

Universidade do Estado do Pará - UEPA
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Centro de Ciências Naturais e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais–Mestrado



Dryelle de Nazaré Oliveira do Nascimento

**Biolixiviação para a extração limpa do minério de
cobre proveniente da região de Carajás-PA**

Belém
2018

Dryelle de Nazaré Oliveira do Nascimento

**Biolixiviação para a extração limpa do minério de cobre
proveniente da região de Carajás-PA**

**Dissertação apresentada como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre
em Ciências Ambientais no Programa de
Pós-Graduação em Ciências Ambientais.
Universidade do Estado do Pará.**

**Orientador: Prof. Dr. Hélio Raymundo
Ferreira Filho (UEPA).**

**Co-orientador: Dr. Joner Oliveira Alves
(Instituto SENAI de Inovação em
Tecnologias Mineraias – ISI-TM).**

Belém
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP),
Biblioteca do Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, UEPA, Belém - PA.

N244b Nascimento, Dryelle de Nazaré Oliveira do

Biolixiviação para a extração limpa do minério de cobre proveniente da região de Carajás-PA; Orientador Hélio Raymundo Ferreira Filho; Coorientador Joner Oliveira Alves. -- Belém, 2018.

78 f.; il.; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade do Estado do Pará, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, Belém, 2018.

1. Mineração - Pará. 2. Lixiviação bacteriana - Pará. 3. Minérios de cobre – Pará. I. Ferreira Filho, Hélio Raymundo. II. Alves, Joner Oliveira. III. Título.

CDD 549

Dryelle de Nazaré Oliveira do Nascimento

**Biolixiviação para a extração limpa do minério de cobre
proveniente da região de Carajás-PA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. Universidade do Estado do Pará.

Data da aprovação: 23/02/2018

Banca Examinadora

_____ – Orientador(a)

Prof. Dr. Hélio Raymundo Ferreira Filho
Doutorem Ciências de Gestão
Universidade do Estado do Pará

_____ – 1ºExaminador(a)

Prof. Dra. Fábيا Maria de Souza
Doutora em Engenharia de Produção
Universidade do Estado do Pará

_____ – 2ºExaminador(a)

Profa. Dra. Suezilde da Conceição Amaral Ribeiro
Doutor em Engenharia de Alimentos
Universidade do Estado do Pará

_____ – 3ºExaminador(a)

Prof. Dr. Antônio Erlindo Braga Júnior
Doutor em Engenharia de Produção
Universidade do Estado do Pará

_____ – 4ºExaminador(a)

Prof. Dr. Risete Maria Queiroz Leão Braga
Doutora em Geologia e Geoquímica
Universidade Federal do Pará

_____ – 5ºExaminador(a)

Prof. Dr. Adriano Reis Lucheta
Doutor em Microbiologia Agrícola
Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Minerais

_____ – Suplente

Prof. Dr. Manoel Tavares de Paula
Doutor em Agronomia
Universidade do Estado do Pará

À minha amada avó, Raimunda Floraci da Silva Oliveira
(*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de bendizê-Lo por meio desta dissertação. À minha Mãe Santíssima, Nossa Senhora de Nazaré, pelas graças ao longo destes dois anos; à Santa Rita de Cássia, pela constante intercessão.

Á minha família, pelo apoio incondicional: meus maravilhosos pais, Miguel e Dinerlei, por todo o amor durante toda minha vida; meus amados irmãos Myllena e Miguel Júnior, pelo incentivo; meus tios Diana e Alcenildo, que me adotaram como a uma filha neste período; tia Dinair e queridos primos Rita de Cássia e Lucas; meu querido avô Domingos e minha amada avó Raimunda (*in memoriam*).

Ao meu querido orientador, Dr. Hélio Raymundo Ferreira Filho, por suas brilhantes orientações, conselhos e seu exemplo de superação, determinação e luta pela vida.

Ao meu co-orientador, Dr. Joner Oliveira Alves, pelo apoio e oportunidade de exercer este projeto.

A todos os amigos do ISI-TM, em especial: aos pesquisadores Adriano Lucheta, Daniela Buzzi, Patrícia Magalhães, por todas as orientações, críticas e sugestões; a André do Carmo, pelas orientações no laboratório e obtenção das imagens no MEV; à Emanuele Nogueira, pelo apoio constante. A Wérica, Thainá, Thaís, Elza, Dirceu e Enéas.

À startup Itatijuca Biotec, em especial ao Dr. Maurício Palmieri, pela parceria no projeto desenvolvido.

À Dra. Norma Beltrão, por todas as orientações e conselhos e aos demais professores que me orientaram nesta jornada.

Às amiga do PPGCA-UEPA, Kelly, Tássia, Liane, Lorena e Muriel.

A todos os amigos que me auxiliaram com incentivo e orações.

À CAPES pela concessão da bolsa.

Ad Maiorem Dei Gloriam!

“Desejar tudo aquilo que eu quero para a glória de Deus, como Deus deseja para a sua glória tudo o que Ele quer” (Santo Alberto Magno, Doutor da Igreja).

RESUMO

A calcopirita é o minério de cobre com maior presença na crosta terrestre, sendo o mais empregado para extração comercial do cobre. No Brasil, as principais reservas de cobre estão situadas no Pará, especificamente na região de Carajás. A tradicional extração deste metal é feita por processos pirometalúrgicos (emprego de altas temperaturas para transformações físico-químicas em minerais), que demandam elevadas quantidades de energia, água e reagentes químicos. Uma alternativa para redução de insumos e geração de resíduos é a utilização do processo de biolixiviação, que consiste na extração de metais de interesse pela ação de micro-organismos oxidantes de ferro e enxofre. A biolixiviação é um processo com relativo baixo custo de instalação e operação, podendo ser uma alternativa para a exploração de minérios de cobre no Pará, contribuindo na conservação de recursos naturais da Amazônia. O trabalho visou o emprego da bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* para a biolixiviação, em colunas e reatores, de amostras de sulfeto mineral e minérios intemperizados contendo cobre, provenientes da região de Carajás-PA. Para tanto, um protótipo em escala laboratorial foi desenvolvido no ISI-TM. As amostras passaram por caracterização mineralógica por Difração de Raios-X (DRX) e química por Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (FRX-ED), e os valores de pH, potencial redox (Eh), taxa de extração de cobre e densidade populacional da bactéria foram monitorados ao longo dos experimentos. O primeiro ensaio de biolixiviação em reatores foi realizado por 100 dias, resultando em taxas de extração de cobre de 0,74% e 18,35% para as amostras de sulfeto mineral e intemperizado, respectivamente. O segundo ensaio foi conduzido por 47 dias, também utilizando amostras de um sulfeto mineral e intemperizado, porém com redução da densidade de polpa e controle de temperatura, em comparação com o primeiro ensaio. A extração de cobre obtida do sulfeto mineral foi quatro vezes superior (1,67%) à do primeiro ensaio enquanto a do minério intemperizado (19,54%) foi similar. Nos ensaios de biolixiviação realizados em colunas, a extração de cobre foi de 1,07% para a coluna contendo o minério com tamanho das partículas de 2,00 mm e de 0,95%, para coluna contendo o minério de 4,75 mm. As maiores taxas de extração de cobre a partir de amostras da Região de Carajás foram obtidas pela biolixiviação dos minérios intemperizados em reatores, indicando este método como a principal alternativa para extração de cobre a partir de rejeitos de minério e amostras de baixo teor.

Palavras-chave: *Acidithiobacillus ferrooxidans*, Calcopirita, Lixiviação bacteriana, Mineração.

ABSTRACT

Chalcopyrite is the copper ore with the greatest presence in the earth's crust, and the most used for commercial extraction of copper. In Brazil, the main copper reserves are located in Pará, specifically at Carajás Region. Traditional extraction of this metal are performed with pyrometallurgical processes (use of high temperatures for physico-chemical transformations in minerals), which demand high amounts of energy, water and chemical reagents. An alternative to reduce feedstocks and waste generation is the bioleaching process, which consists of metal extraction through the iron/sulfur oxidizing bacteria activity. The bioleaching is a process with relatively low installation and operation costs, and might be an alternative to copper ore exploration on Pará, contributing to the conservation of natural resources in Amazon. The work aimed at the use of *Acidithiobacillus ferrooxidans* bacterium for the bioleaching, in columns and reactors, of samples of mineral sulfides and weathered copper ores from the region of Carajás-PA. For this proposal, a laboratory-scale prototype was developed at ISI-TM. Samples mineralogical and chemical characterization were performed by X-ray Diffraction (XRD) and Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF), respectively, and pH, redox potential (Eh), copper extraction and bacterial enumeration were monitored along the experiments. The first bioleaching reactor test was conduct for 100 days, resulting in copper extraction rates of 0.74% and 18.35% from the mineral sulfide and weathered copper ores, respectively. The second bioleaching reaction test was conducted by 47 days, also applying mineral sulfide and weathered copper ores samples, but employing a lower pulp density and a temperature control, when compared with the fist assay. The obtained copper extraction rate from the mineral sulfide was four times higher (1.67%) than the one obtained in the first experiment, whereas the weathered sample extraction (19.54%) was similar. Column bioleaching assays using *A. ferrooxidans* resulted in copper extraction rates of 1.07% in the column containing the 2.00 mm particles size ore and 0.95% for the one containing the 4.75 mm particle size ore. The highest copper extraction rates from samples of the Carajás Region were obtained by the bioleaching of weathered ore samples in reactors, indicating this method as the main alternative for extraction of copper from marginal and low-grade copper ores.

Keywords: *Acidithiobacillus ferrooxidans*, Chalcopyrite, Bacterial leaching, Mining.

LISTA DE TABELAS DO ARTIGO 2

Tabela 1	Composição química das amostras estudadas (%) determinada por EDXRF	32
----------	---	----

LISTA DE TABELAS DO ARTIGO 3

Tabela 1	Composição química das amostras empregadas nos Reatores 1 e 2.	40
----------	--	----

LISTA DE TABELAS DO ARTIGO 4

Tabela 1	Composição química das amostras empregadas nas Colunas 1 e 2	55
----------	--	----

LISTA DE FIGURAS DO ARTIGO 1

Figura 1	Protótipos em escala de bancada para biolixiviação em colunas e em tanques agitados.	13
----------	--	----

LISTA DE FIGURAS DO ARTIGO 2

Figura 1	Esquema de funcionamento dos reatores	31
Figura 2	Difratograma (DRX) das amostras de sulfeto mineral e Intemperizada	31
Figura 3	Valores de pH e Eh para as amostras de sulfeto mineral (A) e intemperizada (B) durante os 100 dias de ensaio	32
Figura 4	Porcentagens de extração de cobre para amostra de sulfeto mineral (A) e intemperizada (B)	33

LISTA DE FIGURAS DO ARTIGO 3

Figura 1	Esquema de funcionamento dos reatores	38
Figura 2	Difratograma das amostras de sulfeto mineral e Intemperizada	40
Figura 3	Concentração de bactérias nos reatores ao decorrer do ensaio	41
Figura 4	Teste de viabilidade da bactéria <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> presente na solução lixiviadora dos reatores.	42
Figura 5	Comportamento do pH e Eh nos reatores 1 (A) e 2 (B)	43
Figura 6	Extração de cobre (%) para o Reator 1	44
Figura 7	Extração de cobre (%) para o Reator 2	45

LISTA DE FIGURAS DO ARTIGO 4

Figura 1	Representação esquemática das colunas de biolixiviação empregadas no ensaio.	53
Figura 2	Difratogramas obtidos por Difração de Raios-X (DRX) da amostra de sulfeto mineral empregada no ensaio de biolixiviação nas colunas 1 (2 mm) e 2 (4,75 mm).	54
Figura 3	Contagem do número de bactérias realizada durante o ensaio	55
Figura 4	Teste de viabilidade realizado durante o ensaio.	56
Figura 5	Micrografia obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de partícula mineral coletada no interior da Coluna. Observação de biofilme e células de <i>A. ferrooxidans</i> aderidas à superfície do sulfeto mineral.	56
Figura 6	Variação de pH e Eh das Colunas 1 (A) e 2 (B) ao longo dos 54 dias de ensaio	57
Figura 7	Taxas de extração de cobre (%) nas Colunas 1 (A) e 2 (B)	59

SUMÁRIO

1	ARTIGO 1: Biodiversidade e mineração na Amazônia: uso da biolixiviação como alternativa de extração	16
	Referências	25
2	ARTIGO 2: Biolixiviação de minérios de cobre em reatores com <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	28
	Resumo	29
	Abstract	29
2.1	Introdução	32
2.2	Material e Métodos	30
2.3	Resultados e Discussão	31
2.4	Conclusão	33
	Referências	34
3	ARTIGO 3: Biolixiviação de sulfetos metálicos e minérios intemperizados provenientes da região de Carajás (PA) em reatores agitados contendo a bactéria <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	35
	Resumo	35
3.1	Introdução	35
3.2	Material e Métodos	37
3.3	Resultados e Discussão	39
3.4	Conclusão	45
	Referências	46
	Abstract	48
4	ARTIGO 4: Biolixiviação em colunas com a bactéria <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> do minério de cobre com diferentes granulometrias proveniente da região de Carajás-PA	49
	Resumo	49
	Abstract	50
4.1	Introdução	50
4.2	Material e Métodos	51
4.3	Resultados e Discussão	54
4.4	Conclusão	61
	Referências	61
5	CONCLUSÕES GERAIS	64
6	ANEXOS	66

1. INTRODUÇÃO GERAL

O cobre é o segundo metal não ferroso mais empregado, com produção mundial de 16,1 mil toneladas no ano de 2011, sendo os países Chile, Peru, China e Estados Unidos os maiores produtores (IBRAM, 2011; PEREIRA, 2014). O Brasil é o 15º produtor mundial, com 82% de suas reservas situadas na Região de Carajás, no Estado do Pará (DNPM, 2016).

Tradicionalmente, a extração deste metal costuma ser feita a partir da pirometalurgia, método utilizado para minérios sulfetados, e pela hidrometalurgia, empregado principalmente para minérios silicatados, oxidados e rejeitos de minérios (SILVA, 2011). Porém, em um contexto de altos custos operacionais, combinado ao declínio dos minérios de alto teor na maioria das áreas de mineração, torna-se crescente a busca por processos mais eficientes de extração (BOBADILLA-FAZINNI, 2017).

Uma alternativa a estas necessidades é a Biolixiviação, técnica hidrometalúrgica que consiste na dissolução oxidativa de sulfetos metálicos insolúveis em formas solúveis em água, por ação de microorganismos oxidantes de Fe e S, tais como o *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans* (SCHIPPERS, 2007). Suas principais vantagens estão na otimização dos recursos, pois os microorganismos sintetizam os íons e ácidos empregados, no seu baixo custo de implementação, facilidades de operação e eficiente recuperação de metais em minérios de baixo teor (WATLING, 2006; HEDRICH et al, 2016).

Para a implementação comercial de plantas de biolixiviação em pilhas ou tanques agitados, faz-se necessária a realização de testes em escala laboratorial, a fim de determinar a taxa de extração para determinado minério e os demais parâmetros a serem empregados, tais como a densidade de polpa, aeração e velocidade de agitação, para os tanques agitados; e aeração, irrigação, temperatura e granulometria do minério, para colunas (WATLING, 2006; PRADHAN et al., 2008; HUANG et al., 2015; KAI et al., 2015; GHORBANI et al., 2016).

Ensaio em escala de bancada em colunas e reatores de biolixiviação foram realizados no Laboratório de Biotecnologia do Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias. Foram empregadas amostras de sulfetos mineraias e de minérios intemperizados, com caracterização química e mineralógica

determinadas por Fluorescência de Raios-X (FRX) e Difração de Raios-X (DRX), respectivamente, no Laboratório de Caracterização Mineral do Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias. Para o monitoramento dos ensaios, foram realizadas análises diárias de pH, Potencial Redox (Eh) e do teor de cobre disponível, esta última análise realizada por FRX. Na Figura 1, a disposição dos ensaios no laboratório.



Figura 1: Protótipos em escala de bancada para biolixiviação em colunas e em tanques agitados.

O presente trabalho estrutura-se da seguinte forma: No Capítulo 1, o Artigo “Biodiversidade e Mineração na Amazônia: uso da biolixiviação como alternativa de extração”, como referencial teórico.

O Capítulo 2, com o artigo “Biolixiviação de minérios de cobre em reatores com *Acidithiobacillus ferrooxidans*” trata da biolixiviação em reatores agitados com amostra desulfeto mineral e minério intemperizado inoculados com o referido micro-organismo. O Capítulo 3, com o artigo “Biolixiviação de sulfetos metálicos e minérios intemperizados provenientes da região de Carajás (PA) em reatores agitados contendo a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans*”, apresenta algumas modificações realizadas no ensaio anterior a fim de elevar as taxas de extração.

O Capítulo 4, o artigo “Biolixiviação em colunas com a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* do minério de cobre com diferentes granulometrias

provenientes da região de Carajás-PA”, apresenta um ensaio realizado em colunas de biolixiviação, a diferentes condições de granulometria e aeração.

REFERÊNCIAS:

BOBADILLA-FAZINNI, R.A. PÉREZ A, GAUTIER V, JORDAN H, PARADA P. Primary copper sulfides bioleaching vs. chloride leaching: Advantages and drawbacks. *Hydrometallurgy*.v.168, p. 26-31, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. DNPM. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas. 2016. Brasília: DNPM, 2016. 31p.

GHORBANI, Y.; FRANZIDIS, J-P.; PETERSEN, J. Heap leaching technology – current state, innovations and future directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. v. 37, p. 73-119, 2016.

HEDRICH, S.; GUEZENEC, A.; CHARRON, M.; SCHIPPERS, A.; JOULIAN, C. Quantitative monitoring of microbial species during bioleaching of a copper concentrate. *Front, Microbiol*. v.44, 2016.

HUANG, M.; WANG, Y.; YIN, S.; WU, A. Enhanced column bioleaching of copper sulfides by forced aeration.v.1130, p.400-405, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. IBRAM. Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira. Instituto Brasileiro de Mineração, 6.ed., 2011. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00001669.pdf>. Acesso em: 03/04/2018.

KAI, L.; WANG, Y.; ZHANG, L.; ZHU, C.; FENG, M. ZHOU, H. Effect of particle size on the column bioleaching of Tibet Yulong Copper Ore. *Advanced Materials Research*.v.1130, p. 375-378, 2015.

PEREIRA, A.C. Desenvolvimento de procedimento experimental para diagnóstico de lixiviação de cobre contido em minérios oxidados. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Rede temática em Engenharia de Materiais-UFOP, CETEC, UEMG. Ouro Preto, 2014.

SILVA, D. R. da. Efeito da adição de nanopartículas na biolixiviação da calcopirita (CuFeS₂) por *Acidithiobacillus ferrooxidans* LR. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2011.

SCHIPPERS, A. Microorganisms involved in bioleaching and nucleic acid-based molecular methods for their identification and quantification. In: Donati ER, Sand W. *Microbial processing of metal sulfides*. Springer, 2007.

WATLING, H. R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulfides-A review. *Hydrometallurgy*. v. 84, p. 81-108, 2006.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliação do processo de biolixiviação para extração de cobre a partir de amostras de sulfetos minerais e amostras intemperizadas, provenientes de jazidas da Região de Carajás (PA), com redução do uso de insumos e da geração de efluentes quando comparados aos processos tradicionais de extração.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar a taxa de biolixiviação de sulfetos minerais com elevado teor de cobre e minérios intemperizados provenientes da região de Carajás (PA) em reatores agitados com *Acidithiobacillus ferrooxidans* (ARTIGO 1).
- Avaliar a biolixiviação de sulfetos minerais com elevado teor de cobre e minérios intemperizados provenientes da região de Carajás (PA) em reatores agitados contendo a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, com modificações na densidade de polpa e temperatura (ARTIGO 2).
- Estabelecer o processo de biolixiviação em colunas, com a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, do minério de cobre com diferentes granulometrias proveniente da região de Carajás-PA (ARTIGO 3).

ARTIGO 1

BIODIVERSIDADE E MINERAÇÃO NA AMAZÔNIA: USO DA BIOLIXIVIAÇÃO COMO ALTERNATIVA DE EXTRAÇÃO

Aceito para publicação no E-Book “Ciências Ambientais na Amazônia: Monitoramento, Manejo e Conservação da Biodiversidade”, organizado pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da UEPA.

RECURSOS MINERAIS NA AMAZÔNIA

A Amazônia é o maior bioma brasileiro, abrigando cerca de 2.500 espécies de árvores (um terço de toda a madeira tropical do mundo) e 30 mil espécies de plantas (30% das espécies de plantas da América do Sul) (BRASIL, 2017), além de extensa diversidade animal e microbiana. A Amazônia Legal, se estende por aproximadamente 5 milhões de km², compreendendo 9 estados brasileiros das regiões: Norte (Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins); Centro-Oeste (Mato Grosso) e Nordeste (Maranhão), representando quase 60% do território brasileiro (IBGE, 2017).

Além da vasta biodiversidade, a Amazônia abriga uma das maiores reservas minerais do mundo. Os recursos minerais da Amazônia Oriental brasileira (Amapá, Maranhão, Pará, Tocantins e Mato Grosso) começaram a ser explorados a partir da década de 1940, com a descoberta de depósitos de óxidos de manganês na região da Serra do Navio (AP), culminando na abertura de minas na década de 1950, visando suprir a crescente demanda de aço no período pós-guerra (SANTOS, 2002). Na década de 1970, foi instalada a primeira empresa dedicada à extração de caulim, a Caulim da Amazônia (CADAM), com uma mina situada no atual município de Laranjal do Jari (AP), margem esquerda do Rio Jari. Ainda nesta década, se iniciou a extração e comercialização da bauxita, pela Mineração Rio do Norte (MRN), que efetuou, em 1979, o primeiro embarque deste minério para o Canadá (MONTEIRO, 2005).

Na década seguinte, quase um milhão de garimpeiros estiveram envolvidos na denominada “corrida do ouro”, com a descoberta de depósitos de ouro na região da Serra Pelada, no sudeste do Pará (SANTOS, 2002). Este período também foi marcado pelo início da exploração, pela antiga Companhia Vale do Rio Doce, das jazidas de ferro de Carajás, que na época foram estimadas em 18 bilhões de toneladas de minério, cujo destino era quase que em sua totalidade a exportação para países como: Japão, Alemanha e Itália (SANTOS, 2002).

Atualmente, minérios de manganês, cobre e níquel são extraídos da região de Carajás. Em Ourilândia do Norte, ocorre o beneficiamento de níquel, com depósitos destes minérios estendendo-se até os municípios de São Félix do Xingu e Parauapebas. Nos municípios de Juruti, Paragominas e Oriximiná ocorre a extração da bauxita e, em Barcarena, o beneficiamento do alumínio (MARLEBA, 2012).

As exportações dos minérios de ferro, cobre e manganês correspondem a 89% das comercializações de minérios da Amazônia Legal para o exterior (IBRAM, 2008). Quanto ao setor de transformações, destacam-se as exportações de ferro-gusa, alumínio e alumina, que somadas representam 88% das exportações da Amazônia Legal para este segmento, sendo a China, Japão e Alemanha os principais destinos (IBRAM, 2008).

A última estimativa das reservas brasileiras de minérios de cobre, em 2012, foi de 17,3 milhões de t de cobre contido, sendo o estado do Pará detentor de 85% do total (IBRAM, 2012). Em 2015, a produção bruta de minério de cobre no país foi de 80.176.949 t, com teor médio de 0,64%, sendo os principais estados produtores: Pará (71%), Goiás (24,9%) e Bahia (3,5%) (DNPM, 2016). No estado do Pará, a extração de minério de cobre apresentou um crescimento de 50,6% em 2016, passando de 533.000 t em 2015, para 802.000 t no ano seguinte (DNPM, 2017). A maior parte das reservas paraenses de cobre está situada na Província Mineral de Carajás, que se localiza na porção sudeste do Cráton Amazônico, formada, ao norte, pelo Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, e ao sul, pelo terreno granito-greenstone arqueano, denominado bloco Rio Maria (CPRM, 2010). A província hospeda ao menos quatro importantes depósitos de óxidos de ferro-cobre-ouro (OFCO), denominados: Salobo, Sossego, Cristalino e Igarapé Bahia-Alemão, além de outros depósitos menores (CPRM, 2010). Os depósitos localizados no distrito cuprífero de Carajás possuem teor médio de 0,80% e somam 1.568.067.455 t, o que corresponde a 12.589.105 t de cobre contido (RODRIGUES et al., 2009). As maiores reservas de cobre do Brasil estão nos depósitos de Salobo, que possui 1.242.845.000 t de minério, com teor médio de 0,72% e no depósito de Sossego, detentor de 320.757.401 t de minério e teor médio de 1,14% de cobre (RODRIGUES et al., 2009).

