

RECUPERAÇÃO DE COBRE POR ELETROELUIÇÃO DE RESINAS POLIMÉRICAS DE TROCA IÔNICA A PARTIR DA RECICLAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE COMPUTADORES SUCATADOS

C.A. Pereira¹, M.L. Torem², A. J.B. Dutra³, H.W.A. da Silva⁴, A.E.C. Peres⁴, A.H. Martins⁴

¹Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia de Minas, Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, Minas Gerais (MG), CEP 35400-000, Brasil

²Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUCRJ), Departamento de Engenharia de Materiais, Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea, Rio de Janeiro, RJ, Cep: 22451-900, Cx. Postal 38097, Brasil.

³Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Cidade Universitária - Centro de Tecnologia-Bloco F, sala F-210, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro (RJ), CEP 21941-972, Brasil.

⁴Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Av. Antônio Carlos 6627, Escola Engenharia, Bloco 2, sala 2233, Pampulha, CEP 31270-900, Belo Horizonte (MG), Brasil. Telefax: (55-31-34091815) ahmartin@demet.ufmg.br

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados para a recuperação de cobre presente em soluções aquosas sintéticas com concentração similar a de licores de lixiviação da reciclagem de computadores sucata, através da técnica de eletroeluição de resina polimérica catiônica Amberlite IR-120® (Merck S.A., USA). A resina foi carregada pela passagem de 200 mL de solução aquosa 0,28 g/L de Cu em 2,18N H₂SO₄ através do leito de 10 g de resina. Os experimentos foram planejados com base em uma abordagem estatística pelo método fatorial de três variáveis a dois níveis experimentais. As condições consideradas estatisticamente ótimas visando a máxima eletrorrecuperação de cobre (96,56%) foram 150A/m² de densidade de corrente catódica, com 100 rpm de intensidade de agitação do eletrólito e tempo de eletroeluição de 164 minutos. Esse resultado é superior ao encontrado por outras técnicas de recuperação de cobre a partir de soluções aquosas originadas de técnicas de reciclagem hidrometalúrgica de placas de circuito impresso de computadores sucata, como por exemplo, precipitação de sais de cobre com 34,3% de recuperação.

Palavras-chave: cobre, reciclagem, sucata eletrônica, eletroeluição, hidrometalurgia

ABSTRACT

This work presents experimental results for copper recovery from synthetic aqueous solution based on leaching liquors for computers recycling using the electroelution technique of cationic polymeric resin Amberlite IR-120® (Merck, USA). The resin was loaded with 200mL of aqueous solution 0.28g/L Cu in 2.18N H₂SO₄ (same metal content of leaching liquor of printed circuit impressed-PCI from scrapped computers) through 10g of polymeric resin bed. The experiments were planned based on a full factorial design method for three variables at two experimental levels. The optimum experimental conditions for maximum copper recovery were 150A/m² for current density, 164 minutes for electroelution and fair stirring intensity around 100rpm. This result is higher than values found for other hydrometallurgical techniques used for recycling of printed circuit boards from scrapped computers, for instance, precipitation of inorganic copper salts having 34.3% copper recovery.

Keywords: copper, recycling, electronic scrap, electroelution, hydrometallurgy

1. INTRODUÇÃO

Os equipamentos eletrônicos fazem parte do cotidiano do homem na sociedade moderna. As inovações tecnológicas não só ampliam as aplicações e usos desses equipamentos, mas também fazem com que esses equipamentos tornem-se obsoletos muito rapidamente. O volume de equipamento eletrônico usado, em especial os microcomputadores pessoais, continua aumentando em todo o planeta. Segundo dados do Greenpeace, por ano, são produzidos até 50 milhões de toneladas desse tipo de dejetos no mundo inteiro e o volume vem crescendo em 5% ao ano na Europa [1].

No Brasil, quem procura descartar um microcomputador obsoleto deve procurar uma empresa de reciclagem, todavia, poucas são as empresas que atuam nesse ramo de atividade com tecnologia apropriada e condições de preservação ambiental. Assim, a sucata eletrônica no Brasil, muitas das vezes, acaba sendo despejada nos aterros sanitários junto com o lixo doméstico. Para evitar a disposição nos aterros industriais, esses microcomputadores usados deveriam ser coletados e processados para reutilização parcial ou total de seus componentes e/ou para a recuperação de metais, vidros, plásticos e materiais em geral.

