

# LIXIVIAÇÃO BACTERIANA DE SUCATA ELETRÔNICA: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO

Luciana Harue Yamane <sup>1</sup>  
Denise Croce Romano Espinosa <sup>2</sup>  
Jorge Alberto Soares Tenório <sup>3</sup>

## Resumo

A aplicação de lixiviação bacteriana no tratamento de minérios já é conhecida e pode também ser aplicada no tratamento de resíduos eletrônicos para a recuperação de cobre. Este trabalho investiga a influência dos parâmetros de processo (densidade de polpa, volume de inóculo, velocidade de rotação e concentração inicial de íon ferroso) na lixiviação bacteriana de cobre de placas de circuito impresso de computadores usando a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans*–LR. Placas de circuito impresso de computadores foram trituradas em moinho martelo, o pó obtido foi separado magnéticamente e o material não-magnético foi utilizado neste estudo. Foi realizado um estudo de frascos agitados com o material não-magnético utilizando um *shaker*. Os resultados mostram que a *Acidithiobacillus ferrooxidans*–LR pode lixiviar 99% de cobre da placa de circuito impresso (material não magnético), sob as condições determinadas por meio dos estudos.

**Palavras-chave:** Lixiviação bacteriana; Sucata eletrônica; Cobre; Placas de circuito impresso.

## BACTERIAL LEACHING OF ELECTRONIC SCRAP: INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS

## Abstract

The application of bacterial leaching in the ore treatment is already known and also can be applied such as treatment of electronic waste to copper recovery. This paper investigates the influence of process parameters (pulp density, inoculum volume, rotation speed and initial concentration of ferrous iron) on bacterial leaching of copper from printed circuit board of computers using the bacterium *Acidithiobacillus ferrooxidans*–LR. Printed circuit boards from computers were comminuted using a hammer mill. The powder obtained was magnetically separated and the non-magnetic material used in this study. A shake flask study was carried out on the non-magnetic material using a shaker. The results show that *Acidithiobacillus ferrooxidans*–LR can leach 99% of copper from printed circuit boards (non-magnetic material) under the determined conditions through of the studies.

**Key words:** Bacterial leaching; Electronic waste; Copper; Printed circuit boards.

---

<sup>1</sup>Bióloga e Tecnóloga em Saneamento Ambiental, Doutora em Engenharia Metalúrgica, Estudante de pós-doutorado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, Av. Professor Mello Moraes, 2463, Cidade Universitária, Cep 05508-030, São Paulo, SP, Brasil.

E-mail: lucianayamane@gmail.com

<sup>2</sup>Engenheira Metalurgista, Professora Associada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, Av. Professor Mello Moraes, 2463, Cidade Universitária, Cep 05508-030, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: espinosa@usp.br

<sup>3</sup>Engenheiro Metalurgista, Professor Titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, Av. Professor Mello Moraes, 2463, Cidade Universitária, Cep 05508-030, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: jtenorio@usp.br

## I INTRODUÇÃO

O resíduo de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), também conhecido como sucata eletrônica, contempla todo tipo de equipamento eletroeletrônico danificado, obsoleto ou que tenha chegado ao fim de sua vida útil, podendo ser citados: computadores, aparelhos celulares, eletrodomésticos, televisores e também partes desses equipamentos, como as placas de circuito impresso.<sup>(1-5)</sup>

Os dois tipos mais comuns de placas de circuito impresso são feitos de fibra de vidro reforçado com resina epóxi (referida comercialmente como FR-4) ou papel de celulose reforçado com uma resina fenólica (FR-2). O tipo FR-4 é utilizado em computadores e os tipos FR-2 são usados em televisões e eletrodomésticos.<sup>(6)</sup> Tipicamente, na face superior ficam os componentes e, na face inferior, fica o circuito propriamente dito formando por listras negras (de cobre, que funcionam como condutores).<sup>(7)</sup>

As placas de circuito impresso podem ser consideradas como uma fonte secundária de cobre, já que o cobre chega a representar 27% em massa da placa de circuito impresso.<sup>(8)</sup>

O crescente conhecimento da lixiviação bacteriana como um processo economicamente viável é atribuído, principalmente, ao esgotamento de minérios ricos em cobre, ouro e prata.<sup>(9)</sup> O processo de lixiviação bacteriana baseia-se na utilização de bactérias para promover a solubilização de metais, sendo uma alternativa na recuperação de metais de interesse econômico a partir de minérios como o cobre.<sup>(10,11)</sup>