IMPACTOS AMBIENTAIS E MINERAÇÃO

A legislação brasileira, segundo a Resolução N° 001, de 23 de janeiro de 1986 do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA (BRASIL, 1986), no Art. 1º, define impacto ambiental como sendo:

(...) qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

I – a saúde, a segurança e o bem-estar da população;

II – as atividades sociais e econômicas;

III – a biota;

IV – as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;

V – a qualidade dos recursos ambientais.

A mesma Resolução também determina as atividades que dependem de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), dentre as quais está incluída a mineração.

O Ministério Público de Minas Gerais (MPMG, 2012) elenca os principais impactos ambientais resultantes deste tipo de empreendimento, sendo estes:

- Alterações acústicas no ambiente ou alteração do ambiente sonoro e geração de vibrações;
- Alterações na qualidade do ar e paisagem;
- Alterações na qualidade das águas superficiais e subterrâneas, bem como, na quantidade das águas;
- Impactos sobre a flora, fauna, ambientes aquáticos e cavernas;
- Impactos sobre a fauna subterrânea, sítios históricos, arqueológicos e paleontológicos;
- Aumento da imigração;
- Alterações na cultura de populações tradicionais;
- Pressão sobre serviços públicos e infraestrutura;
- Conflitos por terra e vizinhança;
- Impactos sobre a economia local.

Milanez (2017) destaca como principais impactos socioambientais que a atividade mineral não controlada pode gerar: as mudanças na paisagem, emissões atmosféricas, consumo e contaminação de recursos hídricos e impactos sobre as comunidades. Com relação às mudanças da paisagem, o autor afirma que, por ser a atividade mineral céu aberto a principal forma de extração mineral no Brasil, é inevitável a retirada da vegetação e do solo para escavação, detonação e remoção do material para as unidades de beneficiamento, eliminando-se as funções ecológicas antes existentes no local.

Caso não haja controle da atividade mineral, os recursos hídricos podem ser prejudicados pelo aumento da turbidez e incidência de poluentes carregados das áreas de

mineração, podendo atingir as águas subterrâneas; por alterações no regime hidrológico dos cursos d'água e aquíferos e rebaixamento do lençol freático, ocasionados pelo emprego do recurso hídrico na lavra e beneficiamento do minério; e pela instabilidade de margens com consequente supressão de matas ciliares, geradas pelo rebaixamento das calhas dos rios pelas lavras dos seus leitos (MECHI & SANCHES, 2010).

BIOLIXIVIAÇÃO COMO ALTERNATIVA DE EXTRAÇÃO

Conceito e Vantagens da Biolixiviação

O desenvolvimento de processos economicamente viáveis para o reaproveitamento de minérios com baixas concentrações de metais de interesse e rejeitos de mineração, são essenciais para o atendimento da crescente demanda global por metais e minimização dos impactos ambientais, como a formação de drenagem ácida de mina (WATLING, 2006, NANCUCHEO et al., 2017).

O processo de biolixiviação é um deles e consiste na conversão de um componente metálico insolúvel em uma forma solúvel em água. Sulfetos metálicos são oxidados a íons metálicos e sulfatos através da atividade direta ou indireta de bactérias acidófilas oxidantes de ferro (II) e/ou compostos reduzidos de enxofre (SCHIPPERS, 2007).

Dentre as principais vantagens deste processo, destacam-se: a eficiente recuperação de metais de minérios de baixo teor e resíduos destes materiais; o moderado capital de investimento com baixos custos de operação; e a simplicidade dos processos de operação (WATLING, 2006).

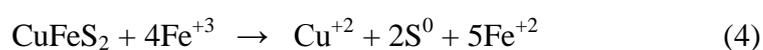
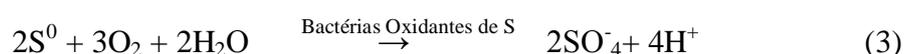
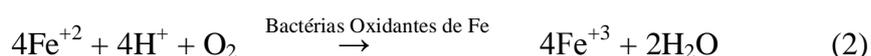
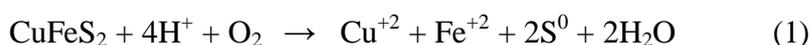
A oxidação dos minerais pode ser realizada por uma única espécie ou por consórcios microbianos (JOHNSON, 2014). Estes micro-organismos se destacam pela capacidade de crescimento em pH extremamente ácido ($\text{pH} < 3,0$) e tolerância a altas concentrações de metais, podendo ser classificados quanto à sua temperatura ótima de crescimento como: mesófilos (20 a 40°C), termófilos moderados (40 a 55°C) e termófilos extremos (55 a 80°C) (SCHIPPERS, 2007). As espécies bacterianas utilizadas em processos de biolixiviação mais estudadas são as Proteobactérias do gênero *Acidithiobacillus*: *A. ferrooxidans* e *A. thiooxidans*. Estas espécies são Gram-negativas, móveis, apresentando forma de bastonetes entre 1,0 a 2,0 μm de comprimento por 0,5 a 0,6 μm de diâmetro, não esporulantes, mesófilas e obrigatoriamente acidófilas ($\text{pH} < 4,0$) (SCHIPPERS, 2007). Apresentam metabolismo quimiolitotrófico, utilizando principalmente o íon ferroso e compostos reduzidos de

enxofre (ex. sulfetos, tiosulfato, enxofre elementar) como fonte de elétrons e energia, e fixando o CO₂ atmosférico pelo Ciclo de Benson-Calvin como fonte de carbono (SCHIPPERS, 2007).

Outros exemplos de micro-organismos associados aos processos de biolixiviação são as espécies bacterianas: *Acidithiobacillus caldus*, *Leptospirillum ferrooxidans*, *L. ferriphilum*, *Sulfobacillus* sp., e as arqueias dos gêneros: *Acidianus*, *Ferroplasma*, *Metallosphaera* e *Sulfolobus*, entre outros (JOHNSON, 2014, HEDRICH et al., 2016).

Mecanismos de Biolixiviação

O processo de biolixiviação da calcopirita (CuFeS₂), o mineral de cobre mais abundante na natureza, envolve etapas químicas (Equações 1 e 4) e biológicas (Equações 2 e 3) (SCHIPPERS, 2007):



A calcopirita é lixiviada tanto pela solubilização ácida pela presença do íon H⁺ (Eq. 1), bem como, pela oxidação através do íon férrico (Fe⁺³) (Eq. 4), apesar da presença do oxigênio comoceptor final de elétrons nos processos de biolixiviação (SCHIPPERS, 2007, PRADHAN et al., 2008). Micro-organismos oxidantes de Fe, como por exemplo a bactéria *A. ferrooxidans*, oxidam os íons ferrosos (Fe⁺²) (Eq. 2) para a obtenção de energia, regenerando os íons férricos e mantendo a continuidade do processo. Já os micro-organismos oxidantes de enxofre (S), como as bactérias: *A. ferrooxidans* e a *A. thiooxidans*, oxidam o enxofre elementar (S⁰) produzindo o componente ácido (H⁺) (Eq. 3) do processo (SCHIPPERS, 2007, PRADHAN et al., 2008). Além da solubilização da calcopirita, a geração de ácido mantém a solubilidade do Fe na solução.

Os mecanismos por trás dos processos de biolixiviação já foram amplamente discutidos na literatura e são descritos em citações mais antigas em três tipos: mecanismo de contato direto, mecanismo de contato indireto e mecanismo indireto (CRUNDWELL et al., 2003). Entretanto, o mecanismo proposto de contato direto, onde os elétrons presentes nos sulfetos metálicos seriam transferidos diretamente para as células microbianas aderidas à superfície através de ação enzimática, nunca foi comprovada, deixando dúvidas sua real

existência (VERA et al., 2013). Uma nova classificação dos métodos de biolixiviação vem sendo utilizada, adotando os termos: “lixiviação por contato” (*contact leaching*) e “lixiviação sem contato” (*non-contact leaching*), e um terceiro novo termo, “lixiviação cooperativa” (*cooperative leaching*) (VERA et al., 2013). No mecanismo de lixiviação “por contato”, as bactérias que estão na superfície do mineral oxidam os íons ferrosos a íons férricos dentro de um biofilme composto por substâncias exopoliméricas (EPS), que por sua vez, oxidam quimicamente os sulfetos (WATLING, 2006). No mecanismo “sem contato”, os micro-organismos planctônicos, isto é, em solução e não aderidos à superfície do mineral, possuem a função de sintetizar os produtos necessários (Fe^{3+} e H^+) para o ataque do minério. Já o termo “lixiviação cooperativa” descreve a dissolução de intermediários de enxofre, coloides de enxofre e fragmentos de minerais por células planctônicas (VERA et al., 2013).

As vias do tiosulfato e do polissulfeto, propostas por Schippers & Sand (1999), são as tentativas mais coerentes para a explicação do processo de oxidação do sulfeto metálico (ROHWERDER & SAND, 2007, VERA et al., 2013).

A via do tiosulfato, ocorre em sulfetos metálicos como pirita (FeS_2), molibdenita (MoS_2) e tungstenita (WS_2), e é baseada exclusivamente no ataque oxidativo de íons Fe^{+3} tendo o tiosulfato como principal composto intermediário contendo enxofre. A via do polissulfeto, de ocorrência na esfalerita (ZnS), galena (PbS), calcopirita (CuFeS_2), arsenopirita (FeAsS) e hauerita (MnS_2), possibilita a dissolução dos sulfetos metálicos por meio do ataque de Fe^{+3} e/ou de prótons, sendo o polissulfeto o principal composto intermediário contendo o enxofre (SCHIPPERS & SAND, 1999, VERA et al., 2013).

O fator preponderante para a seleção do tipo de mecanismo é a solubilidade do sulfeto metálico em ácido, determinada pela configuração eletrônica deste. Sulfetos metálicos com bandas de valência derivadas apenas de orbitais de átomos de metais, não podem sofrer o ataque de prótons. Os sulfetos metálicos que possuem bandas de valência derivadas de orbitais de átomos de sulfetos e metais, podem ser solubilizadas em meio ácido (ROHWERDER & SAND, 2007).

O sucesso dos processos de biolixiviação em pilhas, método mais empregado industrialmente, é diretamente influenciado por características como: a composição do minério e tamanho das partículas; temperatura da pilha, taxa da aeração, controle do potencial redox, pH, e formação de compostos secundários passivadores (PRADHAN et al., 2008).

O tamanho da partícula é determinante para a exposição do minério ao ataque ácido/oxidativo e a adesão dos micro-organismos. Abilash e colaboradores (2011) testaram o efeito do tamanho das partículas em experimentos de biolixiviação de calcopirita de baixo

teor, em frascos sob agitação inoculados com *A. ferrooxidans*, obtendo a melhor extração para partículas de minério com tamanho entre 50-76 μ m (38,31%), quando comparada com partículas de minério de tamanho de 76-150 μ m (29,68%). Os autores também observaram o maior valor para o potencial redox (654 mV) quando utilizaram as menores partículas, provavelmente em resposta ao aumento da superfície de contato da calcopirita para o ataque bacteriano.

Os processos de biolixiviação geralmente ocorrem em temperaturas relativamente baixas, entre 20 a 80°C (JOHNSON, 2014). Entretanto, reações exotérmicas, como a oxidação da pirita e pirrotita, podem elevar muito a temperatura interna das pilhas, podendo ocasionar a autoignição na presença de um combustível (GHORBANI et al., 2016). Temperaturas acima de 55° favorecem o processo de biolixiviação da calcopirita (WATLING, 2006). A presença de micro-organismos modernamente termofílicos e termofílicos é bastante comum em operações de biomineração (JOHNSON, 2014).

Por se tratar de um processo empregando micro-organismos aeróbios, a aeração é essencial para o fornecimento de O₂ e CO₂ para o sistema, evitando a formação de zonas de anaerobiose. Em pilhas de biolixiviação, um bom sistema de aeração pode acelerar as reações de bio-oxidação e melhorar a uniformidade, tornando mais eficiente o processo de bio-extração (PRADHAN et al., 2008).

Durante o processo de oxidação da calcopirita, pode ocorrer a formação de fases sólidas secundárias na superfície do mineral, causando a passivação do minério e diminuindo a eficiência da biolixiviação (MUKHERJEE et al., 2016). A jarosita é geralmente a fase mineral mais abundante resultante da biolixiviação da calcopirita, e a sua formação está diretamente relacionada ao pH do processo (NAZARI et al., 2014). Jyn-Yan e colaboradores (2009), ao analisarem a formação de jarosita em meio de cultura 9K inoculado com a bactéria *A. ferrooxidans*, sob diferentes condições de pH(1.58, 1.63, 1.69, 1.73, 1.79 e 1,99), observaram que a menor formação deste precipitado ocorreu em entre os valores de pH entre 1,6 e 1,7, e conforme aumentou-se o pH, maior foi a formação da jarosita.

Biolixiviação na Mineração

Antes da implementação de grandes projetos de biolixiviação em pilhas de minérios, se faz necessário uma avaliação em menor escala a fim de se determinar os melhores parâmetros para o processo, tais como: tamanho das partículas, taxa de aeração, vazão da irrigação, temperatura adequada para os micro-organismos, entre outros (PRADHAN, et al., 2008, GHORBANI et al., 2016). Tal avaliação, em escala laboratorial, pode ser obtida em

experimentos utilizando a agitação do minério em frascos e reatores ou depositado em colunas estáticas com irrigação de solução lixiviadora.

Ensaio de biolixiviação em frascos sob agitação, inoculados com a bactéria *A. ferrooxidans*, foram realizados com minérios provenientes da região de Carajás - PA (RIBEIRO NETO et al., 2007; ALVES, 2010; GARCIA, 2013; MAGALHÃES, 2016, NASCIMENTO et al., 2018). Magalhães (2016) avaliou a eficiência da descarbonatação em amostras de calcopirita da região de Carajás, antes e durante o processo de biolixiviação em frascos sob agitação, obtendo 47% de extração de Cu em ambas situações ao término de 28 dias, apesar de observar uma extração mais lenta quando a calcopirita foi descarbonatada durante o processo. A presença de carbonatos no minério neutraliza a acidez gerada durante o processo e sua remoção é fundamental para a manutenção do pH ótimo (2,0 a 3,0) para o crescimento microbiano. Nessas situações, o pH deve ser monitorado diariamente e ajustado externamente (ex. adição de ácido sulfúrico), quando necessário, para a manutenção das condições ótimas de extração e atividade microbiana.

Quando os testes em frascos agitados se apresentam promissores, a etapa seguinte é a realização de ensaios em colunas estáticas; que por sua vez, apresentando bons resultados, avançam para ensaios em pilhas de minério com objetivo de simular as configurações de um leito estático (ARENA, 2010). Outro tipo de ensaio a ser realizado são os testes em reatores biológicos agitados, que buscam simular as configurações de um leito dinâmico (NASCIMENTO, 2018). A principal vantagem dos ensaios em reatores na forma de tanques agitados é a possibilidade de controle total sobre as condições do tanque, podendo atingir maiores taxas de lixiviação quando comparados aos ensaios em colunas.

Do ponto de vista ambiental, a biolixiviação apresenta vantagens ao ser comparada com o processo pirometalúrgico convencional, devido ao baixo consumo de energia e impacto ambiental. A principal vantagem da biolixiviação é permitir a exploração econômica de minérios com baixos teores de metais, inviáveis para o processo pirometalúrgico, geralmente já estocados nas minas, diminuindo a necessidade de abertura de novas lavras (WATLING, 2006, GHORBANI et al., 2016).

A biolixiviação pode reduzir o impacto da atividade mineral, uma vez que os ácidos e agentes oxidantes empregados no processo são sintetizados pelos próprios micro-organismos, com redução do gasto energético e ausência de emissões de dióxido de enxofre, um poluente atmosférico emitido no processo pirometalúrgico (MARTIM & SANTOS, 2013). A eficiência no uso da água também é uma vantagem em comparação a outros processos empregados pela

indústria, como a flotação, entretanto perdas consideráveis por evaporação podem ser um problema dependendo da localização das pilhas de biolixiviação (GHORBANI, et al., 2016).

O Chile é o país com maior sucesso na pesquisa e adoção da biolixiviação, tendo instalado a primeira planta comercial para a exploração de sulfetos metálicos exclusivamente por biolixiviação do mundo (GENTINA & ACEVEDO, 2016). Muitas minas chilenas estão instaladas nas proximidades do deserto do Atacama. Estima-se que atualmente 10% de todo o cobre extraído no Chile venha de processos de biolixiviação. O processo de biolixiviação também é apontado como uma alternativa para exploração sustentável de cobre na Zâmbia, país africano que concentra um quinto de toda a reserva mundial de minérios com baixos teores de cobre (cinturão de cobre da África Central) (NGULUBE et al., 2016).

No Brasil, a biolixiviação ainda não é empregada em escala industrial, sendo predominante o uso do processo pirometalúrgico. Contudo, desenvolvimentos em escala laboratorial com minérios brasileiros tem demonstrado resultados que indicam a viabilidade deste processo. Como exemplo, o Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias (Belém-PA) estabeleceu um protótipo de biolixiviação, com emprego da bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, em colunas e reatores para tratamento de amostras de sulfeto mineral e minérios intemperizados contendo cobre provenientes da região de Carajás-PA. Neste protótipo, as maiores taxas de extração de cobre foram obtidas pela biolixiviação dos minérios intemperizados em reatores, cerca de 20%. Por ser um processo com relativo baixo custo de instalação e operação, a biolixiviação pode ser uma alternativa, principalmente, para minérios de baixo teor, estéreis e rejeitos da mineração que são acumulados ao longo da atividade. A região de Carajás-PA possui um elevado volume destes materiais, além de apresentar condições climáticas tropicais de altas temperaturas e umidade altamente favoráveis para os micro-organismos utilizados nos processos de biolixiviação, podendo potencialmente atingir consideráveis taxas de recuperação de metais (NASCIMENTO et al., 2018).

REFERÊNCIAS

ABILASH; K. D. M.; KUMAR, V.; PANDEY, B. D.; TAMRAKAR, P. K. Bioleaching - An alternative uranium ore processing technology for India. *Energy Procedia*.v. 7, p. 158-162, 2011.

ALVES, R. C. *Indução de Acidithiobacillus ferrooxidans e seleção de linhagens mutantes para utilização na biohidrometalurgia*. 2010. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) Universidade Estadual Paulista, Araraquara. 2010.

ARENA, F. A. *Estudos físico-químicos e de lixiviação de calcopirita (CuFeS₂) por Acidithiobacillus ferrooxidans*. 2010. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Estadual Paulista, Araraquara. 2010.

BRASIL. Resolução n. 001, de 23 de janeiro de 1986. Conselho Nacional de Meio Ambiente. CONAMA. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 17 fev. 1986. Seção 1, p 2548.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. MMA. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/amaz%C3%B4nia>>. Acesso em: 02 ago. 2017.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. CPRM. *Modelos de depósitos de cobre no Brasil e sua resposta ao intemperismo*. Brasília: CPRM, 2010. 190p.

CRUNDWELL, F. K. How do bacteria interact with minerals? *Hydrometallurgy*. v. 71, p. 75-81, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. DNPM. *Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas*. 2016. Brasília: DNPM, 2016. 31p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. DNPM. *Informe Mineral do Estado do Pará: Ano base 2016*. Belém: DNPM, Superintendência no Pará, 2017. 10p.

GARCIA, I. G. *Consórcios microbianos associados a ambientes de minas: obtenção, avaliação fisiológica e molecular*. 2013. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia). Universidade Estadual Paulista, Araraquara. 2013.

GENTINA, J. C.; ACEVEDO, F. Copper bioleaching in Chile. *Minerals*. v. 6, p. 1-9, 2016.

GHORBANI, Y.; FRANZIDIS, J-P.; PETERSEN, J. Heap leaching technology – current state, innovations and future directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. v. 37, p. 73-119, 2016.

HEDRICH, S.; GUÉZENNEC, A.; CHARRON, M.; SCHIPPERS, A.; JOULIAN, C. Quantitative monitoring of microbial species during bioleaching of a copper concentrate. *Frontiers in Microbiology*, v. 7, p. 1-11, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/amazonialegal.shtm?c=2>>. Acessado em: 02 ago. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. *Indústria da Mineração*. Ano III, n. 20. Brasília: IBRAM, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. *Informações e análise da economia mineral brasileira*. 7 ed. Brasília: IBRAM, 2012. p. 35.

JOHNSON, B. D. Biomining – biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials. *Current Opinion in Biotechnology*. v. 30, p. 24-31, 2014.

JYN-YAN, L.; XIU-XIANG, T.; PEI, C. Study of formation of jarosites mediated by *Thiobacillus ferrooxidans* in 9K medium. *Procedia Earth and Planetary Science*. v. 1, p. 706-712, 2009.

- MAGALHÃES, V. M. de A. *Remoção de carbonatos para otimizar biolixiviação de rejeito calcopirítico empregando consórcio de microrganismos*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2016.
- MARLEBA, J.; MILANEZ, J. WANDRELEY, L. J. *Novo marco legal da mineração no Brasil: Para quê? Para quem?* Rio de Janeiro: Editora Fase, 2012. 160p.
- MARTIM, H. C.; SANTOS, V. M. L. dos. Avaliação dos impactos ambientais de uma empresa de mineração de cobre utilizando redes de interação. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 17, p. 3246-3257, 2013.
- MECHI, A.; SANCHES, D. L. Impactos Ambientais no Estado de São Paulo. *Estudos Avançados*.v. 24, p. 24-29, 2010.
- MILANEZ, B. Mineração, ambiente e sociedade: impactos complexos e simplificação da legislação. *Boletim regional, urbano e ambiental*. IPEA, n.16, 2017.
- MONTEIRO, M. A. Meio século de mineração industrial na Amazônia e suas implicações para o desenvolvimento regional. *Estudos Avançados*, v.19, p. 187-207, 2005.
- MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS. MPMG. Guia Técnico para atuação do Ministério Público no licenciamento ambiental e atividades de mineração. *Revista do Ministério Público de Minas Gerais*. Belo Horizonte, 2012, 62p.
- MUKHERJEE, C.; JONES, F. S.; BIGHAM, J. M.; TUOUVIEN, O. H. Synthesis of argentojarosite with simulated bioleaching solutions produced by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Material Science and Engineering C*. v. 66, p. 164-169, 2016.
- NANCUCHEO, I.; BINTENCOUR, T. J. A. P.; SAHOO, P. K.; ALVES, J. O.; SIQUEIRA, J. O.; OLIVEIRA, G. C. Recent developments for remediating acidic mine waters using sulfidogenic bacteria. *Biomed Research International*. v. 2017, p. 1-17, 2017.
- NASCIMENTO, D. N. O.; PALMIERI, M. C.; CARMO, A. L. V.; NOGUEIRA, E. P.; LUCHETA, A. R.; PADUA, R. V.; FERREIRA FILHO, H. R.; ALVES, J. O. Biolixiviação de minérios de cobre em reatores com *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*. No prelo. 2018.
- NAZARI, B.; JORJANI, E. Formation of jarosite and its effect on important ions for *Acidithiobacillus ferrooxidans* oxidation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. v. 24, p. 1152-1160, 2014.
- NGULUBE, R.; WANJIYA, M; NYIRENDA, K. An overview of sustainable copper recovery method via bioleaching. *Proceedings of the 86th IIER Internacional Conference*, Joanesburg, 2016.
- PRADHAN, N.; NATHASARMA, K. C.; SRINIVASA RAO, K.; SUKLA, L. B.; MISHRA, B. K. Heap bioleaching of chalcopirite: a review. *Minerals Engineering*. v. 21, p. 355-365, 2008.
- RIBEIRO NETO, W. A. *Biolixiviação de minério de cobre da minha de Sossego, PA-Companhia Vale do Rio Doce*. 2007. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Araraquara. 2007.
- RODRIGUES, A. F. S.; FONSECA, D. S.; HEIDER, M. Mineração de Metais Não-Ferrosos (Capítulo 4; 4.3 - Cobre). In: RODRIGUES, A. F. S.; FERRAZ, C. P. (Org.). *Economia Mineral do Brasil*. Brasília-DF: Cidade Gráfica e Editora Ltda., 2009. v. 01, p. 216-235.

