

# COMINUIÇÃO BIOASSISTIDA NA MELHORIA DO PROCESSO DE FLOTAÇÃO

Juan C. Barreto<sup>1</sup>, Cláudio G. Porto<sup>1</sup> & Luis G. Sobral<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Pós-graduação em Geologia/Universidade Federal de Rio de Janeiro. Av. Brigadeiro Trompowski s/n, CCMN/IGEO, Bloco G, Rio de Janeiro – RJ. CEP: 21949-900. Tel. +55 21 2598-9478, fax +55 2598-9465. E-mail: juan.guerrero@gmail.com, porto@geologia.ufrj.br.

<sup>2</sup> Coordenação de Processo Metalúrgicos Ambientais/Centro de Tecnologia Mineral. Av. Pedro Calmon, 900, Rio de Janeiro – RJ. CEP.: 21941-908. Tel. +55 21 3865 7246, fax + 55 21 3865-7246. E-mail: lsobral@cetem.gov.br.

## RESUMO

A inovação tecnológica no processamento mineral, na etapa de cominuição, mediante o uso de micro-organismos que, de forma indireta, favorecem a fragmentação da rocha, foi o principal objetivo deste estudo. Porém, este trabalho visou, também, minimizar o consumo de energia na etapa de moagem, bem como dar seguimento à etapa de beneficiamento de um minério primário de sulfetos minerais de cobre de baixo teor, rejeito de um tratamento biológico/oxidativo. Nesse estudo foram monitorados, em intervalos de tempo pré-determinados, a distribuição granulométrica, o índice de trabalho e o consumo de energia, bem como efetuados ensaios de flotação em bancada, que consistiram, unicamente, em uma etapa de desbaste (*Rougher*). As determinações do índice de trabalho foram realizadas em um moinho padrão de Bond marca Denver. As recuperações dos sulfetos minerais foram acompanhadas pelas determinações de cobre utilizando o método analítico de digestão ácida/absorção atômica. Os resultados, para a amostra que passou pelo referido processo biológico, mostram que houve uma diminuição no índice de trabalho, reduzindo, assim, em sete pontos percentuais, o consumo de energia, e que na etapa posterior de concentração o minério respondeu bem ao processo de flotação.

**PALAVRAS-CHAVE:** fragmentação, minério de cobre, índice de trabalho, tratamento biológico.

## ABSTRACT

The technological innovation in the mineral processing, in the comminution step, by using microorganisms that, in an indirect way, enhance the rock fragmentation, was the main objective of this study. However, this work aimed, also, at minimizing the energy consumption of the grinding step, as well as to go further in the stage of improvement of a low copper content primary ore, as a residue of a biological oxidative treatment. In that study, the particle size distribution, the work index and energy consumption were monitored, in pre-determined time intervals, as well as accomplishing bench scale rougher flotation tests. The work index terminations were accomplished in a standard Denver Bond mill. The sulphide minerals recoveries were accompanied by the copper analysis using the analytical method of acid digestion of the solid phase followed by the copper analysis by atomic absorption spectrometry. The tests results, for the sample that was biologically treated, show that the work index decreased, show that there was a decrease in the work index by 7% the energy consumption, and improving a great deal the sulphide minerals recoveries during the flotation process.

**KEY WORDS:** comminution, copper sulfide ore, Bond work index, biological treatment.

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Luz e Lins (2004), a rocha é definida como um conjunto de agregados minerais. Nessa rocha quando um ou mais de seus componentes apresentam valor econômico passa-se a chamar de minério. Sabe-se que a única maneira comercialmente empregada para a liberação desses minerais na indústria é a aplicação de grandes quantidades de energia mecânica em britadores e moinhos, resultando na produção de partículas finas, as quais apresentam maior probabilidade de se encontrarem disponíveis para seu beneficiamento e extração (Tavares, 2005). Tromans (2008) mostrou que em países, como o Brasil, com uma importante participação da mineração no setor industrial, é esperado que o gasto de energia seja uma parte importante da fração nacional, considerando-se que a cominuição é a etapa de processamento com custo mais elevado.