Alguns fatores fazem do processo de lixiviação bacteriana uma alternativa vantajosa na recuperação de cobre de fontes secundárias, por exemplo:<sup>(12,13)</sup>

- A economia de insumos (ácidos e agentes oxidantes) utilizados em um processo hidrometalúrgico convencional, pois a própria bactéria produz insumos a partir de substratos presentes no minério;
- O requerimento de energia, se comparado ao processo pirometalúrgico;
- O investimento de capital inicial e custos operacionais devido à simplicidade das instalações;
- A reduzida necessidade de mão de obra especializada na operação;
- Além de evitar a emissão de poluentes gasosos, como o SO<sub>2</sub> gerado no processo pirometalúrgico.

Comparado aos processos convencionais de reciclagem de placas de circuito impresso (hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos), a principal desvantagem é o processo ser mais lento.

O objetivo deste estudo é avaliar a influência dos parâmetros de processo sobre a lixiviação bacteriana do cobre presente nas placas de circuito impresso de computador.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Para realização deste estudo, foi utilizado o material não magnético das placas de circuito impresso de computador, obtido após trituração do resíduo em moinho de martelos (<2 mm) e separação magnética via seca do material cominuído. Este material foi escolhido por concentrar o cobre após processamento mecânico. A composição do material (% em peso) é apresentada na Tabela 1.

A bactéria utilizada neste estudo foi a *Acidithiobacillus ferrooxidans*, linhagem LR, isolada a partir de licor de lixiviação ácida de minério de urânio.<sup>(14)</sup>

O meio de cultura utilizado para o crescimento do inóculo bacteriano foi o meio de cultura T&K,<sup>(15)</sup> composto por duas soluções (A e B):

- Solução A: (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0,625 gL<sup>-1</sup>; MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O: 0,625 gL<sup>-1</sup> e K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>: 0,625 gL<sup>-1</sup>;
- Solução B: 166,5 gL<sup>-1</sup> FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O.

### 2.2 Métodos

Para avaliar a influência dos parâmetros de processo, foi realizado um estudo do tipo frascos agitados,<sup>(9,10,12)</sup> adaptado para REEE, visto que estudos anteriores foram realizados com minério. Para isso, foram inoculados frascos Erlenmeyer (esterilizados em autoclave), contendo 200 mL de meio T&K, com bactérias adaptadas e incubados num *shaker* a 30°C ± 2°C. O pH foi monitorado e ajustado, quando necessário, para 1,8-2,0.

Os parâmetros de processo estudados foram: densidade de polpa, volume de inóculo, velocidade de rotação e concentração inicial de Fe<sup>+2</sup>.

No estudo de influência da densidade de polpa são avaliadas seis condições, sendo: 15 gL<sup>-1</sup>; 22,5 gL<sup>-1</sup>; 30 gL<sup>-1</sup>; 45 gL<sup>-1</sup>; 60 gL<sup>-1</sup>; 75 gL<sup>-1</sup> e respectivos controles abióticos. Foram utilizados 200 mL de solução lixiviante (meio T&K), inóculo de 5% (v/v) a 180 rpm de velocidade de rotação.

**Tabela 1.** Concentração (%p) dos metais no material não magnético das placas de circuito impresso de computadores, determinada por espectrometria de absorção atômica

Metal	Concentração (%p)
Cu	28,1
Sn	7,8
Pb	4,9
Al	4,5
Zn	3,9
Fe	0,4
Ni	0,2
Ag	0,1
Au	0,1

Com o intuito de avaliar a influência do volume de inóculo, foi realizado um estudo utilizando 200 mL de solução lixiviante (meio T&K), 15 gL<sup>-1</sup> de placas de circuito impresso (material não magnético) a 180 rpm de velocidade de rotação. Diferentes volumes de solução oxidada de cultivo de bactérias adaptadas foram inoculados, sendo (%v/v): 5, 10, 20, 30, 40, 50 e 60. Também foi estudado um controle abiótico em paralelo.

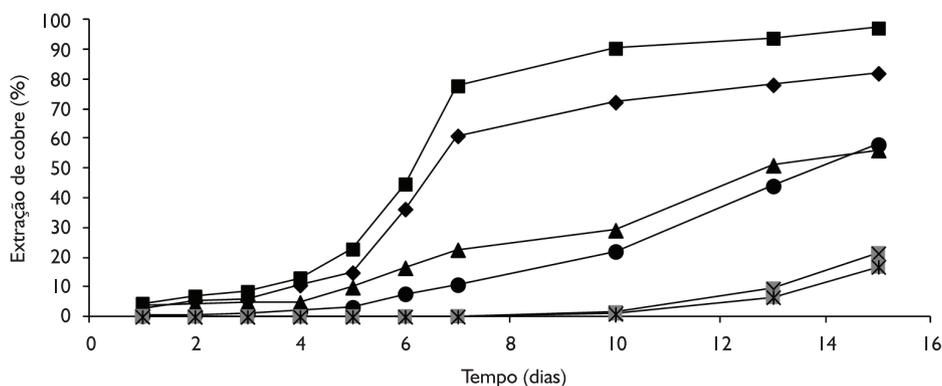
Para avaliar a influência da velocidade de rotação foram utilizados 200 mL de solução lixiviante (meio T&K), 15 gL<sup>-1</sup> de placas de circuito impresso (material não magnético) e 10%v/v de inóculo (bactérias adaptadas). Foram avaliadas diferentes velocidades de rotação, sendo: 150 rpm, 160 rpm e 170 rpm.

No estudo de influência da concentração inicial de íon ferroso foram utilizados 200 mL de solução lixiviante, 15 gL<sup>-1</sup> de placas de circuito impresso (material não magnético), 10%v/v de inóculo, velocidade de rotação de 170 rpm e diferentes concentrações iniciais de íon ferroso (gL<sup>-1</sup>), sendo: 6,75; 13,57 e 16,97. Todos os estudos foram conduzidos em duplicata.

Para a determinação da extração de cobre, foram centrifugadas alíquotas da lixívia durante 20 minutos a 5.000 rpm e o sobrenadante retirado, sendo que 10 mL da alíquota foram utilizados na titulometria do ferro e, nos 5 mL restantes, foram adicionadas duas gotas de HNO<sub>3</sub> concentrado e preservado em frasco âmbar a 4°C até a realização das análises químicas pela técnica de espectroscopia de absorção atômica. A concentração de Fe<sup>+2</sup> foi determinada por meio da técnica de titulação com dicromato de potássio.

### 3 RESULTADOS

No estudo sobre a influência da densidade de polpa, os resultados mostram que a maior extração de cobre (97,2%) é obtida utilizando densidade de polpa de 15 gL<sup>-1</sup> após 15 dias. Os resultados obtidos na extração de cobre utilizando diferentes densidades de polpa são apresentados na Figura 1.



**Figura 1.** Extração de cobre (%) obtida utilizando massa específica de polpa de: 15 gL<sup>-1</sup> (■), 22,5 gL<sup>-1</sup> (◆), 30 gL<sup>-1</sup> (▲), 45 gL<sup>-1</sup> (●), 60 gL<sup>-1</sup> (⊠) e 75 gL<sup>-1</sup> (⊞) após 15 dias.

Como pode ser visto na Figura 1, os resultados mostram que o aumento na densidade de polpa acarreta a diminuição da extração de cobre, isso porque, quanto menor a densidade de polpa, maior é o volume de solução lixiviante por massa de concentrado, o que aumenta a solubilização metálica.<sup>(16)</sup> Além disso, a atividade bacteriana pode ser inibida por concentrações maiores, que variam entre 0,45 gL<sup>-1</sup>-4,45 gL<sup>-1</sup>; sendo assim, o aumento na densidade de polpa pode inibir significativamente a atividade dos microrganismos.<sup>(16,17)</sup> Guo, Guo e Xu<sup>(8)</sup> descrevem efeito similar da densidade de polpa sobre a lixiviação bacteriana de escória fundida Pb/Zn.

Nas densidades de polpa de 15 gL<sup>-1</sup> e 22,5 gL<sup>-1</sup> foi biolixiviado mais de 70% do cobre devido à adaptação bacteriana ter aumentado a tolerância das bactérias aos íons gerados na oxidação dos metais contidos nas placas de circuito impresso. Resultados similares são obtidos por Ilyas et al.<sup>(18)</sup> e Yang et al.<sup>(19)</sup> que estudam a recuperação de cobre de placas de circuito impresso em frascos agitados obtendo taxas de extração de cobre maiores que 70%.

Na maior densidade de polpa (75 gL<sup>-1</sup>) a extração de cobre é inferior a 20%, a mesma obtida no controle abiótico, mostrando que nesta densidade de polpa a extração de cobre não sofre influência da atividade bacteriana, tendo ocorrido apenas a lixiviação química do cobre.

Alguns estudos<sup>(18-21)</sup> reportam a toxicidade das placas de circuito impresso, e apesar da adaptação bacteriana aumentar a tolerância aos íons metálicos, provavelmente devido à quantidade de placas de circuito impresso adicionadas ao meio lixiviante, nas densidades de polpa de 30 gL<sup>-1</sup>, 45 gL<sup>-1</sup>, 60 gL<sup>-1</sup> e 75 gL<sup>-1</sup>, pode ter ocorrido um aumento da condição de lise das células além de prejudicar o processo de transferência de massa.<sup>(19)</sup> No entanto, segundo Brandl, Bosshard e Wegmann,<sup>(20)</sup> os componentes e mecanismos responsáveis por essa toxicidade ainda não foram estudados, mas microrganismos crescem bem em concentrações menores que 10 gL<sup>-1</sup> de sucata. Ainda assim, como pode ser observado na Figura 1, nas massas específicas de polpa de 15 gL<sup>-1</sup> a 60 gL<sup>-1</sup>, a extração de cobre obtida na lixiviação bacteriana é superior aos controles abióticos.

Os resultados obtidos nas condições controles de todas as massas específicas de polpa estudadas são inferiores às obtidas na lixiviação bacteriana e não são apresentadas na Figura 1, e mostram que a solubilização do cobre é promovida pelo pH ácido (1,8 a 4,0), o que mostra que a lixiviação ácida é um fator contribuinte na extração do cobre. Apesar do cobre ser insolúvel em solução diluída de ácido sulfúrico, a agitação introduz oxigênio no meio, o que favorece a solubilização do cobre.<sup>(22)</sup>

A solução oxidada de cultivo é utilizada para inocular bactérias que estão em fase exponencial de crescimento nos experimentos. Mais detalhadamente, o crescimento bacteriano possui quatro fases: fase *lag* (fase de adaptação), fase exponencial, fase estacionária e fase de morte.<sup>(23)</sup> Na fase exponencial, ocorre um aumento exponencial do número de células, que acarreta um aumento da atividade metabólica bacteriana envolvendo a oxidação do íon ferroso a íon férrico e a consequente solubilização do cobre.<sup>(24)</sup>

A Figura 2 apresenta os resultados obtidos na extração de cobre usando diferentes volumes de solução de cultivo oxidada como inóculo.

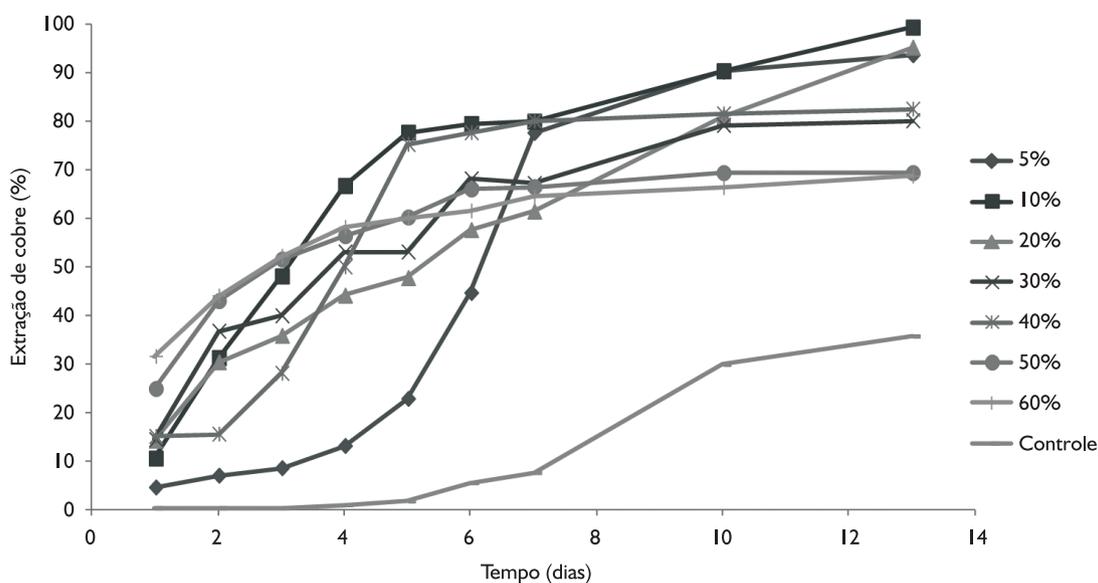
Como pode ser observado na Figura 2, com 10% de inóculo é alcançado um valor de 99,2% de extração do cobre, tendo sido este o melhor resultado obtido. A principal diferença observada com 10% de inóculo é a fase exponencial de crescimento bacteriano ter ocorrido até o 2º dia, enquanto que, com 5% de inóculo, essa fase ocorreu até o 6º dia. Isso ocorreu, pois utilizando 10% de inóculo, foi introduzido ao meio um número maior de células do que com 5% de inóculo, e esse incremento no número de células fez com que o  $Fe^{+2}$  disponível fosse oxidado mais rapidamente, com consequente extração de 80% do cobre em 5 dias. A partir do 5º dia, o aumento na