ROHWERDER, T.; SAND, W. Mechanisms and biochemical fundamentals of bacterial metal sulfide oxidation. In: DONATI, E.R. SAND, W. (Org.). *Microbial processing of metal sulfides*.Springer, 2007.

SANTOS, B. A. Recursos minerais da Amazônia. *Estudos Avançados*. v. 16, p. 123-152, 2002.

SCHIPPERS, A. Microorganisms involved in bioleaching and nucleic acid-based molecular methods for their identification and quantification. In: DONATI, E.R. SAND, W. (Org.). *Microbial processing of metal sulfides*.Springer, 2007.

SCHIPPERS, A.; SAND, W. Bacterial leaching of metal sulphides proceeds by two indirect mechanisms via thiosulfate or via polysulfides and sulfur. *Applied and Environmental Microbiology*.v. 65, p. 319-321, 1999.

VERA, M.; SCHIPPERS, A; SAND, W. Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation - Part A. *Applied Microbiology Biotechnology*. v. 97, p. 7529-7541, 2013.

WATLING, H. R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides-A review.*Hydrometallurgy*. v. 84, p. 81-108, 2006.

ARTIGO 2

Artigo Aceito para Publicação na Revista: Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração (ISSN 2176-1523), em 31/12/2017.

**BIOLIXIVIAÇÃO DE MINÉRIOS DE COBRE EM REATORES COM
ACIDITHIOBACILLUS FERROOXIDANS**

*Dryelle Nazaré Oliveira do Nascimento*¹

*Maurício César Palmieri*²

*Andre Luiz Vilaça do Carmo*³

*Emanuele Pereira Nogueira*⁴

*Adriano Reis Lucheta*⁵

*Rafael Vicente de Pádua Ferreira*⁶

*Hélio Raymundo Ferreira Filho*⁷

*Joner Oliveira Alves*⁸

Resumo

A biolixiviação consiste na solubilização de metais provenientes dos minérios a partir da ação de micro-organismos oxidantes de Fe e S, como a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans*. O objetivo deste trabalho foi avaliar o processo de biolixiviação de um sulfeto de cobre mineral e outro intemperizado, provenientes da Serra dos Carajás (PA), Brasil. O ensaio foi conduzido em batelada, em tanques agitados inoculados com *A. ferrooxidans*, durante 100 dias. Análises mineralógicas e químicas das amostras foram realizadas por Difractometria de Raios-X (DRX) e Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDXRF), respectivamente. Determinações de pH e potencial de oxirredução (Eh) foram realizadas diariamente além da coleta de amostras para a determinação da extração de cobre (EDXRF). As amostras apresentaram comportamento semelhante quanto ao Eh e distintos com relação ao pH, o que se deu por conta de diferenças em suas composições. No 100º dia, a amostra sulfetada apresentou 0,74% de extração de cobre, com o processo encontrando-se ainda ativo. A amostra intemperizada apresentou 18,35% de extração no 60º dia, com o processo encerrado no 100º dia. O processo de biolixiviação em reatores pode ser uma alternativa viável para a recuperação de cobre principalmente de minérios intemperizados

Palavras-chave: Biomineração; Cobre; Calcopirita; Lixiviação bacteriana.

**COPPER ORES BIOLEACHING IN REACTORS WITH ACIDITHIOBACILLUS
FERROOXIDANS**

¹Eng. Ambiental e de Energias Renováveis, Mestranda em Ciências Ambientais na UEPA, Bolsista no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias, Belém, PA - Brasil.

²Químico, Doutor em Biotecnologia, Diretor de Processos Biotecnológicos na Itatjuca Biotech, São Paulo, SP - Brasil.

³Químico Industrial, Mestre em Geologia e Geoquímica, Assistente de Pesquisa no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias, Belém, PA - Brasil.

⁴Graduanda em Engenharia Química pela Universidade Federal do Pará, Bolsista no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias, Belém, PA - Brasil.

⁵Eng. Agrônomo, Doutor em Ciências, Pesquisador no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias, Belém, PA - Brasil.

⁶Biomédico, Doutor em Tecnologia Nuclear, Diretor Executivo na Itatjuca Biotech, São Paulo, SP - Brasil.

⁷Eng. Elétrico, Doutor em Ciências de Gestão, Professor na Universidade do Estado do Pará, Belém, PA - Brasil.

⁸Físico, Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Diretor no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias, Belém, PA - Brasil.

Abstract

Bioleaching consists of ore leaching by the action of iron and sulfur oxidizing bacteria, such as *Acidithiobacillus ferrooxidans*. This study aimed to evaluate the bioleaching process of sulfide and weathered copper ores, from the Serra dos Carajás (PA), in Brazil. An assay was conducted in batch, in stirred tanks inoculated with *A. ferrooxidans*, during 100 days. Samples mineralogical and chemical characterizations were performed by X-ray Diffraction (XRD) and Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF), respectively. Measurement of pH and redox potential (Eh) were performed daily, and samples collected for copper extraction determination (EDXRF). The results highlighted the similar behavior of Eh and distinguished to pH, due to different ores composition. On the 100th day, the sulfide ore sample presented 0.74% copper extraction, but the process being still active. The weathered ore sample presented 18.35% of extraction on the 60th day and the process ended on the 100th day. The stirred reactors bioleaching process may be a viable alternative for copper recovery mainly from weathered copper ores.

Keywords: Biomining; Copper; Chalcopyrite; Bacterial leaching.

1 INTRODUÇÃO

As reservas brasileiras de minérios contendo Cobre (Cu) estão estimadas em 10,8 milhões de toneladas de mineral contido, sendo que aproximadamente 82% estão localizadas no estado do Pará, principalmente, na região da Serra dos Carajás [1]. Os processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos utilizados para a extração de cobre consomem em escala global anualmente $6,13 \times 10^8$ GJ de energia e emitem $6,0 \times 10^7$ toneladas de CO₂ na atmosfera [2], viabilizando apenas o processamento de minérios com altos teores (>2% de metal contido) ou concentrados de cobre [3]. O desenvolvimento de processos alternativos de extração de cobre, que demandem menos insumos, tais como: reagentes químicos, eletricidade e água; e que contribuam para a redução das emissões de gases do efeito estufa, são estratégicos para a sustentabilidade do setor mineral em um cenário a médio/longo prazo de esgotamento das principais reservas [4].

A biolixiviação é um processo tecnicamente simples e de baixo custo, no qual micro-organismos são utilizados para a solubilização de metais dos minérios [5]. As principais vantagens, quando comparados aos processos convencionais, são: menor gasto de energia com a cominuição dos minérios, economia de água quando comparado ao processo de flotação e menor infra-estrutura requerida, entre outras, viabilizando economicamente o processamento de minérios com baixos teores (<0,5% de cobre) [6]. A bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* é a principal espécie microbiana estudada e empregada nos processos de biolixiviação, obtendo energia por meio da oxidação de formas inorgânicas reduzidas de enxofre (ex. sulfetos metálicos e enxofre elementar) e/ou ferro (íon ferroso) presentes nos minérios [7]. A biolixiviação de sulfetos minerais em grande escala é comum em países como: Chile, Peru, Estados Unidos e Austrália, no entanto, sua utilização em escala industrial no Brasil é inexistente [8, 9]. As principais operações comerciais no mundo utilizam o processo de biolixiviação estática em pilhas, entretanto a heterogeneidade do tamanho das partículas, além de irregularidades na aeração e dispersão da solução ácida dentro da pilha afetam diretamente sua eficiência [8]. Materiais

contendo altos teores de argila podem ocasionar o entupimento da pilha inviabilizando o processo [6]. Alternativamente, a biolixiviação de minérios contendo Cu pode ser realizada em reatores sob agitação, permitindo o contato contínuo das partículas com a solução contendo as bactérias. Outra vantagem da biolixiviação em reatores é o maior controle das condições do processo (temperatura, pH, potencial redox, agitação), além da possibilidade de utilização de materiais com maiores teores de argila [6,10]. Poucos estudos foram realizados avaliando o potencial da lixiviação em tanques como alternativa para o processo de biolixiviação de Cu em minérios brasileiros [9], o que pode ser uma opção viável ao processo pirometalúrgico no futuro.

O presente trabalho avaliou a eficiência do processo de biolixiviação em tanques, utilizando a bactéria *A. ferrooxidans*, de dois tipos de minério de cobre (sulfeto mineral e intemperizado de textura argilosa) provenientes da região da Serra dos Carajás, Pará.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização das Amostras

Amostras de um sulfeto mineral (que passou por cominuição manual e peneiramento até atingir granulometria inferior a 1,68 mm) e um minério intemperizado (que dispensou cominuição devido à sua textura argilosa) foram coletadas em uma mina de cobre, localizada na região da Serra dos Carajás/PA. Cerca de 100 g de cada amostra foram pulverizadas em moinho do tipo almofariz. A composição mineralógica foi determinada por Difractometria de Raios-X (DRX), sendo empregado o preparo *backloading*, pelo método do pó, em equipamento modelo Empryean-PANalytical. A determinação da composição química foi realizada por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDXRF), em equipamento modelo Epsilon 3^{XLE}-PANalytical.

2.2 Preparo do Inóculo Bacteriano e Montagem dos Reatores

A cepa de *Acidithiobacillus ferrooxidans* LR foi cultivada em 100mL de meio de cultura T&K [11] em erlenmeyers de 250mL, sob agitação de 160 rpm a 30°C, durante três dias. Para cada reator, foram preparados 25L de solução lixiviadora contendo 22,5L de meio T&K [11] sem adição do sulfato ferroso e 2,5L de inóculo de *A. ferrooxidans*. Foram adicionados 3kg de cada minério nos respectivos tanques, sendo o sistema mantido sob agitação mecânica (400 rpm) e aeração constante através da injeção de ar comprimido ($0,05 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$) (Figura 1). O pH da solução foi monitorado diariamente através de um pHmetro (FerMac 260, Electrolab) e, quando necessário, ajustado para 1,8 pela adição de H_2SO_4 . O acompanhamento da ação dos micro-organismos foi realizado ao longo de 100 dias de maneira indireta, a partir de medições diárias do pH, potencial de oxirredução (Eh) e da quantificação química do cobre lixiviado (EDXRF).

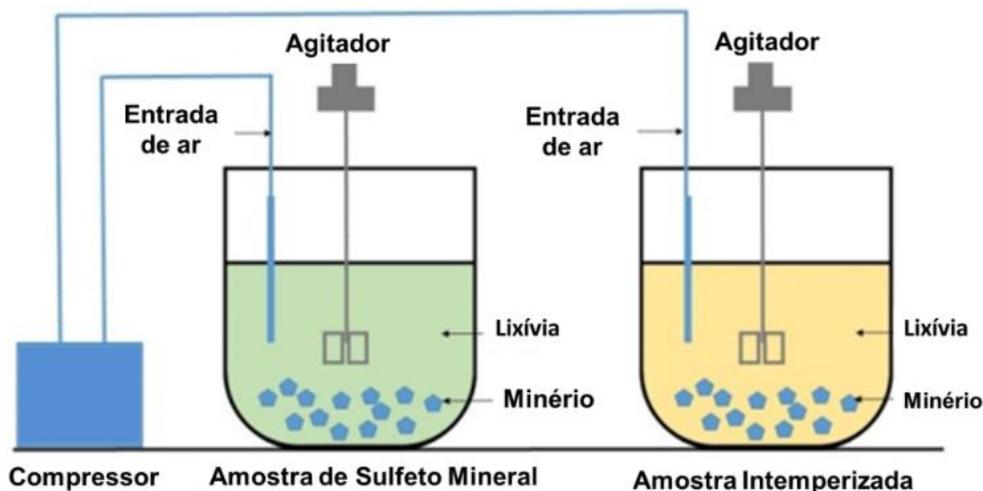


Figura 1. Esquema de funcionamento dos reatores.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composições Mineralógica e Química

A análise de DRX identificou a presença dos minerais calcopirita (3,03 e 1,85Å), quartzo (3,34 e 4,25Å), calcita (3,03Å) e clorita (14,7 e 3,5Å) na amostra de sulfeto mineral; e, clorita, mica (10 e 5Å), quartzo e goethita aluminosa (4,15Å) na amostra intemperizada (Figura 2).

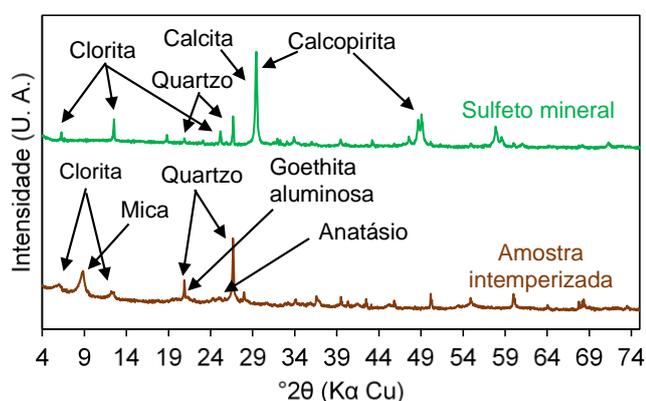


Figura 2: Difratograma (DRX) das amostras de sulfeto mineral e intemperizada.

O sulfeto mineral apresentou predomínio dos elementos enxofre, ferro e cobre (34,5%, 23,5% e 18,4%, respectivamente), associados principalmente à calcopirita (Tabela 1). A presença de cálcio (13,2%) foi associada à calcita; do silício (6,6%) ao quartzo e a estrutura da clorita, juntamente com o alumínio (1,2%), magnésio (0,8%) e ferro. O elemento fósforo não foi associado a nenhum dos minerais identificados. No minério intemperizado, observou-se o predomínio do elemento silício (45,9%), associado principalmente ao mineral quartzo, bem como, aos minerais clorita e mica juntamente ao alumínio (16,0%), ferro (25,6%) e magnésio (3,3%) (Tabela 1). Os elementos ferro e alumínio também compuseram o mineral goethita aluminosa. A presença dos elementos potássio e titânio foram associados exclusivamente à mica e anatásio, respectivamente. Cálcio (1,5%), cobre (1,4%) e fósforo (1,1%) não foram associados aos minerais identificados.

Tabela 1. Composição química das amostras estudadas (%) determinada por EDXRF.

Amostra	Fe ₂ O ₃	CuO	SO ₃	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂
Sulfeto mineral	23,5	18,4	34,5	13,2	6,6	1,6	1,2	0,8	-	-
Intemperizada	25,6	1,4	-	1,5	45,9	1,1	16,0	3,3	3,8	1,1

(-): Abaixo do limite de detecção da técnica empregada.

3.2 Monitoramento do pH e Eh

Um aumento significativo dos valores de Eh foi observado inicialmente, de 543 mV para 590 mV na amostra de sulfeto mineral (Figura 3A) e de 563 mV para 596 mV na amostra intemperizada (Figura 3B), evidenciando o início da atividade bacteriana.

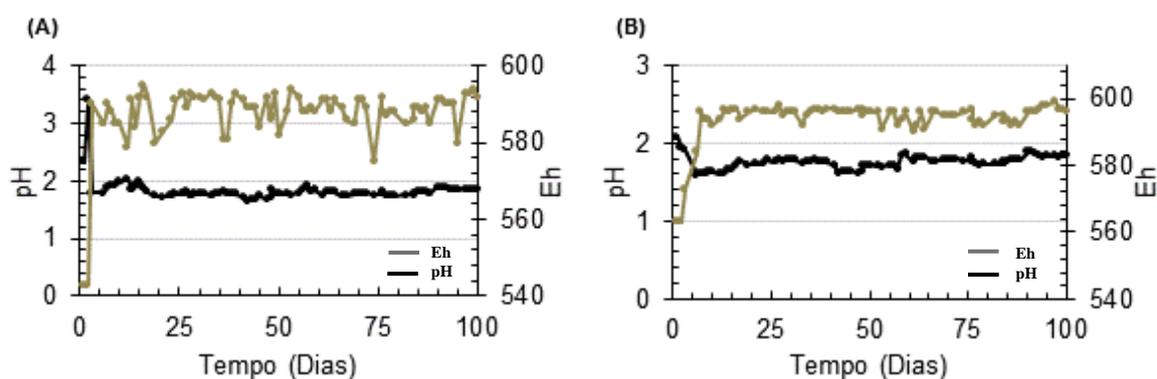


Figura 3. Valores de pH e Eh para as amostras de sulfeto mineral (A) e intemperizada (B) durante os 100 dias de ensaio.

As amostras apresentaram comportamentos distintos de pH. No reator contendo o sulfeto mineral (Figura 3A), observou-se o aumento de pH nos primeiros dias, provavelmente pela presença de carbonato na amostra (origem calcítica), sendo os valores mantidos abaixo 2,0 pela adição de ácido até o final do experimento. No reator contendo a amostra do minério intemperizado (Figura 3B), o pH inicialmente diminuiu e manteve-se em valores inferiores a 2,0. A manutenção do pH nestes valores foi essencial para o desenvolvimento da *A. ferrooxidans*, além de evitar a formação de sais férricos, como a jarosita ($MFe_3(SO_4)_2(OH)$), responsáveis pela passivação do minério ao processo de biolixiviação [12].

As porcentagens de extração de cobre estão ilustradas na Figura 4. No sulfeto mineral (Figura 4A), a extração do cobre foi de cerca de 0,47% no 50º dia de ensaio, e 0,74% no 100º dia. Este valor pode ser considerado baixo quando comparado com outros estudos utilizando micro-organismos mesofílicos e termofílicos, entretanto trataram-se de experimentos realizados com volumes (100-150mL) e granulometrias da calcopirita (37-75µm) reduzidos, o que aumenta a eficiência da extração. Liu e co-autores (2017) [13] obtiveram 59,2% de extração de cobre em experimentos de biolixiviação da calcopirita (Cu: 32,6%) inoculados com um consórcio de micro-organismos mesofílicos (*A. ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans*) e 84,56% quando inoculados com micro-organismos termofílicos extremos. Estudos de biolixiviação de amostras de calcopirita extraídas da região de Carajás/PA, utilizando a bactéria *A. ferrooxidans* LR, também

resultaram em taxas de extração superiores, variando entre 35 e 40% após 42 dias [14].

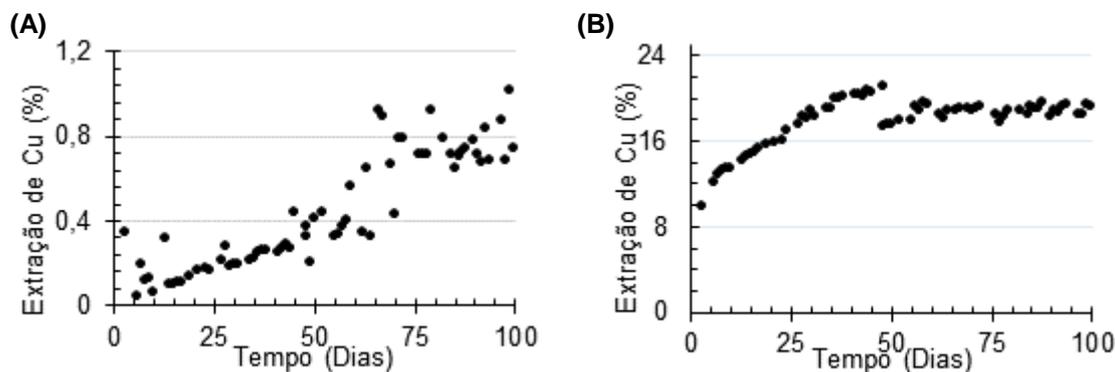


Figura 4. Porcentagens de extração de cobre para amostra de sulfeto mineral (A) e intemperizada (B).

Na amostra intemperizada (Figura 4B), a extração de cobre chegou a 17,49% no 50º dia, estabilizando-se por volta do 60º dia, com 18,35% de extração. Nos últimos 10 dias de ensaio, o valor médio de extração foi de 18,83%, indicando que a dissolução foi praticamente encerrada. A menor taxa de solubilização observada na amostra de minério sulfetado deve-se à maior recalcitrância da calcopirita ao ataque oxidativo (Fe^{3+}) e dissolução ácida causado pela *A. ferrooxidans*, demandando mais tempo para a solubilização do cobre [8]. Além disso, durante o experimento não foi realizado o controle da temperatura nos tanques, podendo ter afetado a eficiência da bactéria. No caso de micro-organismos mesofílicos, como a *A. ferrooxidans*, a temperatura ótima de crescimento se dá em torno de 30°C. [7]. A utilização de consórcios microbianos compostos por espécies oxidantes de Fe e S também já foi demonstrada como sendo mais eficiente na biolixiviação da calcopirita do que a utilização de uma espécie única [12]. Como alternativas para o aumento da eficiência do processo de biolixiviação, podemos salientar ainda a adoção de pré-tratamentos ácidos para remoção de carbonatos, que demonstrou valores de extração de 47% para minérios com 0,5% de cobre provenientes da região de Carajás [15], somados ao controle mais rigoroso da temperatura e a utilização de consórcios microbianos mesofílicos ou termofílicos [10].

4 CONCLUSÃO

A amostra de sulfeto mineral, contendo predominantemente a calcopirita, apresentou maior recalcitrância ao processo de biolixiviação em reatores utilizando a bactéria *A. ferrooxidans*, nas condições avaliadas. Com uma taxa de extração de cobre de 0,74%, a biolixiviação continuou crescente até o 100º dia de ensaio, evidenciando a atividade no processo e necessidade de um período mais longo para determinar a extração máxima. Alternativas como o pré-tratamento da amostra para a remoção de carbonatos, bem como, utilização de um consórcio microbiano e/ou micro-organismos termófilos tendem a aumentar a eficiência da biolixiviação, sendo esta avaliação alvo dos próximos experimentos. Os ensaios de biolixiviação em tanques mostraram a possibilidade de a extração de cobre de minérios intemperizados de

baixo teor contendo argila provenientes da região da Serra de Carajás, podendo ser uma solução para o volume de estéreis depositados nas minas.

5 AGRADECIMENTOS

Projeto realizado com o apoio financeiro do Edital SENAI SESI de Inovação e programas de bolsas da CAPES/Mestrado e CNPq/PIBIT.

6 REFERÊNCIAS

1. DNPM- Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral 2015. DNPM, 2016.
2. Rankin J. Energy use in metal production. Presentation 1. High Temperature Processing Symposium. Swinburne University of Technology. 2012. <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP12183&dsid=DS3>
3. Bobadilla-Fazzini RA, Pérez A, Gautier V, Jordan H, Parada P. Primary copper sulfides bioleaching vs. chloride leaching: Advantages and drawbacks. *Hydrometallurgy*. 2017;168:26–31.
4. Walting, HR. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides- A review. *Hydrometallurgy*. 2006;84:81-108.
5. Bosecker K. Bioleaching: metal solubilization by microorganisms. *FEMS Microbiology Reviews*. 1997;20:591-604.
6. Ghorbani Y, Franzidis J-P, Petersen J. Heap leaching technology – current state, innovations and future directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016;37:73-119.
7. Temple KL, Colmer AR. The autotrophic oxidation of iron by a new bacterium: *Thiobacillus ferrooxidans*. *Journal of Bacteriology*. 1951;62:605-611.
8. Panda S, Akcil A, Pradhan N, Devenci H. Current scenarios of chalcopyrite bioleaching: A review for the recent advances to its heap-leach technology. *Bioresearch Technology*. 2015;196:694-706
9. Bevilaqua D, Lahti H, Suegama PH, Garcia Jr O, Benedetti AV, Puhakka JA, Tuovinen OH. Effects of Na-chloride on the bioleaching of a chalcopyrite concentrate in shake flasks and stirred tank bioreactors. *Hydrometallurgy*. 2013;138:1-13.
10. Gerick M, Govender Y, Pinches A. Tank bioleaching of low-grade chalcopyrite concentrates using redox control. *Hydrometallurgy*. 2010;104:414-419.
11. Tuovinen OH, Kelly DP. Studies on the growth of *Thiobacillus ferrooxidans* - Use of membrane filters and ferrous iron agar to determine viable number and comparison CO₂ fixation and iron oxidation as measures of growth. *Archives of Microbiology*. 1973;88:285-298.
12. Fu B, Zhou H, Zhang R, Qiu G. Bioleaching of chalcopyrite by pure and mixed cultures of *Acidithiobacillus* spp. and *Leptospirillum ferriphilum*. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2008;62:109–115.
13. Liu H, Xia J, Nie Z, Liu L, Wang L, Ma C, Zheng L, Zhao Y, Wen W. Comparative study of S, Fe and Cu speciation transformation during chalcopyrite bioleaching by mixed mesophiles and mixed thermophiles. *Minerals Engineering*. 2017;106:22–32.
14. Silva, DR da. Efeito da adição de nanopartículas na biolixiviação da calcopirita (CuFeS₂) por *Acidithiobacillus ferrooxidans* LR [Dissertação Mestrado]. Universidade Estadual Paulista; 2011.
15. Magalhães VMA. Remoção de carbonatos para otimizar biolixiviação de rejeito calcopirítico empregando consórcio de microorganismos [Dissertação Mestrado] em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte; 2016.