O processo bio-oxidativo baseia-se na atividade de micro-organismos mesofílicos, termofílicos moderados e termofílicos extremos, que suprem suas necessidades energéticas na oxidação de íons e compostos reduzidos, para a manutenção de seus metabolismos, tendo como resultado prático a solubilização de minerais. Diversos autores entre eles Lima (2006), Dopson e Lindstrom (1991), Suzuki (2001) e Norris (1990) mostraram que a presença de micro-organismos, em solução ou aderidos ao mineral, catalisa a oxidação de sulfetos minerais pela modificação dos mecanismos eletroquímicos de oxidação. O intemperismo dos silicatos minerais, sua dissolução e a influência sobre a bio-lixiviação em pilhas foi estudado por Dopson e outros (2009), esses autores sugerem que o intemperismo nos silicatos pode influenciar neste processo devido ao aumento do pH e liberação de impurezas, fato que sugere a fragilização desses minerais devido à disponibilização de elementos provenientes das estruturas dos mesmos.

Neste trabalho visou-se minimizar o consumo de energia na etapa de moagem, bem como dar seguimento à etapa de beneficiamento de um minério primário de sulfetos de cobre de baixo teor em cobre, rejeito de um tratamento biológico/oxidativo. Entretanto, com o processo de cominuição bio-assistida, acena-se para o desenvolvimento de uma nova técnica que auxiliará na minimização do consumo de energia nas etapas de britagem e moagem diminuindo, ainda, o tempo de residência do minério dentro do moinho. Espera-se com os resultados deste trabalho acenar, também, para novos conhecimentos na área de geologia, associados às contribuições dos processos biológicos e de processamento mineral disponíveis e, conseqüentemente, aplicar aos processos extrativos minerais em nível nacional.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Duas amostras diferentes foram estudadas, uma antes (RSA) e outra após (BPE) ao tratamento biológico/oxidativo. Ambas as amostras foram caracterizadas sendo determinadas as composições químicas, mineralógicas, distribuição granulométrica, índice de trabalho e consumo de energia.

O ensaio biológico/oxidativo foi realizado nos moldes do processo Geocoat™, desenvolvido pela GeoBiotics, LLC (Lima e outros, 2009). O Meio de Cultura utilizado foi o MKM para proceder ao cultivo e manutenção dos consórcios microbianos utilizados (micro-organismos mesofílicos, termofílicos moderados e termofílicos extremos), além de servir como solução lixiviante durante o processo. Após inoculação dos micro-organismos com concentração populacional inicial de  $8 \times 10^8$  UFC\*/ml, o tempo de ensaio foi de 70 dias, aproximadamente. (UFC: Unidades formadoras de colônias).

Como o ensaio consiste no recobrimento da rocha suporte (partículas entre 5 à 25 mm) com concentrado de flotação de sulfetos minerais de cobre, a amostra representativa, após ensaio, foi classificada em duas frações, grossa (partículas >3,35 mm) e fina (partículas < 3,35 mm). As determinações do índice de trabalho foram seguidas segundo a literatura (Bond, 1961 e; Yap e outros, 1982) e utilizando como malha de trabalho 105 µm. As duas amostras foram cominuídas abaixo de 3,35 mm, minimizando a geração de finos, num britador de mandíbulas. O equipamento utilizado para os ensaios de Índice de trabalho foi um moinho padrão tipo Bond marca Denver. As análises granulométricas foram feitas seguindo a serie de peneiras *Tyler mesh*, via úmido.

Na etapa de flotação a fração fina, produto da classificação granulométrica, foi cominuída durante 10 min num moinho de barras com carga interna de 10 barras. Adicionou-se 1 litro de água para 1 kg de amostra. Os testes de flotação foram realizados em uma única etapa de desbaste (rougher) a qual foi realizada em célula de bancada, marca Denver, utilizando-se uma cuba de 4 litros e amostras de 1kg. O pH foi controlado através de um medidor digital da marca ANALYON e utilizado-se como agente regulador uma solução 1M de hidróxido de Sódio. Foi adicionado o coletor AP-3477 da CYTEC (40 g/t), o qual teve um tempo de condicionamento de 6 minutos e, em seguida, foi adicionado o espumante MIBC (12,5 g/t). O tempo de condicionamento do espumante foi de 1 minuto. O tempo de flotação foi estabelecido em 6 minutos.

