



RECUPERAÇÃO DOS METAIS PRESENTES EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Natália Rangel Greco¹ (nataliargreco@yahoo.com.br), Rui de Góes Casqueira¹ (rui.casqueira@gmail.com), Daiane Silva de Paula¹ (dayane.eq.ufrj@gmail.com), Hélio Fernandes Machado Júnior (hfmjr@ufrj.br)¹

1 UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

Instituto de Tecnologia - Departamento de Engenharia Química - BR 465 km 7 Seropédica – RJ

RESUMO

Os equipamentos eletroeletrônicos, como celulares, computadores, e todos os aparelhos eletrônicos possuem em sua composição uma placa, chamada placa de circuito impresso. As placas de circuito impresso são compostas por metais, plásticos e materiais cerâmicos, e apresentam uma difícil reciclagem, porém necessária devido ao risco que estes materiais podem causar ao meio ambiente e à vida humana. Portanto, como o descarte de equipamentos eletrônicos vem aumentando desordenadamente nos dias de hoje, faz-se extremamente necessário estudar métodos de reciclagem para estas placas. Neste trabalho, serão analisadas técnicas de recuperação de metais contidos em placas de circuito impresso, algumas mais favoráveis ao meio ambiente, outras um pouco poluidoras, seguido de estudos de caso que ilustram a reciclagem utilizando diferentes processos.

Palavras-chave: REE, Reciclagem, PCI.

RECOVERY OF METALS PRESENT IN PRINTED CIRCUIT BOARDS

ABSTRACT

The electronic equipment such as mobile phones, computers, and all electronic devices have in their composition a plate, called a printed circuit board. The printed circuit boards are composed by metals, plastics and ceramics this composition leads to a complex recycling process because the risk these materials to pollute the Therefore, as the disposal of electronic equipment is increasing disorderly these days, it is extremely necessary to study recycling methods for these boards. In this paper, contained metal recovery techniques will be analyzed in printed circuit boards, some more environment-friendly, others a more polluting, followed by case studies that illustrate the recycling using different processes.

Keywords: REE, Recycling, PCI.

1. INTRODUÇÃO

A consciência ambiental em que o mundo se encontra hoje pode ser apresentada por vertentes básicas: crescimento populacional, aumento do consumo dos recursos naturais e geração de resíduos, todas ligadas entre si e fruto do desenvolvimento. O desenvolvimento com suas tecnologias introduziram novos padrões de geração de resíduos, que surgem em quantidades excessivamente maiores do que a capacidade de absorção da natureza e de tal maneira que esta não é capaz de reciclar. Os equipamentos eletroeletrônicos são exemplos perfeitos de resíduos produzidos na era moderna (GRECO, 2012).

Estes equipamentos, ao final de sua vida útil, devem ser tratados e reciclados de uma forma que estas substâncias possam ser, finalmente, absorvidas pela natureza ou reutilizadas. Sendo assim este trabalho tem como proposta realizar um estudo sobre tratamento e/ou reciclagem de uma peça fundamental nos equipamentos eletroeletrônicos, que é de difícil reciclagem, mas que se faz necessária para um desenvolvimento sustentável, a placa de circuito

Realização



Apoio Acadêmico

ESCOLA
Politécnica





impresso (PCI). Elas podem ser encontradas em computadores, *notebooks*, *pen drives*, telefones e diversos outros equipamentos. Como esses aparelhos estão sendo descartados com muita rapidez atualmente, devido ao avanço das novas tecnologias, houve um aumento exagerado deste tipo de resíduos (GRECO, 2012).

Em linhas gerais as PCI são compostas de materiais cerâmicos, vidros e óxidos (30%), plásticos (30%) e metais (40%). A reciclagem de toda essa mistura torna-se muito difícil, entretanto, a presença de metais e metais preciosos a torna uma matéria-prima interessante economicamente. Adicionalmente, a presença de substâncias poluentes e tóxicas, em sua composição, incentiva investimentos em estudos para evitar a sua disposição no meio ambiente de forma inadequada, podendo causar danos, não só ao ambiente, mas também à saúde (VEIT *et al.*, 2008).

As tecnologias usadas para a reciclagem dessas sucatas incluem processos mecânicos (inicialmente usados com a finalidade de separar os metais em uma fração, e os materiais cerâmicos e plásticos em outra), químicos e térmicos. Os quatro principais processos são: Processamento Mecânico, Pirometalurgia, Hidrometalurgia (onde pode haver o uso da biotecnologia), Eletrometalurgia (GRECO, 2012).

2. OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho foi estudar a reciclagem dos metais presentes nas PCI e investigar alternativas para a recuperação dos principais metais.

3. METODOLOGIA

Foram estudados três casos que apresentaram rotas distintas para a recuperação de metais presentes nas PCI de equipamentos eletroeletrônicos obsoletos ou danificados. Nesses casos, a reciclagem de cobre de PCI de sucatas eletrônicas foi feita a partir de processos mecânicos e eletroquímicos, lixiviação de estanho e cobre recuperados de PCI de microcomputadores sucateados e a influência da adaptação bacteriana e da suplementação de Fe^{+2} para a biolixiviação de cobre de PCI de computadores obsoletos.

3.1. Estudo de caso 1

VEIT *et al.* (2008) estudaram a reciclagem de cobre de sucatas eletrônicas a partir de processos mecânicos e eletroquímicos. Os processamentos mecânicos foram utilizados para concentrar os metais em uma fração e os polímeros e cerâmicos em outra. Os processos eletroquímicos foram empregados para separar os metais entre si.

As placas de circuito impresso que foram utilizadas provêm de equipamentos eletrônicos danificados ou obsoletos. Essa amostra sofreu cominuição em moinho de facas até atingir granulometria inferior a 1 mm. A amostra foi classificada granulometricamente em 3 diferentes frações: F1 (-0,25 mm); F2 (+0,25 -0,50 mm) e F3 (+0,50 -1,00 mm).

Cada fração das três diferentes frações da amostra foi separada magneticamente em um separador magnético de esteira por via seca, usando campo magnético de 6000 a 6500 Gauss. Obteve-se então uma fração magnética e uma, não magnética. A fração não magnética foi posta em um separador eletrostático para separação em materiais condutores e não condutores. As amostras magnéticas e condutoras foram analisadas quimicamente.

Posteriormente foi utilizada uma técnica eletrometalúrgica, a eletro-obtenção. Em um potenciostato, ocorreram eletro-obtenções de F3 de PCI, dissolvida com ácido sulfúrico e com água-régia.

Nos dois casos, aproximadamente 20 gramas de amostra foram adicionadas à solução de dissolução numa proporção de 1:3 sólido/líquido. Na dissolução com ácido sulfúrico, a solução foi aquecida até 70°C, durante 10 min. Terminada a dissolução, as soluções foram filtradas e diluídas

Realização



Apoio Acadêmico

ESCOLA
Politécnica



Universidade de Brasília





até 1000 mL. A célula utilizada continha uma placa de cobre como cátodo e uma placa de platina como anodo. Através de ensaios de voltametrias cíclicas obteve-se um valor de 40 mA/cm^2 de densidade de corrente.

3.2. Estudo de caso 2

MARTINS (2007) apresentou resultados para a lixiviação de estanho e cobre recuperados de PCI de microcomputadores sucitados. A lixiviação foi realizada empregando soluções $2,18\text{N H}_2\text{SO}_4$, $2,18\text{N H}_2\text{SO}_4 + 3,0\text{N HCl}$, $3,0\text{N HCl}$ ou $3,0\text{N HCl} + 1,0\text{N HNO}_3$.

As PCI usadas no experimento, provenientes de microcomputadores danificados, foram cortadas em guilhotina manual e os pedaços obtidos foram alimentados em um moinho de panela por 8 minutos. O material moído foi peneirado em peneira com malhas de abertura padrão de 0,208 mm. A parte do material que ficou retido na peneira, ou seja, maior que 0,208 mm, foi realimentada no moinho.

Após as etapas de moagem e classificação granulométrica, o produto obtido com granulometria inferior a 0,208 mm foi lavado com água destilada em um béquer com a finalidade de remover a parte não-metálica do material moído que poderia interferir nas etapas de lixiviação e precipitação. Nesta etapa de lavagem, houve perda de material, cerca de 13% de cobre e 9% de estanho presentes na amostra de pó obtido na moagem.

As amostras do pó lavado foram para caracterização por difratometria de raios x para identificação das espécies presentes e, espectrometria de absorção atômica visando à determinação da concentração das espécies metálicas. Na etapa de lixiviação, 50g da amostra de pó lavado foram postas em béqueres de 1L, com 500 ml de solução de lixiviação ($2,18\text{N H}_2\text{SO}_4$, $2,18\text{N H}_2\text{SO}_4 + 3,0\text{N HCl}$, $3,0\text{N HCl}$ ou $3,0\text{N HCl} + 1,0\text{N HNO}_3$). As soluções resultantes foram mantidas a uma temperatura aproximada de 60°C e sob agitação constante e intensa utilizando-se uma placa aquecedora com agitação magnética. Os licores de lixiviação formados foram coletados em intervalos de 10, 30, 60 e 120 minutos de experimento. Estas amostras foram filtradas e depois analisadas quimicamente para determinação da concentração do cobre e estanho no licor de lixiviação. O resíduo sólido gerado na lixiviação foi recolhido por centrifugação, seco em estufa, e amostras de 10g deste resíduo foram levadas para análise química.

Na etapa de neutralização dos licores de lixiviação, estes foram mantidos a temperatura ambiente e sob intensa agitação com o uso de um agitador magnético em béqueres de 1L. A precipitação ocorreu por meio do uso de lentilhas de NaOH sólido que foram adicionadas ao licor de lixiviação. Os precipitados foram obtidos em valores específicos de pH, medidos pelo uso de um eletrodo de vidro conectado a um pHmetro digital, depois de recolhidos, foram secos em estufa, pesados e levados à análise química para identificação das espécies presentes e a determinação dos teores de Cu e Sn.

3.3. Estudo de caso 3

YAMANE *et al.* (2011) relataram a influência da adaptação bacteriana e da suplementação de Fe^{+2} para a biolixiviação de cobre de PCI de computadores obsoletos utilizando a bactéria *Acidithiobacillusferrooxidans*-LR. As PCI foram cominuídas em moinho de martelos e o material cominuído foi levado a um separador magnético, obtendo-se as frações magnética e não-magnética. Uma amostra da fração não-magnética foi para um separador eletrostático e obteve-se três frações: condutora, mista e não-condutora. Para cada fração obtida foi feita uma análise da concentração de metais.

As amostras da fração não-magnética, sem a separação eletrostática, que representou mais de 80% em peso do total das placas cominuídas, foram empregadas na biolixiviação. A determinação da concentração dos metais foi feita através da espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

Realização



Apoio Acadêmico

ESCOLA
Politécnica





Para avaliar a influência da adaptação bacteriana sobre a biolixiviação de cobre da fração não-magnética das PCI foram utilizadas, como inóculo, bactérias adaptadas e não-adaptadas, e um controle abiótico (sem inóculo bacteriano). E com relação a influência da suplementação de íon ferroso, foram usadas, como solução de cultivo, apenas a solução A do meio T&K para condição sem suplementação de Fe^{+2} , e o meio T&K (soluções A e B) para condição suplementada com Fe^{+2} .

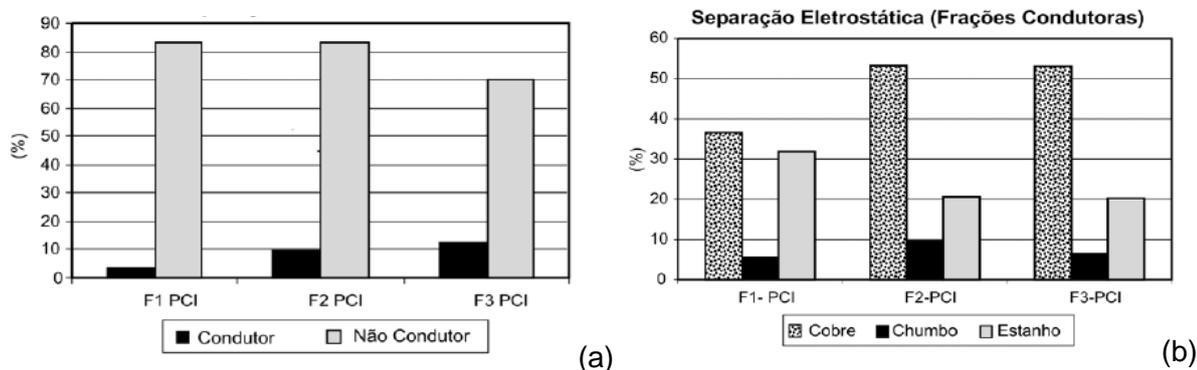
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Estudo de caso 1

Dentre os metais analisados (Fe, Ni, Cu e Pb), Fe e Ni foram escolhidos por serem ferromagnéticos, fazendo-se presentes após uma separação magnética; o Cu por ser o metal mais comum em placas de circuito impresso e o mais desejado neste estudo; e finalmente o Pb por ser o metal mais perigoso presente nas PCI.

A separação magnética foi muito eficiente, pois, como esperado, as frações separadas magneticamente apresentaram altos teores de Fe. Na separação eletrostática, os metais avaliados Cu, Sn e Pb são bons condutores, e também são metais com os maiores teores encontrados nas placas de circuito impresso.

Figura 1 – Percentagem de material condutor e não condutor após separação eletrostática (a) e Análise química das frações condutoras após separação eletrostática (b).



Observam-se ótimos resultados para a separação eletrostática. A percentagem da fração condutora é bem relevante, principalmente F3 que possui aproximadamente 13% (Figura 1a). Na (Figura 1b) os teores de cobre superiores a 50% em F2 e F3 condutoras, além de significativos teores de Pb e Sn, usados nas soldas dos componentes eletrônicos. Para os testes de eletro-obtenção, tem-se a amostra de PCI dissolvida com ácido sulfúrico (Figura 2) e com água-régia (Figura 3).

Figura 2 - Variação da concentração de Cu, Sn e Pb em relação ao tempo em uma solução real de PCI dissolvida com ácido sulfúrico.

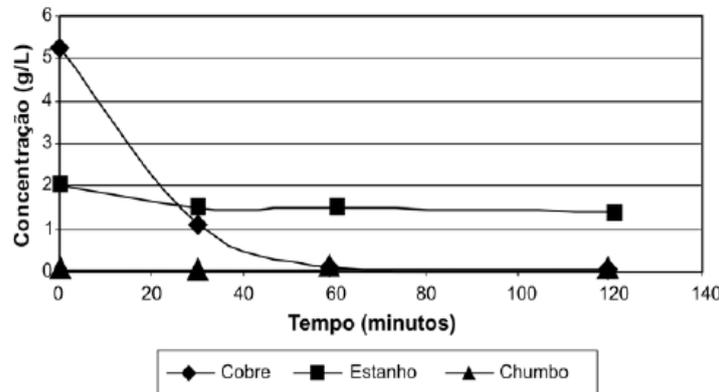
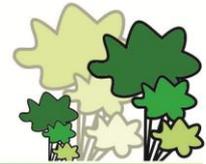
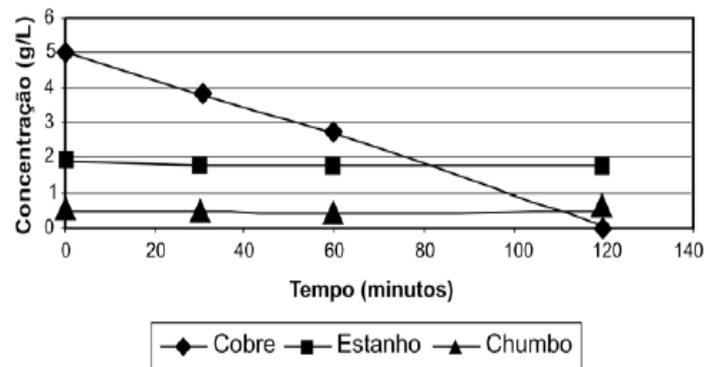


Figura 3 - Variação da concentração de Cu, Sn e Pb em relação ao tempo em uma solução real de PCI dissolvida com água-régia.



Pode-se perceber que o teor de cobre em solução baixou rapidamente, principalmente na amostra dissolvida com ácido sulfúrico que, em 60 minutos, já estava quase nulo. Enquanto na solução com água-régia, no intervalo de 60 minutos, existia cerca de 50% do teor de cobre original. Além disso, observa-se que o teor de estanho e chumbo em ambas as amostras não reduziu consideravelmente, comprovando que somente os íons cobre que estavam em solução se depositaram no cátodo. A partir de uma análise química feita nos metais presentes na solução, constatou-se que o cobre depositado apresenta teores acima de 95%, provando que os íons que saíam da solução se depositavam no cátodo.

4.2. Estudo de caso 2

De acordo com os resultados da análise química feita com amostras do pó lavado, observou-se que os metais de maior concentração foram Al, Sn e Cu, respectivamente. Os teores de 3,09% de Sn e 2,85% de Cu podem ser considerados expressivos quando comparados aos teores encontrados em fontes minerais primárias, e por este motivo, sua recuperação foi o foco deste estudo. O Al apesar de apresentar teor 3,71%, não foi analisado, pois para que sua exploração seja viável economicamente é necessário teores acima de 30%.