extração de cobre é provavelmente devido à lixiviação do cobre (promovido pelo meio ácido), podendo-se ser que o crescimento bacteriano pode ter entrado na fase estacionária, na qual o número de células permanece o mesmo ou quase não há replicação, já que o pH permanece em torno de 2,0 mostrando atividade biológica do ciclo  $Fe^{+2}/Fe^{+3}$ .

Com o aumento do volume da solução oxidada de cultivo sendo inoculada ao meio, conseqüentemente a disponibilidade de  $Fe^{+2}$  é menor (no meio de cultivo), e como o crescimento bacteriano está estritamente ligado à oxidação biológica do íon ferroso para obtenção de energia, mesmo com a inoculação de um número maior de células, não se observa um incremento significativo na extração de cobre, quando inoculados volumes acima de 30% de solução oxidada de cultivo. Além disso, a oxidação do  $Fe^{+2}$  pode ser inibida na presença de concentrações ( $10\text{ gL}^{-1}$ ) de íon férrico<sup>(9)</sup>.

Na solução oxidada de cultivo, o íon ferroso já é completamente oxidado a íon férrico antes da inoculação ao meio, ou seja, quanto maior o volume inoculado, maior é a concentração inicial de  $Fe^{+3}$ , o que leva a uma extração inicial de cobre maior, como observado nas condições com 50% e 60% de volume de inóculo. A partir do 5º dia, a extração permanece constante até o final do experimento. A lixiviação promovida pelo íon férrico não é a única responsável pela extração acima de 60% obtida.

Em estudos de frascos agitados, o oxigênio é introduzido ao meio lixiviante através da agitação constante. A disponibilidade de oxigênio é fundamental, visto que a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* é aeróbica e consome o  $O_2$  na oxidação do íon ferroso.<sup>(25)</sup> Segundo Lewis et al.,<sup>(26)</sup> a temperatura e a velocidade de agitação têm provado serem os parâmetros que mais influenciam a cinética de dissolução do cobre.



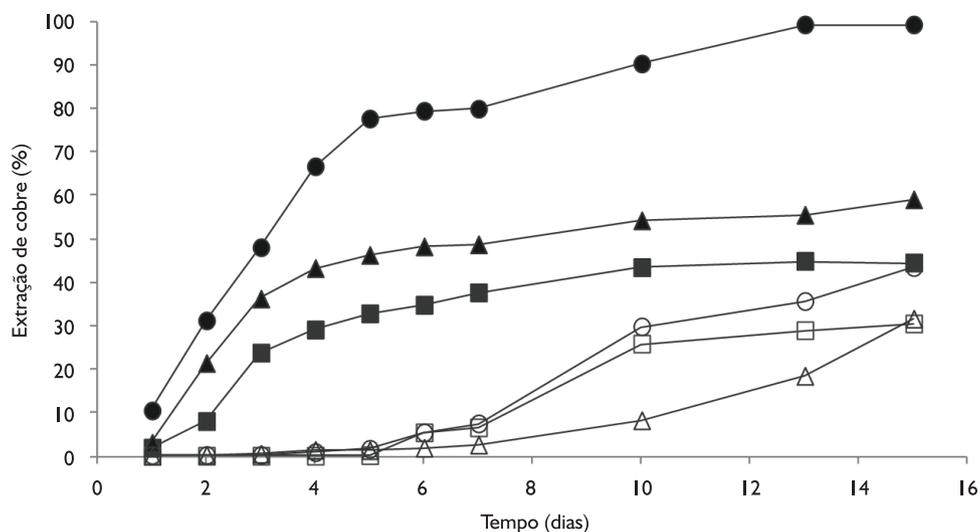
**Figura 2.** Extração de cobre utilizando como inóculo diferentes volumes de solução oxidada de cultivo de (%v/v): 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% e controle abiótico.

Nos estudos anteriores observa-se que o efeito da lixiviação química dos metais (controles abióticos), principalmente do cobre, é resultado da introdução de oxigênio promovido pela agitação. Foi realizado um estudo utilizando diferentes velocidades de rotação para investigar a possibilidade de diminuir a velocidade de rotação, suprimindo assim o efeito da lixiviação química sem comprometer a extração do cobre pela lixiviação bacteriana. Os resultados obtidos na extração de cobre (%) sob diferentes velocidades de rotação são apresentados na Figura 3.

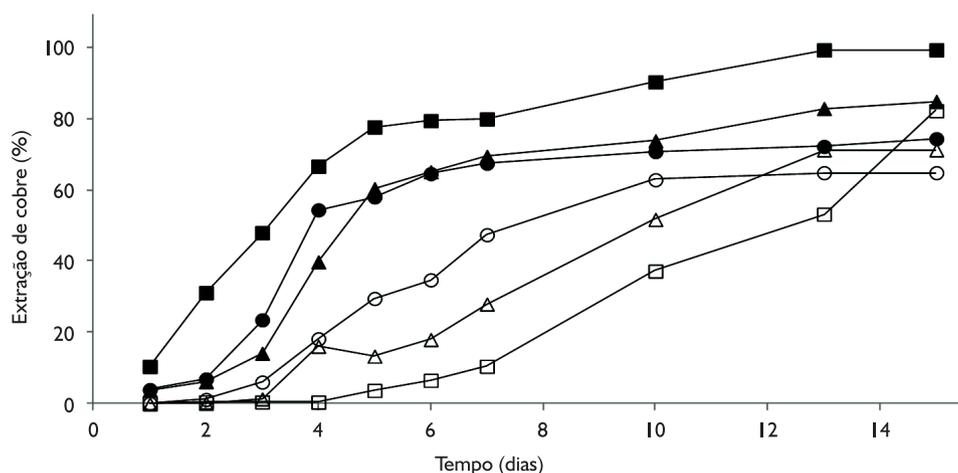
Como pode ser observado na Figura 3, a maior extração de cobre (99%) é alcançada utilizando velocidade de rotação de 170 rpm. Estudos de lixiviação bacteriana<sup>(18-21,27)</sup> reportam taxas de extração acima de 70% com condições de agitação variando entre 150 rpm a 250 rpm; porém, utilizando velocidades de rotação de 150 rpm e 160 rpm, a extração do cobre diminuiu para menos de 60%.

Devido à natureza aeróbica de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, o oxigênio dissolvido é um fator limitante para o crescimento bacteriano, não sendo observado o crescimento para concentrações inferiores a  $0,2 \text{ mgL}^{-1}$ .<sup>(17)</sup> Apesar de não ter sido realizada a medição do oxigênio dissolvido no meio, observa-se que a diminuição da velocidade de rotação, e por consequência, da introdução de oxigênio ao meio, diminui a extração do cobre, sendo esperado que velocidades inferiores às aplicadas possam inibir o crescimento bacteriano. A agitação do meio promove não somente a introdução de oxigênio, mas também de  $\text{CO}_2$ , requerido como fonte de carbono na atividade metabólica bacteriana.<sup>(12)</sup>

A extração de cobre (%) obtida utilizando diferentes concentrações iniciais de  $\text{Fe}^{+2}$  é apresentada na Figura 4.



**Figura 3.** Extração de cobre (%) utilizando velocidade rotação de (■) 150 rpm, (▲) 160 rpm e (●) 170 rpm e respectivos controles abióticos (□) 150 rpm, (△) 160 rpm e (○) 170 rpm.



**Figura 4.** Extração de cobre (%) utilizando concentração inicial de  $\text{Fe}^{+2}$  ( $\text{gL}^{-1}$ ) de (■) 6,75; (▲) 13,57; (●) 16,97 e seus respectivos controles abióticos (□) 6,75; (△) 13,57; (○) 16,97 após 15 dias.

A Figura 4 mostra que o aumento na concentração inicial de íon ferroso não aumenta a extração de cobre, como seria esperado, já que atividade biológica está estritamente ligada à oxidação do íon ferroso. Porém, segundo Nemati et al.<sup>(17)</sup> concentrações de  $\text{Fe}^{+2}$  (maiores que  $5 \text{ kg m}^{-3}$ ) mostram ter efeito inibitório sobre o crescimento microbiana. Em ambas as condições estudadas a extração obtida é superior a 70%.

Estudo realizado por Choi et al.<sup>(27)</sup> sobre a lixiviação bacteriana de cobre de placas de circuito impresso utilizando diferentes concentrações iniciais de  $\text{Fe}^{+2}$  ( $0\text{-}9 \text{ gL}^{-1}$ ) alcançam maior solubilização do cobre ( $5 \text{ gL}^{-1}$ ) usando  $7 \text{ gL}^{-1}$  de  $\text{Fe}^{+2}$ , resultados similares aos obtidos neste estudo ( $6,75 \text{ gL}^{-1}$ ).

O mesmo é observado por Xiang et al.,<sup>(28)</sup> com o aumento da lixiviação bacteriana do cobre, à medida que aumenta a concentração inicial de  $\text{Fe}^{+2}$  ( $0, 3 \text{ gL}^{-1}$ ,  $6 \text{ gL}^{-1}$  e  $9 \text{ gL}^{-1}$ ) e declínio nas concentrações de  $12 \text{ gL}^{-1}$  e  $15 \text{ gL}^{-1}$ . Ainda neste estudo, a taxa de lixiviação do cobre diminui com o tempo de incubação, sendo sugerido que o mesmo ocorre devido à precipitação de  $\text{Fe}^{+3}$  formando uma camada de passivação na superfície das placas de circuito cominuídas, que explica a diminuição da extração do cobre nas concentrações de  $\text{Fe}^{+2}$  inicial ( $12 \text{ gL}^{-1}$  e  $15 \text{ gL}^{-1}$ ).

## 4 CONCLUSÕES

- Os estudos de lixiviação bacteriana sobre a influência da densidade de polpa, volume de inóculo, velocidade de rotação e concentração inicial de íon ferroso mostram que estes parâmetros influenciam a extração de cobre através da lixiviação bacteriana das placas de circuito impresso (material não magnético) usando a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans*-LR;
- Os controles abióticos mostram que a solubilização do cobre promovida pelo meio ácido (pH 1,8) é um fator contribuinte na extração dos metais; e
- Os resultados dos estudos permitam a definição das condições: densidade de polpa de  $15 \text{ gL}^{-1}$ , volume de inóculo (bactérias adaptadas) de 10% (v/v) e velocidade de rotação de 170 rpm para extração de 99% do cobre presente no material não magnético das placas de circuito impresso de computador.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de doutorado (Proc. n° 08/53254-1) e pelo financiamento da pesquisa (Proc. n° 10/51009-0).

## REFERÊNCIAS

- 1 SCHLUEP, M. et al. *Recycling: from e-waste to resources*. Berlin: United Nations Environment Programme/United Nations University, 2009. p. 95.
- 2 CUI, J.; FORSSBERG, E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 99, n. 3, p. 243-263, May, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00061-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00061-X)
- 3 CUI, J.; ZHANG, L. Metallurgical Recovery of metals from electronic waste: a review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 158, n. 2-3, p. 228-256, Oct. 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.001>
- 4 VEIT, H. M. *Reciclagem de cobre de sucatas de placa de circuito impresso*. 2005. 101 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- 5 BERTUOL, D. A. et al. Resíduos urbanos tecnológicos: desafios e tendências. *Revista Metalurgia e Metais*, v. 61, n. 554, p. 167-170, mar. 2005.
- 6 KELLEY, E. J. Introduction to base materials. In: COOMBS JUNIOR, C. F. (Ed.). *Printed circuits handbook*. 6. ed. New York: McGraw-Hill Handbooks, 2008. p. 6.3-6.24.
- 7 PIROPO, B. *Computadores XIV: circuitos impressos integrados*. Disponível em: <<http://www.forumpcs.com.br/coluna.php?b=135976>>. Acesso em: 11 mar. 2009.
- 8 GUO, J., GUO, J.; XU, Z. Recycling of Non-metallic fractions from waste printed boards: a review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 168, n. 2-3, p. 567-590, Sep. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.104>
- 9 VALDÍVIA, D. N. U. *Lixiviação bacteriana de minérios refratários de ouro*. 2003. 120 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mineral, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- 10 BEVILAQUA, D. et al. Oxidation of chalcopyrite by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* in shake flasks. *Process Biochemistry*, v. 38, n. 4, p. 587-592, Dec. 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-9592\(02\)00169-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-9592(02)00169-3)
- 11 GARCIA JUNIOR, O. Utilização de microorganismos em processos bio-hidrometalúrgicos. In: ENCONTROS DE METALURGIA, MINERAÇÃO E MATERIAIS DA UFMG, 1./2., 1995, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: [s.n.], 1995.

- 12 GARCIA JUNIOR, O. *Estudos da biolixiviação de minérios de urânio por Thiobacillus ferrooxidans*. 1989. 261 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, 1989.
- 13 LYNN, N. S. The bioleaching and processing of refractory gold ore: overview. *Journal of Minerals, Metals and Materials*, v. 49, n. 4, p. 24–26, Apr. 1997. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02914870>
- 14 GARCIA JUNIOR, O. Isolation and purification of *Thiobacillus ferrooxidans* and *Thiobacillus thiooxidans* from some coal and uranium mines of Brazil. *Revista de Microbiologia*, v. 20, p. 1–6, 1991.
- 15 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 CO<sub>2</sub> fixation and iron oxidation as measures of growth. *Archives of Microbiology*, v. 88, n. 1, p. 285–298, Mar. 1973.
- 16 MOUSAVI, S. M. et al. Influence of process variables on biooxidation of ferrous sulfate by an indigenous *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Part I: flask experiments. *Fuel*, v. 85, n. 17–18, p. 2555–2560, Dec. 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2006.05.020>
- 17 NEMATI, M. et al. Biological oxidation of ferrous sulfate by *Thiobacillus ferrooxidans*: a review on the kinetic aspects. *Biochemical Engineering Journal*, v. 1, n. 3, p. 171–190, Jun. 1998. [http://dx.doi.org/10.1016/S1369-703X\(98\)00006-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1369-703X(98)00006-0)
- 18 ILYAS, S. et al. Bioleaching of metals from electronic scrap by moderately thermophilic acidophilic bacteria. *Hydrometallurgy*, v. 88, n. 1–4, p. 180–188, Ago. 2007.
- 19 YANG, T. et al. Factors influencing bioleaching copper from waste printed circuit boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Hydrometallurgy*, v. 97, n. 1–2, p. 29–32, Jun. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.12.011>
- 20 BRANDL, H., BOSSHARD, R.; WEGMANN, M. Computer–munching microbes: metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi. *Hydrometallurgy*, v. 59, n. 2–3, p. 319–326, Feb. 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00188-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00188-2)
- 21 WANG, J. et al. Bioleaching of metals from printed wire boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* and their mixture. *Journal of Hazardous Materials*, v. 172, n. 2–3, p. 1100–1105, Dec. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.102>
- 22 VOGEL, A.I. *Química analítica qualitativa*. 5. ed. São Paulo: Mestre Jou, 1981.
- 23 BARRETT, J. et al. *Metal extraction by bacterial oxidation of minerals*. New York: Ellis Horwood, 1993.
- 24 GAYLARDE, C. *Bioextraction and biodeterioration of metals*. Cambridge: University Press, 1995.
- 25 BOSECKER, K. Bioleaching: metal solubilization by microorganisms IEMS. *Microbiology Reviews*, v. 20, n. 3–4, p. 591–604, Jul. 1997. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2011.03.025>
- 26 LEWIS, G. et al. Bio hydrometallurgical recovery of metals from fine shredder residues. *Minerals Engineering*, v. 24, n. 11, p. 1166–1171, Sep. 2011.
- 27 CHOI, M.–S. et al. Microbial recovery of copper from printed circuit boards of waste computer by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Journal of Environmental Science and Health. Part A – Toxic/Hazardous Substances & Environmental*, v. 39, n. 11, p. 1–10, Ago. 2004.
- 28 XIANG, Y. et al. Bioleaching of copper from waste printed circuit boards by bacterial consortium enriched from acid mine drainage. *Journal of Hazardous Materials*, v. 184, n. 1–3, p. 812–818, Dec. 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.113>

Recebido em: 08/05/2012

Aceito em: 18/02/2013