Para a identificação das espécies minerais foi utilizada a técnica de difração de raios-X (DRX), método do pó. As análises foram executadas em um equipamento *Bruker-D4 Endeavor*, nas seguintes condições de operação: radiação Co K $\alpha$  (35kV/40mA), geometria de feixe paralelo com espelho de Goebel, velocidade do goniômetro

de  $0,02^{\circ} 2\theta$  por passo com tempo de contagem de 1,0 segundo por passo e coletados de  $5$  a  $80^{\circ} 2\theta$ . A interpretação qualitativa do espectro foi efetuada por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF02 (ICDD, 2006) em software *Bruker Diffrac<sup>plus</sup>*.

As análises químicas foram efetuadas por fluorescência de raios X (FRX), em equipamento Bruker S4 Explorer. O espectro gerado a partir da amostra foi avaliado pelo software *Spectra plus* v.1.6 no modo *standardless method*, sem curva de calibração específica, e sem recálculo para 100%. As pastilhas foram secas na estufa a  $60^{\circ} C$  e prensadas. Foram feitas determinações de cobre a partir de amostras representativas, coletadas em cada uma das etapas, por digestão ácida seguido de análises por absorção atômica (AAS – atomic absorption spectrometry).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Composição Química, Mineralógica e Distribuição Granulométrica das Amostras

A Tabela I, a seguir, mostra a composição química das amostras antes (RSA) e após (BPE) tratamento bio-oxidativo. Já na Tabela II, são listadas as espécies mineralógicas identificadas em ambas as amostras.

**Tabela I.** Composição química das amostras da antes (RSA) e após ensaio bio-oxidativo (BPE).

Composição elementar	RSA Concentração (%)	BPE Concentração (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,54	9,93
CaO	4,51	4,38
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20	0,22
<b>CuO</b>	<b>1,02</b>	<b>0,71</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,39	13,27
K <sub>2</sub> O	1,35	1,21
MgO	7,13	6,84
MnO	0,18	0,19
Na <sub>2</sub> O	1,94	1,93
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,29	0,24
SiO <sub>2</sub>	39,12	41,82
<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>0,99</b>	<b>1,82</b>
TiO <sub>2</sub>	0,71	0,70
<b>Total</b>	<b>81,37</b>	<b>83,26</b>

**Tabela II.** Minerais identificados por Difração de Raios X.

Amostra	Fases Identificadas
<b>RSA</b>	Enstatita, hornblenda, quartzo, clorita, talco, biotita, calcopirita.
<b>BPE</b>	Enstatita, chamosita, albita, sepiolita, hornblenda, talco, jarosita de potássio, calcopirita, quartzo, magnesita, gesso e dolomita.

Comparando os resultados na Tabela I destaca-se o aumento dos teores de enxofre após ensaio, em contraste com uma queda do conteúdo de cobre. O primeiro ponto pode ser explicado devido a presença de jarosita (KFe<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>), que ficou como resíduo impregnando a rocha suporte. No entanto, a diminuição do teor de cobre na rocha, após o ensaio de biolixiviação, pode ser devido à digestão de parte dessa rocha disponibilizando o cobre, na forma solúvel, para a solução. Observa-se, a partir da Tabela II, a formação de novas espécies minerais na amostra após tratamento (BPE), sugerindo a intemperização dos minerais presentes na amostra original RSA, em particular dos silicatos minerais.

Embora os micro-organismos acidófilos se aderem, preferencialmente, à superfície dos sulfetos (Edwards e outros, 2004), de acordo com Santelli e outros (2001), a sua adesão nos silicatos ocorre devido à habilidade de crescimento a partir da liberação de Fe<sup>2+</sup> da dissolução dos mesmos.

Na Figura 1 é mostrada a distribuição granulométrica da amostra BPE (amostra após tratamento biológico). Observa-se que, aproximadamente, 17 % da massa total da amostra encontram-se abaixo de 3,35 mm (fração fina) e que, quando comparada à granulometria da amostra RSA (partículas entre 5 e 25 mm), houve a geração de partículas finas. Acredita-se que a desagregação, na amostra BPE, tenha ocorrido durante o desmonte da coluna e classificação/peneiramento do produto final na amostra após ensaio.

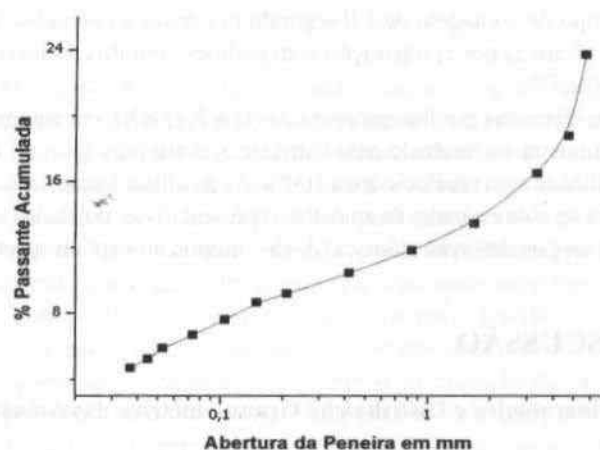


Figura 1. Curva da distribuição granulométrica da amostra BPE (após ensaio de tratamento biológico).

### 3.2 Índice de Trabalho e Consumo de Energia (Método de Bond)

Nas Figuras 2 e 3, a seguir, são mostrados os valores de índice de trabalho e consumo de energia, respectivamente, para as amostras RSA (antes do tratamento) e BPE (após tratamento). Segundo os valores mostrados nas Figuras supracitadas, a quantidade de energia requerida para diminuir o tamanho das partículas na amostra BPE, foi menor à demandada na amostra RSA. Essa redução é da ordem dos 7%. Esses resultados sugerem a possibilidade da geração de novas fraturas e/o agravante das mesmas nas partículas da amostra BPE, devido ao intemperismo causado pelo tratamento biológico/oxidativo, catalisado pela ação dos micro-organismos acidofílicos utilizados no ensaio.

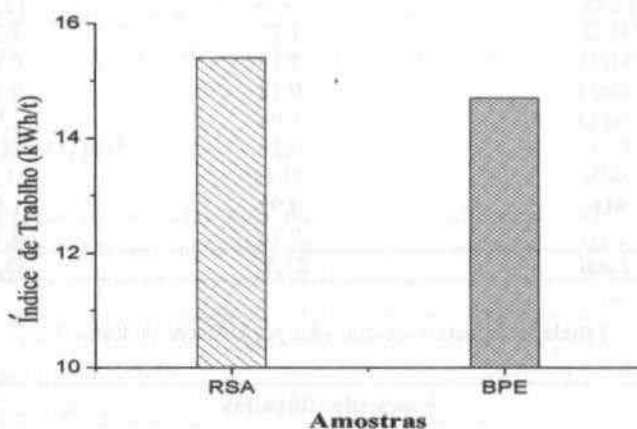


Figura 2. Índice de trabalho das amostras RSA (inicial) e BPE (após tratamento biológico).

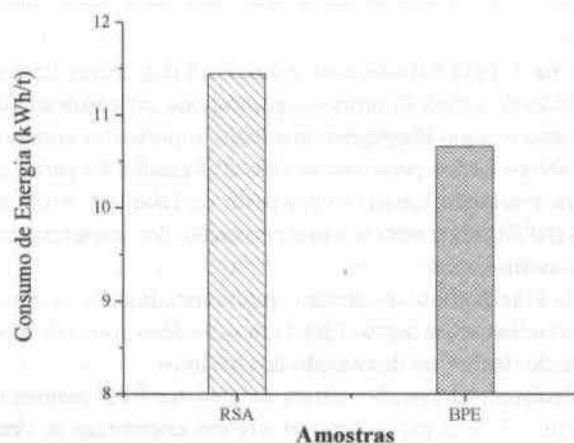


Figura 3. Consumo de energia na amostras RSA (inicial) e BPE (após tratamento biológico) calculado a partir do método de Bond.

### 3.3 Recuperação de Cobre da Fração Fina da Amostra BPE por Flotação

Na Tabela III é mostrado o balanço metalúrgico da concentração do cobre por flotação da fração fina (partículas < 3,35 mm) da amostra BPE. Os resultados mostram que é possível obter recuperações de cobre maiores que 90%, e que a falta de flotabilidade das partículas de sulfeto de cobre pode ser atribuída à passivação da superfície dos mesmos. Dentre as possíveis causas estariam a oxidação superficial das partículas de cobre devido ao processo biológico oxidativo a que são submetidas e à precipitação de jarosita ( $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ) sobre esses minerais formando uma fina camada que impede que o coletor entre em contato, de forma efetiva, com a superfície do mineral.

**Tabela III.** Resultados obtidos nos ensaios preliminares de flotação com tempo de moagem de 10 min.

Produto	Massa (%)	Teor Cu (%)	Recup. Cu (%)
Concentrado	31,46	18,0	93,2
Rejeito	68,54	0,6	6,8
Alimentação	100,00	6,1	100,0

## 4. CONCLUSÕES

O tratamento bio-oxidativo conseguiu reduzir o consumo de energia em 7%, aproximadamente. Esses resultados sugerem a possibilidade da geração de novas fraturas e/ou agravamento das existentes nas partículas da amostra após tratamento biológico/oxidativo, causadas pelo intemperismo causado por esse tratamento, sendo catalisado pela ação dos micro-organismos acidofílicos.

O rejeito da amostra após tratamento biológico responde bem à concentração por flotação, corroborando a efetividade do processo biológico praticado, propiciando elevadas recuperações dos sulfetos de cobre existentes na amostra. Com a prática da moagem num tempo de 10 minutos, foram obtidas recuperações de cobre acima de 90% gerando rejeitos com teores abaixo de 0,6% em Cu.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo e apoio financeiro e à Mineração Caraíba S. A. pelo fornecimento das amostras.

## 6. REFERÊNCIAS

- Bond, F. Crushing and grinding calculations. *Brit. Chem. Eng.*, v. 6, p. 543-548, 1961.
- Dopson, M. & Lindstrom, B. Potential role of *Thiobacillus caldus* in arsenopyrite bioleaching. **Environ. Microbiol.** v. 65, p. 36-40, 1999.
- Dopson, M., Lövgren, L. & Boström, D. Silicate mineral dissolution in the presence of acidophilic microorganisms: implications for heap leaching. **Hydrometallurgy**, v. 96, p. 288-293, 2009.
- Edwards, K., Bond, P. & Banfield, J. Characteristics of attachment and growth of *thiobacillus caldus* on sulphide minerals: a chemotactic response to sulphur minerals?. **Environ. Microbiol.** v. 2, p. 324-332, 2000.
- Lima, R. Biolixiviação de Concentrado de Flotação de Sulfetos de Cobre. 2006. 90f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos).-Escola de Química, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- Lima, R., Souza, C., Sobral, L., Monteiro D., Leite S. & Medeiros P. Bioleaching of Copper Sulphides Flotation Concentrate Using Consortium of Mesophiles and Thermophiles Microorganisms: a Pilot Scale Approach. **HYDROCOPPER 2009 workshop**, p. 374-381, Antofagasta- Chile, 2009.
- Luz, A., & Lins, F. Introdução ao Tratamento de Minérios. In: Tratamento de Minérios, CETEM/MCT, quarta edição, p. 3-15, Rio de Janeiro- Brasil, 2004.
- Norris, P. Acidophilic bacteria and their activity in mineral sulfide oxidation. *Microbial Mineral Recovery*, McGraw- Hill, p. 3-27. New York-USA, 1990.
- Santelli, C., Welch, S., Westrich, H. & Banfield, F. The effect of Fe-oxidizing bacteria on Fe-silicate mineral dissolution. **Chem. Geol.** v. 180, p. 99-115, 2001.
- Suzuki, I. Microbial leaching of metals from sulfide minerals. In: **Biotechnology Advances**, Department of Microbiology, v. 19, p. 119-132. University of Manitoba, Winnipeg-Canada, 2001.

- Tavares, L. Operações Unitárias em Processamento Mineral. Apostila do curso de Processamento de Recursos Minerais, PEMM/COPPE, p.144, Universidade Federal de Rio de Janeiro, 2005.
- Tromans, D. Mineral Comminution: Energy efficiency considerations. **Minerals Engineering**, v. 21, p. 613-620, 2008.
- Yap, R., Sepulveda, J. & Jauregui, R. Determination of the Bond work index using an ordinary laboratory batch ball mill. In: Mular, A.L. (Ed.), Design and Installation of Comminution Circuits Soc. Min. Eng. AIME. p. 176-203, New York-USA, 1982.