A análise para os percentuais de extração de estanho e de cobre versus tempo de lixiviação com soluções aquosas 2,18N H₂SO₄, 2,18N H₂SO₄ + 3,0N HCl (lixiviação inicial), 2,18N H₂SO₄ + 3,0N HCl (lixiviação secundária), 3,0N HCl ou 3,0N HCl + 1,0N HNO₃ estão apresentados na Figuras 4a e 4b. Comparando os resultados para os sistemas estudados, notou-se que o sistema de solução 2,18N H₂SO₄ apresentou os percentuais mais baixos, enquanto o sistema de solução 3,0N HCl + 1,0N HNO₃ apresentou os melhores valores de extração de Sn, 98% e Cu,



93%. A lixiviação secundária do sistema 2,18N H₂SO₄ + 3,0N HCl chegou a quase 90% de extração de Sn, a partir do resíduo de lixiviação inicial, permitindo uma extração metálica próxima do sistema 3,0N HCl, o segundo mais eficiente.

A neutralização dos licores de lixiviação nos sistemas estudados, por ação das lentilhas de NaOH adicionadas, provoca a precipitação de algumas espécies obtidas em valores específicos de pH. A Tabela 1 mostra os resultados da caracterização por difração de raios-X das amostras destes precipitados.

Figura 4 – (a) Percentual de extração de Sn versus tempo de lixiviação para os sistemas de lixiviação estudados. (b) Percentual de extração de Cu versus tempo de lixiviação para os sistemas de lixiviação estudados

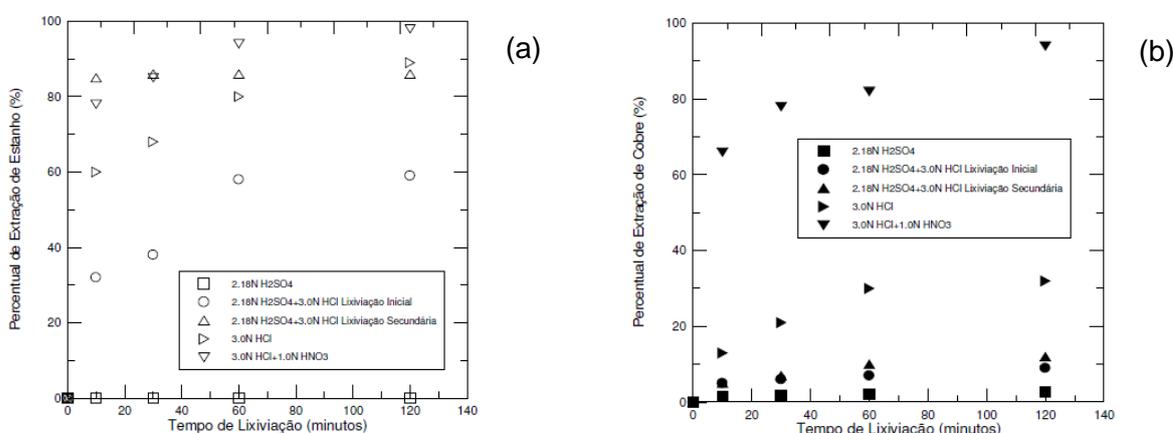


Tabela 1 - Resultados da caracterização por difração de raios-X das amostras de precipitados obtidos pela neutralização dos licores de lixiviação dos sistemas estudados.

Sistema de lixiviação	pH inicial de precipitação	Principais espécies identificadas
2,18N H₂SO₄	0,5	Na ₂ SO ₄ , SnO ₂ , CaSO ₄ , CaO
	4,6	Na ₂ SO ₄ , SnO, CaSO ₄ , CaO
	8,9	Na ₂ SO ₄ , SnO ₂ , CaSO ₄ , CaO, Cu ₂ O
2,18N H₂SO₄ + 3,0N HCl	Lixiviação Inicial	
	3,0	SnO ₂ , ZnO, CaO
	4,3	SnO ₂ , ZnO, CaO
Lixiviação Secundária		
8,5	SnO ₂ , ZnO, Fe ₃ O ₄	
3,0	SnO ₂ , CaO, CuO ₂ , Fe ₃ O ₄	
8,5	SnO, CaSO ₄ , SnO ₂ , CuO ₂	
3,0N HCl	1,8	NaCl, (CuNi) ₂ Cl(OH) ₃
	3,0	NaCl, (CuNi) ₂ Cl(OH) ₃
	4,2	NaCl, (CuNi) ₂ Cl(OH) ₃
3,0N HCl + 1,0N HNO₃	2,6	Cu ₇ Cl ₄ (OH) ₁₀ H ₂ O, NaCl
	3,3	Cu ₇ Cl ₄ (OH) ₁₀ H ₂ O, NaCl
	4,2	Cu ₇ Cl ₄ (OH) ₁₀ H ₂ O, NaCl, NaNO ₃

As “espécies” Cu, Ca, Sn, Al, Zn, Fe, Ni e Ti foram detectadas no pó de alimentação. O pó analisado provém de partes metálicas das placas de circuito impresso e estes pós metálicos encontram-se livres no seio da massa de pó e no estado cristalino, portanto, era de se esperar a detecção de Sn, Cu e outros metais por difração de raios-X (EWING, 1972, citado por MARTINS, 2007). Nos sistemas 3,0N HCl e 3,0N HCl + 1,0N HNO₃ não foi possível identificar os compostos

Realização



Apoio Acadêmico





portadores de Sn, possivelmente pela presença de espécies orgânicas associadas ao pó de alimentação. Estas espécies orgânicas se solubilizam devido o contato com os agentes de lixiviação estudados, podendo interferir na precipitação. Uma interferência que pode originar, por exemplo, uma modificação na composição ou estrutura do precipitado, tornando-o amorfo e, por isso, não sensível à identificação por difração de raios-X.

A análise dos teores de Sn e Cu nos precipitados obtidos em valores específicos de pH, formados pela neutralização dos licores de lixiviação, foram determinados por espectrometria de absorção atômica e estão dispostos na Tabela 8.

O precipitado obtido em pH=1,8 por neutralização do licor de lixiviação do sistema 3,0N HCl foi o que apresentou o melhor resultado para a massa de Sn recuperada (1200 mg), seguido do precipitado obtido em pH=2,6 no sistema 3,0N HCl + 1,0N HNO₃ (793 mg). A maior massa de Cu recuperada (267 mg) foi encontrada no precipitado em pH=4,2 do sistema 3,0N HCl + 1,0N HNO₃ (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2 - Teores de Sn e Cu nos precipitados obtidos por neutralização dos licores de lixiviação.

Sistema de lixiviação	pH inicial de precipitação	Massa do precipitado (mg)	Sn (%)	Sn recuperado (mg)	Cu (%)	Cu recuperado (mg)
2,18N H ₂ SO ₄	0,5	1480	<0,01	-	<0,01	-
	4,6	10450	0,23	24	<0,01	-
	8,9	2460	0,52	13	<0,01	-
2,18N H ₂ SO ₄ + 3,0N HCl Lixiviação inicial	3,0	13000	2,5	325	0,4	52
	4,3	33800	1,5	507	0,2	67
	8,5	1200	0,1	1,0	0,1	1,2
Lixiviação secundária	3,0	16300	1,2	196	0,5	81
	8,5	13200	0,8	106	0,3	39
3,0N HCl	1,8	10000	12,0	1200	0,2	20
	3,0	16400	1,0	164	0,1	16
	4,2	1300	<0,01	-	10,1	13,1
3,0N HCl + 1,0N HNO ₃	2,6	25600	3,1	793	0,4	10,2
	3,3	5100	4,3	219	1,3	66
	4,2	22300	1,3	290	1,2	267

Tabela 3 - Percentuais de recuperação de Sn e Cu nos precipitados em relação ao pó de alimentação (54 g de Sn e 1,41 g de Cu) e aos licores de lixiviação.

Sistema de lixiviação	Recuperação de Sn (%)		Recuperação de Cu (%)	
	Pó de alimentação	Licor de lixiviação	Pó de alimentação	Licor de lixiviação
2,18N H ₂ SO ₄	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2,18N H ₂ SO ₄ + 3,0N HCl	79,6	96,3	18,4	29,8
3,0N HCl	87,3	98,2	6,4	20,0
3,0N HCl + 1,0N HNO ₃	84,1	85,8	31,9	34,3

Analisando os precipitados obtidos na etapa de neutralização, observou-se que o sistema 2,18N H₂SO₄ apresentou os piores percentuais de recuperação metálica, tanto em relação ao pó de alimentação quanto ao licor de lixiviação. Para a recuperação do Sn, o sistema 2,18N H₂SO₄ + 3,0N HCl exibiu resultados considerados próximos dos sistemas 3,0N HCl e 3,0N HCl + 1,0N HNO₃. Porém, para a recuperação do Cu, os valores obtidos por 2,18N H₂SO₄ + 3,0N HCl e 3,0N HCl foram sensivelmente mais baixos. Portanto, a recuperação simultânea de Sn e Cu foi bem



melhor sucedida utilizando-se a solução 3,0N HCl + 1,0N HNO₃, que é a mais indicada para o tratamento de placas de circuito impresso de microcomputadores sucataados.

Pode-se considerar bem sucedida a neutralização dos licores de lixiviação através da adição de lentilhas de NaOH, já que ocorreu precipitação de material sólido e filtrável, muitos deles formados por Sn e Cu.

4.3. Estudo de caso 3

No trabalho de YAMANE *et al.* (2011), os resultados obtidos na análise de metais de cada fração depois do processamento mecânico estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Composição (% em peso) das frações obtidas no processamento mecânico das placas de circuito impresso dos computadores obsoletos usados.

Metal	Fração magnética	Fração não-magnética		
		Condutora	Mista	Não-condutora
Prata	0,03	0,05	0,00	0,08
Alumínio	1,23	2,41	0,15	1,91
Ouro	0,04	0,05	0,00	0,04
Cobre	1,88	11,17	0,58	6,56
Ferro	6,97	0,06	0,01	0,29
Níquel	0,25	0,11	0,00	0,07
Chumbo	0,64	3,29	0,09	1,51
Estanho	1,02	5,39	0,16	2,26
Zinco	0,56	2,64	0,14	1,14

Observando os resultados, pode-se perceber que o ferro se concentrou na fração magnética, o que era de se esperar, já que este é um metal fortemente magnético, provando a eficiência da separação magnética na extração do ferro. A caracterização das frações obtidas na separação eletrostática mostrou que o cobre, metal de maior concentração na placa de circuito impresso (20,2% em peso), ficou concentrado na parte condutora e na não-condutora, portanto não é vantajosa a separação eletrostática para a obtenção do cobre. Portanto, a fração não-magnética foi escolhida por concentrar 18,3% do cobre. Os resultados encontrados na extração de cobre nos experimentos de biolixiviação são dispostos na Figura 5.

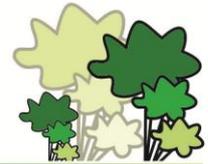
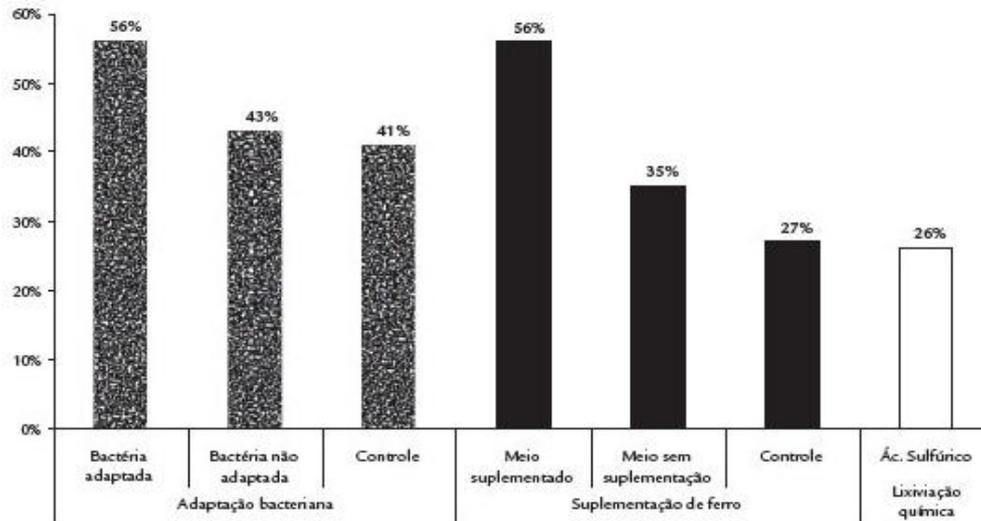


Figura 5 – Extração de cobre nos experimentos de biolixiviação após 30 dias.



Na extração de cobre com bactérias adaptadas, observou-se que após 30 dias, a taxa de biolixiviação de cobre é superior em 13% quando comparada a taxa de extração alcançada com bactérias não-adaptadas. A adaptação bacteriana diminuiu a sensibilidade de *A. ferrooxidans*-LR aos íons cobre gerados, o que aumentou a taxa de biolixiviação de cobre.

Segundo Nematiet *al.* (1998), citado por Yamaneet *al.* (2011), populações naturais de *A. ferrooxidans* são resistentes a íons Cu na concentração de 1 a 2g.L⁻¹, a atividade bacteriana pode ser inibida por concentrações superiores a 4,45 g.L⁻¹, porém linhagens adaptadas podem tolerar concentrações maiores que 29,8g.L⁻¹ de íons Cu.

O meio inoculado com bactérias não adaptadas e a condição-controle obtiveram taxas de extração muito aproximadas, indicando que, nessas condições, houve possivelmente a inibição da atividade bacteriana e a extração de cobre foi química.

A extração de cobre com meio T&K inoculado com suplementação de ferro foi maior do que em meio inoculado sem Fe⁺², isto porque o mecanismo direto bacteriano de solubilização de metais se baseia na oxidação do Fe⁺² a Fe⁺³.

A condição-controle (não inoculada) do meio sem suplementação de ferro teve 27% de cobre extraído, bem próximo da lixiviação química com solução de ácido sulfúrico, 26%. Esse resultado se deve devido ao cobre ser insolúvel em solução de ácido sulfúrico, entretanto a agitação introduziu oxigênio ao meio possibilitando uma breve solubilização. Uma redução na agitação do meio acarreta na eliminação do efeito de lixiviação química.

As amostras das placas de circuito impresso (fração não-magnética) apresentaram somente 0,36% em peso de Fe_{total}, deste modo grande parte do ferro da lixívia (íon ferroso) foi proveniente da adição de solução de sulfato ferroso (solução B) no processo de preparação do meio. A adição de íon ferroso ao processo de biolixiviação de placas de circuito impresso usando a bactéria *A. ferrooxidans* ajuda na dissolução de cobre.

5. CONCLUSÃO

Os processos mecânicos, pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e eletrometalúrgicos foram muito bem utilizados nos três estudos de casos realizados, obtendo resultados surpreendentes. No estudo de caso 1, onde o cobre foi reciclado de placas de circuito impresso a partir da eletro-obtenção em ácido sulfúrico e água-régia, alcançou-se teores de cobre acima de 95%,

Realização



Apoio Acadêmico

ESCOLA Politécnica



Universidade de Brasília





comprovando a eficácia do método. Comprovou-se também que em solução de ácido sulfúrico, o cobre é obtido mais rapidamente, aproximadamente metade do tempo de obtenção em solução de água-régia.

No estudo de caso 2, os melhores resultados para lixiviação de estanho e cobre simultaneamente ocorreu utilizando-se solução 3,0N HCl + 1,0N HNO₃, sendo a mais indicada para este tipo de tratamento de placas de circuito impresso. Embora, para o estanho separadamente, a melhor percentagem de recuperação foi conseguida no sistema 3,0N HCl.

No estudo de caso 3, as bactérias *Acidithiobacillusferrooxidans*-LR adaptadas proporcionaram uma recuperação de cobre cerca de 13% maior que as bactérias não-adaptadas analisadas, pois a adaptação diminuiu a sensibilidade das bactérias aos íons cobre. Analisando a suplementação de Fe⁺² para biolixiviação do cobre, percebeu-se que em meio inoculado com suplementação de ferro, a extração de cobre é consideravelmente maior do que em meio sem suplementação de ferro, devido ao mecanismo bacteriano de solubilização de metais se basear na oxidação de Fe⁺² a Fe⁺³. As recuperações de cobre obtidas para bactérias adaptadas e meio com suplementação de ferro mostraram que o processo é eficiente.

Portanto, avaliando os temas abordados e os resultados alcançados nos estudos pode-se concluir que os processos mecânicos são fundamentais para dar-se início ao tratamento das placas, pois além de realizar um pré-tratamento às partes grandes, ainda é capaz de separar os metais dos plásticos e cerâmicos. O processo eletrometalúrgico foi o que mais se destacou com os resultados, sendo capaz de recuperar a maior percentagem de cobre entre os estudos de caso deste trabalho. A biolixiviação é uma técnica que ainda é uma novidade no ramo, por isso ainda merece muitos investimentos e estudos na área, para poder aprimorar seus resultados. Um atrativo para investir-se na biotecnologia é o baixo custo do seu processo de reciclagem de placas de circuito impresso.

REFERÊNCIAS

GRECO, N. R. Recuperação de Metais Presentes em Placas de Circuito Impresso. Seropédica, 28 p., 2012. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

MARTINS, A. H. Recuperação de Estanho e Cobre a partir da reciclagem de placas de circuito eletrônico de microcomputadores sucata. **Estudos Tecnológicos**, vol. 3, n. 2: 124-131 jul/set 2007.

VEIT, H. M.; BERNARDES, A. M.; BERTUOL, D. A.; OLIVEIRA, C. T. Utilização de processos mecânicos e eletroquímicos para reciclagem de cobre de sucatas eletrônicas. **Revista Esc Minas**, v.61, n.2, Ouro Preto, abr./jun. 2008.

YAMANE, L. H.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Biolixiviação de cobre de sucata eletrônica. **Revista Esc Minas**, vol.64, n.3, Ouro Preto, jul./set. 2011.

Realização



Apoio Acadêmico

ESCOLA
Politécnica

