



III-1156- RECUPERAÇÃO DE COBRE DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO ATRAVÉS DO PROCESSO DE LIXIVIAÇÃO EM ÁCIDO SULFÚRICO

Ari Clecius Alves de Lima (1)

Engenheiro Químico pela Universidade Federal do Ceará. Mestre e Doutor em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará – UFC. Coordenador do Laboratório de resíduos sólidos e efluentes (Larse) do Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Endereço⁽¹⁾: Rua Professor Rômulo Proença, s/n – Pici – CEP 60440-552 – Fortaleza – CE
e-mail: ari.lima@nutec.ce.gov.br

Gabriel Saraiva da Silva

Engenheiro Metalúrgico pela Universidade Federal do Ceará. Mestrando em Engenharia e Ciência de Materiais pela Universidade Federal do Ceará e membro do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC).

Endereço: Campus do Pici - Bloco 729 CEP 60.440-554 - Fortaleza - CE
e-mail: gabrielsaraivasilva1996@gmail.com

Mauro Andres Cerra Florez

Engenheiro Metalúrgico pela Universidad Industrial de Santander (Colômbia), Mestre e doutor em Engenharia e Ciência de Materiais pela Universidade Federal do Ceará, e doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais pela Universitat Politècnica de Catalunya (Espanha). Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFC, Coordenador do Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) e membro do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC).

Endereço: Campus do Pici - Bloco 729 CEP 60.440-554 - Fortaleza - CE
e-mail: mauro.cerra@metalmat.ufc.br

Daniel de Castro Girão

Químico pela Universidade Federal do Ceará. Mestre e Doutor em Engenharia e ciência de materiais pela Universidade Federal do Ceará – UFC. Coordenador do Laboratório de materiais poliméricos e metálicos (LMPM) do Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nutec).

Endereço: Rua Professor Rômulo Proença, s/n – Pici – CEP 60440-552 – Fortaleza – CE
e-mail: daniel.girao@nutec.ce.gov.br

Walney Silva Araujo

Engenheiro Químico pela Universidade Federal do Ceará. Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e coordenador do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC).

Endereço: Campus Universitário do Pici - Bloco 729 CEP 60440-554 - Fortaleza-CE
e-mail: wsa@ufc.br

RESUMO

A produção de lixo eletrônico vem crescendo no mundo junto ao desenvolvimento tecnológico, o que é um problema, pois as medidas de recuperação desses materiais não crescem nas mesmas proporções. O Brasil é um dos países que mais produz lixo eletrônico, e o sistema para reciclagem do mesmo é ineficiente e quase inexistente. Visto esse problema, o Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC), em associação com o Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC), do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, da Universidade Federal do Ceará, criaram um projeto em parceria que visa o desenvolvimento de tecnologia de recuperação do lixo eletrônico. A realização deste trabalho é parte integrante desse projeto e tem como objetivo o desenvolvimento de um procedimento com instrumentação simples que permita a recuperação de cobre de placas de circuito impresso e a identificação das variáveis desse processo. Neste trabalho, placas de circuito impresso de computadores obsoletos, já moídas grosseiramente por moinho de facas, foram separadas em amostras homogêneas e dissolvidas em água régia por 24 horas, do licor resultante, foram tomadas amostras e foi feita a caracterização através da análise de espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente, e o restante do material foi queimado e macerado para realizar uma caracterização complementar, com fluorescência de raio x, isto com a finalidade de determinar a quantidade total de cobre nas amostras. Dessa forma, foi possível comprovar que a composição do material recebido era cerca de 30% de metais, 30% de polímeros e 40% de cerâmicos. Após a caracterização, foi elaborado e executado um procedimento de lixiviação de 3 amostras em solução, contendo ácido sulfúrico, em meio

oxidante, por 6 horas, e os resultados foram comparados com os da caracterização inicial para identificar a eficiência do processo. Os resultados tiveram algumas variações, mas foi constatado uma recuperação média de cobre de 60%.

PALAVRAS-CHAVE: recuperação de cobre. lixiviação. placa de circuito impresso

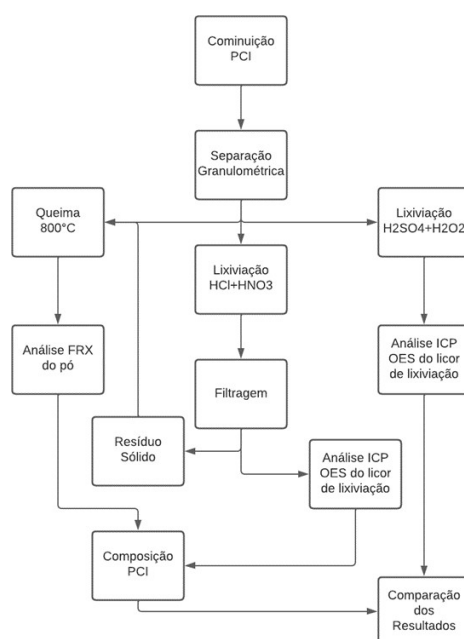
INTRODUÇÃO

Os equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE) tornaram-se uma parte essencial do dia a dia. Sua disponibilidade e uso generalizado permitiram que grande parte da população global se beneficiar de padrões de vida mais elevados. No entanto, a forma atual de como produzimos, consumimos e descartamos o lixo eletrônico é insustentável. Os impactos socioambientais se agravam devido à lenta adoção da reciclagem, ao consumo de recursos, à emissão de gases de efeito estufa e à liberação de substâncias tóxicas provenientes desse material. Consequentemente, muitos países são desafiados pelos consideráveis problemas ambientais e de saúde humana relacionados aos riscos do gerenciamento inadequado de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REE), amplamente conhecido como lixo eletrônico (FORTI et al., 2020). Placas de circuito impresso (PCI) é um dos tipos de lixo eletrônico, seu tratamento é complexo, necessitando de aprimoramento de tecnologias de recuperação e desenvolvimento de novas tecnologias, para recuperar esse material. Os processos envolvidos em sua recuperação podem ser mecânicos, pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos, eletrometalúrgico, biometalúrgicos, ou mesmo, a combinação deles (GERBASE; OLIVEIRA, 2012). A hidrometalúrgia oferece custo de capital relativamente baixo, alto teor de recuperação, possibilidade de adequação para aplicação em pequena escala e menor impacto ambiental pela não emissão de gases e resíduos perigosos (TUNCUK et al., 2012). A lixiviação é um dos processos hidrometalúrgico, em que soluções ácidas ou alcalinas são postas a reagir com material provocando a dissolução dos metais presentes. Estes metais, posteriormente, podem ser recuperadas do licor de lixiviação, seguindo etapas de separação, como, filtração, destilação e precipitação (GERBASE; OLIVEIRA, 2012). Dentre os processos de lixiviação ácida, o processo de lixiviação com ácido sulfúrico, em meio oxidante, tem se mostrado eficiente, segundo Moraes (2011), nesse processo é possível realizar recuperação de até 99% de massa do cobre presente nas amostras, se aplicadas às condições adequadas de processo. Dessa forma, foi aplicado um processo de lixiviação semelhante neste trabalho, buscando uma montagem simples, que permita recuperação do cobre presente em placas de circuito impresso.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de lixiviação, do presente trabalho, foram realizados no Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC), da Universidade Federal do Ceará (UFC), as análises dos metais pela técnica Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) foram realizadas no Laboratório de Química Instrumental (LQI), do Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC), e as análises de fluorescência de raios X por energia dispersiva (FRX) foram realizados no Núcleo de Química Forense (NUQFO), da Perícia Forense do Estado do Ceará (PEFOCE). Foram entregues 795,29 g de placas de circuito impresso com seus componentes, grosseiramente fragmentadas por moinho de facas, a partir deste material foram estabelecidas as amostras para os diferentes ensaios. O fluxograma do processo realizado pode ser observado na figura 1.

Figura 1 – Fluxograma do processo realizado.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

RESULTADOS

Pré-tratamento

A separação granulométrica foi realizada com objetivo de formar amostras mais homogêneas usando um pouco de material dos tamanhos separados previamente. Ao mesmo tempo, também foi possível fazer algumas observações: na peneira de 9,5 mm, foi encontrado maior quantidade de pedaços de plástico, borracha e acrílico, não úteis para o processo de recuperação de metais, mas também ficaram retidos PCI's mal cominuídas, resistores e pedaços de aço, provavelmente do encaixe para processador. O material retido na peneira de 4,75 mm é o que contém maior quantidade de PCI's propriamente dita, e também configura a maior parte do material trabalhado. Já na peneira de 2,36 mm é possível encontrar pedaços de plástico, de solda de componentes, além de fios de cobre, com cobertura de resina, e PCI's bem finos. Por fim, no material de fundo, foi observado uma poeira escura, provavelmente de fibra de vidro e a presença de material ferro magnético, quando aproximado de ímã de neodímio. A distribuição de massa do material peneirado pode ser vista na tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição de massa de acordo com granulometria.

Peneiras	Massa	%
9,50 mm	257,36 g	32%
4,75 mm	462,56 g	58%
2,36 mm	69,94 g	9%
FUNDO	5,43 g	1%

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Caracterização ICP OES

A concentração dos metais presentes na solução de água régia, obtida através do método ICP-OES, em mg/L, e a porcentagem de massa referente a massa total posta a reagir, %m/m, estão presentes na tabela 2.

Com os resultados da caracterização por água régia, é factível verificar que o metal com maior concentração na solução, portanto no material de estudo, é o cobre, com o correspon- dente a 15,7% de massa. Isso indica que, no total do material recebido, é possível remover cerca de 124,86 g de cobre. Além disso, ferro e alumínio foram identificados com alta concentração

Tabela 2 – Resultado da caracterização do licor de lixiviação por ICP OES.

Metal	Ensaio A		Ensaio B		Ensaio C	
	mg/L	%m/m	mg/L	%m/m	mg/L	%m/m
Al	16,040	3,009%	0,760	0,148%	8,783	1,667%
As	0,000	0,000%	0,004	0,001%	0,011	0,002%
B	0,145	0,027%	0,158	0,031%	0,208	0,039%
Ba	<LQ	-	0,017	0,003%	<LQ	-
Be	<LQ	-	0,002	0,000%	<LQ	-
Bi	<LQ	-	<LQ	-	<LQ	-
Ca	0,731	0,137%	0,612	0,119%	0,348	0,066%
Cd	0,001	0,000%	0,001	0,000%	0,001	0,000%
Co	0,009	0,002%	0,090	0,018%	0,034	0,007%
Cr	1,022	0,192%	1,363	0,266%	2,140	0,406%
Cu	92,885	17,423%	76,665	14,945%	78,535	14,905%
Fe	22,406	4,203%	22,576	4,401%	41,336	7,845%
K	0,147	0,028%	0,092	0,018%	0,030	0,006%
Li	0,054	0,010%	0,026	0,005%	0,017	0,003%
Mg	0,059	0,011%	0,032	0,006%	0,011	0,002%
Mn	0,576	0,108%	0,186	0,036%	0,567	0,108%

Mo	0,044	0,008%	0,004	0,001%	0,009	0,002%
Na	0,322	0,060%	0,212	0,041%	0,083	0,016%
Ni	3,327	0,624%	3,103	0,605%	1,903	0,361%
P	0,156	0,029%	0,076	0,015%	0,106	0,020%
Pb	2,859	0,536%	5,205	1,015%	5,935	1,126%
Sb	0,211	0,040%	0,114	0,022%	0,059	0,011%
Sc	<LQ	-	<LQ	-	<LQ	-
Se	<LQ	-	<LQ	-	<LQ	-
Sr	0,007	0,001%	0,008	0,002%	0,003	0,001%
V	0,001	0,000%	<LQ	-	0,008	0,002%
Zn	16,627	3,119%	6,563	1,279%	10,987	2,085%

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

e devem ser levados em consideração quando for interesse remover cobre da solução. Outro metal de grande importância econômica também encontrado, foi o níquel, com cerca de 0,5% em massa, o que equivale a 3,97g do total de material recebido.

O resultado da pesagem dos materiais sólidos, após a reação por 24 horas, filtragem, lavagem e secagem, em estufa à 60°C por 24 horas, estão expostos na tabela 3.

Tabela 3 – Material retido no filtro.

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Total	15,994 g	15,39 g	15,807 g
Material retido	9,956 g	11,339 g	10,989 g
Massa de metais teórica	6,038 g	4,051 g	4,818 g
Massa de metais real	4,729 g	3,536 g	4,533 g
Diferença	22%	12,7%	5%

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

A partir do resultado da pesagem foi possível verificar que, em teoria, 27% do total são metais. Isto pode ser usado apenas como referência, pois não é possível afirmar que todo metal foi solubilizado. Ao comparar a massa teórica com a massa real, calculada a partir da caracterização ICP-OES, foi verificada diferença entre o resultado teórico e o real. Isto pode estar associado à perda de material durante a filtragem e a não homogeneização da solução no momento de retirada das alíquotas.

Caracterização FRX

O processo de queima foi utilizado para ajudar na pulverização do material de estudo, para então, ser realizada a análise de FRX. Esta foi feita com o intuito de complementar a caracterização pela técnica de ICP-OES. A queima à 800°C, no forno mufla, permitiu estimar a quantidade de materiais voláteis a esta temperatura na amostra (ver tabela 4), que, em sua maioria, são polímeros. Quando iniciada a queima, foi possível observar grande quantidade de fumaça preta saindo do forno, o que indica volatilização de polímeros e, ao retirar do forno, o material se encontrou quebradiço, expondo pequenas placas de cobre e coberto de cinzas (ver figura 2).

Tabela 4 – Distribuição de massa de acordo com granulometria.

	Antes	Depois	Sólido	Volátil	%m/m
Cadinho 3	52,034 g	47,028 g	5,983 g	5,006 g	29,4 %
Cadinho 4	45,007 g	43,823 g	2,777 g	1,184 g	29,9 %

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Dos dados apresentados, foi possível determinar que a quantidade de polímeros nas placas estudadas é de 29%. As concentrações dos metais em porcentagem de massa, obtidas do ensaio de FRX, foram as observadas na tabela 5.

Os resultados do FRX para as amostras A4.a e A4.b confirmaram que a concentração de cobre no material de estudo está em torno de 15%. A alta concentração de silício está relacionada ao material cerâmico das PCI's, já a alta porcentagem de cálcio está ligada ao processo de queima aplicado. Ademais, foi averiguado a quantidade de estanho em torno de 3%, e que na amostra 3 sua quantidade está bem reduzida, o que leva a considerar que há estanho em solução, embora não foi observado no ICP-OES, por problemas no procedimento. Os resultados do FRX para a amostra 3 são complementares aos resultados por ICP-OES para a mesma amostra. Pela análise dos resultados, foi possível verificar que a maior parte do cobre foi recuperado

Figura 2 – Material ao ser retirado do forno.



Fonte: autor (2022).

Tabela 5 – Resultado da caracterização por FRX.

Metal	A4.a	A4.b	A3
Ba	23,76%	1,68%	2,34%
Br	0,72%	0,64%	4,19%
Ca	31,71%	33,42%	41,34%
Cu	16,27%	14,42%	2,62%
Fe	1,02%	0,90%	1,75%
K	0,07%	0,06%	0,18%
Ni	0,05%	0,02%	0,02%
Pb	0,53%	0,67%	1,90%
S	0,57%	0,92%	0,29%
Si	41,01%	41,25%	42,68%
Sn	3,16%	3,52%	0,10%
Sr	0,50%	0,51%	0,56%
Ti	0,75%	0,80%	0,93%
Zn	1,22%	1,14	0,34%
Zr	0,04%	0,05%	0,08%
Mn	-	-	0,10%

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

do material de estudo, assim como todos os outros metais tiveram substancial redução em sua concentração. Entretanto, não foi possível verificar a presença de alumínio no ensaio de FRX, possivelmente, por este não estar presente na amostra 4 devido a heterogeneidade do material. Já na amostra 3, por ter sido totalmente solubilizada, devido à sua alta reatividade com água régia.

Lixiviação ácida em meio oxidante

Os resultados das caracterizações dos metais disponibilizados nas lixiviações, após 6 horas de reação com ácido sulfúrico, obtidos pelo método ICP OES estão apresentados em gramas na Tabela 6, onde %m/m é a porcentagem de metal recuperado do valor médio inicial adicionado, m corresponde ao valor médio em gramas, recuperado após 6 horas nos três ensaios e desvpad é o desvio padrão referente a média de massas. As tabelas referentes aos três ensaios estão apresentadas nos apêndices A, B e C.

Tabela 6 – Resultado da caracterização do licor de lixiviação com ácido sulfúrico.

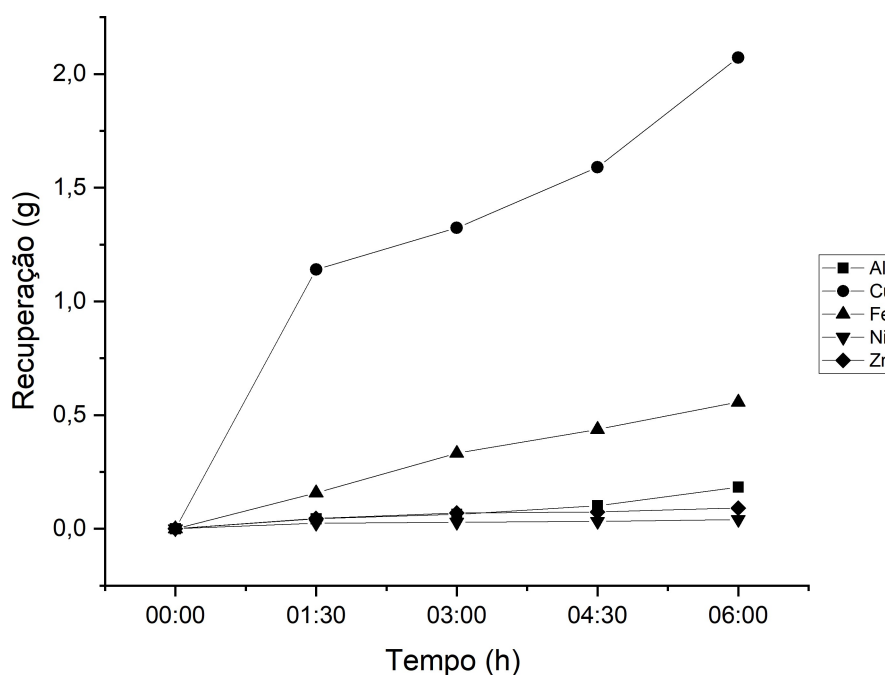
Elemento	m (g)	%m/m	desvpad
Al	0,206951	1,35%	0,12421
As	<LQ	-	-
B	0,006968	0,05%	0,00583
Ba	0,003670	0,02%	0,00423
Be	<LQ	-	-
Bi	<LQ	-	-
Ca	0,147492	0,96%	0,11888
Cd	0,000039	0,00%	0,00003
Co	0,002932	0,02%	0,00276
Cr	0,000547	0,00%	0,00029
Cu	1,550264	10,08%	1,13274
Fe	0,386414	2,51%	0,34744
K	0,054835	0,36%	0,05012
Li	0,003500	0,02%	0,00277
Mg	0,095266	0,62%	0,08448
Mn	0,002792	0,02%	0,00158
Mo	0,000039	0,00%	0,00002
Na	0,211266	1,37%	0,23833
Ni	0,030138	0,20%	0,02167
P	0,007957	0,05%	0,00472
Pb	0,013361	0,09%	0,00938
Sb	0,013719	0,09%	0,00837
Sc	0,000003	0,00%	0,00000
Se	0,000376	0,00%	0,00048
Sn	0,166322	1,08%	0,15062
Sr	0,001987	0,01%	0,00163
V	0,000024	0,00%	0,00001
Zn	0,064477	0,42%	0,05700

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Com os resultados da lixiviação com ácido sulfúrico, foi verificado que o metal com maior concentração em solução nos três ensaios foi o cobre, com a média de 10% da massa do material posto a reagir, o que equivale a 52% da massa dos metais recuperados. Além disso houve considerável solubilização indesejada de outros metais, como é o caso do ferro e do alumínio.

Ademais, foi observada uma variação nas massas obtidas, dando destaque ao ensaio B, do qual a massa de cobre recuperada ficou mais próxima da recuperação ideal, em torno de 16% da massa total, como pode ser verificado no B. De acordo com Moraes (2011), o aumento da concentração de cobre, em condições semelhantes a deste trabalho, cessaram após 2 horas de reação. Dessa forma, já que o material de estudo apresenta maior granulometria, foi considerado um maior tempo de reação, mas, embora este tenha sido maior, não foi possível atingir a concentração de cobre dos ensaios em água régia. Como apresentado na figura 3, nota-se que existe um aumento da lixiviação, com um acréscimo de temperatura, porém não se atingiu um patamar constante, mesmo após 6 horas de reação. O gráfico da figura 3 expõe a quantidade de massa recuperada em gramas pelo tempo de reação.

Figura 3 – Recuperação de metais.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

As massas dos metais recuperados dos ensaios A, B e C estão dispostos na tabela 7, em que m é a massa recuperada em gramas, e %m/m é a porcentagem de massa recuperada em comparação ao total posto a reagir.

A variação dos resultados está associada a alguns fatores, entre os quais podemos citar a adição manual de peróxido de hidrogênio, que proporcionou diferentes velocidades de adição, afetando o aquecimento constante da reação, que subia a 85°C, devido ao caráter

Tabela 7 – Resultado da recuperação de metais.

Ensaio	m (g)	%m/m
A	3,16	20,21%
B	4,50	29,41%
C	1,04	6,82%

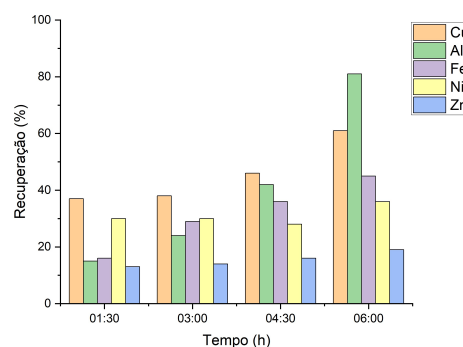
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

exotérmico da reação de oxidação, e após alguns minutos caia drasticamente para 70°C. Outro fator relevante é a heterogeneidade do material usado, PCI's de diferentes modelos, ano de fabricação e tecnologia podem apresentar composição diferente e como afirmado por SOARES et al. (2019) apud

MORAES, 2011), o cobre, em granulometrias maiores que 1 mm, é encapsulado por material cerâmico e polimérico, o que dificulta a solubilização no ácido, pois o cobre precisa estar exposto ao ataque ácido para reagir. Vale ressaltar que, nos momentos em que era adicionado o peróxido de hidrogênio, podem ter surgido microcélulas dentro da solução, na qual houve algumas variações no pH e no potencial de reação, com isso, favorecendo a dissolução de outros metais, preferencialmente ao cobre.

As porcentagens de lixiviação usando ácido sulfúrico tomaram como base a quantidade máxima de cobre encontrada com água régia, a partir disso foi montado o gráfico da figura 4, onde é possível observar a recuperação média de cobre e outros metais em relação ao tempo. A eficiência de recuperação média de massa, após as 6 horas, foi a de alumínio, com 81%, seguida do cobre, com de apenas 61%, ferro 45%, níquel 36% e Zinco 19%. Ademais, foi possível observar que as recuperações relativas de cobre e níquel eram maiores nas primeiras 3 horas, provavelmente, pela maior disponibilização de ácido no início das reações.

Figura 4 – Recuperação de metais relativa.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

CONCLUSÕES

O Verificou-se que a análise por ICP-OES, do licor de lixiviação em água régia por 24 horas, se mostrou eficiente na caracterização dos metais presentes, pois teve seus resultados confirmados pela análise de FRX. A composição das PCI's estudadas foi de 29% de polímeros, aproximadamente 27,5% de metais e 43,5% de cerâmicos. Além disso, foi identificado, quanto a massa, que há 15,7% de cobre e 0,5% de níquel. No que diz respeito a análise por ICP-OES do licor de lixiviação com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio, foi possível recuperar o valor médio de 10,08% de massa de cobre do material utilizado, após 6 horas de reação, o que corresponde a 61% do resultado da caracterização. Além do cobre, o ferro, o alumínio, o níquel e o zinco foram lixiviados. As eficiências da recuperação de massa, em comparação com os resultados da caracterização, foram de 45% para o ferro, 81% para o alumínio, 36% para o níquel e 54% para zinco. Os resultados obtidos em cada uma das triplicatas da lixiviação ácida em meio oxidante apresentaram algumas variações, estas estão associadas às diferentes velocidades de acréscimo de peróxido de hidrogênio, adicionado manualmente à solução. Essas variações poderiam ser amenizadas com a utilização de um funil de adição por gotejamento, porém o propósito do trabalho era realizar a montagem de maneira mais simples. