta rota consiste na utilização de microrganismos capazes de promover a solubilização de determinados metais presentes na amostra mineral. O processo de solubilização de minérios, sob condições adequadas ao crescimento dos microrganismos, é chamado de biolixiviação e ocorre na natureza.

A cominuição convencional não é o único segmento altamente caro na hidrometalurgia do cobre, mas constitui um estágio essencial de preparação no processamento de minério. Para minerais de cobre mais duros, mais consumidores de ácido e mais refratários, a cominuição convencional não oferece nenhuma opção de grande aprimoramento, restando preocupações com o consumo de energia, disponibilidade e rendimento. Na biolixiviação, um dos maiores limitantes é a falta de acesso dos microrganismos aos sulfetos minerais de cobre. Para a maioria dos minérios, a britagem convencional não ocasiona a microfissura da matriz da ganga.

Métodos mais novos de cominuição estão continuamente sendo solicitados, oferecendo a perspectiva de atingir os resultados exigidos (redução de tamanho e liberação do mineral) com menor consumo energético. Estes métodos

incluem otimização do circuito de cominuição e desenvolvimento de dispositivos de cominuição Neste estudo, serão abordadas as técnicas de uso de pulsos elétricos de alta voltagem e o uso de rolos de moagem de alta pressão.

Palavras-chave

Biolixiviação, extração, HPGR, pulsos elétricos de alta voltagem.

ABSTRACT

While world demand for copper is growing (raising about 3% per year), the mineral industry is increasingly faced with the need to process low grade ores, overburden and waste from current mining operations. The economic extraction of copper from low-grade ores requires low-cost processing methods such as in situ, dump and heap leaching in order to face a copper feasible extraction.

In general, biohydrometallurgical process can be used to reach considerable metal recovery obtaining low operational costs.

This process consists on the use of micro-organisms capable of solubilizing metals found in mineral samples. Ore solubilizing process, when occurs under growing micro-organisms suitable conditions, is known as Bioleaching and this process occurs naturally, in mines, for example.

The conventional cominution process is not considered the unique expensive step in copper hydrometallurgy. However, it is considered an essential step in the ore processing. For more refractory and acidic consuming copper minerals, the conventional cominution does not offer increasingly improvements, resulting in costs associated with energy costs and yield. In bioleaching process, one of the limiting factors is the lack of micro-organisms access to copper sulphide minerals. For most types of ores, conventional milling does not open microfractures in the gangue matrix.

Novel crushing methods have been analyzed, opening the perspective of reaching better results associated with lower energy consumption. Such methods promote optimization of cominution circuit and development of cominution devices.

In such review, techniques as electric pulses of high voltage and HPGR (High Pressure Grinding Rolls) are going to be studied.

Keywords: Bioleaching, extraction, HPGR, electric pulses of high voltage.

1 | INTRODUÇÃO

1.1 | Cominuição

Muitas são as aplicações dos minérios ou minerais em nosso cotidiano, e eles aparecem em praticamente todos os momentos de nosso dia a dia, lembrando-nos de sua importância dentro da história humana. Todos sabem que esses minérios são extraídos da subsuperfície através de minas a céu aberto ou subterrâneas, mas para que eles cheguem até o usuário final ou consumidor, é necessário passar por várias etapas de processamento (<http://tecnicoemineracao.com.br/etapas-da-cominuicao-de-minerios-britagem-e-moagem/>).

Segundo DA LUZ *et al.*, (2004), a operação de fragmentação no beneficiamento de minérios agrega um conjunto de técnicas que permitem que um sólido de determinado tamanho seja reduzido a fragmentos de tamanho menor.

O estágio inicial da fragmentação aplicado ao processamento do minério é a etapa da lavra, que consiste no desmonte do minério ou rocha com o auxílio de explosivo. São produzidos blocos volumosos, que alimentam os equipamentos de britagem.

Cominuição é o processamento de materiais para romper rochas e matéria-prima crua em partículas menores e pedaços. Isto é usado na mineração e na produção de uma vasta gama de produtos, incluindo as matérias-primas para a construção, bem como componentes acabados. As empresas podem usar processos por via úmida e seca, dependendo dos materiais com que trabalham e como eles planejam usá-los. Nesta área,

os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento incluem a invenção de novos equipamentos, melhores sistemas de classificação e novos usos para materiais antes desperdiçados (www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/6997-o-que-e-cominuicao/)

As etapas da cominuição de minérios são a britagem e a moagem. Vejamos como cada uma das etapas funciona.

1.2 | Britagem

A britagem é considerada o primeiro processo de fragmentação, e também o mais importante, segundo os especialistas, pois é responsável por boa parte do que se entende por beneficiamento mineral. Esta é a etapa seguinte à lavra. Tal operação pode ser repetida diversas vezes, mudando-se o equipamento (britagem primária, secundária, terciária). Há um grande número de variedades de britadores, sendo que os mais comuns são os seguintes: mandíbulas, giratório, cônicos, rolo simples, rotativo, rolo duplo, impacto e martelos, etc.

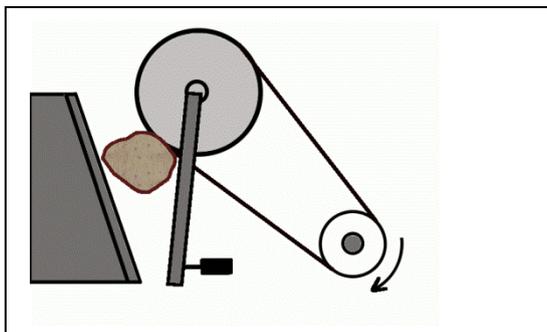


Figura 1. Esquema do processo de britagem.

Após o minério ser extraído da mina através da etapa de lavra, os blocos são encaminhados ao britador para que sejam reduzidos a uma granulometria conveniente para alimentação dos moinhos ou para sua utilização direta. Dentro do processo de cominuição de minérios, a britagem é responsável, entre outras coisas, pelo tamanho e pela forma dos fragmentos de minério, sendo os processos divididos. As dimensões dos blocos vindos da mina (ROM) irá definir qual britador deverá ser utilizado no primeiro processo de britagem. Caso a granulometria desejada não seja atingida no primeiro processo (britador primário), o material resultante desta primeira britagem é encaminhado ao britador secundário, onde geralmente a granulometria desejada é alcançada. Após isso, o material é direcionado à moagem.

1.3 | Moagem

Considerada a sequência natural do processo de britagem, a moagem é a chamada fragmentação fina, que representa o último estágio da redução granulométrica na cominuição de minérios. Aqui as partículas são reduzidas pela combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito, a um tamanho adequado à liberação do mineral, geralmente, a ser concentrado nos processos subsequentes (pelotização, lixiviação e combustão, dentre outros). Ela é realizada por meio da utilização de moinhos cilíndricos (bolas, barras ou seixos) ou moinhos de martelo, sendo os cilíndricos os mais utilizados. Moinhos cilíndricos de bolas utilizam bolas como meio moedor e são utilizados para moagens mais finas. Moinhos cilíndricos de barras são utilizados para moagem mais grossa e utilizam barras como meio moedor. Também suportam uma

alimentação grossa de até 50 mm, alguns também os consideram como máquinas de britagem fina. Por ser responsável pela fragmentação mais fina do minério, a moagem também é o processo mais oneroso dentro da cominuição, gerando custos altos, de acordo com o tamanho das partículas de minério resultantes do processo.

1.4 | Biolixiviação

O gradual esgotamento das reservas mundiais de minérios de grau elevado tem levado ao desenvolvimento de rotas alternativas de recuperação de metais encontrados em minérios de baixo grau e em concentrados, em situações onde estes não podem ser processados. Portanto, propõem-se algumas soluções possíveis para resolver este problema, ainda que estas não sejam consideradas plenamente adequadas, uma vez que tais processos consomem grande quantidade de energia. Outra desvantagem seria o custo associado à proteção ambiental em todo o planeta (BOSECKER, 1997; PRADHAM *et al.*, 2008).

O bioprocessamento de minerais contendo metais de interesse é visto como uma das melhores aplicações para a solução dos problemas supracitados. Esta técnica, segundo os autores, apresenta como vantagens o fato de reduzir o custo de capital fixo, além de proporcionar redução da poluição ambiental. Os processos biológicos são realizados sob condições ambientes e os produtos resultantes dos mesmos se encontram dissolvidos em solução aquosa, fato que facilita o tratamento dos efluentes gerados (PRADHAM *et al.*, 2008) e YU *et al.*, 2014).

Enquanto a demanda mundial de cobre é crescente (aumento de cerca de 3% ao ano), a indústria de minerais enfrenta, cada vez mais, a necessidade de processar rejeitos e minérios de baixo grau contendo esse metal. Levando em consideração o investimento, os custos operacionais, e as questões ambientais, a biolixiviação é reconhecida como uma tecnologia limpa e econômica, quando utilizada na recuperação de minerais descartados (FENG *et al.*, 2014).

Em 2010, mais de 20% da produção mundial de cobre foi atingida pelo uso desta tecnologia limpa, associada à combinação das técnicas de extração por solvente e eletrodeposição. Desta forma, é possível concluir que sendo o mais abundante mineral de cobre, a biolixiviação industrial de calcopirita, CuFeS_2 , que é um mineral refratário, não deveria ser considerada um método bem sucedido na extração de cobre, em função do seu baixo grau nesse metal e da sua composição complexa. No entanto, estudos direcionados ao aprimoramento da dissolução de calcopirita por ação de microrganismos têm atraído a atenção de pesquisadores (FENG *et al.*, 2014).

Segundo BOSECKER (1997), processos biotecnológicos podem ter sido utilizados por gregos e romanos, que provavelmente obtiveram sucesso na extração de cobre há cerca de 2000 anos. No entanto, há pouco mais de 50 anos, utilizam-se bactérias e outros microrganismos em processos biotecnológicos, sendo tais microrganismos responsáveis pela disponibilização de metais em solução aquosa. Tais metais eram encontrados em depósitos de minérios e em minas. O processo de solubilização desses minérios é chamado de biolixiviação e ocorre na natureza sob condições adequadas ao crescimento dos microrganismos que promovem este processo.

Segundo SOBRAL *et al.*, (2010), chama-se de biolixiviação o processo de dissolução de minerais contendo substâncias inorgânicas por ação de microrganismos. Este processo biohidrometalúrgico pode ser utilizado na solubilização de minérios metálicos por ação direta ou indireta de microrganismos.

De acordo com PRADHAM *et al.*, (2008), a biolixiviação é uma tecnologia emergente, com grande potencial para agregar valor à indústria de mineração, proporcionando benefícios do ponto de vista ambiental e social. A biolixiviação de calcopirita, CuFeS_2 , considerada o mais importante mineral contendo cobre é, ao contrário de muitos outros minérios contendo esse metal, conhecida por ser recalcitrante ao processamento hidrometalúrgico. O principal impedimento para o uso da calcopirita no processamento metalúrgico é sua baixa velocidade de dissolução.

Os microrganismos com potencial para ser usados no processo de biolixiviação são caracterizados em termos de sua ação oxidante sobre os íons Fe^{2+} e/ou sobre espécies reduzidas de enxofre, em meio ácido. Segundo BOSECKER (1997), os microrganismos utilizados na extração de metais a partir de sulfetos metálicos são quimiotróficos, e portanto, apenas compostos inorgânicos são necessários para o seu crescimento. Em geral, os nutrientes são obtidos do próprio ambiente e do próprio mineral a ser lixiviado. Para o ótimo crescimento dos microrganismos, compostos de ferro e enxofre podem ser complementados com sais de amônio, fosfato e magnésio.

Existem microrganismos capazes de dissolver sulfetos metálicos contidos em minérios de cobre e concentrados, onde o lixiviado de cobre é oxidado a sulfato de cobre II (CuSO_4) em meio aquoso. Em seguida, a solução resultante da biolixiviação é removida e submetida à tecnologia de extração por solvente, com o objetivo de extrair cobre iônico, Cu^{2+} . Os íons Cu^{2+} serão, posteriormente, reduzidos a Cu^0 através do uso da tecnologia de eletrodeposição, obtendo-se como produto final um catodo de cobre de alta pureza (99,999% de Cu) (SOBRAL *et al.*, 2010). Desta forma, dentre os vários fatores que interferem na eficiência do processo de biolixiviação de minerais metálicos, a presença de microfissuras no material processado pode contribuir para que se obtenha melhor extração do material de interesse.

2 | OBJETIVO

O objetivo principal desta revisão é mostrar como o uso de distintas formas de processamento mineral pode influenciar na biolixiviação de metais de base, uma vez que a busca por tipos de processamento mineral que proporcionem maior rendimento, menor consumo energético, menor impacto ambiental e menor retirada de matérias primas se faz essencial na mineração.

3 | EXPERIMENTAL

3.1 | O Uso de Novas Tecnologias Visando a Cominuição das Rochas

A cominuição convencional não é o único segmento altamente caro na hidrometalurgia do cobre, mas constitui um estágio essencial de preparação no processamento de minério. Para minerais de cobre mais duros, mais consumidores de ácido e mais refratários, a cominuição convencional não oferece nenhuma opção de grande aprimoramento, restando preocupações com o consumo de energia, disponibilidade e rendimento. Na biolixiviação, um dos maiores limitantes é a falta de acesso dos microrganismos aos sulfetos minerais de cobre. Para a maioria dos minérios, a britagem convencional não ocasiona a microfissura da matriz da ganga.

A cominuição permanece, há muito tempo, como a etapa que mais consome energia na maioria das minas, com consumo específico de energia relatado variando de alguns kWh/t na britagem, até 10-60 kWh/t para moagem AG/SAG e moinhos de bola, até mais de 100 kWh/t para moagem ultrafina. O maior consumo de energia implica em custo operacional elevado.

O desenvolvimento sustentável e o uso de matérias primas exigem processos novos, melhores e mais eficientes. Métodos mais novos de cominuição estão continuamente sendo solicitados, oferecendo a perspectiva de atingir os resultados exigidos (redução de tamanho e liberação do mineral) com menor consumo energético. Estes métodos incluem otimização do circuito de cominuição e desenvolvimento de dispositivos de cominuição tais como rolos de moagem de alta pressão (HPGR), processamento por uso de micro-ondas,

fragmentação eletrohidráulica e fragmentação eletrodinâmica. Nesre estudo, serão abordadas as técnicas de uso de pulsos elétricos de alta voltagem e o uso de rolos de moagem de alta pressão.