Um breve levantamento do estado da arte de reciclagem de computadores usados [2] mostra que as rotas tecnológicas para a recuperação de metais, a partir de sucatas eletrônicas, têm se caracterizado pela geração de emissões que são potencialmente tão perigosas quanto os metais sob tratamento, especialmente, os metais pesados presentes nas estruturas dessas sucatas. Isso demonstra a necessidade de agregação de valor tecnológico inovador a essas rotas de tratamento metalúrgico, principalmente, para a indústria brasileira de reciclagem de sucatas eletrônicas.

Entre as tecnologias alternativas para recuperação de metais, a partir das suas soluções aquosas, pode ser mencionada a de troca iônica com resinas poliméricas [3]. As principais vantagens do uso de resinas poliméricas nos sistemas de recuperação de

metais são: elevadas taxas de adsorção metálica, etapas de regeneração da resina com custo financeiro-operacional inferior a outras técnicas hidrometalúrgicas, estabilidade química nas condições de processo, inexpressiva perda de resina ao longo dos processos, com um baixo custo de reposição, além da possibilidade de reciclagem e regeneração da resina permitindo sua reutilização. Além dessas características, deve-se ressaltar o aspecto de baixa contaminação do meio ambiente em decorrência da sua utilização. Um uso potencial desta técnica de eletroeluição de resinas poliméricas de troca iônica é na recuperação metálica de espécies presentes nos efluentes das etapas de processamento hidrometalúrgico das rotas de reciclagem de placas de circuito impresso de microcomputadores sucitados, como por exemplo, nas soluções aquosas esgotadas das etapas de precipitação e de eletrorrecuperação metálica.

A eletroeluição de resinas poliméricas de troca iônica para a recuperação de metais é uma técnica relativamente nova, ainda em fase de desenvolvimento tecnológico e que ainda não possui aplicações industriais registradas na literatura [4, 5, 6]. A técnica consiste na remoção dos íons metálicos adsorvidos a resina, utilizando o efeito combinado do deslocamento físico e/ou reação química com outros íons presentes no eletrólito. Estes efeitos são estimulados pelo campo elétrico gerado na célula de eletroeluição, o qual fornece a força motriz necessária ao sistema para estimular a migração destas espécies iônicas até a superfície do cátodo para ocorrer a deposição metálica.

Este trabalho experimental apresenta os resultados da eletroeluição de resinas poliméricas catiônicas Amberlite IR-120® (Merck, USA), associada à eletrorrecuperação de cobre a partir de um eletrólito aquoso sintético com composição química similar ao do licor de lixiviação com H_2SO_4 da rota hidroeletrometalúrgica adotada para o tratamento de placas de circuito impresso (PCI) de microcomputadores usados destinados ao sucateamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As placas de circuito impresso (PCI) de microcomputadores sucata utilizadas nos experimentos foram fornecidas pelo Setor de Manutenção de Microcomputadores da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

As placas de circuito impresso foram processadas segundo o procedimento descrito por [7]. As PCI foram desmontadas visando remover as partes não-metálicas e as indesejáveis. A maioria das partes metálicas encontradas nas placas de circuito impresso estava fixada por soldagem ou prensagem. As placas desmontadas foram cortadas em guilhotina manual e os fragmentos obtidos foram alimentados em um moinho de panela com temporizador. A moagem foi efetuada por 8 minutos e o produto foi peneirado utilizando-se uma peneira com abertura de malhas padrão de 0,208mm (65 mesh da série Tyler). O material retido na peneira foi realimentado no moinho de panela para remoagem.

O produto da etapa de moagem e com granulometria abaixo de 0,208mm foi lavado com água destilada em béqueres de vidro borossilicato com capacidade nominal de 2000ml. A lavagem foi efetuada em três etapas com 1000 mL de água destilada em cada uma. O objetivo da etapa de lavagem foi a remoção da parte considerada não-metálica do material moído que poderia interferir potencialmente na etapa posterior de lixiviação.

Cobre (2,85%), estanho (3,09%) e alumínio (3,10%) foram as espécies de maior ocorrência no pó lavado e seus teores foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (AA). Este trabalho concentrou-se na recuperação de cobre. Todas as determinações das concentrações de cobre em soluções aquosas produzidas neste trabalho também foram efetuadas por espectrometria de absorção atômica-AA (Perkin Elmer, mod. AAnalyst300-USA).