ARTIGO 3

Submetido ao 23º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais.

EXTRAÇÃO DE COBRE A PARTIR DE MINÉRIOS MARGINAIS DA REGIÃO DE CARAJÁS (PA) COM EMPREGO DA BIOLIXIVIAÇÃO EM REATORES

D. de N. O. do Nascimento¹, A. R. Lucheta², M. C. Palmieri³, A. L. V. do Carmo⁴, R. V. de P. Ferreira⁵, H. R. Ferreira Filho⁶, J. O. Alves⁷

RESUMO

*A biolixiviação consiste na solubilização oxidativa de sulfetos minerais por ação de micro-organismos, como o *Acidithiobacillus ferrooxidans*. A calcopirita é o sulfeto de cobre primário mais refratário ao processo de biolixiviação em pilhas, sendo a biolixiviação em tanques agitados uma alternativa empregada. O objetivo deste trabalho foi avaliar a extração de cobre de amostras de sulfeto mineral e intemperizadas da região de Carajás-PA em reatores agitados inoculados com *A. ferrooxidans*. Caracterizações mineralógicas (DRX) e químicas (FRX) das amostras foram realizadas. O pH, Eh e taxa de extração de cobre foram monitorados diariamente. As taxas de extração de cobre foram de 1,67% para a amostra de sulfeto mineral e de 19,54% para a amostra intemperizada, após 47 dias. Os resultados apontam que a biolixiviação em reatores agitados pode ser considerada uma alternativa ao processo de biolixiviação em pilhas para minérios de cobre da região de Carajás, principalmente os intemperizados contendo argila.*

Palavras-chave: cobre, tratamento de minérios, biolixiviação, *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

INTRODUÇÃO

A biolixiviação consiste no processo de extração do metal de interesse do minério por ação bacteriana, a partir da solubilização oxidativa do sulfeto mineral^(1,2). Este método encontra-se bem estabelecido e é uma alternativa econômica às técnicas convencionais de tratamentos de minérios de baixo teor (concentração de Cu < 0,5%), principalmente em um contexto de recursos minerais com altos teores cada vez mais escassos e de menor qualidade⁽³⁾.

¹ Eng. Ambiental e de Energias Renováveis, Mestranda em Ciências Ambientais na UEPA, Bolsista no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Minerais, Belém, PA - Brasil.

² Eng. Agrônomo, Doutor em Ciências, Pesquisador no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Minerais, Belém, PA - Brasil.

³ Químico, Doutor em Biotecnologia, Diretor de Processos Biotecnológicos na Itatijuca Biotech, São Paulo, SP - Brasil.

⁴ Químico Industrial, Mestre em Geologia e Geoquímica, Assistente de Pesquisa no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Minerais, Belém, PA - Brasil.

⁵ Biomédico, Doutor em Tecnologia Nuclear, Diretor Executivo na Itatijuca Biotech, São Paulo, SP - Brasil.

⁶ Eng. Elétrico, Doutor em Ciências de Gestão, Professor na Universidade do Estado do Pará, Belém, PA - Brasil.

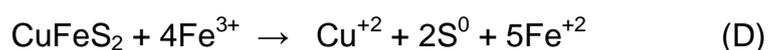
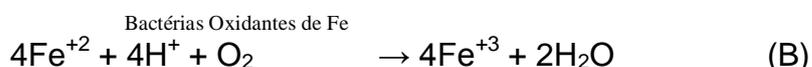
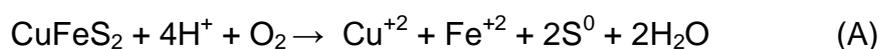
⁷ Físico, Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Diretor no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Minerais, Belém, PA - Brasil

A Calcopirita (CuFeS_2) é um sulfeto de cobre primário, refratário e o mais abundante minério de cobre da natureza, correspondendo a cerca de 70% das reservas mundiais de cobre^(4,5,6). A demanda por este mineral é crescente por parte da indústria, entretanto, a diminuição das reservas e o alto custo do processamento do minério de baixo teor pela indústria convencional, são fatores que tornam a biolixiviação um método de extração de cobre cada vez mais atrativo⁽⁷⁾.

Watling et al (2006)⁽⁷⁾, destaca as principais vantagens da biolixiviação como sendo: a economia de insumos empregados nos processos convencionais, visto que eles são produzidos pelos micro-organismos a partir dos constituintes do minério, baixo requerimento de energia e custos operacionais menores, quando comparada aos processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos.

Dentre os micro-organismos mais utilizados em processos de biolixiviação, a bactéria da espécie *Acidithiobacillus ferrooxidans* é uma das mais estudadas. Ela é capaz de se desenvolver em ambientes extremamente ácidos e em temperaturas de 20 a 40°C, tolerando elevadas concentrações de metais^(8,9). Caracteriza-se por apresentar metabolismo quimiolitotrófico, utilizando íon ferroso e compostos reduzidos de enxofre como fonte de elétrons e energia e fixando o carbono a partir do CO_2 ⁽⁹⁾.

Durante o processo de biolixiviação, a *A. ferrooxidans* colabora tanto com oxidação enzimática dos íons ferrosos (Equação B) quanto com a oxidação do enxofre elementar (Equação C), gerando os substratos Fe^{3+} e H^+ responsáveis pelos ataques oxidativo (Equação D) e ácido (Equação A) da calcopirita^(10,11).



Dentre os principais processos de biolixiviação com aplicações comerciais, Rawlings (2005)⁽¹²⁾ destaca a biolixiviação em pilhas, na qual o minério é aglomerado em pilhas sobre uma superfície impermeável, sob constante irrigação pela solução lixiviante contendo os micro-organismos, e em tanques agitados, nos quais o minério é adicionado a uma fina granulometria, com as determinadas

concentrações de densidade de polpa, em meio contendo os micro-organismos, a uma agitação constante.

Se comparada à biolixiviação em colunas, a biolixiviação em reatores agitados pode apresentar custo mais elevado para sua manutenção e operação, entretanto, costuma apresentar maiores taxas de extração e ser empregada com sucesso em minérios refratários⁽¹³⁾. Isto porque ocorre maior interação entre a superfície da partícula mineral e os agentes oxidantes, por ser uma operação realizada em reatores, agitados mecanicamente ou por meio de injeção de ar, o que também contribui para o suprimento da demanda de oxigênio e gás carbônico dos micro-organismos⁽¹⁴⁾.

Diversos estudos envolvendo a biolixiviação em reatores agitados tem sido desenvolvidos, a fim de otimizar esta técnica de biolixiviação para minérios refratários^(15, 16, 17, 18,19).Entretanto, um dos principais desafios para a biolixiviação em reatores agitados é a força de cisalhamento e turbulência gerada pela agitação mecânica da lixívia⁽²⁰⁾.

O objetivo do presente trabalho foi determinar as taxas de extração de cobre de amostras de sulfetos minerais e minérios intemperizados, provenientes da região de Carajás-PA, por meio da biolixiviação em reatores agitados inoculados com a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

MATERIAL E MÉTODOS

Coleta e preparação das amostras

Amostras de um sulfeto de cobre e de um minério intemperizado foram coletadas em uma mina de cobre situada na Serra dos Carajás (PA). As amostras foram cominuídas e peneiradas, até atingirem granulometria inferior a 1,68mm. Foram pulverizadas 100g de cada amostra em moinho do tipo almofariz (Retsch, RM200), utilizadas para a caracterização mineralógica e química.

Caracterização mineralógica e química

A composição mineralógica das amostras foi determinada por Difractometria de Raios-X (DRX), em equipamento da marca PANalytical, modelo Empyrean, com preparo backloading pelo método do pó. A composição química foi determinada por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (FRX), em

equipamento da marca PANalitycal, modelo Epsilon 3 XLE, tubos de Raios-X cerâmico de Ródio e nível de potência máxima de 15W.

Preparo do inóculo e montagem dos reatores

A cepa de *Acidithiobacillus ferrooxidans* LR⁽²¹⁾ foi cultivada em meio de cultura T&K⁽²²⁾, tendo o sulfato de ferro ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) como doador de elétrons. O inóculo bacteriano foi adicionado aos reatores numa proporção de 10%, considerando o volume final de 25 litros de solução lixiviadora. Para a montagem dos reatores foram adicionados 22,5L de meio T&K⁽²²⁾, sem a adição do sulfato de ferro, 2,5 L do inóculo bacteriano e 1250 g da amostra de minério (< 1,68 mm), sendo o pH final ajustado para 1,8, pela adição de ácido sulfúrico concentrado. O reator 1, recebeu a amostrado sulfeto mineral, enquanto o reator 2, recebeu o minério intemperizado, constituindo numa densidade de polpa de 5%. O sistema foi mantido sob agitação mecânica (450 rpm) através de um agitador de hélice mod. AE-40 (Gehaka, Brasil), recebeu injeção de ar comprimido ($0,05\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$) e a temperatura da solução foi mantida a 30°C por um aquecedor elétrico submerso. A atividade do processo de biolixiviação foi monitorada diariamente, por meio da medição do pH em um pHmetro modelo FerMAc 260 (Electrolab, Reino Unido), potencial redox (Eh) em equipamento mod. FerMac 290 (Electrolab, Reino Unido) e coleta de amostras para a quantificação do cobre lixiviado, realizadas por FRX. A Figura 1 apresenta o esquema de funcionamento dos reatores.

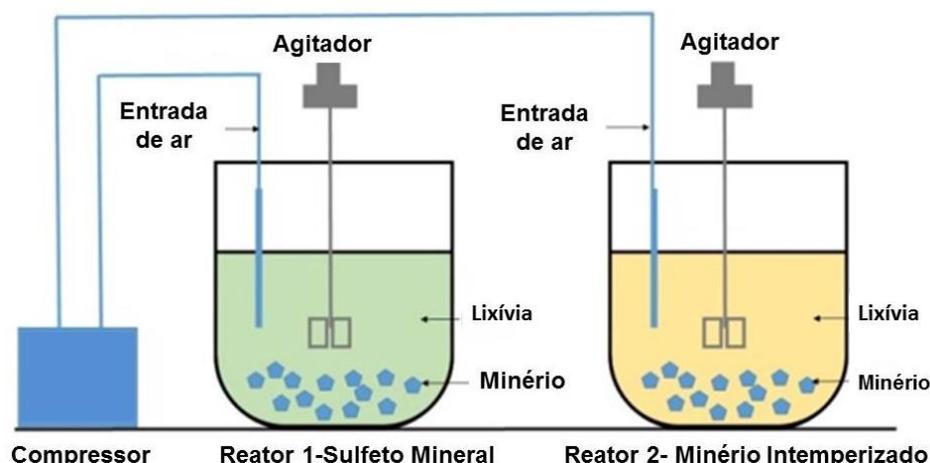


Figura 1: Esquema de funcionamento dos reatores.

Contagem populacional e viabilidade da bactéria *a. ferrooxidans*

A densidade populacional da bactéria *A. ferrooxidans* foi determinada semanalmente através de contagem em câmara de Neubauer, em aumento de 400x, em um microscópio óptico modelo DM3000 LED (Leica, Alemanha).

A viabilidade das bactérias na oxidação do ferro foi determinada semanalmente a partir de inoculação de 20 mL de amostras retiradas dos reatores em 180 mL de meio T&K⁽²²⁾ em erlenmeyer de 250 mL, que foram incubados sob agitação de 150 rpm, a 30°C, durante 72 horas. A atividade microbiana foi determinada visualmente pela alteração da coloração esverdeada do meio T&K para a coloração marrom-ferrugem, resultante da oxidação do sulfato de ferro pelas bactérias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Composições mineralógica e química

A Figura 2 apresenta a composição mineralógica das amostras estudadas. Na amostra de sulfeto mineral utilizada no reator 1, foram identificados, predominantemente, os minerais calcopirita (3,03 e 1,85 Å), quartzo (3,34 e 4,25 Å), magnetita (2,53 e 1,48 Å), clorita (14,7 e 3,5 Å) e magnésiohornblenda ferrosa (3,12 e 8,40 Å). Quanto à amostra de minério intemperizado, foi identificada a presença majoritariamente dos minerais quartzo (3,34 e 4,25 Å), goethita aluminosa (4,17 Å) e hematita (2,69 e 2,53 Å).

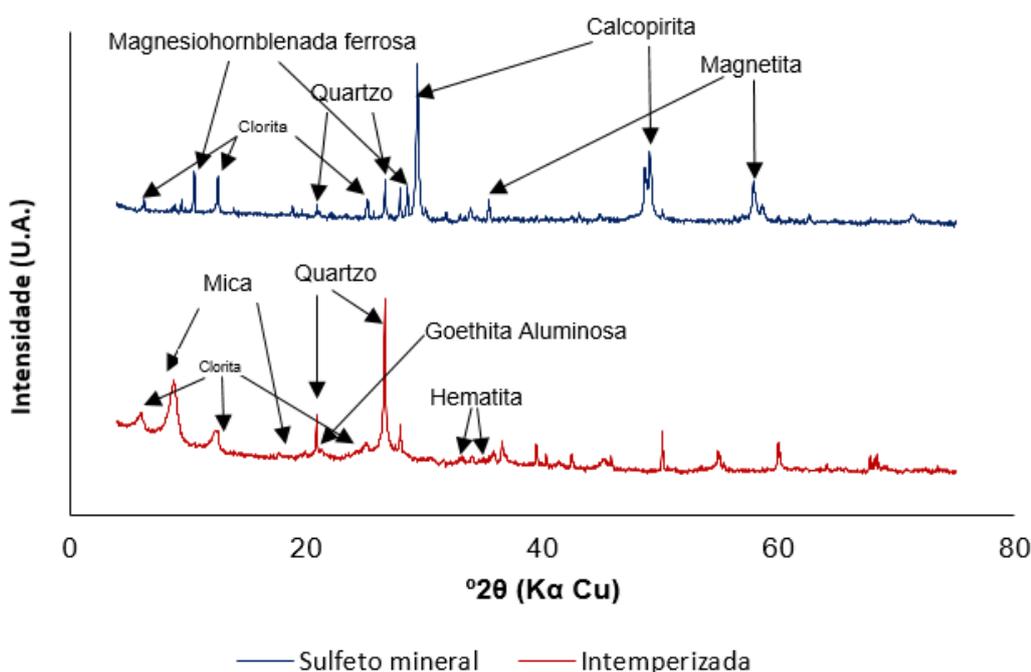


Figura 2. Difratoograma das amostras de sulfeto mineral e intemperizada obtido por Difractometria de Raios-X (DRX).

A Tabela 1 apresenta a composição química das amostras empregadas nos reatores 1 e 2. Os elementos predominantes no sulfeto mineral foram enxofre (38,58%), ferro (26,10%), cobre (17,38%) e silício (11,38%), sendo os três primeiros associados à estrutura da calcopirita (CuFeS_2). O silício está relacionado à estrutura do quartzo (SiO_2) e da magnésiohornblenda ferrosa ($\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Fe}^{+2})_4\text{Al}(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}(\text{OH},\text{F})_2$), a qual também estão associados o ferro, o alumínio (2,47%), cálcio (1,22%) e magnésio (2,81%). O ferro também está associado à estrutura da magnetita (Fe_3O_4).

A amostra de minério intemperizado apresentou o predomínio dos elementos silício (47,77%), alumínio (16,66%) e ferro (24,63%). O silício está associado à estrutura do quartzo (SiO_2) e dos argilominerais mica e clorita. O ferro está associado à estrutura dos minerais goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e hematita (Fe_2O_3). Alumínio e ferro também podem estar relacionados à clorita. O cobre, elemento de interesse na amostra, foi determinado na concentração de 1,26%, não sendo identificado o mineral associado.

Tabela 1. Composição química das amostras empregadas nos Reatores 1 e 2.

Elemento	Concentração (%)	
	Reator1	Reator2
SiO_2	11,41	47,44
TiO_2	0,10	1,03
Al_2O_3	2,47	16,77
Fe_2O_3	26,10	24,63
CaO	1,63	1,22
CuO	17,38	1,26
MgO	1,52	2,81
NiO	0,13	-
K_2O	0,19	3,65
P_2O_5	0,45	0,66
SO_3	38,58	-
Na_2O	-	0,26

Contagem e viabilidade das bactérias *A. ferrooxidans*

O constante monitoramento da população bacteriana em processos de biolixiviação é fundamental para a manutenção da eficiência da extração,

possibilitando intervenções no processo, como por exemplo: alteração das taxas de aeração/agitação, composição do meio nutritivo, necessidade de injeção de CO_2 , entre outros⁽²³⁾. Os resultados da contagem de bactérias, apresentados na Figura 3, indicaram um declínio do número de células. mL^{-1} , de $1,3 \cdot 10^8$ células. mL^{-1} no 1º dia para $1,31 \cdot 10^7$ células. mL^{-1} no 12º dia, para o reator 1; e de $6,85 \cdot 10^7$ células. mL^{-1} no 3º dia para $1,7 \cdot 10^7$ células. mL^{-1} no 12º dia, para o reator 2. Esta redução inicial na população bacteriana provavelmente foi causada pela oxidação do sulfato de ferro adicionado junto ao inóculo, levando certo tempo até que os micro-organismos utilizassem o minério como fonte de energia e elétrons. A partir do 12º dia de ensaio, houve crescimento no número de células no reator 1, alcançando valores de $6,63 \cdot 10^7$ células. mL^{-1} no 50º dia, o que pode ser explicado pela dissolução da calcopirita pelo ataque ácido no decorrer do ensaio e a consequente disponibilização dos íons ferrosos e enxofre elementar, substratos para o crescimento microbiano. O reator 2 permaneceu estável em valores próximos a $2,0 \cdot 10^7$ células. mL^{-1} do 12º até o 31º dia, com declínio para $1,15 \cdot 10^7$ células. mL^{-1} no 50º dia. A menor população de *A. ferrooxidans* observada no reator 2 se deu pela menor disponibilidade de formas reduzidas de ferro e enxofre, uma vez que o minério utilizado já estava em sua forma oxidada. O principal minério de ferro encontrado na amostra intemperizada foi a hematita, que diferentemente da calcopirita e magnetita, apresenta somente os íons Fe^{3+} , não servindo como substrato para as bactérias.

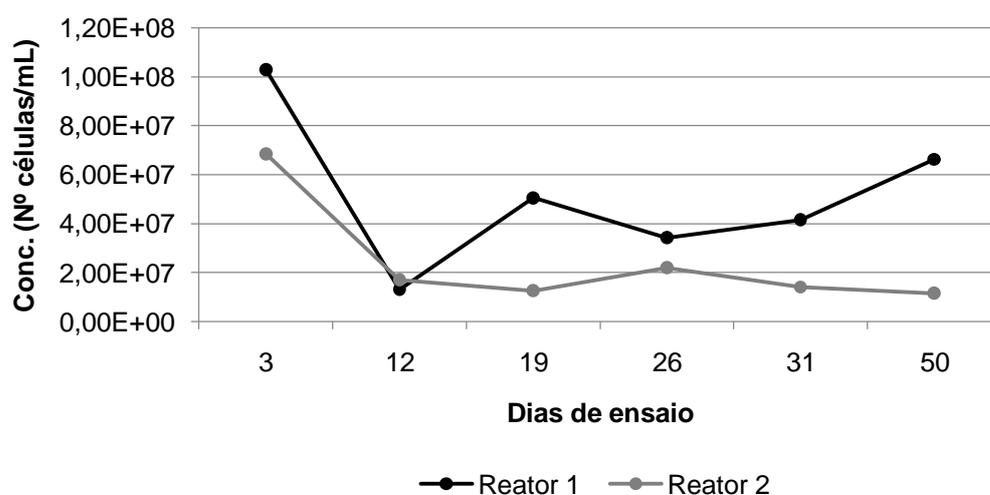


Figura 3. Concentração de bactérias nos reatores ao decorrer do ensaio.

No caso da biolixiviação em tanques agitados, um problema comum é redução da população microbiana causada pela colisão e fricção das partículas do minério com os micro-organismos, dependendo do tipo de pá mecânica empregada, velocidade de agitação e concentração de polpa de minério, impactando negativamente as taxas de extração^(24, 20). Durante o presente trabalho, a concentração da polpa de minério foi reduzida para 5% (peso/volume) em comparação com o trabalho desenvolvido por Nascimento et al., (2018)⁽²⁵⁾ que utilizou 12% de polpa em experimentos de biolixiviação de amostras de sulfetos da região de Carajás em tanques agitados. Não foram observados efeitos de lise mecânica das bactérias no presente trabalho, sendo observado até o aumento da população no reator 1 após o 26º dia (Figura 3). A integridade das células de *A. ferrooxidans* também foi confirmada pela capacidade de oxidação do sulfato de ferro contido no meio T&K⁽²²⁾, como pode ser observado na Figura 4.

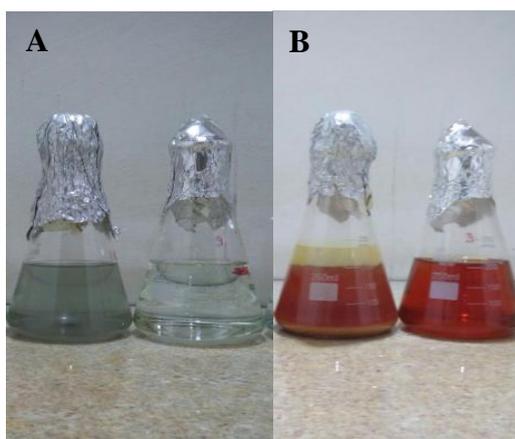


Figura 4. Teste de viabilidade da bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* presente na solução lixiviadora dos reatores. (A) Coloração do meio T&K⁽²²⁾ contendo sulfato de ferro ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) reduzido. (B) Coloração do meio T&K⁽²²⁾ contendo o sulfato de ferro oxidado pelas bactérias, após 72 horas de incubação.

Monitoramento de pH e Eh

O pH dos reatores foi mantido entre 1,8 e 1,9 (Figura 5A e 5B), durante todo o período do experimento, como desejado, evitando a possível formação de agentes passivadores, como a jarosita, favorecida em pH acima de 2,0⁽²⁶⁾.

Oscilações nos valores de Eh foram observados no reator 1, enquanto que o reator 2 apresentou comportamento mais estável do potencial de óxido-redução (Figura 5A e 5B). No reator 1, foi observado aumento inicial de 546,7mV no 1º dia para 595,4mV no 6º dia, permanecendo com valores próximos a 590mV até o 17º

dia. Após este período, houve declínio para valores próximos a 585mV, estabilizando-se assim até o final do ensaio. No reator2, o aumento inicial foi de 543,6mV no 1º dia, para 588,7 até o 5º dia, seguido de um novo incremento para valores próximos a 600mV até o 21º dia, estabilizando em 586,5mV até o término do experimento.

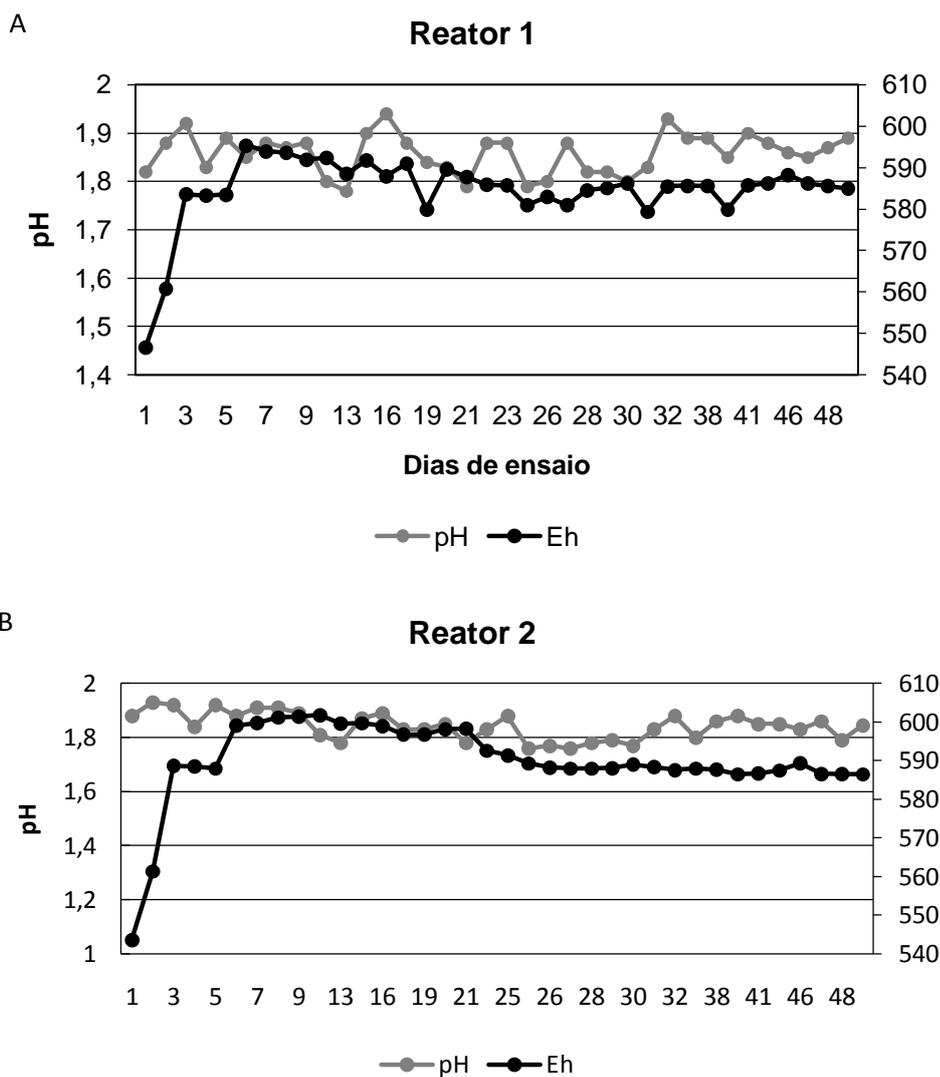


Figura 5. Comportamento do pH e Eh nos reatores 1 (A) e 2 (B).

Extração do minério de cobre

O reator 1 apresentou, após o 48º dia de ensaio, extração total de 1,67% do cobre contido no minério e tendência de crescimento linear da extração (Figura 6). Tal valor pode ser considerado baixo se comparado a outros estudos envolvendo biolixiviação de sulfetos de cobre, porém foi quatro vezes maior do que o obtido por

Nascimento et al., (2018)⁽²⁵⁾, no mesmo período, utilizando a concentração de 12% de uma calcopirita extraída da Serra dos Carajás (PA) nos reatores. Além de diferenças na composição do minério, como a presença de carbonatos na amostra utilizada por Nascimento et al., (2018), o presente trabalho utilizou uma menor concentração de polpa (5%) e controle constante da temperatura dos reatores em 30°C, o que pode ter diminuído o efeito da lise mecânica das células e favorecido o desenvolvimento da bactéria *A. ferrooxidans*.

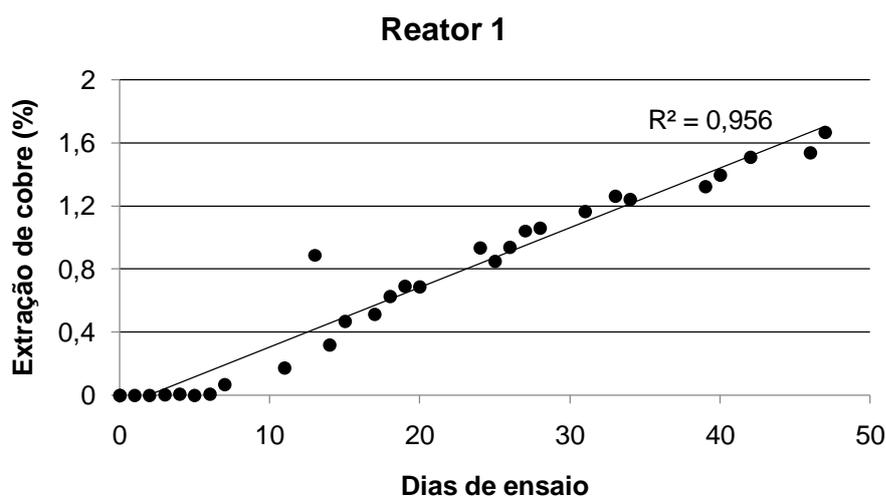


Figura 6. Extração de cobre (%) para o Reator 1.

Em ensaio de biolixiviação, comparando-se, a eficiência na extração de cobre de concentrados calcopiríticos em reatores e em frascos agitados contendo *A. ferrooxidans*, sob condições de temperatura e densidade de polpa semelhantes ao presente estudo, Zhao et al (2015)⁽²⁷⁾ obtiveram como resultados 60% de extração para reatores e de 45% para frascos agitados. Este resultado deve-se, de acordo com os autores, ao melhor efeito de transferência de massa, injeção de ar e redução e camada de passivação sobre o minério. Outro fator que contribuiu para a menor extração nos frascos, de acordo com os autores, foi a tensão de cisalhamento neles existente.

Wu et al (2007)⁽²⁸⁾, ao avaliarem a biolixiviação da calcopirita em consórcio de micro-organismos moderadamente termofílicos, constataram que uma revolução muito rápida na polpa impede o crescimento de micro-organismos e ocasiona baixa extração de cobre, devido à elevada tensão de cisalhamento. Os mesmos autores obtiveram a máxima biomassa bacteriana e extração de cobre quando aplicada a agitação de 180 rpm (8,1g.L⁻¹) e a mínima extração e biomassa, a 220rpm (4,6g.L⁻¹).

Quanto ao reator 2 (Figura 7), constatou-se que já nos primeiros dias de ensaio, as taxas de extração do cobre presente no minério oxidado foram decerca de 16%, pouco variando até o final do experimento. Este resultado sugere um efeito maior de lixiviação ácida do cobre presente na amostra, do que propriamente da biolixiviação. Entretanto, alguns ensaios ainda são necessários para a confirmação desta hipótese. Nascimento e colaboradores (2018)⁽²⁵⁾, obtiveram taxas de recuperação do cobre de 18%, em amostras de minérios oxidados também coletadas na Serra dos Carajás, biolixiviadas em tanques de 25 litros por 50 dias com a bactéria *A. ferrooxidans*. Diferentemente dos resultados obtidos no presente trabalho, Nascimento et al., (2018) observaram o crescimento linear na extração do cobre nos primeiros 50 dias, seguidos por uma fase estacionária até o término do experimento.

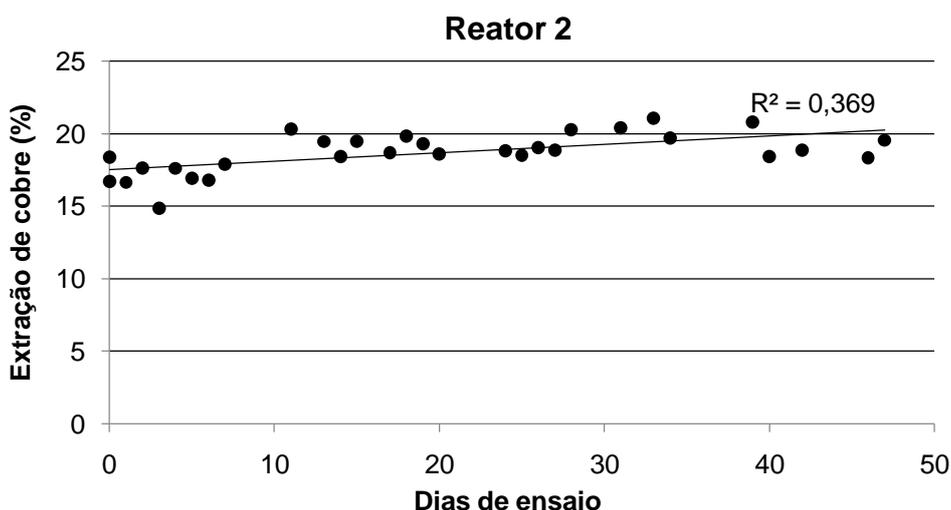


Figura 7. Extração de cobre (%) para o Reator 2.

Os micro-organismos, por sua vez, apesar de apresentarem declínio inicial em sua concentração, decorrentes do estresse gerado pelas novas condições de agitação, mantiveram-se em concentração estável, próxima de 2×10^7 células.mL⁻¹, até o 26º dia de ensaio. Durante este período, ocorreu aumento da taxa de extração para cerca de 20%, a qual permaneceu constante até o 48º dia, em 19,54% de cobre extraído, indicando que a biolixiviação foi encerrada.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para extração de cobre da amostra de sulfeto mineral contendo predominantemente a calcopirita (1,67%) pode ser considerada baixa em comparação com outros ensaios em frascos agitados, porém foi quatro vezes superior a experimentos em reatores com o mesmo volume, também utilizando amostras da calcopirita da região de Carajás. Tal incremento se deu principalmente pela redução da concentração da polpa, evitando a lise das bactérias e controle constante da temperatura dos reatores. O reator 2, contendo o minério intemperizado, apresentou maior taxa de extração de cobre desde os primeiros dias de ensaio (19,54%), apresentando-se como uma alternativa para a biolixiviação de minérios oxidados contendo argila da região de Carajás-PA. Entretanto, deve-se ainda avaliar a interferência da solubilização ácida neste processo.

REFERÊNCIAS

1. ACEVEDO, F. The use of reactors in biomining processes. *Electronic Journal of Biotechnology*. v.3, n. 3, 2000.
2. GENTINA, J.C.; ACEVEDO, F. Application of bioleaching to copper mining in Chile. *Electronic Journal of Biotechnology*. v.16, n.3, p.1-14, 2013.
3. BLAUTH, P. L. Oxidação da calcopirita (CuFeS₂) por *Acidithiobacillus ferrooxidans* em presença de cisteína e de *Acidithiobacillus thiooxidans*. [Dissertação de Mestrado] Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia. UESP, 2008.
4. CARNEIRO, M.F.C.; LEÃO V.A. Lixiviação da Calcopirita com cloreto férrico e cloreto de sódio. *Revista Escola de Minas*. V.58, n.3, p.231-235, 2005.
5. BOBADILLA-FAZZINI, R.A.; PÉREZ, A.; GAUTIER, V.; JORDAN, H.; PARADA, P. Primary copper sulfides bioleaching vs. chloride leaching: Advantages and drawbacks. *Hydrometallurgy*. v.168, p.26-31, 2017.
6. ZHAO, H.; WAN, J.; QIN, W.; HU, M.; QIU G. Electrochemical Dissolution of Chalcopyrite Concentrates in Stirred Reactor in the Presence of *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *International Journal of Electrochemical Science*. v.10, p.848-858, 2015.
7. WATLING, H. R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides-A review. *Hydrometallurgy*. v.86, p.81-108, 2016.
8. SCHIPPERS, A. Microorganisms involved in bioleaching and nucleic acid-based molecular methods for their identification and quantification. In: Donati ER, Sand W. *Microbial processing of metal sulfides*. Springer, 2007.
9. MAGALHÃES, V.M.A. Remoção de carbonatos para otimizar biolixiviação de rejeito calcopirítico empregando consórcio de microorganismos. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.
10. ERLICH, H.L.; FOX, S.I. Environmental effects on bacterial copper extraction from low-grade copper ores. *Biotechnol. Bioeng.* 1967; 9 (1967): 471-485.
11. HADDAIN, J.; DAGOT, C.; FICK, M. Models of bacterial leaching. *Enzyme and Microbial Technology*. v.17, p.290-305, 1995.
12. RAWLINGS, D.E. Characteristics and adaptability of iron- and sulfur-oxidizing microorganismos used for the recovery of metals from minerals and their concentrates. *Microbial Cell Factories*. v.4, n.13, p. 1-15, 2005.
13. BOSECKER, K. Bioleaching: metal solubilization by microorganisms. *FEMS Microbiology Reviews*. v.20, p. 591-604, 1997.

14. OLIVEIRA, D.M.; SÉRVULO, E.F.C; SOBRAL, L.G.S.; PEIXOTO, G.H.C. Biolixiviação: utilização de micro-organismos na extração de metais. Série tecnologia ambiental.n.53, p.40, 2010.
15. GIAVENO, M.A.; LAVALLE, T.L.; DONATI, E. Use of biorreactors in the leaching of na Oxidized copper ore. Latin America Applied Research.v.33, n.1, p.1-6, 2003.
16. ARROYAVE, D.G.; MÁRQUEZ,M.G.; CALLEGOS, S.D.; PACHECO, G.Evaluación y caracterización mineralógica del proceso de biooxidación en um reactor continuo de tanque agitado. Dyna. v.77, n.164, p.18-29, 2010.
17. JIN, J.; LIU, G.; ZHANG, Q.; CONG, Z. Comparison of Fe²⁺ oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans* in rotating-drum and stirred-tank reactors. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. V.23, p.804-881, 2013.
18. GUEZENEC, A.; JOULIAN, C.; JACOB, J.; ZRCHANE, A.; IBARRA, D.; BUYER, R.; BODENÁN, F.; D'HUGE, P.Influence of dissolved oxygen on the bioleaching efficiency under oxygen enriched atmosphere. Minerals Engineering.v.106, p.64-70, 2017.
19. WANG, J.; HU, M.; ZHAO, H.; TAO, L.; GAN, X.; QIN, W.; QIU, G.Well-controlled column bioleaching of a low-grade copper ore by a novel equipment. 2015;22 (2015): 3318–3325.
20. LIU, G.; YIN, J.; CONG, W. Effect of fluid shear and particles collision on the oxidation of ferrous iron by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Minerals Engineering. 2007; 20 (2007): 1227–1231.
21. GARCIA JR, O. Isolation and purification of *Thiobacillus ferrooxidans* and *Thiobacillus thiooxidans* from some coal and uranium mines of Brazil. Revista de Microbiologia.v.22, n.1, p.1-6, 1991.
22. TUOVINEN, O.H.; KELLY, D.P. Studies on the growth of *Thiobacillus ferrooxidans* - Use of membrane filters and ferrous iron agar to determine viable number and comparison CO₂ fixation and iron oxidation as measures of growth. Archives of Microbiology.v.88, p.285-298,1973.
23. HEDRICH, S.; GUEZENEC, A.; CHARRON, M.; SCHIPPERS, A.; JOULIAN, C. Quantitative monitoring of microbial species during bioleaching of a copper concentrate. Front, Microbiol.v.44, 2016.
24. MORIN, D.H.R. Bioleaching of Sulfide minerals in continuous stirred tanks. In: Donati ER, Sand W. Microbial processing of metal sulfides. Springer, 2007.
25. NASCIMENTO, D.N.O.; PALMIERI, M.C.; CARMO, A.L.V.; NOGUEIRA, E.P.N.; LUCHETA, A.R; FERREIR, R.V.P.; FREREIRA FILHO, H.R.; ALVES, J.O. Biolixiviação de minérios de cobre em reatores com *Acidithiobacillus ferrooxidans*.Artigo aceito para publicação na revista TMMM(ISSN 2176-1523), em 31/12/2017.
26. NAZARI, B.; JORJANI, E. Formation of jarosite and its effect on important ions for *Acidithiobacillus ferrooxidans* oxidation. Transactions of Nonferrous Metals Society of China.v.24, n.4, p.1152-1160, 2014.
27. ZHAO, H.; WANG, J.; QIN,W.; HU, M.; QIU, G.Electrochemical Dissolution of Chalcopyrite Concentrates in Stirred Reactor in the Presence of *Acidithiobacillus ferrooxidans*. International Journal of Electrochemical Science. 2015 ; 10 (2015) : 848-858.
28. WU, Z.; ZENG, W.; ZHOU, H.; FU, B.; HUANG J, QIU G, WANG D. Bioleaching of chalcopyrite by mixed culture of moderately thermophilic microorganisms. J. Cent. South Univ. Technol. v.4, p.474-5, 2007.

COPPER EXTRACTION FROM MARGINAL ORES OF THE CARAJÁS REGION (PARÁ STATE) WITH USE OF BIOLIXIVIATION IN REACTORS

ABSTRACT

Bioleaching consists in the mineral sulfides oxidative solubilization through the bacterial action, such as *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Chalcopyrite is the most refractory copper ore in heap bioleaching, and stirred tank an alternative employed. The aim of this work was to evaluate the extraction of copper from sulfide mineral samples and intemperizadas of the Carajás-PA in agitated reactors inoculated with *A. ferrooxidans*. Mineralogical characterization (DRX) and chemical (FRX) of the samples were carried out. The pH, Eh and copper extraction rate were monitored daily. Copper extraction rates were 1.67% for sulfide mineral sample and 19.54% for the weathered sample, after 47 days. The results indicate that stirred reactor bioleaching is an alternative to heap bioleaching for copper ores from Carajás region, mainly for the weathered ores containing clay.

Keywords: copper, mineral processing, bioleaching, *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

ARTIGO 4

Será submetido à revista da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração-ABM.

BIOLIXIVIAÇÃO EM COLUNAS COM A BACTÉRIA *ACIDITHIOBACILLUS FERROOXIDANS* DO MINÉRIO DE COBRE COM DIFERENTES GRANULOMETRIAS PROVENIENTE DA REGIÃO DE CARAJÁS-PA

Dryelle Nazaré Oliveira do Nascimento¹
Adriano Reis Lucheta²
Maurício César Palmieri³
Andre Luiz Vilaça do Carmo⁴
Patricia Magalhães Pereira Silva⁵
Rafael Vicente de Pádua Ferreira⁶
Hélio Raymundo Ferreira Filho⁷
Joner Oliveira Alves⁸

Resumo

Biolixiviação consiste na solubilização de componentes metálicos insolúveis presente no minério, em formas solúveis em água, por atividade direta ou indireta de micro-organismos, principalmente os oxidantes de ferro e enxofre, como o *Acidithiobacillus ferrooxidans*. As vantagens da biolixiviação relacionam-se à economia de insumos: reagentes químicos, energia elétrica, água e moderado capital investido. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência da biolixiviação em colunas, por *A. ferrooxidans*, de um sulfeto mineral, proveniente da região de Carajás (PA), cominuído em diferentes granulometrias (2 e 4,75 mm). A caracterização mineralógica e química foi realizada por Difractometria de Raios-X (DRX) e Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (FRX), respectivamente. Foram coletadas amostras diariamente para determinação do pH, potencial redox (Eh) e cobre extraído (FRX). A densidade populacional e viabilidade da bactéria foram monitoradas. A colonização das bactérias foi verificada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Obtiveram-se taxas de 1,07% e 0,95% para as granulometrias de 2,5 e 4,75, respectivamente, após 54 dias, porém com tendência crescente. Tais resultados indicam que a menor granulometria do minério favoreceu a extração, apesar da refração da calcopirita à biolixiviação. Mesmo pequena em escala laboratorial, esta diferença pode ser significativa economicamente em pilhas em processos industriais.

¹Eng. Ambiental e de Energias Renováveis, Mestranda em Ciências Ambientais na UEPA, Bolsista no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias, Belém, PA - Brasil.

²Eng. Agrônomo, Doutor em Ciências, Pesquisador no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias, Belém, PA - Brasil.

³Químico, Doutor em Biotecnologia, Diretor de Processos Biotecnológicos na Itatjuca Biotech, São Paulo, SP - Brasil.

⁴Químico Industrial, Mestre em Geologia e Geoquímica, Assistente de Pesquisa no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias, Belém, PA - Brasil.

⁵Lic. em Química, Doutora em Geoquímica e Petrologia, Assistente de Pesquisa no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias, Belém, PA - Brasil.

⁶Biomédico, Doutor em Tecnologia Nuclear, Diretor Executivo na Itatjuca Biotech, São Paulo, SP - Brasil.

⁷Eng. Elétrico, Doutor em Ciências de Gestão, Professor na Universidade do Estado do Pará, Belém, PA - Brasil.

⁸Físico, Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Diretor no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias, Belém, PA - Brasil

Palavras-chave: *Acidithiobacillus ferrooxidans*; Biolixiviação em pilhas; Calcopirita

Column bioleaching with the bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* of copper ore with different granulometry from Carajás-PA

Abstract

Bioleaching consists in the solubilization of an insoluble metal present in the ore to a water-soluble form, by the direct or indirect microorganisms action, mostly iron and sulfur oxidizing bacteria, for example: *Acidithiobacillus ferrooxidans*. The main commercial bioleaching advantages are: chemicals, electricity and water economy and lower capital inputs. The goal of this work was to evaluate the column bioleaching, using *A. ferrooxidans*, of a sulfide mineral from Carajás (PA) region, crushed into different particle sizes (2 and 4.75 mm). Mineralogical and chemical sample characterization were done by X-ray Diffraction (XRD) and Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF), respectively. Leaching solution samples were collected daily for pH, redox potential (Eh) and copper extraction quantification (EDXRF). *A. ferrooxidans* population density and viability was monitored. Bacterial colonization over the ore surface was checked by Scanning Electron Microscopy (SEM). Copper extraction obtained rates were 1.07% and 0.95% in the columns filled with the 2.5 and 4.75 ore particles, respectively, after 54 days bioleaching, but still showing a growth trend. The results indicated that the lower granulometry favored the copper extraction, despite the chalcopyrite recalcitrance to bioleaching. Despite the small differences, when considering a commercial bioleaching heap scale, it may be very economically significant.

Keywords: *Acidithiobacillus ferrooxidans*; Heap Bioleaching; Chalcopyrite

1 INTRODUÇÃO

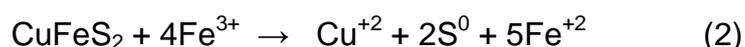
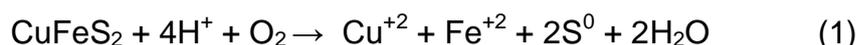
A biolixiviação de minérios consiste na solubilização oxidativa de sulfetos minerais mediante a ação de micro-organismos [1, 2]. Entre as suas vantagens estão a economia de insumos, uma vez que os principais agentes responsáveis pela lixiviação (Fe^{3+} e H^+) são produzidos pelos micro-organismos a partir da oxidação do próprio minério; o baixo requerimento de energia quando comparado aos processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos (consomem anualmente $6,13 \times 10^8$ GJ de energia), além do baixo custo de investimento dada a simplicidade das operações [3, 4].

A calcopirita (CuFeS_2) é o sulfeto de cobre primário mais abundante na crosta terrestre, correspondendo a 70% das reservas globais de cobre, sendo também o mais estudado em ensaios de biolixiviação [5]. O processo de biolixiviação em pilhas é utilizado em escala industrial para a extração de cobre, principalmente da calcopirita, em países como: Chile, Peru, Austrália e Estados Unidos [6,7]. A extração de cobre em pilhas de lixiviação já é responsável por 7% dos 17 milhões de toneladas de cobre produzidas mundialmente [7], sendo o Chile o maior produtor de cobre via biolixiviação.

Neste tipo de extração, o minério é grosseiramente fracionado, disposto em pilhas de 6 a 8 metros de altura sobre uma superfície impermeável e constantemente

irrigado com uma solução ácida ($\text{pH} < 2.0$) contendo o inóculo bacteriano [8,9]. Esta solução é constantemente recirculada através da pilha, sendo enriquecida em íons Fe^{3+} e H^+ derivados do processo de oxidação do sulfeto metálico pelas bactérias oxidantes de ferro e enxofre, resultando na oxidação do Cu^+ em Cu^{2+} , solúvel em água [9]. Posteriormente o cobre metálico é recuperado através de métodos eletroquímicos e a solução reciclada pela adição de nutrientes, voltando a ser irrigada no topo da pilha.