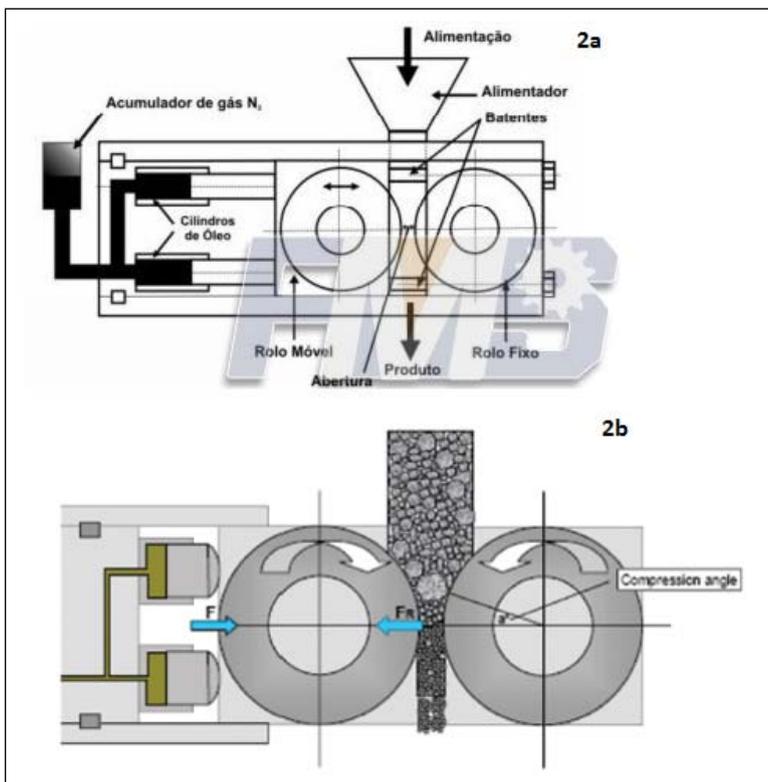
3.2 | HPGR (High Pressure Grinding Rolls)

A tecnologia conhecida como HPGR (High Pressure Grinding Rolls) surge como alternativa visando o processamento do minério de uma forma mais econômica, possibilitando a obtenção do metal de base a partir de minério mais refratário e com elevado rendimento.

Ao contrário da crença popular, HPGR não é uma tecnologia nova, tendo sua origem no início do século XX, empregada na briquetagem de carvão, além de ser aplicada na cominuição de materiais desde meados dos anos 80. No entanto, apesar de HPGR ter sido lugar comum na briquetagem de cimento, diamantes e minério de ferro, sua adoção na cominuição de rochas pesadas tem sido lenta e cautelosa, e ainda há poucas operações com rochas pesadas para ser abraçadas por essa tecnologia. Torna-se um objetivo marcante desta revisão acabar com mitos e desmitificar a tecnologia, buscando encorajar o espalhamento do conhecimento sobre HPGR como uma alternativa ou complemento às tecnologias convencionais usadas nos circuitos de esmagamento e moagem.

O equipamento utilizado em HPGR inclui um par de rolos contra-giratórios, montado em uma estrutura robusta. Um rolo fica fixo na estrutura, enquanto o outro rolo flutua em trilhos e fica posicionado usando molas pneumohidráulicas.

A alimentação é realizada no espaço entre os rolos, sendo esmagada através de um mecanismo de ruptura interparticular (mecanismo no qual partículas são quebradas por compressão contra outras partículas, diferentemente da quebra de uma única partícula, envolvendo a compressão entre as superfícies de esmagamento da máquina).



Figuras 2a e 2b. Princípios do projeto do HPGR.

A performance da cominuição é fortemente determinada pela pressão exercida pelo sistema hidráulico no rolo flutuante. Tipicamente, pressões de operação estão na faixa entre 50 a 150 bar, mas pode atingir o valor de 180 bar. Para máquinas maiores, as forças aplicadas podem ser superiores a 25.000 kN.

Os custos de capital podem ser maiores para o uso de HPGR ao invés de britadores. No entanto, quando se faz a comparação com a capacidade de britagem/cominuição, os custos de capital são comparáveis.

Por exemplo, uma operação poderia requerer vários britadores terciários para proporcionar o mesmo poder de britagem oferecido por um equipamento HPGR. Como resultado, o custo de capital para os britadores (mesmo excluindo os gastos com manutenção) poderia ser o dobro do valor gasto com HPGR.

Além do mais, britadores convencionais introduzem substanciais gastos de cominuição e ineficiências em termos de energia, desgaste do aço e/ou ausência de boa liberação. A indústria do cobre sempre enfrenta o problema do esgotamento de minérios puros e tradicionais (óxidos), enquanto a necessidade de lixiviar minérios de bornita e calcopirita, com o uso da biohidrometalurgia, está rapidamente acelerando.

Na biolixiviação, um dos maiores limitantes é a falta de acesso da bactéria aos minerais de sulfeto de cobre. Para a maioria dos minérios, a britagem convencional não ocasiona microfissuras na matriz da ganga. O HPGR, ao contrário, é uma das tecnologias de cominuição disponível atualmente que realiza consideráveis microfissuras para uma larga faixa de tipos de minério, especificamente nas frações mais grosseiras.

BAUM *et al.*, (1997) registraram que mais de 60% de todas as partículas com granulometria acima de 100 mesh, obtidas a partir de minério de cobre, mostraram microfissuras. De acordo com avaliação realizada com material lixiviado após britagem com HPGR, realizada em Freeport, confirmou-se a utilidade e o impacto altamente efetivo do HPGR na lixiviação do cobre.

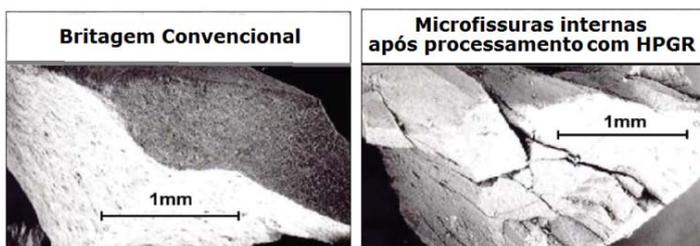


Figura 3. Partículas esmagadas pelo método tradicional e por uso de HPGR, respectivamente.

Fabricantes

Há, atualmente, três fabricantes reconhecidos de equipamentos HPGR, cujos nomes são: Polysius (uma empresa da companhia Thyssenkrupp), KHD (KHD Humboldt Wedag AG) e Köppern, todas com suas bases na Alemanha.

Não há diferenças fundamentais entre as mesmas. No entanto, há algumas variações entre os projetos. Por exemplo, a Polysius favorece um projeto com grande relação de aspecto – com diâmetros dos rolos grandes, menor largura – enquanto a KHD prefere um projeto com baixa relação de aspecto e a Köppern, uma relação quadrada. Mais recentemente, a KHD ofereceu maiores relações de projeto para aplicações de maior capacidade de processamento.

Polysius e Köppern usam suportes de rolo de auto-alinhamento, enquanto a KHD usa suportes cilíndricos.

Todos os três fabricantes oferecem projetos de rápida substituição dos rolos, visando a rápida troca de rolos danificados.

A grande maioria das mais de 500 unidades em operação em todo o planeta está no setor de cimento. Desde a sua introdução, na metade dos anos 80, HPGR tem sido largamente utilizada nos setores de diamante e processamento de minério de ferro. No processamento de rochas pesadas (tipicamente minérios de cobre e de ouro), a primeira aplicação em grande escala ocorreu em Cyprus Sierrita em 1995/1996.

Mais recentemente, HPGR foi escolhida como a tecnologia preferida para o projeto Cerro Verde cobre/molibdênio, no Peru, e o projeto de ouro/cobre, em Boddington, Austrália. Freeport, Indonésia, usa duas unidades de pré-tratamento com alimentação do moinho de bola, para gerar um produto mais fino e conseqüentemente, melhorar o desempenho de flotação.

A divisão de Amplats Potgeitersrus (platina, África do Sul) comissionou uma grande unidade em novembro de 2007. Muitas outras companhias de mineração, localizadas na Austrália, são consideradas como usuárias da tecnologia HPGR.

A Figura abaixo ilustra a pronta aceitação e aumento no uso da tecnologia HPGR, seguindo sua introdução nos setores de processamento de diamantes e minério de ferro, e também reflete a relativa abordagem lenta e cautelosa no processamento de rochas pesadas – ainda que o interesse no uso dessa tecnologia aparente ser crescente.

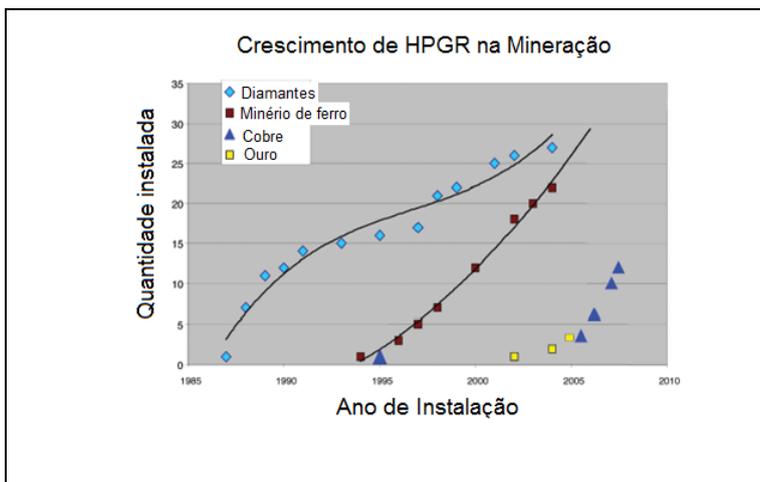


Figura 4. Crescimento do uso de HPGR.

Tipicamente, a escolha de HPGR para o trabalho de cominuição é baseado em testes realizados em escala piloto. Esses testes são realizados por fabricantes de HPGR e exigem grandes quantidades de material a ser transportado para as instalações dos fabricantes ou laboratórios comerciais com capacidade de testes em escala piloto. Uma característica marcante do processo HPGR é que a cominuição aumenta conforme a entrada de energia específica aumenta até um certo limite, além do qual pouca ou nenhuma cominuição extra é percebida. Este ponto é comumente conhecido como **ponto de saturação de energia** (ESP), uma condição de processo que define as condições ótimas de HPGR para um tipo específico de minério. A Figura 5 mostra um equipamento de HPGR utilizado em escala de laboratório, que requer de 20 a 25 kg de minério triturado a 100% 9,5 mm.

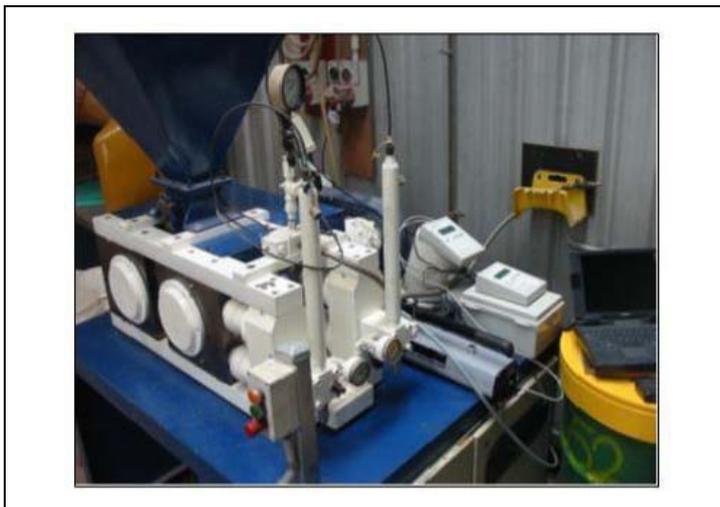


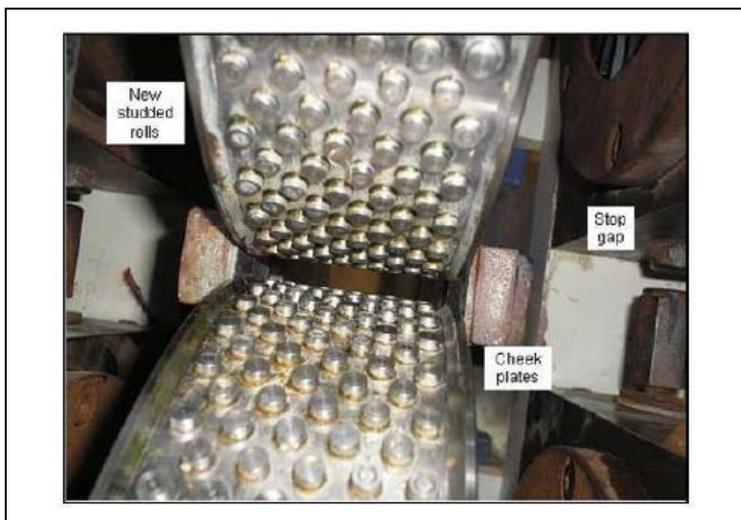
Figura 5. Equipamento de HPGR usado em escala de laboratório.

As regras quanto ao uso de HPGR

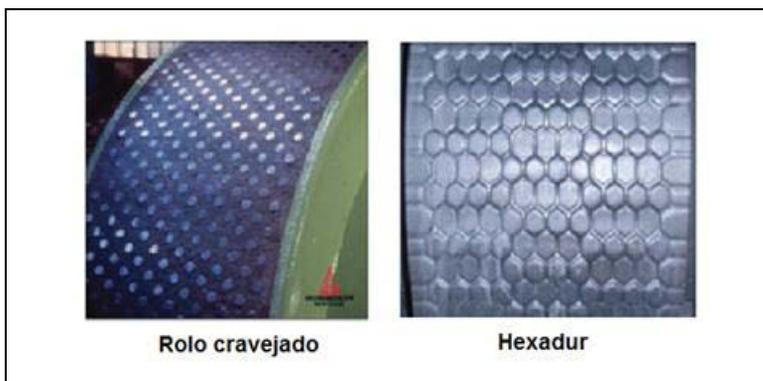
As questões principais estão relacionadas principalmente à proteção da superfície de desgaste e podem ser assim resumidas:

- i) O material (minério) deve estar não segregado e apresentado uniformemente através da largura do rolo;
- ii) O manuseio de metal indesejável deve ser altamente eficiente e o sistema projetado de tal forma que a remoção deste tipo de metal não ocasione a parada da alimentação do HPGR;
- iii) A alimentação pela parte superior do sistema não deve exceder o espaço existente entre os rolos;
- iv) Para minérios que contêm metais de interesse pressões de operação muito elevadas devem ser evitadas;

- v) A proteção da extremidade do rolo e o projeto de placa lateral é agora bem desenvolvido e este método de proteção é geralmente preferido para se evitar a fuga do material em processo de cominuição, embora essa alternativa seja considerada em algumas aplicações especializadas.



Apesar de o equipamento ser mecanicamente muito confiável, a grande maioria do tempo de operação perdido está relacionado à superfície de cobertura, ainda que o foco nesse aspecto esteja em desenvolvimento de tecnologia.



Que faixa está disponível levando em conta a capacidade da unidade?

Deixando de lado as máquinas usadas em laboratório, as menores unidades implantadas no campo são as unidades piloto da KHD e da Polysius, classificadas como 20-80 e 80-100 t/h, respectivamente. A maior máquina produzida até então é a Polysius 24/17 (2,4 m de diâmetro, 1,7 m de largura – em operação em Cerro Verde e ordenada para o projeto em Boddington). Esta máquina tem uma capacidade de cerca de 2250 t/h e impulsionado pela dupla 2500 kW (Cerro Verde) e 2800 kW (Boddington).

Os fabricantes desenvolveram uma faixa de tamanho padrão entre estes limites, mas estão aptos a criar máquinas de qualquer tamanho. Por exemplo, o maior diâmetro das máquinas até o momento é o de 2,8 m em unidades localizadas na mina de diamantes Premier, na África do Sul. Elas têm 0,5 m de largura, no entanto, com impulsionadores duplos de 600 kW, logo, não são particularmente grandes em termos de capacidade – o diâmetro grande foi escolhido para proporcionar um grande espaço operacional, evitando a ruptura

do diamante. Recentemente, as superfícies dos rolos foram alteradas de suaves para cravejadas, promovendo um grande impulso tanto na capacidade quanto no tempo de revestimento com apenas um pequeno impacto na performance de redução de tamanho.

3.3 | Aplicação de Pulsos Elétrico de Alta Voltagem

Nas últimas décadas, grandes aprimoramentos têm sido realizados na compreensão do funcionamento dos equipamentos de cominuição, simulação e controle. No entanto, aprimoramentos na liberação deveriam também ser considerados como objetivo principal. A liberação de minerais valiosos encontrados na matriz da rocha é um processo essencial em cominuição. O método de liberação ideal é por ruptura intergranular, onde tal ruptura ocorre através da superfície do grão nas fases do mineral, permitindo a preservação do tamanho natural do grão e minimização de sobre-moagem. Aprimoramentos na liberação são procurados por duas razões principais. Inicialmente, se a liberação for atingida sem a necessidade de moer as partículas até ser transformados em finos, menos energia é exigida.(WANG *et al.*, 2012).

Em seguida, a sobre-moagem é um processo muito caro e produz finos que tendem a interferir no subsequente processo de separação, tornando o processo corrente abaixo tanto ineficiente quanto mais caro.

Os problemas da atual tecnologia de liberação são: os elevados custos de capital do processo de cominuição e sua manutenção, o elevado consumo de energia, a geração de excesso de finos e o destino dos rejeitos. A liberação

insuficiente e a sobre-moagem de minerais obtida pelos métodos convencionais, indicam que a cominuição mecânica não é uma tecnologia ideal de liberação. Ao contrário, trata-se de uma tecnologia de redução de tamanho do minério, com a liberação ocorrendo como se fosse um efeito secundário.

Nos processos de cominuição tradicionais, (tais como SAG e moinho de bolas), não há controle sobre a liberação do minério devido à ruptura aleatória no processo mecânico.

Um aumento na liberação sem que haja grande produção de finos é difícil de ser atingido através do uso da cominuição mecânica. O desenvolvimento de um método de liberação específico e seletivo, preferencialmente por ruptura intergranular das partículas do minério, torna-se uma tarefa importante para o processamento mineral. Várias tentativas têm sido divulgadas sobre novos métodos de fragmentação de minérios.

O trabalho usando pulsos de alta voltagem para fragmentar as rochas parece interessante. WANG *et al.*, (2011) relataram testes de liberação comparativa sobre óxidos minerais, dentre os quais hematita e minerais do grupo da platina, além de minerais contendo sulfetos complexos de cobre e pentlandita. Os resultados indicaram que a desintegração do agregado mineral por ação de pulsos elétricos gerou uma porcentagem maior de partículas liberadas e menor porcentagem de material fino do que o obtido por cominuição mecânica. Constantes dielétricas dos minerais geram fissuras nos minerais quando os pulsos são aplicados, mas nem tantos finos. Ao contrário da técnica de HPGR, o uso de pulsos de alta voltagem gera fissuras, mas não de forma indistinta.

WANG *et al.*, (2011) mostraram em um estudo comparativo de liberação de amostra de recife cominuída por desagregação com uso de pulso elétrico e por britagem convencional. A liberação da ganga foi similar usando ambos os métodos, mas a liberação de minerais do grupo da platina foi superior ao obtido pelo uso do convencional britador de mandíbula.

Ainda, WANG *et al.*, (2011) descobriram que a desintegração elétrica resulta em ruptura preferencial de derivados do carvão e partículas minerais ao longo de suas fronteiras. A literatura mostra que a melhor liberação pode ser atingida com rupturas proporcionadas por pulsos de alta voltagem.

No entanto, dados muito escassos foram publicados em relação ao consumo de energia no processo de ruptura por uso de pulsos de alta voltagem. O consumo de energia por unidade de volume de minérios testados variou muito, mas, em média, foram de 2-3 vezes maiores que a cominuição mecânica convencional. Eles citaram que o consumo foi de 50 kWh/t para a cominuição mecânica e 90 kWh/t para a desintegração elétrica. Ainda que se argumente que a ruptura causada por pulso de alta voltagem possa gerar economia global de energia por causa do grau maior do concentrado produzido, a ruptura causada por pulsos de alta voltagem reduz a massa de material alimentado ao processo de fundição, que consome 2,5 MWh/t, o consumo de energia de 90 kWh/t é significativo quando comparado ao processo de cominuição convencional, processando-se minérios do mesmo tamanho.

Nos últimos dois anos, uma nova abordagem para explorar ruptura por uso de pulso de alta voltagem tem sido desenvolvida no Centro de Pesquisa Mineral Julius Kruttschnitt (JKMRC). Esta abordagem é distinta por:

- i) a aplicação de apenas um conteúdo energético muito pequeno e específico (ex: 1–3 kWh/t) no processo de ruptura com pulsos de alta voltagem, com o objetivo de danificar as partículas da rocha e reduzir a força da rocha; e
- ii) a consideração do efeito deste processo no consumo energético ao longo de todo o circuito de cominuição. A abordagem não consiste na tentativa de fissurar as rochas de alimentação em micropartículas para liberar partículas de valor, mas apenas enfraquecê-las de forma que o processo de cominuição de partículas de minério exija energia reduzida.

Conclui-se que a aplicação de pulsos elétricos de menor energia pode danificar a estrutura da rocha, proporcionando o contato dos microrganismos com os minerais no processo de biolixiviação, com gasto reduzido de energia, uma vez que o objetivo de aplicação dos pulsos é tão somente enfraquecer as rochas.

A tabela a seguir mostra características do processo de cominuição convencional.

Tabela 1. Cominuição tradicional e suas características.

Cominuição Convencional
Estágio essencial no processamento mineral, porém, é caro.
Não apresenta grande aprimoramento no processamento de minerais refratários.
Preocupações com consumo de energia, disponibilidade e rendimento.
Ausência de microfissura no material.
Necessidade de métodos novos de cominuição, mais eficientes.
Métodos novos com maior rendimento.

A Tabela 2 nos permite comparar características das tecnologias de HPGR e de pulsos elétricos de alta voltagem.

Tabela 2. Características das tecnologias de HPGR e pulsos elétricos de alta voltagem.

High Pressure Grinding Rolls (HPGR)	Pulsos elétricos de alta voltagem
<p>Tecnologia econômica.</p> <p>Elevado rendimento.</p> <p>Pouca aplicação na cominuição de rochas pesadas.</p> <p>Alternativa ou complemento às tecnologias de esmagamento.</p> <p>Possibilidade de substituir vários bitadores em uma única operação unitária.</p> <p>Formação de microfissuras, de forma indistinta, que permitem o acesso dos microrganismos aos minerais sulfetados.</p>	<p>Maior liberação de partículas com menor porcentagem de finos.</p> <p>Constantes dielétricas geram fissuras quando o pulso é aplicado.</p> <p>Fissuras geradas na superfície do mineral.</p> <p>Melhor liberação por ação de pulsos.</p> <p>Maior economia global, porém, para um mesmo volume de minerais, a aplicação de pulsos elétricos é um processo mais caro.</p> <p>Aplicação de pulsos apenas para enfraquecer a superfície mineral exige menos energia.</p>

4 | CONCLUSÕES

As tabelas mostradas no item anterior indicam as vantagens que as novas tecnologias de processamento mineral apresentam sobre a britagem convencional, visando a realização da biolixiviação de metais de base. A cominuição convencional se apresenta como uma tecnologia cara, sendo necessária a busca por processos mais eficientes e melhores do ponto de vista econômico e ambiental. Assim, o uso de HPGR e de pulsos de alta voltagem podem proporcionar melhor abertura da estrutura do material a ser processado, através da formação de microfissuras, substituindo uma série de etapas da cominuição tradicional, além de facilitar o contato dos microrganismos com os minerais.

5 | AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos ao CNPq pelo auxílio financeiro e apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOSECKER, K. Bioleaching: metal solubilization by microorganism. FEMS Microbiology review, 591-604p, 1997.
- DA LUZ, A.; SAMPAIO, J. A.; DE ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de Minérios. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. 4ª Edição. 853 p. Rio de Janeiro, 2004.
- FENG, S.; YANG, H.; ZHAN, X.; WANG, W.; Novel integration strategy for enhancing chalcopyrite bioleaching by *Acidithiobacillus* SP. In a 7-L fermenter. Bioresource Technology, 371-378p., 2014.
- MORLEY, C. HPGR – FAQ. Vol. 110. March, 2010.
- PRADHAM, N.; NATHSARMA, K. C.; RAO, S.; SUKLA, L. B.; MISHRA, B. K. Heap bioleaching of chalcopyrite: a review. Minerals Engineering. 355-365 p, 2008.
- SOBRAL, L. G. S.; DE OLIVEIRA, D. M.; DE SOUZA, C. E. G. Biohydrometallurgical processes: a practical approach. CETEM/MCT. 324p. Rio de Janeiro, 2010.
- WANG, E.; SHI, F.; MANLAPIG, E. Pre-weakening of mineral ores by high voltage pulses. Minerals Engineering, 2011.
- WANG, E.; SHI, F.; MANLAPIG, E. Mineral liberation by high voltage pulses and conventional cominution with same specific energy levels. Minerals Engineering. 2012.
- YU, R.; SHI, L.; GU, G.; ZHOU, D.; YOU, L.; CHEN, M.; QIU, G.; ZENG, W. The shifty of microbial community under the adjustment of initial and processing pH during bioleaching of chalcopyrite concentrate by moderate thermophiles. Bioresource Technology. 300-307p. 2014

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2010, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 200 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

Últimos números da Série Tecnologia Ambiental

STA-73–Aplicação de Ensaios Biológicos na Avaliação da Biodisponibilidade de Hidrocarbonetos de Petróleo em Solos Impactados. Andréa Camardella de Lima Rizzo, Cristina Lúcia S. Sisino, Cláudia D. Cunha, Andréa M. Salgado, Paulo Rubens G. Barrocas, Rodrigo G. Taketani e Ellen C. Giese, 2014.

STA-72–Biofilmes: A interação micro-organismo/substrato mineral na biolixiviação. Ellen Cristine Giese, 2014.

STA-71–Avaliação de Emissões Radioativas em Rochas Ornamentais. Yasmin Soares Gavioli, Julio Cesar Guedes Correia e Roberto Carlos da C. Ribeiro, 2014.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ

Geral: (21) 3865-7222

Biblioteca: (21) 3865-7218 ou 3865-7233

Telefax: (21) 2260-2837

E-mail: biblioteca@cetem.gov.br

Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.