A resina catiônica Amberlite IR-120® foi, inicialmente, mergulhada em um banho de

água destilada por 24 horas visando promover seu "inchamento", isto é, absorção de água na sua estrutura. Em seguida, a resina foi filtrada e colocada em bandejas retangulares para secagem ao ar. Após a secagem, a resina foi alimentada a um becher contendo solução 2,18N H₂SO₄ para o condicionamento químico da resina por 24 horas. O carregamento metálico da resina catiônica Amberlite IR-120® foi efetuado em uma coluna vertical de troca iônica por percolação descendente da solução aquosa portadora de cobre. A coluna vertical consistiu de uma bureta graduada (capacidade nominal de 50mL) com 620mm de comprimento e 10mm de diâmetro interno. Fez-se a adição de, aproximadamente, 40mL de água destilada para preencher a coluna vertical de troca iônica. Certa quantidade apropriada de lã de vidro foi posicionada na parte inferior e interior da coluna para servir como suporte do leito de resina polimérica a ser formado durante o carregamento metálico. A massa de 10g de resina IR-120® condicionada e seca foi pesada em balança analítica. Essa massa foi transferida para a coluna vertical de troca iônica preenchida com água destilada. A vazão de passagem de solução aquosa através da coluna vertical de troca iônica foi regulada para 10mL.min⁻¹. O carregamento do leito de resina formado ocorreu através da passagem de 200mL de solução aquosa 0,28g/L de Cu em 2,18N H₂SO₄, através do leito de 10g de resina. Após a passagem de 200mL de solução aquosa, o procedimento foi repetido três vezes com a mesma solução aquosa inicialmente empregada no carregamento.

Ao final de cada procedimento, recolheu-se a solução passante pelo leito de resina e armazenou-se em um frasco de vidro para análise química visando determinar a concentração final de cobre. A eficiência de carregamento metálico do leito de resina polimérica foi determinada pela razão entre a massa de Cu adsorvida na resina após a passagem da solução aquosa e a massa de Cu inicialmente presente na solução aquosa de carregamento.

Uma vez concluído o carregamento metálico do leito de resina polimérica, a massa de

resina foi removida da coluna vertical e deixada secar ao ar por 24 horas. A resina seca foi armazenada em sacos plásticos para ser utilizada nos experimentos de eletroeluição.

Os experimentos de eletroeluição foram realizados a temperatura ambiente e

consistiram no emprego de uma célula eletrolítica de seção quadrada (26mm de lado e 50mm de altura) de vidro borosilicato com capacidade nominal de 30mL cuja representação esquemática é mostrada na figura 1 e inspirada no trabalho de Martins[8].

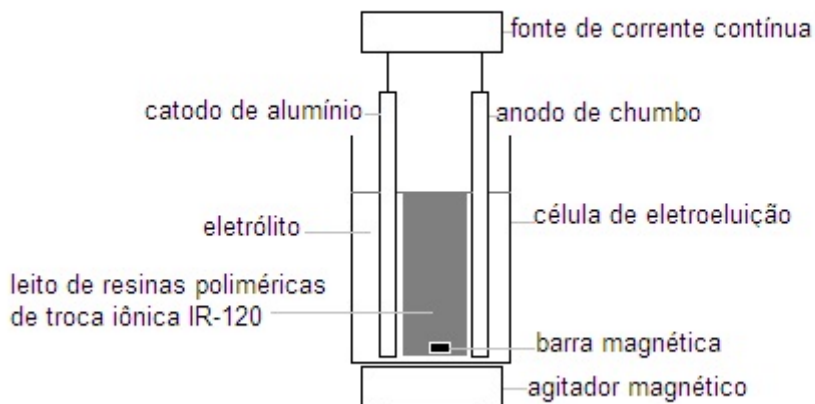


Figura 1. Representação esquemática de célula de eletroeluição usada nos experimentos [8].

O eletrólito da célula de eletroeluição foi formado por 10g de resina seca, condicionada e carregada, imersos em 15mL de solução aquosa 2,18N H₂SO₄. Os eletrodos foram imersos no eletrólito. Uma fonte elétrica (Minipa, mod.MPL-1303M) de corrente contínua foi conectada aos terminais de um catodo de alumínio e um anodo de chumbo metálico, ambos com 70mm de altura, 20mm de largura e 0,2mm de espessura. As espessuras do catodo e anodo foram desconsideradas no cálculo das densidades de corrente.