As principal espécie de micro-organismo responsável pelo processo de biolixiviação em pilhas é a Proteobacterias: *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Esta bactéria possui formato de bastonete, com tamanho entre 1 a 2 μm de comprimento por 0,5 a 0,6 μm de diâmetro, é mesófila (crescimento entre 20 a 40°C), acidófila (pH 1 - 4) e quimiolitotrófica (utilizam compostos inorgânicos reduzidos como fonte de energia e elétrons e o CO_2 como fonte de carbono) [10]. A espécie *A. ferrooxidans* é bastante versátil, podendo oxidar o íon ferroso na presença de oxigênio molecular ($4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ \rightarrow 4\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$), sulfetos metálicos ($\text{MeS} + \text{O}_2 \rightarrow \text{MeSO}_4$) e formas reduzidas de enxofre, como o enxofre elementar ($2\text{S}^0 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{SO}_4$) [11]. Estes produtos, por sua vez, serão responsáveis pelo ataque da calcopirita, de acordo com as seguintes equações:



Um obstáculo em relação à biolixiviação da calcopirita é a refratariedade deste sulfeto metálico resultante da sua elevada energia e rede cristalina, e também da passivação da superfície do minério, causada pela deposição de precipitados durante a bioextração, como a jarosita [12]. Por este motivo, inúmeros trabalhos buscando alternativas que visem aumentar a eficiência da extração de cobre da calcopirita tem sido desenvolvidos, tendo estes em colunas de biolixiviação como modelo antes da aplicação em pilhas industriais [13, 14, 15, 16, 17, 18]. Nestas estruturas, as partículas sólidas são dispostas em uma coluna que possui, geralmente, forma cilíndrica, sofrendo irrigação na parte superior por uma solução lixiviante contendo os micro-organismos, que percorre o interior da pilha por gravidade e é direcionada à recuperação do metal de interesse [19].

A temperatura é um fator importante na extração de cobre em pilhas de biolixiviação, pois sua determinação e controle estão relacionados aos diversos processos físico-químicos que ocorrem simultaneamente em seu interior e atividade dos micro-organismos [20]. A granulometria e a aeração influenciam na percolação da lixívia no interior da coluna e disponibilidade de oxigênio para as reações existentes entre minério e micro-organismo.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência da biolixiviação em colunas de um minério de cobre extraído da região de Carajás-PA, em diferentes granulometrias, pela ação da bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Coleta e Preparação das Amostras

A amostra de um sulfeto mineral utilizada no experimento de biolixiviação em colunas foi coletada em uma mina de cobre situada na Serra dos Carajás (PA), cominuída e peneirada, resultando nas frações granulométricas de 2mm e 4,75 mm. Foram pulverizadas 100g de cada fração granulométrica em moinho do tipo almofariz (Retsch, RM200) para caracterização mineralógica e química.

2.2 Caracterização Mineralógica e Química

A composição mineralógica da amostra foi determinada por Difractometria de Raios-X (DRX), em equipamento da marca PANalytical, modelo Empyrean, sendo empregado o preparo backloading pelo método do pó. A composição química foi determinada por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (FRX), em equipamento da marca PANalytical, modelo Epsilon 3 XLE, tubos de Raios-X cerâmico de Ródio e nível de potência máxima de 15W.

2.3 Preparo do Inóculo de *Acidithiobacillus ferrooxidans*

A cepa de *Acidithiobacillus ferrooxidans* LR [21] foi inoculada em 0,4 L de meio de cultura T&K [22], em frasco do tipo erlenmeyer, incubado sob agitação de 160 rpm, a 28°C, por 48 horas. O inóculo bacteriano foi adicionado a 3,6L de meio de cultura T&K [22] sem a adição de sulfato de ferro completando 4L de solução lixiviadora para cada coluna.

2.4 Montagem das Colunas

A coluna de biolixiviação é uma representação, em pequena escala, da seção transversal de uma pilha de biolixiviação comercial [19]. A sua montagem foi realizada utilizando dois tubos de acrílico de 0,5m de altura por 0,09m de diâmetro, contendo um suporte para a retenção do minério e aberturas nas extremidades para a entrada e saída da solução ácida e aeração forçada (Figura 1). Cada coluna foi preenchida com 3kg de minério previamente separados nas granulometrias de 2 mm (coluna 1) e 4,75 mm (coluna 2). A solução contendo a bactéria *A. ferrooxidans* foi circulada ininterruptamente através da coluna com o auxílio de bombas peristálticas (vazão 5 mL.min⁻¹) e coletada em um tanque posicionado abaixo da mesma (Figura 1). Aquecedores elétricos foram posicionados dentro dos tanques mantendo a temperatura constante da solução em 30°C, para o favorecimento do desenvolvimento microbiano e do processo de biolixiviação, enquanto as colunas foram posicionadas em área externa ao laboratório expostas à temperatura ambiente (Figura 1B). Ambas colunas foram ventiladas em sua parte superior com ar comprimido (180 L.h⁻¹) gerado por um compressor. Uma mangueira de borracha perfurada foi introduzida entre o minério ao longo da extensão da coluna 1, permitindo a melhor difusão do oxigênio entre as menores partículas e evitando a formação de zonas de anaerobiose. A Figura 1 apresenta o protótipo deste ensaio.

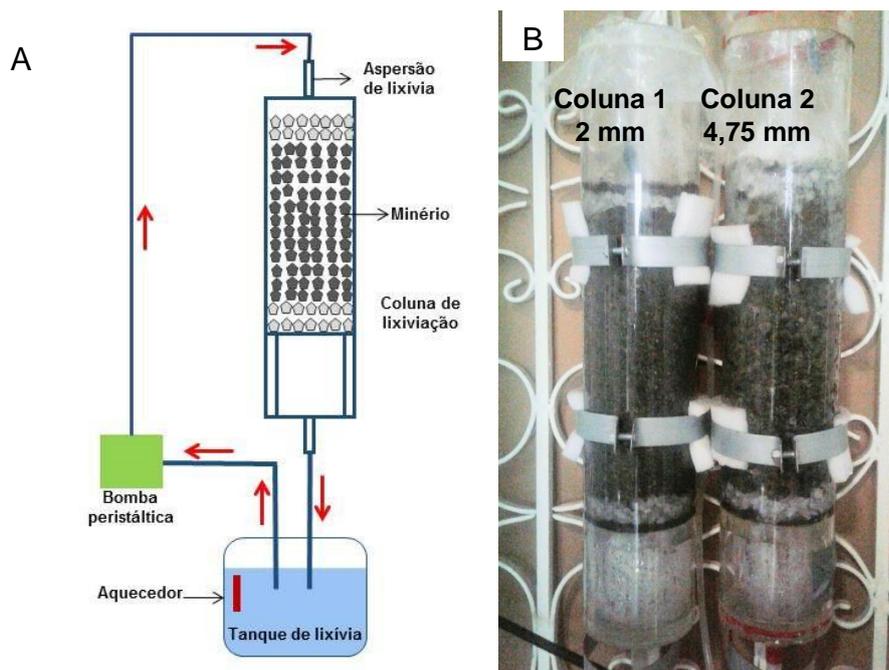


Figura 1.(A) Representação esquemática das colunas de biolixiviação empregadas no ensaio. (B) Colunas de biolixiviação empregadas no ensaio.

Amostras da solução lixiviadora foram coletadas diariamente para determinação do pH em um pHmetro modelo FerMAc 260 (Electrolab, Reino Unido), potencial redox (Eh) em equipamento mod. FerMac 290 (Electrolab, Reino Unido) a quantificação do cobre lixiviado por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (FRX), em equipamento modelo Epsilon 3^{XLE}(PANalytical), sendo construídas curvas de calibração nas concentrações de 2,5 a 2000ppm, utilizando o sulfato de cobre.

2.5 Densidade e Viabilidade das Bactérias *A. ferrooxidans*

A densidade população e a viabilidade das bactérias *A. ferrooxidans* foram acompanhadas ao longo do experimento. A contagem do número de bactérias foi realizada por microscopia óptica utilizando um microscópio modelo DM3000 LED (Leica, Alemanha), com o auxílio de uma câmara de Neubauer aumento de 400x. Para a determinação da viabilidade das bactérias, 20 mL da solução lixiviadora percolada através das colunas foi transferida para erlenmeyer de 500 mL, contendo 180 mL de meio de cultura T&K [22], que foram incubados sob agitação de 150 rpm, a 30°C, por 72 horas, em agitador modelo Innova 42 (New Brunswick Labs, Estados Unidos). Controles positivos e negativos foram preparados adicionando-se 20 mL do inóculo de *A. ferrooxidans* e meio de cultura estéril aos erlenmeyers, respectivamente. A viabilidade das bactérias foi determinada visualmente pela alteração da coloração do meio de cultura da cor esverdeada para a coloração marrom ferrugem, ocasionada pela oxidação microbiana do sulfato de ferro ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).

2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Amostras de minério foram coletadas nas duas colunas e fixadas em solução tampão fosfato ($\text{KH}_2\text{PO}_4/\text{K}_2\text{HPO}_4$) contendo 2,5% de glutaraldeído (Sigma-Aldrich, Estados Unidos). Posteriormente as amostras foram lavadas em solução contendo concentrações crescentes de etanol (50, 60, 70, 80, 90 e 2 x 100%) para

desidratação antes da secagem em câmara de ponto crítico mod. EM CPD300 (Leica, Alemanha) e metalização à vácuo com Au em metalizador modelo Desk V (Denton Vacuum, Estados Unidos). As amostras metalizadas foram visualizadas em microscópio eletrônico de varredura, modelo Vega 3 (Tescan, Estados Unidos) para a visualização da colonização microbiana.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Mineralógica e Química

A Figura 2 apresenta a composição mineralógica da amostra de sulfeto mineral coletada na Serra dos Carajás (PA). Foram identificados, predominantemente, os minerais calcopirita (3,03 e 1,85 Å), quartzo (3,34 e 4,25 Å), magnetita (2,53 e 1,48 Å), clorita (14,7 e 3,5) e magnésiohornblenda ferrosa (3,12 e 8,40 Å).

A composição química da amostra utilizada nas colunas de biolixiviação pode ser vista na Tabela 1. Na amostra da coluna 1 (2,5 mm), os elementos predominantes foram enxofre, ferro, cobre e silício (teores de 35,17%, 26,81%; %, 16,14% e 14,13%, respectivamente), sendo os mesmos também presentes na coluna 2 (4,75 mm), porém em menores proporções (31,05%, 25,16%, 13,88% e 20,33%, respectivamente). Apesar de se tratar da mesma amostra coletada na Serra de Carajás (PA), diferindo apenas na granulometria, certas variações na composição são esperadas em função da heterogeneidade natural do minério.

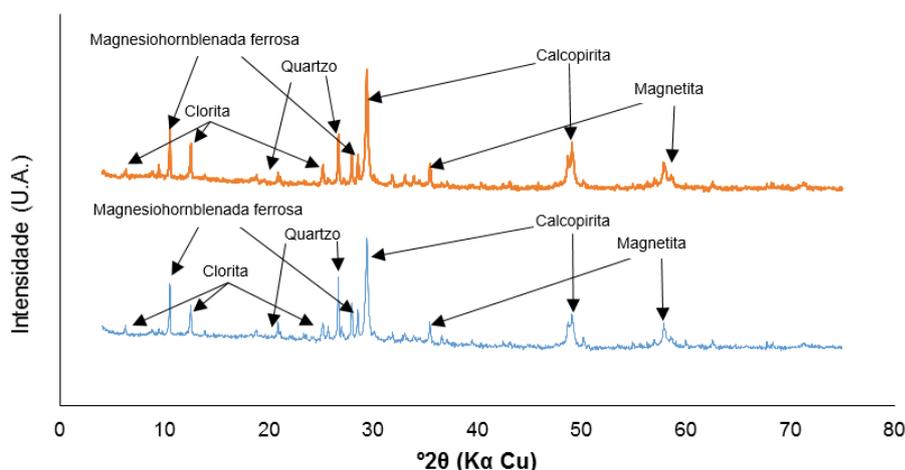


Figura 2. Difratoogramas obtidos por Difração de Raios-X (DRX) da amostra de sulfeto mineral empregada no ensaio de biolixiviação nas colunas 1 (2 mm) e 2 (4,75 mm).

Os elementos enxofre, ferro e cobre estão relacionados à estrutura da calcopirita (CuFeS_2). O silício relaciona-se à estrutura do quartzo (SiO_2), da clorita e da magnésiohornblenda ferrosa ($\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{+2})_4\text{Al}(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}(\text{OH}, \text{F})_2$). A este último mineral também estão associados o ferro, o alumínio (coluna 1: 2,9%; coluna 2: 4,24%), cálcio (coluna 1: 1,97%; coluna 2: 2,08%) e magnésio (coluna 1: 1,85%; coluna 2: 2,15%). O ferro também está relacionado à estrutura da magnetita (Fe_3O_4) e clorita.

Elemento	Concentração (%)	
	Coluna 1	Coluna 2
SiO ₂	14,13	20,33
TiO ₂	0,13	0,18
Al ₂ O ₃	2,90	4,24
Fe ₂ O ₃	26,81	25,16
CaO	1,97	2,08
CuO	16,14	13,88
MgO	1,85	2,25
NiO	0,15	0,14
K ₂ O	0,23	0,28
P ₂ O ₅	0,44	0,33
SO ₃	35,17	31,05
Outros	<0,1	<0,1

Tabela 1. Composição química da amostra de sulfeto mineral empregada nas Colunas 1 (2 mm) e 2 (4,75 mm).

3.2 Contagem viabilidade da bactéria *A. ferrooxidans*

Os resultados do monitoramento da população e do teste de viabilidade indicaram que as bactérias permaneceram ativas durante todo o ensaio nas duas colunas, utilizando o sulfeto metálico como fonte de energia e elétrons (Figura 3). A população de *A. ferrooxidans* na coluna 1 saltou de $1,26 \cdot 10^7$ células.mL⁻¹, no início do experimento, para valores próximos a $5,0 \cdot 10^7$, a partir do 30º dia de ensaio, enquanto que na coluna 2, a variação populacional foi de $1,48 \cdot 10^7$ células.mL⁻¹, no início, para $4,3 \cdot 10^7$, próximo ao 50º dia de ensaio (Figura 4).

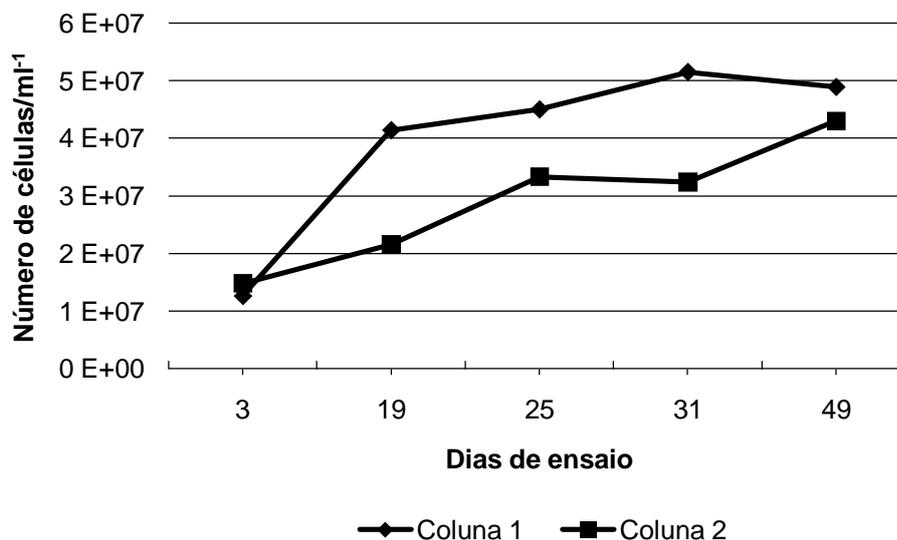


Figura 3. Contagem do número de bactérias realizada durante o ensaio.

A oxidação dos íons ferrosos a férricos, indicada pela mudança de coloração no meio T&K [22], comprovou a atividade das bactérias *A. ferrooxidans* presente nas colunas de biolixiviação 1 e 2 (Figura 4). Bactérias planctônicas são responsáveis pelo processo de “lixiviação sem contato”, sendo responsáveis pela geração dos

substratos Fe^{3+} e H^+ que atacam a calcopirita, solubilizando o cobre para a solução lixiviadora [23].

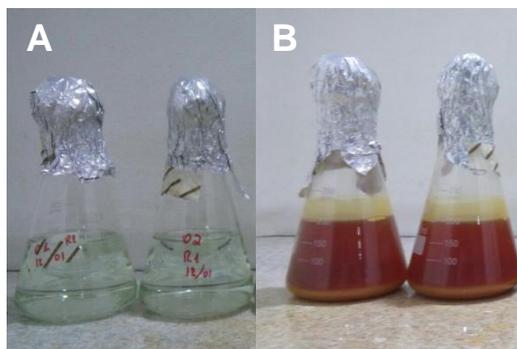


Figura 4. Teste de viabilidade da bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* presente na solução lixiviadora percolada através das colunas. (A) Coloração do meio T&K [22] contendo sulfato de ferro ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) reduzido. (B) Coloração do meio T&K [22] contendo o sulfato de ferro oxidado pelas bactérias, após 72 horas de incubação.

3.3 Imagens obtidas a partir da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 5 apresenta a visualização da ocorrência do processo de biolixiviação e aderência das bactérias na superfície do minério a partir de micrografia obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

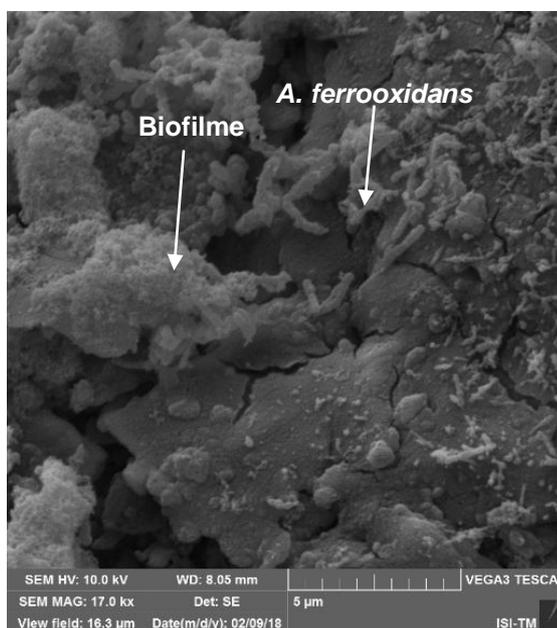


Figura 5. Micrografia obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de partícula mineral coletada no interior da Coluna. Observação de biofilme e células de *A. ferrooxidans* aderidas à superfície do sulfeto mineral.

É possível observar na Figura 5 os micro-organismos aderidos à superfície do sulfeto mineral, com a formação de biofilme formado por substâncias exopoliméricas (EPS), atuando no processo de “lixiviação por contato”.

3.4 Monitoramento do pH e EH

O pH das colunas 1 (Figura 6A) e 2 (Figura 6B) foi mantido de forma praticamente estável entre 1,8 e 2,0 ao longo de todo o experimento, sendo corrigido pela adição de ácido sulfúrico concentrado quando necessário.

O controle rigoroso do pH em ensaios de biolixiviação é de suma importância para evitar a precipitação de sais férricos, como a jarosita ($MFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ - onde $M = K^+, Na^+, NH_4^+, Ag^+$ ou H_3O^+), favorecida em valores de pH acima de 2, causando a passivação do minério e reduzindo a eficiência da extração [24]. Apesar do aumento inicial de pH ocorrido, não foi observada a formação de precipitados nas partículas através do MEV.

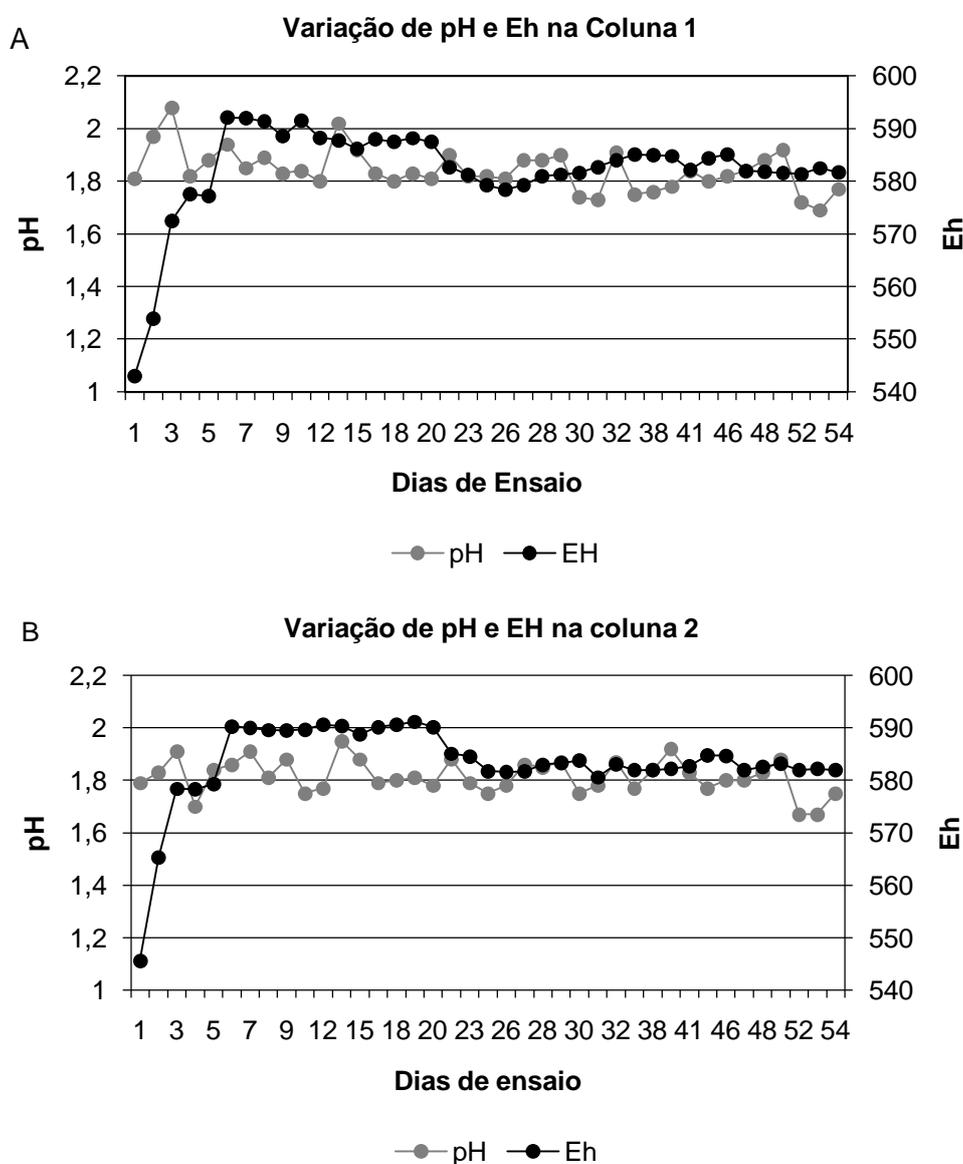


Figura 6. Variação de pH e Eh das Colunas 1 (A) e 2 (B) ao longo dos 54 dias de ensaio.

Acoluna 1 (Figura 6A) apresentou aumento nos valores de Eh, de 543,1mV, no dia inicial, para 592,1mV no 6º dia, mantendo-se com valores próximos a 590

até o vigésimo dia. Após este período, os valores ficaram próximos de 582mV, com pequenas variações entre 580 e 585,1mV até o 54º dia.

De forma semelhante, a coluna 2 (Figura 6B) passou de 545,6mV, no primeiro dia, para 590,3mV no 6º dia, permanecendo com valores de aproximadamente 590mV até o 20º dia. A partir de então, houve leve decréscimo para valores próximos a 582mV, permanecendo assim até o 54º dia de ensaio.

A oxidação do sulfato ferroso contido no meio de cultura em íons férricos por ação das bactérias, foi a principal razão do aumento do potencial redox durante os primeiros dias do experimento [25]. Após o consumo do ferro livre e da formação do biofilme microbiano sobre as partículas de minério, o Eh tendeu a se estabilizar. Os valores posteriores, próximos a 580, foram semelhantes aos obtidos por Mejía et al (2015) [26], que realizou biolixiviação da calcopirita em frascos agitados por 30 dias, empregando *A. ferrooxidans*. Santos e colaboradores (2017) [27] observaram valores de Eh variando entre 300 a 470mV em condições abióticas de oxidação da calcopirita, enquanto que na presença da bactéria *A. ferrooxidans* LR, os valores de Eh observados foram próximos a 600 mV, semelhante aos observados no presente estudo.

3.5 Extração do minério de cobre

Ambas colunas apresentaram valores crescentes de extração de cobre. A coluna 1 obteve melhores resultados, com 1,07% do minério extraído no 47º dia de ensaio (Figura 7A), enquanto que a coluna 2 obteve 0,95% de extração para este mesmo período (Figura 7B). Tal fato pode ser atribuído à maior superfície de contato ao ataque oxidativo e adesão das bactérias em razão da menor granulometria do minério e eficiência do sistema de aeração pela inserção da mangueira perfurada na coluna 1.

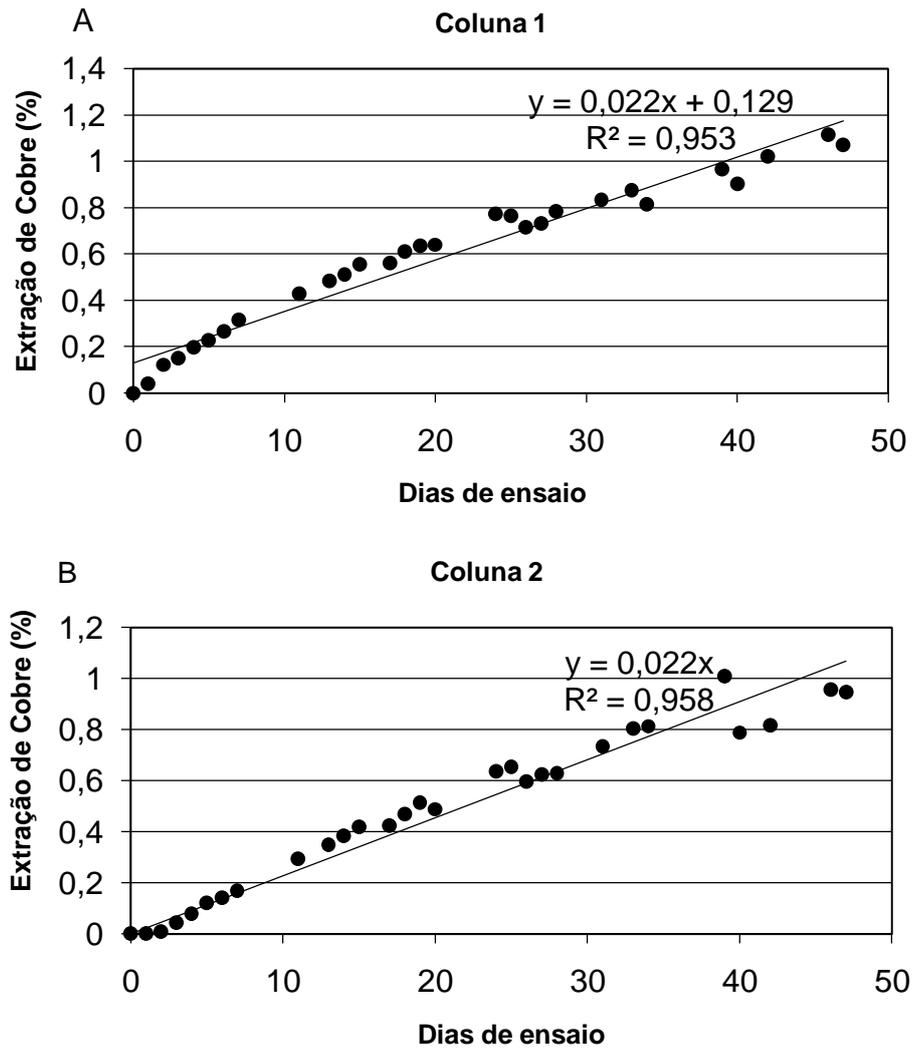


Figura 7. Taxas de extração de cobre (%) nas Colunas 1 (A) e 2 (B).

Em pilhas de biolixiviação, boas condições de aeração favorecem em cerca de 20 a 30% a sua eficiência, visto que o oxigênio funciona como o aceptor de elétrons das reações catalisadas pelos micro-organismos [28]. Outra vantagem da aeração está relacionada à percolação da solução lixiviante.

Ao estudar diferentes taxas de aeração (0 a 150 L/h) em colunas de biolixiviação para sulfeto de cobre com bactérias da espécie *A. ferrooxidans*, Huang et al (2015) encontraram valores de concentração bacteriana, concentração de Fe^{3+} e capacidade oxidativa proporcionais à taxa de aeração, com extração de cobre de 81,2% em minério de baixo teor para valores de aeração superiores a $60L.h^{-1}$ [17].

Tal favorecimento do fluxo da lixívia também foi percebido por Milkzareck et al (2013) [29], que realizaram testes em pilhas de lixiviação a fim de avaliar as interações entre os processos de irrigação e aeração. Os autores notaram correlação existente entre as taxas de drenagem e de injeção de ar, indicando que a localização da injeção de ar influencia na distribuição e direção da solução lixiviante no interior da pilha. Portanto, além do tamanho da partícula, a melhor aeração da coluna 1 possivelmente contribuiu também para a percolação eficiente da lixívia em seu interior.

A granulometria do minério empregado também exerce influência na taxa de extração de cobre. Estudos demonstram que tal valor diminui com o aumento da granulometria da partícula [30, 31, 16, 32].

Em estudo avaliando a biolixiviação em colunas de minérios de cobre de baixo teor, com a bactéria *A. ferrooxidans*, foram determinadas as taxas de extração de cobre para granulometrias de minério de 5-8, 5-15 e 5-20 mm. Apesar das duas primeiras frações apresentarem valores próximos (93,11% e 91,04%, respectivamente), a terceira faixa apresentou redução da extração de cobre (80,04%), indicando o efeito da granulometria sobre a biolixiviação [16].

Para amostras de alto teor de cobre, nas granulometrias de 5-10, 10-15 e 15-20mm, foram obtidas as taxas de 89, 80 e 57%, respectivamente, para testes de biolixiviação em colunas utilizando as espécies *Leptospirillum ferrifillium* e *Acidithiobacillus caldus* e temperatura de 45°C, ao longo de 110 dias de ensaio. Em tais condições, ao serem comparadas uma coluna de biolixiviação e outra de lixiviação ácida de mesma granulometria (10-15 mm), o consumo de ácido sulfúrico foi 33% menor na primeira, confirmando a eficiência no emprego destes micro-organismos [15].

No presente trabalho, procurou-se manter a temperatura da solução lixiviante de ambas as colunas em torno de 30°C, por ser esta a temperatura ideal para a espécie de bactéria empregada [13]. Entretanto, o uso de micro-organismos termófilos ou termófilos extremos (adequados a condições de temperaturas de 40°C a 55°C e 55°C a 80°C, respectivamente) proporciona aumento das taxas de extração de cobre [33, 34]. Rodríguez et al (2003) obtiveram resultados semelhantes, com maior dissolução química do mineral em maiores temperaturas, não sendo observadas barreiras de passivação na calcopirita com o emprego de micro-organismos termófilos [35]. Tais condições poderão ser testadas no futuro com amostras de minérios de cobre da região de Carajás.

4 CONCLUSÃO

A biolixiviação em colunas, pela bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, da amostra do minério de cobre proveniente da Serra dos Carajás (PA), contendo majoritariamente a calcopirita, apresentou-se como uma alternativa para a extração de cobre, de maneira menos impactante para a região. A população de *A. ferrooxidans* se manteve ativa durante o processo de biolixiviação, contribuindo tanto pela formação de biofilme nas partículas de minério, bem como, pela produção de Fe^{3+} e H^+ por células planctônicas, independentes de contato. O menor tamanho de partícula do sulfeto metálico (2 mm) e o sistema de aeração mais eficiente refletiram em maiores taxas de recuperação do cobre na coluna 1, possivelmente pela maior superfície de contato das partículas e uniformidade na oxigenação e percolação da lixívia nesta coluna. O controle do pH e temperatura se mostraram primordiais para evitar a passivação da calcopirita pela formação da jarosita, e potencialização do crescimento das bactérias, respectivamente. Embora na escala laboratorial a diferença observada na biolixiviação em função do tamanho das partículas após 47 dias seja pequena, este valor pode ter representatividade econômica em pilhas de biolixiviação em escala comercial e a longo prazo.

REFERÊNCIAS:

1. Gentina JC, Acevedo F. Application of bioleaching to copper mining in Chile. *Electronic Journal of Biotechnology*. 2013;16(3):1-14.
2. Araújo ECO, Silva IR, Ferreira JS, Cordeiro LS, Coelho, GD. Biomineração: extração sustentável e silenciosa de minério. *Revista Saúde e Ciência*. 2014;3(3): 253-265.
3. Rojas, EAR. Lixiviação férrica, química e bacteriana de sulfetos secundários de cobre. [Dissertação de Mestrado]. UFMG: Belo Horizonte, 2009. Site Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química [página da internet]. UFMG: Belo Horizonte, 2018 [acesso em 17 mar. 2018]. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-94PGZF>
4. Rankin J. Energy use in metal production. Presentation 1. High Temperature Processing Symposium. Swinburne University of Technology. 2012. Disponível em: <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP12183&dsid=DS3>
5. Robertson SW, Van Staden, OJ, Seyedbagheri A. Advances in high-temperature heap leaching of refractory copper copper sulphide ores. *Metallurgy*. 2012;112(12): p.2411-9717.
6. Birley CL, Birley JA. Progress in bioleaching: part B: applications of microbial process by the minerals industries. *Appl. Microbiol Biotechnol*. 2016;97(2016); 7543-7552.
7. Panda S, Akci A, Nilotpala P, Deveci H. Current scenario of chalcopyrite bioleaching: A review on the recent advances to its heap-leach technology. *Bioresource Technology*. 2015; 196 (2015): 694–706.
8. Petersen J, Dixon DG. Principles, mechanisms and dynamics of chalcocite heap bioleaching. In: Donati ER, Sand W. *Microbial processing of metal sulfides*. Springer, 2007.
9. Campodonico MA, Vaisman D, Castro JF, Razmilic V, Mercado F, Andrews BA, Feist AM, Asenjo JA. *Acidithiobacillus ferrooxidans*'s comprehensive model driven analysis of the electron transfer metabolism and synthetic strain design for biomining applications. *Metabolic Engineering Communications*. 2016; 3 (2016); 84–96.

10. Grangeiro L.C. Avaliação do potencial biotecnológico para o tratamento de um minério de ouro de uma mina do estado do Amapá. [Dissertação de Mestrado]. Belém, Universidade Federal do Pará, 2016. Site do Repositório Institucional da UFPA [página a internet]. Belém, Universidade Federal do Pará, 2018. [acesso em 17 mar. 2018]. Disponível em: <http://www.repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/7697>.
11. Suzuki I, Chan CW, Takeuchi TL. Oxidation of elemental sulfur to sulfite by *Thiobacillus thiooxidans* cells. *Applied and Environmental Microbiology*. 1992; 58 (1992): 3767-3769.
12. Silva DR. Efeito da adição de nanopartículas na biolixiviação da calcopirita (CuFeS₂) por *Acidithiobacillus ferrooxidans* LR. [Dissertação de Mestrado] Araraquara, Universidade Estadual Paulista; 2011. Site do Repositório da Universidade Estadual Paulista. [página da internet]. Araraquara, Universidade Estadual Paulista; 2018. [acesso em 17 mar. 2018]. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/87966/silva_dr_me_araiq.pdf?sequence=1.
13. Yang Y, Diao M, Liu K, Quian L, Nguyen, A. V., Qiu, G. Column bioleaching of a low-grade copper ore by *Acidithiobacillus ferrooxidans* in pure and mix cultures with a heterotrophic acidophile *Acidiphilium* s.p. *Hydrometallurgy*. 2013; 131 (2013): 93-98.
14. Shinkawa T, Kamiya T, Kojima K, Chida T. Primary Copper Ore Leaching by Leaching Solution Adjusted Oxidation-Reduction Potential in Column. 2015; 1130 (2015): 375-378.
15. Kai L, Wang Y, Zhang L, Zhu C, Feng M, Zhou H. Effect of particle size on the column bioleaching of Tibet Yulong Copper Ore. *Advanced Materials Research*. 2015; 1130 (2015): 375-378.
16. Wang J, Hu M, Zhao H, Tao L, Gan X, Qin W, Qiu G. Well-controlled column bioleaching of a low-grade copper ore by a novel equipment. 2015; 22 (2015): 3318-3325.
17. Huang M, Wang Y, Yin S, Wu A. Enhanced column bioleaching of copper sulfides by forced aeration. 2015; 1130 (2015): 400-405.
18. Wang Y, Li K, Chen X, Zhou H. Responses of microbial community to pH stress in bioleaching of low grade copper sulfide. 2017; 249(2018): 146-153.
19. Andrade Lima LRP. A mathematical model for isothermal heap and column leaching. 2015; 21 (3): 435-477.
20. Liu W, Granata G. Temperature control in heap bioleaching. *Hydrometallurgy*. 2018; 176 (2018): 26-32.
21. Garcia JR, O. Isolation and purification of *Thiobacillus ferrooxidans* and *Thiobacillus thiooxidans* from some coal and uranium mines of Brazil. *Revista de Microbiologia*. 1991; 22(1): 1-6.
22. Tuovinen OH, Kelly DP. Studies on the growth of *Thiobacillus ferrooxidans* - Use of membrane filters and ferrous iron agar to determine viable number and comparison CO₂ fixation and iron oxidation as measures of growth. *Archives of Microbiology*. 1973; 88: 285-298.
23. Vera M, Pagliani F, Guiliani, Jerrez CA. The Chemolithoautotroph *Acidithiobacillus ferrooxidans* Can Survive under Phosphate-Limiting Conditions by Expressing a C-P Lyase Operon That Allows It To Grow on Phosphonates, *Applied and Environmental Microbiology*. 2008; 74 (6): 1829-1835.
24. Watling HR. The bioleaching of sulfide minerals with emphasis on copper sulfides – A review. 2006; 84 (2006): 81-108.
25. Pereira GSF. Biolixiviação de concentrado de flotação de sulfetos de cobre, em batelada, utilizando microorganismos mesofílicos e termofílicos. In: Jornada de Iniciação Científica, Rio de Janeiro. CETEM/MCT, 2007.
26. Mejía ER, Ospina JD, Osorno L, Márquez MA, Morales AL. Mineralogical characterization of chalcopyrite bioleaching. *Mineralogical Characterization of Chalcopyrite Bioleaching*. 2015.

27. Santos ALS, Arena FA, Benedetti AV, Bevilaqua D. Effect of redox potential on chalcopyrite dissolution imposed by addition of ferrous ions. *Eclética Química Journal*. 2017; 42 (2017): 40-50.
28. Çelik H. Biologically assisted extraction of metals from ores/concentrates, and present commercial application. *The Journal of Ore Dressing*. 2008; 10(19): 11-22.
29. Milczareck M, Yao M, Keller J, Benerjee M. Intermediative scale evaluation of air-solution interactions in heap leaching irrigation and aeration process. 2013; Conference Paper: Heap Leach 2013, At Vancouver BC, Canada.
30. Naderi H, Abollahy M, Mostoufi N, Koleini MJ, Shojaisadati AS, Manafi Z. Kinetics of chemical leaching of chalcopyrite from low grade copper ore: behavior of different size fractions. *International Journal of Minerals and Materials*. 2011; 18 (6): 638-645.
31. Rao KS, Mishra A, Pradham D, Chaydhury GR, Mohapatra BK, Das T, Sukla B, Mishra BK. Percolation bacterial leaching of low-grade chalcopyrite using acidophilic microorganisms. *Korean Journal Chemical Engineering*. 2008; 25 (3): 524-530.
32. Abilash, Metha KD, Pandey BD. Bacterial leaching kinetics for copper dissolution from a low-grade Indian chalcopyrite ore. *Revista Escola de Minas*. 2013; 66 (2): 245-250.
33. Madsen BW, Groves RD. Percolation Leaching of a Chalcopyrite Bearing Ore at Ambient and Elevated Temperatures With Bacteria. United States Department of Interior. 1983.
34. Donati ER, Sand W. *Microbial processing of metal sulfides*. Springer, 2007.
35. Rodríguez Y, Ballestar A, Blázquez ML, Muñoz JA. New information on the chalcopyrite bioleaching mechanism at low and high temperature. *Hydrometallurgy*. 2003; 71 (1-2): 47-56.

CONCLUSÕES GERAIS

Amostras de sulfeto mineral (predominantemente a calcopirita) e minérios intemperizados foram coletados na região de Carajás (PA) e biolixiviados com sucesso em reatores sob agitação, contendo a bactéria *A. ferrooxidans*. No Artigo 1, que tratou da biolixiviação de minério de alto teor em reatores agitados, a amostra de sulfeto mineral apresentou maior recalcitrância à biolixiviação, com taxa de extração de 0,74%, crescente até o 100º dia de ensaio. Quanto à amostra Intemperizada, esta apresentou 18,35% de extração de cobre em 60 dias.

Foram realizadas alterações em algumas condições do ensaio anterior, tais como a porcentagem de polpa e controle de temperatura, a fim de maximizar os resultados para biolixiviação em reatores (Artigo 2). Foram alcançados 1,67% de extração de cobre em amostra de sulfeto mineral em 48 dias de ensaio, e 19,54% para amostra Intemperizada. Entretanto, neste último caso é necessário avaliar a interferência da solubilização ácida no processo.

Por fim, avaliou-se a biolixiviação de sulfeto mineral em colunas de biolixiviação (Artigo 3), a diferentes condições de granulometria e aeração. A coluna 1, de granulometria 2mm, obteve taxa levemente superior de extração de cobre em relação à coluna 2, de 4,75m (valores de 1,07% e 0,95%, respectivamente). Este resultado deve-se, possivelmente, às melhores condições de irrigação da solução lixiviante ao longo da pilha, promovidas pela melhor aeração e menor granulometria empregados na coluna.

Nos dois últimos ensaios realizados, foram monitoradas a viabilidade e contagem dos micro-organismos empregados, indicando que eles estavam ativos durante todo o período analisado. Foi também observada, por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a formação de biofilmes na superfície do minério que, aliados às bactérias planctônicas, atuaram na biolixiviação.

A partir dos resultados obtidos, considera-se esta técnica adequada principalmente para minérios intemperizados contendo teores de argila e inutilizáveis para os processos pirometalúrgicos e pela própria biolixiviação em pilhas. Maiores taxas de solubilização do cobre, a partir da calcopirita, poderão ser obtidas com o emprego de consórcios de micro-organismos termófilos, que deverão ser testados em futuros experimentos com amostras da região de Carajás.

Os estudos da biolixiviação como alternativa para extração de metais apresentam resultados expressivos, bem como eficiência na otimização de insumos. Contudo, uma evolução da técnica é demandada para o emprego em escala industrial no Brasil. A médio prazo, a consolidação da biolixiviação como processo de extração poderá representar, principalmente, uma alternativa para os minérios de baixo teor, estéreis e rejeitos da mineração.

ANEXOS

Normas para publicação no E-Book “Ciências Ambientais na Amazônia: Monitoramento, Manejo e Conservação da Biodiversidade” (Artigo 1):

Os originais devem ser enviados, preferencialmente, no seguinte formato:

1. Os artigos deverão possuir de 10 a 20 laudas; em Word, formato A4; Fonte Times New Roman; tamanho 12; espaço entre linhas 1,5; 3 cm de margem superior e esquerda, 2 cm de margem inferior e direita; normalizados segundo a ABNT.
2. As citações devem seguir a norma da ABNT NBR 10520:2002.
3. As notas de rodapé (se houver devem possuir tamanho 11, Times New Roman, espaçamento simples e serem justificadas.
4. No rodapé deve estar o endereço profissional completo do(s) do(s) autor(es): Nome completo do(s) autor(res); nome e sigla da sua instituição e o vínculo profissional (enquadramento funcional e departamento ou setor a que pertence); deve ser acrescentado, também, o endereço eletrônico (e-mail).
5. As citações diretas de 4 ou mais linhas devem vir em tamanho 11, espaço simples, justificado, com recuo à esquerda de 4 cm.
6. Não é necessária a formulação de resumo.
7. Agradecimentos devem vir na primeira página antes da introdução;
8. Qualquer que seja a ilustração (Figura, Tabela ou Quadro), sua identificação aparece na parte superior. Na parte inferior é obrigatório identificar a fonte consultada, mesmo que seja dos autores.
9. Tabelas e quadros devem ser digitados em Word, sequencialmente numerados, com legendas claras.
10. As figuras podem ser coloridas ou em preto e branco; devem ser apresentados em páginas separadas do texto e numeradas, com as respectivas legendas. Imagens devem ter resolução mínima de 300 dpi, em formato JPEG ou TIFF. As informações de texto presentes nas figuras devem estar com tamanho entre 8 e 10 pts; se as imagens forem extraídas diretamente de uma câmara digital, podem vir no tamanho e resolução originais da câmara;
11. Seções e subseções no texto não devem ser numerados.
12. Apenas termos científicos latinizados e palavras em língua estrangeira devem constar em itálico.
13. Caso as imagens não possam ser enviadas em alta resolução por e-mail, deverão ser entregues na coordenação da PPGCA em CD ou pen-drive.
14. As referências bibliográficas deverão ser colocadas no final do texto, dispostas em ordem alfabética, por autor. As referências devem seguir a norma da ABNT NBR 6023:2002.

Nota: Todos os artigos recebidos passarão por avaliação de um comitê de especialistas da área, a fim de identificar aderência ao tema do livro, cumprimento das normas descritas e mérito científico do trabalho.

Normas para publicação na revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração (Artigo 2):

INSTRUÇÕES AOS AUTORES

Escopo

A revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração (TMM) é voltada para a comunicação científico-tecnológica e tem como principal objetivo estimular a difusão das inovações e melhorias tecnológicas nos processos, nos produtos e nas práticas de gestão nos setores de minerometalúrgico e de materiais. Publicada trimestralmente pela Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração – ABM, aceita manuscritos para publicação nos idiomas português, inglês e espanhol, nas seguintes categorias: artigos originais, artigos de revisão e comunicações breves (short communications); possui edição online, disponível no site <http://tecnologiammm.com.br>. Nenhuma das etapas do processo de submissão e publicação envolve custos para os autores. Tipos de contribuições - Artigos Originais: divulgação de trabalhos inéditos de pesquisa, não devendo exceder 10 páginas; - Artigos de revisão (reviews): tem como objetivo avaliar textos já existentes, devendo o autor fornecer sua opinião a respeito de recentes avanços e futuras perspectivas sobre determinado tema. Não deve exceder a 12 páginas. A submissão de artigos de revisão é possível mediante convite dos Editores;- Comunicações breves (short communications) – relato sucinto dos resultados preliminares de uma pesquisa, não devendo exceder quatro páginas.

Política Editorial

O conteúdo dos artigos é de total e exclusiva responsabilidade dos autores. A autoria deve ser limitada àqueles que participaram e contribuíram substancialmente para o desenvolvimento do trabalho. A versão do artigo para outro idioma diferente do publicado na revista poderá ser feita desde que autorizada pela ABM; os créditos devem ser fornecidos.

Direitos Autorais

A submissão de manuscrito para a TMM implica confirmação de que o trabalho é original, não publicado anteriormente e não submetido para avaliação em outra revista. O autor concorda, também, na transferência dos direitos autorais para a Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração quando da aprovação do artigo para publicação. Todos os artigos são publicados sob a licença de uso CC BY-NC-ND (Creative Commons).

Conflito de Interesses

Os autores devem relatar qualquer conflito de interesse, que possa influenciar de forma inadequada nos resultados finais, incluindo os de ordem financeira, pessoal, ou relações com pessoas ou organizações, ocorridos nos três anos anteriores ao início do trabalho submetido. A revista segue os códigos de ética do Committee on Publication Ethics – COPE, em todas as etapas do processo de avaliação dos artigos. As informações estão publicadas no site da revista: <http://tecnologiammm.com.br/site/ethics>.

Avaliação dos Artigos

O Editor-Chefe ou um dos Editores Executivos de Área define o Editor Adjunto que será responsável pelo artigo. Este editor indica dois revisores ad hoc que devem avaliar o artigo segundo: escopo, relevância do tema, originalidade, forma de apresentação dos resultados, objetivos, conclusões etc. Todo o sistema é automatizado e sigiloso – os autores não têm conhecimento dos revisores responsáveis pela avaliação e vice-versa (sistema double-blind). Os autores devem indicar dois possíveis revisores para seu trabalho, que podem ser usados a critério dos Editores. Certifique-se de que os e-mails dos revisores indicados estejam corretos. Os revisores emitem uma das quatro recomendações possíveis: aceitar sem necessidade de revisão, aceitar com revisão opcional, aceitar com revisão obrigatória ou rejeitar. O Editor avalia as revisões e emite o parecer. Os artigos são novamente avaliados, quando houver necessidade, após correção e resubmissão pelos autores. Se o manuscrito for rejeitado para publicação, os autores serão notificados e poderão recorrer, por e-mail, da decisão. O conteúdo do parecer não é divulgado para outras revistas. Os artigos aprovados serão diagramados e encaminhados aos autores para correção de possíveis erros. Neste estágio, não serão aceitas alterações de conteúdo e/ou linguagem. Não havendo resposta dos autores, a publicação será suspensa.

Submissão Online

A submissão de artigos para a revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração é online, e deve ser feita mediante cadastro no site da revista (<http://tecnologiammm.com.br>) ou diretamente pelo link <http://tmm.submitcentral.com.br>.

Preparação para Submissão

Devem ser enviados dois arquivos em formato Word (.doc), tamanho A4, com margens de 2,5 cm, espaço simples entre linhas e parágrafos. O texto deve estar em coluna única, Arial 12. Os artigos originais devem conter no máximo dez (10) páginas, os artigos de revisão, no máximo 12 e os short communications no máximo quatro (4), sendo que títulos, subtítulos, figuras, tabelas e equações precisam estar separados por uma linha. - O primeiro arquivo deve conter: título, autoria, resumo, palavras-chave, título em inglês, Abstract, Keywords e os dados dos autores no final da página; - O segundo arquivo deve conter: trabalho completo, incluindo as informações do primeiro arquivo, mas sem qualquer identificação dos autores (nomes e dados), os agradecimentos e as referências.

1 Título Deve ser conciso, em negrito, Arial 12, em letras maiúsculas e centralizado.

2 Autores Inserir, abaixo do título à direita, nome completo do autor(es), em ordem direta, em itálico, Arial 10. Utilizar números arábicos sobrescritos, em ordem crescente. Esses números identificarão as informações referentes aos autores. No final da página, identificar os autores segundo numeração adotada no início da página, em itálico, Arial 10. Indicar afiliação (departamento/laboratório e instituição de trabalho/estudo), cidade, país e e-mail.

3 Resumo e palavras-chave / Título em inglês, Abstract e Keywords

Abaixo da palavra Resumo (negrito e Arial 12) inserir o texto com no máximo 15 linhas, sem uso de parágrafos. Deve conter, de maneira concisa, o objetivo, a metodologia, os resultados e as conclusões do trabalho. Palavra-chave: indicar no

máximo quatro termos – usualmente empregados em pesquisas bibliográficas, separados por ponto e vírgula (;) e iniciados em letra maiúscula. Título em inglês: após as palavras-chave, separados por uma linha, em negrito, Arial 12, em letras maiúsculas e centralizadas. Abaixo da palavra Abstracts (negrito, Arial 12) inserir a versão do resumo para o idioma inglês, sem uso de parágrafo. Keywords: palavras-chave em inglês, separadas por ponto e vírgula (;) e iniciadas com letra maiúscula. Recomenda-se que sejam evitadas as traduções literais.

4 Corpo do trabalho

O trabalho deve ser enviado no segundo arquivo e ter a seguinte estrutura: Conteúdo do primeiro arquivo (sem nomes e dados dos autores), Introdução, Metodologia, Resultados, Discussão e Conclusão. Numerar títulos e subtítulos, de forma sequencial, utilizando o sistema de numeração progressiva (1, 1.1, 1.1.1): □ títulos do nível 1 – em negrito, com todas as letras maiúsculas; □ nível 2 (1.1)– em negrito, com apenas as iniciais maiúsculas (artigos e preposições em minúsculo); □ nível 3 (1.1.1) – em negrito, com apenas a primeira letra do subtítulo maiúscula. O Sistema Internacional de Unidades (SI) deve ser adotado no texto.

A Introdução deve conter a apresentação do trabalho, os objetivos e a revisão da literatura.

Em Materiais e Métodos, descrever detalhadamente os equipamentos e os procedimentos utilizados, permitindo que a pesquisa possa ser reproduzida posteriormente por outros pesquisadores. Apresentar a literatura e a descrição dos métodos estatísticos empregados, quando for o caso.

Em Resultados, apresentá-los incluindo tabelas, quadros e ilustrações. Não repetir informações já apresentadas no texto.

Tabelas e Figuras:

- numerar em algarismos arábicos, na ordem em que aparecem no texto;
- titular de forma clara e concisa, em Arial 10;
- citar no corpo do texto, próximo ao local onde aparecem.

Tabelas:

- formatar conteúdo em Arial 11;
- inserir os títulos na parte superior destas, em seguida à palavra Tabela, e seu respectivo número (número arábico, Arial 10);
- posicionar as notas ou legendas logo abaixo da Tabela, em itálico e Arial 9. Colocar as notas uma seguida da outra, separadas por ponto e vírgula (;).

Figuras (desenhos, esquemas, fluxogramas, fotografias, gráficos etc.):

Inserir os títulos na parte inferior destas, após a palavra Figura, e sua respectiva numeração (número arábico, Arial 10); Referenciar as fontes sempre que necessário; dispor em formato que possibilite a visualização em preto e branco, para a edição impressa do periódico.

As Equações devem ser numeradas sequencialmente, com números entre parênteses alinhados à direita, e citadas no texto. É necessária a utilização dos recursos para edição de equações.

A Discussão é a parte principal do trabalho e deve estabelecer comparações entre os resultados obtidos pelo autor e por outros autores.

Na Conclusão, não mencionar trabalhos não finalizados. Podem ser apresentadas novas hipóteses, quando bem justificadas e incluídas as recomendações, porém, estas precisam ser claras e fundamentadas nos objetos dos estudos realizados.

5 Agradecimentos

Indicar, se de interesse, pessoas que colaboraram na execução da pesquisa ou que proporcionaram auxílio técnico. Quando houver Auxílios ou Bolsas provenientes de órgãos de fomento, os autores deverão fazer referência ao nome da instituição financiadora da pesquisa, ao ano e ao número do processo a que se refere o apoio.

6 Referências Devem ser listadas, ao final do artigo, na ordem em que aparecem no texto. Utilizar o estilo Vancouver para indicação das referências, não usar grifo, negrito ou itálico. Certifique-se de que todas as referências citadas no texto estejam listadas e vice-versa. As citações no texto devem ser indicadas por números arábicos, entre colchetes e na linha do texto. Ex.: “Oliveira [5] demonstra que...”

Exemplos de diferentes formatos de referências:

Artigos Autor(es). Título do artigo. Título do periódico. Ano; volume(número): página inicial e final do artigo.

- Até seis autores (liste todos)

McCarthy F, Sahajwala V, Saha-Chaudhury N. Influence of ash on interfacial reactions between coke and liquid iron. Metallurgical and Materials Transactions. 2003;34:573-580.

- Com mais de seis autores (liste os seis primeiros seguidos de et al.)

Oliveira CAN, Villa AAO, Gonzalez CH, Guimarães PB, Ferreira RJ, Urtiga Filho, SL et al. Analysis of the transformations temperatures of helicoidal Ti-Ni actuators using computational numerical methods. Materials Research. 2013;16:944-953.

Artigos em meio eletrônico

Autor(es). Título do artigo. Título do periódico abreviado. Ano [data de acesso com a expressão “acesso em”];volume(número):paginação. Disponível em: URL.

McCarthy F, Sahajwala v, Saha-Chaudhury N. Influence of ash on interfacial reactions between coke and liquid iron. Metall. Mater. Trans. 2003 [acesso em 26 ago 2012];34:573-580. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007%2F11663-003-0026-9#page-1>

Livros

- Até seis autores, liste todos; e com mais de seis, liste os seis primeiros seguidos de et al. Autor(es).

Título do livro. edição (a partir da 2ª). Cidade: Editora; ano de publicação. Ashby M, Shercliff H, Cebon D. Materials, engineering, science, processing and design. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2010.

- Ausência de autoria

Título do livro. Edição. Cidade de publicação: Editora; Ano de publicação. The Oxford dictionary of Computing. 5th ed. Oxford: Oxford University Press; 2003.

Capítulos de livros

- Autor do capítulo é o mesmo da obra:

Autor(es) do livro. Título do livro. Edição (a partir da 2ª). Cidade: Editora; ano de publicação. Título do capítulo; página inicial e final do capítulo. Ashby M, Shercliff H, Cebon D. Materials engineering, science, processing and design. 2. ed. Oxford: Elsevier; 2010. Stiffness and weight: density and elastic moduli; p. 47-79.

- Autoria diferente:

Autor(es) do capítulo. Título do capítulo. In: autor ou editor do livro. Título do livro. Edição (a partir da 2ª). Cidade: Editora; ano de publicação. página inicial e final do capítulo. Canale LCF, Totten GE. Hardening of Steels. In: Lišč-č B, Tensi HM, Canale LCF. Quenching theory and technology. 2. ed. Boca Raton: CRC; 2010. p. 85-113.

Livros em meio eletrônico

Autor(es). Título do livro. edição (a partir da 2ª). Cidade: Editora; ano de publicação [data de acesso com a expressão "acesso em"]. Disponível em: link. United States Environmental Protection Agency. Climate change indicators in the United States. Washington: EPA; 2012 [acesso em 3 ago. 2012]. Disponível em: <http://www.epa.gov/climatechange/science/indicators/index.html>

Sites

Autor(es) (se houver). Título do site [página da internet]. Cidade: Editora; data da publicação do site [data da última atualização com a expressão "atualizada em"; data de acesso com a expressão "acesso em"]. Endereço do site com a expressão "Disponível em:" Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração [página da internet]. São Paulo: ABM; 2011 [atualizada em 2 dez. 2013; acesso em 17 dez. 2013]. Disponível em: <http://www.abmbrasil.com.br>.

CD-ROM e DVD

Autor(es). Título [tipo do material]. Cidade de publicação: Editora; ano. Anderson SC, Poulsen KB. Anderson's eletronic atlas of hematology [CD-ROM]. Philadelphia: Lippincott Williams & Willins; 2002.

Trabalhos apresentados em eventos

Autor(es). Título do trabalho. In: Editora ou Instituição responsável pelo evento. "Proceedings" ou "Anais do" título do evento; data do evento; cidade, país de realização do evento. Cidade de publicação: Editoria; ano de edição. Página inicial e final do trabalho.

Morton J, Burzic D, Wimmer F. Application of dynagap soft reduction to high quality blooms and billets. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Proceedings of the 44th Steelmaking Seminar – International; 2013 May 26-29; Araxá, Brazil. São Paulo: ABM; 2013. p. 182189.

Dissertações, teses ou trabalhos acadêmicos

Autor. Título da tese [grau]. Cidade de publicação: Instituição onde foi defendida; ano de defesa do trabalho. Oliveira E. Ethanol flushing of gasoline residuals: microscale and field scale experiments [doctor thesis]. Waterloo: University of Waterloo; 1997.

Patente

Nome do inventor. Nome do cessionário e indicação(ões). Título da invenção. País e número do depósito. Data (do período de registros). Pagedas AC, inventor; Ancel Surgical R&D Inc., cessionário. Flexible endoscopic grasping and cutting device and positioning tool assembly. United States patent US 20020103498. 2002 Aug 1.

Normas para publicação no 23º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (Artigo 3):

TÍTULO

(Formatação do título: todas maiúsculas - exceto em fórmulas, unidades, e outras - com fonte Arial 12; em negrito e centralizado. NÃO utilizar formatação "caixa alta")
(3 linhas simples)

Nome(s) do(s) autor(es) (M. N. da Silva)

Nome do local de trabalho (de todos os autores)

Endereço postal completo e e-mail (somente do autor para correspondência)
(4 linhas simples)

RESUMO

O resumo do trabalho deverá conter no máximo 150 palavras, dispostas em um único parágrafo, escrito com caracteres em itálico.

Palavras-chave: materiais, congresso, instruções (no mínimo 3 e no máximo 5).

INTRODUÇÃO

O trabalho deverá ser escrito no editor de texto WORD, sem o uso de macros (arquivos com macros serão automaticamente devolvidos ao autor). Os arquivos devem ocupar um máximo de 3 Mb e devem ser verificados quanto à presença de vírus. O tamanho de página deve ser A4, com margens de 2,5 cm e parágrafo de 1,0 cm. A fonte deve ser Arial de tamanho 12 e espaçamento entre linhas de 1,5. O texto não deve conter cabeçalho ou rodapé. O trabalho deverá ter no máximo 12 (doze) páginas e poderá ser escrito em português, espanhol ou inglês. Trabalhos em português (espanhol) terão resumos em português (espanhol) e em inglês. Trabalhos em inglês poderão ter resumos somente em inglês.

O conteúdo do trabalho deverá ter a seguinte disposição: TÍTULO / RESUMO / Palavras-chaves / (texto principal dividido em seções, como por exemplo: INTRODUÇÃO, MATERIAIS E MÉTODOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO, CONCLUSÃO, AGRADECIMENTOS (se aplicável)) / REFERÊNCIAS / TITLE / ABSTRACT / Keywords (em inglês).

Os títulos das seções deverão ser impressos em letra maiúscula, junto à margem esquerda. Os títulos devem ser separados do texto por espaços simples, acima e abaixo. Os subtítulos devem ser iniciados em letras maiúsculas, sublinhados, iniciados a 1,00 cm da margem esquerda e separados do texto apenas por um espaço simples.

As referências deverão ser indicadas seqüencialmente por números entre parênteses e sobrescritos (1), no texto.

EQUAÇÕES, UNIDADES, FIGURAS E TABELAS

Equações

As equações devem ser impressas centradas em relação à página. Se a expressão não couber em uma linha, ela poderá continuar na linha seguinte, desde que na mesma página. A indicação das equações deverá ser feita na ordem em que elas aparecem no texto com letra maiúscula. A letra deverá estar entre parênteses, à margem direita da coluna. Siga o exemplo abaixo:

$$X + y = z \quad (A)$$

No texto, para se referir às expressões, use a letra maiúscula entre parênteses: (A), (B). Devem ser deixados pelo menos um espaço simples acima e abaixo das equações.

Unidades

Deve ser usado o Sistema Internacional de Unidades.

Figuras

As figuras deverão ser ajustadas na página. As legendas deverão ser impressas abaixo das figuras. As figuras devem ser referenciadas no texto e aparecer em local apropriado, deixando pelo menos um espaço simples acima e abaixo de cada uma. Não acumule as figuras no final do texto. As figuras deverão ter boa qualidade, podendo ser coloridas, mas não devem ocupar uma quantidade grande de memória (recomenda-se utilizar o formato *.jpg por ser mais compacto). Lembre-se que o trabalho completo deve ocupar no máximo 3 Mb.

Tabelas

As tabelas deverão ser apresentadas o mais próximo possível da citação no texto, devendo ser deixados um espaço simples acima e abaixo de cada uma. A numeração deve ser em algarismos arábicos. A legenda deve ser colocadas na parte superior da tabela.

REFERÊNCIAS (Sugestões de formatação segundo a ABNT NBR 6023, alguns exemplos)

Livros:

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D.R. Introduction to Ceramics. New York: John Wiley & Sons, 1976.

Artigos de periódicos:

DEKSNYS, T. P.; MENEZES, R.R.; FAGURY-NETO, E.; KIMINAMI, R.H.G.A. Synthesizing Al₂O₃/SiC in a microwave oven: a study of process parameters. Ceram. Int., v. 33, n. 1, p. 67-71, 2007.

Artigos apresentados em eventos:

FERREIRA, L.L.H.C.; BALDO, J.B.; RODRIGUES, J.A.; BERNARDI, L.T.; BRESSIANI, J.C. Refratários do sistema MgO-TiO₂-CaO para aplicação em zona de queima de fornos de cimento. In: 51 CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, Salvador, BA, 2007. Anais... São Paulo, ABC, 2007, p.1-12. Ref. 7-15. Disponível em: http://www.abceram.org.br/51cbc/51cbc_inicial.htm. Acesso em: 12 de dezembro de 2016.

Dissertações e teses:

GHUSSN, L. Síntese e Caracterização de Vidros Niobofosfatos e Ferrofosfatos Utilizados Como Meio para Imobilização de U₃O₈. 2005, 100p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

Capítulos de livros:

RÜHLE, M.; CLAUSSEN, N.; HEUER, A.H. Microstructural studies of Y₂O₃-containing tetragonal polycrystals (Y-TZP). In: CLAUSSEN, N.; RÜHLE, M.; HEUER, A.H. (Eds.) Advances in Ceramics v. 12: Science and Technology of Zirconia II.

Columbus, OH, The American Ceramic Society, 1984, p.352-370.
(3 linhas simples)

TÍTULO EM INGLÊS

ABSTRACT

This instruction for authors presents the final format for submitting technical papers and technical notes to the Editorial Board for publication in the Proceedings. The papers will be published in DVD form by reproduction of the approved manuscript. These instructions should be carefully followed for the final approval of the manuscript.

(3 linhas simples)

Keywords: (3 minimum - 5 maximum)

Normas para publicação da Associação Brasileira de Metalurgia Materiais e Mineração-ABM (Artigo 4):

NORMAS PARA ENVIO DE TRABALHOS

Quanto aos trabalhos de contribuições técnicas (oral ou pôster): 1. Devem obedecer ao Template padrão (modelo de trabalho formatado) indicado após escolha do Tema, assim como atender às normas para envio de trabalhos; 2. O download do Template (.doc) e as submissões serão feitas através do site do evento, enquanto durar a fase de chamada de trabalhos; 3. Siga atentamente a formatação do Template, substituindo as instruções de cada seção (título, autores, resumo, introdução...) pelo conteúdo de seu trabalho. 4. Ao submeter o trabalho, o autor deve selecionar a Área de Conhecimento e depois o Tema para o qual deseja enviar sua contribuição.

ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho deve estar em uma coluna única, usando-se espaço simples entre linhas, fonte Arial 12, em no máximo doze (12) páginas. Na primeira página devem constar: título, autores e suas afiliações, resumo, palavras-chave, título em inglês, abstract e keywords. Fornecer os nomes completos (sem abreviaturas). A partir da segunda página, inserir o corpo do trabalho, os agradecimentos e as referências.

1 Título

Deve ser conciso com até 150 caracteres, em negrito, fonte Arial 16, caixa alta e centralizado.

1 Autores

Inserir, abaixo do título à direita, nome completo do(s) autor(es), em itálico, Arial 10. Utilizar números arábicos sobrescritos após os nomes, em ordem crescente. Esses números identificarão as informações referentes aos autores. No final da página, inserir informações do(s) autor(es), em itálico, Arial 10. Indicar formação (graduação e titulação), cargo/função, afiliação (instituição de trabalho e/ou estudo), cidade e país.

2 Resumo e Palavras-chave

Texto do Resumo com no máximo 1.500 caracteres (200 palavras), sem uso de parágrafos. Deve conter, de maneira concisa, o objetivo, metodologia e resultados alcançados ou esperados do trabalho. Palavras-chave: no máximo quatro termos – usualmente empregados em pesquisas bibliográficas, separados por ponto e vírgula (;) e iniciados em letra maiúscula.

4 Título em Inglês, Abstract e Keywords Versão traduzida para o inglês do título, do resumo e das palavras-chave. Recomenda-se que sejam evitadas as traduções literais.

3 Corpo do Trabalho

Deve conter a seguinte estrutura: introdução, materiais e métodos, resultados, discussão e conclusão. Numerar títulos e subtítulos, de forma sequencial, utilizando

o sistema de numeração progressiva (1, 1.1, 1.1.1). O Sistema Internacional de Unidades (SI) deve ser adotado no texto.

A Introdução inclui uma breve apresentação do trabalho, contendo os objetivos e a revisão da literatura. Os Materiais e Métodos devem descrever sucintamente os equipamentos e os procedimentos utilizados, assim como a literatura e os métodos estatísticos empregados, quando for o caso. Os principais Resultados devem ser apresentados incluindo Tabelas e Figuras, quando necessárias. Não repetir informações já apresentadas no texto. A Discussão é a parte principal do trabalho e deve estabelecer comparações entre os resultados mais relevantes obtidos pelo autor e por outros autores. Na Conclusão, indicar as principais. As Tabelas e Figuras (desenhos, esquemas, fluxogramas, fotografias, gráficos etc.) devem ser numeradas sequencialmente, em algarismos arábicos, e intituladas de forma clara e curta. Indicar todas as fontes, se necessário. Titular, em Arial 10, as Tabelas na parte superior destas e as Figuras na parte inferior. As Equações devem ser numeradas sequencialmente, com números entre parênteses alinhados à direita, e citadas no texto. É necessária a utilização dos recursos para edição de equações.

6 Agradecimentos

Quando houver Auxílios ou Bolsas provenientes de órgãos de fomento, os autores deverão fazer referência ao nome da instituição financiadora da pesquisa, ao ano e ao número do processo a que se refere o apoio. É opcional para os demais casos.

7 Referências

Devem ser listadas, ao final do artigo, na ordem em que aparecem no texto. Utilizar o estilo Vancouver para indicação das referências, não usar grifo, negrito ou itálico. Certifique-se de que todas as referências citadas no texto estejam listadas e vice-versa. As citações no texto devem ser indicadas por números arábicos, entre colchetes e na linha do texto. Ex.: “Oliveira [5] demonstra que...” Não usar sistemas automatizados de inserção de referências.

Exemplos de diferentes formatos de referências

Artigo:

- Com até seis autores (liste todos)

Farina PFS, Farina AB, Goldenstein H. Tratamento criogênico e de alívio de tensões em um aço AISI D2. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. 2012;9(2):140-147.

- Com mais de seis autores (liste os seis primeiros seguidos de et al.)

Oliveira CAN, Villa AAO, Gonzalez CH, Guimarães PB, Ferreira RJ, Urtiga Filho SL, et al . Analysis of the transformations temperatures of helicoidal Ti-Ni actuators using computational numerical methods. Materials Research. 2013;16:944-953.

- Em meio eletrônico

Marini OJ. Panorama técnico-científico do setor mineral brasileiro. Parcerias Estratégicas. 2001 [acesso em 26 ago. 2012];11:74-92. Disponível em: http://www.cgee.org.br/arquivos/pe_11.pdf.

Livro:

Leite PR. Logística reversa: meio ambiente e competitividade. São Paulo: Prentice Hall; 2003.

- Ausência de autoria

Michaelis: dicionário prático inglês. São Paulo: Melhoramentos; 2010.

Capítulo de livro:

- Autor do capítulo é o mesmo da obra

Leite PR. Logística reversa: meio ambiente e competitividade. São Paulo: Prentice Hall; 2013. Logística reversa: um interesse crescente; p. 15-30.

- Autoria diferente:

Barbosa, JP. Refino de ouro. In: Trindade RBE, Barbosa Filho O. Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: CETEM/MCT; 2002. p. 157-177.

- Em meio eletrônico United States Environmental Protection Agency. Climate change indicators in the United States. Washington: EPA; 2012 [acesso em 3 ago. 2012]. Disponível em:

<http://www.epa.gov/climatechange/science/indicators/index.html>

Trabalho apresentado em evento

Xavier RR, Carvalho MA, Boccacini Junior M, Sinatora A, Souza RM. Desenvolvimento e caracterização de desgaste de cilindros para laminadores de tiras a quente. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 40º Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos; 2003; Vitória, Brazil. São Paulo: ABM; 2003. p. 215-223

Dissertação, tese ou trabalho acadêmico

Oliveira E. Ethanol flushing of gasoline residuals: microscale and field scale experiments [tese de doutorado]. Waterloo: University of Waterloo; 1997. Site Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração [página da internet]. São Paulo: ABM, 2011 [acesso em 17 dez. 2013]. Disponível em: <http://www.abmbrasil.com.br>.

CD-ROM e DVD Anderson SC, Poulsen KB. Anderson's eletronic atlas of hematology [CD-ROM]. Philadelphia: Lippincott Williams & Willins; 2002.

Observações importantes:

- Obedecer ao Template (modelo padrão) de cada evento de acordo com as normas de estrutura do trabalho;
- Não abreviar o título do trabalho e os nomes dos autores;
- Numerar todas as Figuras e Tabelas;
- As Figuras deverão ser salvas e aplicadas em formato JPG ou GIF diretamente nas páginas, não podendo ultrapassar o tamanho destas (A4). Não utilizar caixas de texto ou tabelas para inserir figuras.



Universidade do Estado do Pará

Centro de Ciências Naturais e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais – Mestrado

Tv. Enéas Pinheiro, 2626, Marco, Belém-PA, CEP: 66095-100