A densidade de corrente empregada nos experimentos foi determinada com base na área do catodo de alumínio imerso no eletrólito, isto é, a parte do catodo que toma parte das reações de redução das espécies metálicas iônicas na região do católito.

Um multímetro potenciométrico (Agilent, mod. U3401A) foi empregado nos experimentos e permitiu acompanhar os valores de voltagem e corrente catódicas contínuas aplicadas na célula de eletroeluição. Uma barra magnética com imã

(5mm de comprimento) foi imersa no eletrólito aquoso e seu acionamento deu-se por uma placa aquecedora com agitação magnética (Fisatom, mod. 752A), a qual promoveu a agitação do eletrólito. A intensidade de agitação do eletrólito/leito de resina polimérica foi da ordem de 100rpm, aproximadamente, e considerada moderada.

As correntes foram calculadas com base na área dos eletrodos submersa na solução, a área submersa foi de $6,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ para cada eletrodo, sabendo-se que a densidade de corrente é a razão entre a corrente elétrica catódica por unidade de área do catodo imerso no eletrólito.

Ao final do experimento, desligaram-se a fonte de corrente contínua e a placa aquecedora com agitação magnética e transferiram-se os eletrodos da célula para um vidro de relógio, deixando-os secar ao ar por 24 horas. Os eletrodos foram pesados e a massa depositada no catodo foi calculada por diferença entre a massa final e a massa inicial de eletrodo. A massa inicial do catodo foi medida antes do experimento em uma

balança analítica de precisão (marca Top Loading, série mark S).

Após cada experimento, o eletrólito usado e a resina utilizada foram recolhidas para análise química visando a determinação da concentração metálica presente. Para os experimentos de eletroeluição da resina IR-120® empregou-se uma solução aquosa 2,18N H₂SO₄ como eletrólito.

Nos experimentos de eletroeluição de resina polimérica para a recuperação individual de cobre, as massas metálicas depositadas sobre o catodo foram determinadas por pesagem direta do catodo em balança analítica, antes e após cada experimento. A pesagem dos catodos em balança analítica foi precedida de lavagem com água destilada e aspersão de acetona (PA) visando acelerar a evaporação do excesso de água na superfície do catodo de alumínio.

A realização dos experimentos foi baseada em um planejamento estatístico pelo método fatorial completo replicado de três variáveis a dois níveis [9, 10]. As variáveis adotadas neste trabalho foram a densidade de corrente catódica, o tempo de eletroeluição e a intensidade de agitação do eletrólito. Para cada uma das variáveis foram adotados dois níveis experimentais, um superior e outro inferior. Os valores dos níveis experimentais para cada variável foram determinados com base em experimentos preliminares exploratórios. Os 8 experimentos replicados, com um total de 16, foram executados com o emprego de 16 catodos de alumínio, um para cada experimento.

3. RESULTADOS

A análise por difratometria de raios-X do pó gerado pela moagem das placas desmontadas de circuitos impressos de microcomputadores sucitados, e lavado com água destilada, mostrou a presença de Cu metálico e de seus óxidos. Levando-se em conta que o pó analisado vem do processamento de partes metálicas das placas de circuito impresso de microcomputadores sucitados e que estes pós-metálicos encontravam-se livres no seio

da massa de pó e no estado cristalino, era de se esperar a detecção de Cu por difração de raios-X, assim como de outros metais presentes nas PCIs.

Em termos de Cu pode-se afirmar que o teor encontrado é comparável a várias fontes minerais primárias. Em função destes resultados, optou-se por concentrar o trabalho na recuperação de Cu por agregar maior valor econômico aos resultados do projeto.

A escolha da concentração 2,18N H₂SO₄ objetivou avaliar o comportamento de solubilização de cobre presente no pó de alimentação, uma vez que a reciclagem de metais encoraja o uso de reagentes de baixo custo e em menores concentrações relativas visando elevar o retorno financeiro do projeto e reduzir impactos ambientais.

A lixiviação com solução 2,18N H₂SO₄ e borbulhamento de oxigênio foi efetuada com 50g de pó lavado, oriundo do processamento das PCIs de microcomputadores sucitados. A massa de pó foi lixiviada com 500mL de solução 2,18N H₂SO₄ em um béquer de vidro borossilicato de 1000mL de capacidade nominal. A polpa formada foi mantida a 60±2°C e sob intensa agitação magnética por 120 minutos empregando uma placa aquecedora com agitação magnética. Amostras do licor de lixiviação foram coletadas, filtradas, armazenadas em frascos de amostra de vidro borossilicato, identificadas e encaminhadas para determinação da concentração de Cu em solução através de espectrometria de absorção atômica (AA). Os resultados experimentais indicaram que, aproximadamente, 2,8g/L de Cu foram extraídos.

Em relação a etapa de carregamento metálico da resina de troca iônica, amostras de solução aquosa após o carregamento da resina IR-120® foram encaminhadas para análise química via espectrometria de absorção atômica (AA). Levando-se em consideração a concentração inicial da solução aquosa de carregamento antes do contato com o leito de resinas poliméricas, se chegou ao resultado de 0,03g de Cu/g de

resina seca, ou seja, 1,0g de resina seca, continha 0,03g de cobre.

A tabela 2 mostra os resultados obtidos para os experimentos replicados de eletroeluição de resina polimérica catiônica IR-120® para a eletrorrecuperação de cobre. Os resultados foram expressos em massa de cobre (gramas) eletrodepositado sobre o catodo.

Os resultados experimentais obtidos para a eletroeluição da resina IR-120® visando a recuperação de cobre mostrados na tabela 2 possibilitaram a construção do algoritmo de Yates do método fatorial completo a dois níveis experimentais e mostrado na tabela 3. A tabela 1 mostra as variáveis e os níveis experimentais adotados.

Tabela 1. Variáveis adotadas e seus respectivos níveis experimentais

Variáveis	Notação	Níveis experimentais	
		Superior (+)	Inferior (-)
Densidade de corrente catódica (A/m ²)	A	200	100
Tempo de eletrolução (min)	B	30	20
Intensidade de agitação do eletrólito	C	com agitação (100 rpm)	sem agitação

Tabela 2. Respostas experimentais obtidas a partir da Matriz de blocos do método fatorial completo para experimentos replicados de eletroeluição de resinas para a eletrorrecuperação de cobre.

Experimento	A	B	C	Notação	Cu(g)	
					R ₁	R ₂
1	-	-	-	T	0,02	0,01
2	+	-	-	A	0,01	0,02
3	-	+	-	B	0,01	0,02
4	+	+	-	AB	0,02	0,03
5	-	-	+	C	0,01	0,01
6	+	-	+	AC	0,01	0,01
7	-	+	+	BC	0,03	0,04
8	+	+	+	ABC	0,03	0,05

Tabela 3. Algoritmo de Yates construído a partir dos resultados para a eletroeluição da resina IR-120® visando a recuperação de cobre

teste	R1+ R2	Y-1	Y-2	Y-3	DM	Efei to	(R1- R2) ²	Tcal c	Significânci
1	0,03	0,06	0,14	0,33	0,04125	T	0,0001	-	-
2	0,03	0,08	0,19	0,03	0,00375	a	0,0001	1	NS
3	0,03	0,04	0,02	0,13	0,01625	b	0,0001	4,3	S
4	0,05	0,15	0,01	0,03	0,00375	ab	0,0001	1	NS
5	0,02	0,00	0,02	0,05	0,00625	c	0	1,6	NS
6	0,02	0,02	0,11	-	-	ac	0	0,3	NS
				0,01	0,00125				
7	0,07	0,00	0,02	0,09	0,01125	bc	0,0001	3	S
8	0,08	0,01	0,01	-	-	abc	0,0004	0,3	NS
				0,01	0,00125				

α_{exp} :0,0075, EPDM: 0,00375, Ttab: 2,31

A partir dos valores da coluna DM da tabela 3, a variável tempo de eletroeluição e a interação entre o tempo de eletroeluição e a intensidade de agitação do eletrólito foram consideradas significativas, ao nível de 95% de confiança estatística. As demais variáveis e suas respectivas interações não foram consideradas significativas para o intervalo de valores dos níveis experimentais e valor de confiança estatística adotada (95% de confiança ou 5% de erro).

A variável (B) tempo de eletroeluição da resina polimérica catiônica IR-120®, influencia significativamente a resposta para a massa de cobre eletrorecuperada. Além disso, para valores positivos da diferença média (DM), tem-se que maiores tempos de eletroeluição correspondem a maiores massas de cobre eletrorecuperadas. O mesmo raciocínio pode ser adotado para a interação BC (tempo de eletroeluição e intensidade de agitação do eletrólito). Já as demais variáveis, (A, C) e as suas interações (AB, AC e ABC) não foram consideradas significativas ao nível de 95% de confiança estatística ou 5,0% de erro estatístico. Estes

resultados podem ser explicados pelos valores dos níveis experimentais adotados, assim como, pelo grau de confiança estatístico escolhido para este trabalho. Pode-se especular que se modificando os valores dos níveis experimentais adotados, respostas experimentais poderiam ser alcançadas de modo que, as variáveis poderiam tornar-se significativas e a avaliação global do experimento seria alterada.

O efeito positivo da variável tempo pode ser explicado pelo fato de que em um tempo maior há maior possibilidade de deposição do cátion metálico sobre o catodo, aumentando a eletrorecuperação metálica.

A otimização dos resultados experimentais obtidos através do método de otimização pelo passo ascendente foi realizada. A tabela 4 apresenta as respostas estatisticamente previstas para a recuperação de cobre, via eletroeluição das resinas catiônicas, pelo método de otimização pelo passo ascendente.

Tabela 4. Resposta prevista para a recuperação de cobre pelo método do passo ascendente em função dos passos estabelecidos para as variáveis estudadas.

Experimento projetado	A (A.m²)	B (min)	C (100rpm)	Resposta prevista(g)	Resposta prevista(%)
1	150	10	Com agitação	0,0206	6,86
2	150	17	Com agitação	0,0323	10,76
3	150	24	Com agitação	0,044	14,66
4	150	31	Com agitação	0,0557	18,56
5	150	38	Com agitação	0,0674	22,47
6	150	45	Com agitação	0,0791	26,37
7	150	52	Com agitação	0,0908	30,26
8	150	59	Com agitação	0,1025	34,17
9	150	66	Com agitação	0,1142	38,06
10	150	73	Com agitação	0,1259	41,97
11	150	80	Com agitação	0,1376	45,86
12	150	87	Com agitação	0,1493	49,77
13	150	94	Com agitação	0,161	53,66
14	150	101	Com agitação	0,1727	57,56
15	150	108	Com agitação	0,1961	65,37
16	150	115	Com agitação	0,2078	69,26
17	150	122	Com agitação	0,2195	73,91
18	150	129	Com agitação	0,2312	77,06
19	150	136	Com agitação	0,2429	80,96
20	150	143	Com agitação	0,2546	84,86
21	150	150	Com agitação	0,2663	88,77
22	150	157	Com agitação	0,278	92,67
23	150	164	Com agitação	0,2897	96,56

Considerando-se que foram utilizadas 10g de resina seca (0,03g de cobre para cada grama de resina seca) nos testes de eletroeluição, os experimentos projetados de otimização mostrados na tabela 4 foram limitados até o número 23 porque não se pode recuperar uma massa de cobre maior do que 0,30g.

Portanto, as condições consideradas estatisticamente ótimas para a eletroeluição da resina polimérica catiônica IR-120® para 96,5% de recuperação de cobre correspondendo a 0,289g de cobre, são: densidade de corrente igual a 150A/m², tempo de eletroeluição igual a 164 minutos e com intensidade de agitação moderada do eletrólito (100rpm).

Dois experimentos replicados com as condições ótimas estatisticamente calculadas foram realizados com o objetivo de validar a abordagem adotada. Os experimentos comprobatórios obtiveram um valor médio igual a 0,277g de cobre recuperado pela técnica de eletroeluição de resinas poliméricas. Nessas condições otimizadas, 92,3% de cobre inicialmente adsorvidos à resina polimérica catiônica foram recuperados. Esse valor foi considerado válido porque possui apenas 4% de diferença em relação ao resultado estatisticamente calculado (96,5%), portanto, dentro da faixa de até 5% de erro (ou 95% de confiança) aceito pelo modelo estatístico adotado.

O valor experimental de 92,3% de cobre recuperado pela técnica de eletroeluição de resinas poliméricas pode ser considerado satisfatório quando se compara com o resultado de 34,3% para a recuperação de cobre obtido em circunstâncias semelhantes pela técnica de precipitação de sais inorgânicos de cobre para a reciclagem de placas de circuito impresso de computadores sucata [2]. Esse valor demonstra o potencial da técnica para ser usada na recuperação metálica de soluções aquosas.

Não obstante esse potencial, a técnica de eletroeluição de resinas poliméricas ainda carece de um maior desenvolvimento tecnológico para permitir seu emprego na recuperação de outros metais.

4. CONCLUSÕES

O processamento metalúrgico das placas de circuito impresso de microcomputadores sucata mostrou-se factível ao empregar-se a rota hidroeletrometalúrgica proposta neste trabalho experimental ao nível de bancada de laboratório.

A desmontagem das PCI, seguida de corte em pequenos pedaços do suporte das PCI, moagem e lavagem do pó com água destilada permitiu a obtenção de um pó processado com a maior parte dos metais associados.

A lixiviação do pó processado com solução aquosa 2,18N de H₂SO₄ e borbulhamento de oxigênio possibilitou a solubilização daquela espécie metálica de maior valor agregado com vistas a reciclagem, isto é, cobre (28g/L).

O carregamento da resina polimérica catiônica IR-120® deu-se através do emprego de coluna vertical de troca iônica cujo resultado permitiu um carregamento de 0,03g de Cu/g de resina seca para os experimentos de recuperação de cobre.

A realização dos experimentos de eletroeluição da resina IR-120® utilizando o método fatorial completo das três variáveis estudadas permitiu concluir que as variáveis significativas, ao nível de 95% de confiança estatística, para a eletrorrecuperação de cobre foram a variável tempo de eletroeluição e a interação entre o tempo de eletroeluição e a intensidade de agitação do eletrólito. Os valores considerados ótimos para 96,5% de eletrorrecuperação de cobre (0,2897g de cobre) via eletroeluição de resinas e determinados pelo método estatístico de otimização do passo ascendente foram 150A/m² para a densidade de corrente catódica, 164 minutos de eletroeluição e intensidade de agitação moderada do eletrólito de 100rpm.

As condições otimizadas estatisticamente foram testadas experimentalmente e obteve-se um valor de 92,3% de cobre recuperado pela técnica de eletroeluição de resinas

poliméricas aplicada à reciclagem de placas de circuito impresso de computadores sucataados.

De um modo geral, os resultados experimentais mostraram potencial de uso para a recuperação de cobre (92,3%) proveniente da reciclagem de PCIs de computadores destinados ao sucateamento empregando a eletroeluição da resina polimérica catiônica IR-120®. Isso pode ser evidenciado quando se compara com os resultados obtidos por outras técnicas hidrometalúrgicas aplicadas à recuperação de cobre contido em soluções aquosas provenientes de técnicas de reciclagem de PCIs, como por exemplo, a precipitação de sais inorgânicos de cobre [2] em que a recuperação de cobre foi de 34,3% em condições experimentais próximas aquelas utilizadas nesse artigo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

5. BIBLIOGRAFIA

[1] <http://www.greenpeace.org/international/en/campaigns/toxics/electronics/the-e-waste-problem/04/06/2013>.

[2] L. A. Castro, A. H. Martins. Brazilian

Journal of Chemical Engineering, vol. 26, No. 04, pp. 649-657, October - December, 2009.

[3] C.A. Fleming, G. Cromberge. J. S. Afr. Inst. Min. Metall., vol. 84, #5, May, p. 125-137, 1984.

[4] E. P. Zdorova. Tr. Tsent. Nauch.Iss.Gor.Inst., 70:58-61, 1967.

[5] R. Y. Bek. Tsvet.Met. 82-83, 1972.

[6] A.H. Martins. 46º Congresso Anual da ABM - São Paulo, vol. 2, Setembro, p. 519 - 540, 1991.

[7] A.E.C. Peres, A.H. Martins. Proceedings of the VIII International Conference on Clean Technologies for the Mining Industries, Ed. Mario Sanchez, Armando Valenzuela, Eduardo Chaparro, Andrés Reghezza, Jaime Alvarez. Santiago-Chile, April 13-16, 2008, 387 p.

[8] A.H. Martins. Canadian Metallurgical Quarterly, vol.32, nº1, January, pp.85-87, 1993.

[9] G. E. P. Box. Hunter, W.G, Hunter, J. S. - Statistics for Experiments, John Wiley & Sons Inc., 1978.

[10] D. R. Cox. Planning of Experiments, John Wiley & Sons Inc., New York, 208 p., 1958.

[11] G. W. Ewing. Métodos Instrumentais de Análise Química, vol. 1, Ed. Edgard Blucher, São Paulo, Brasil, 1972, 296 p.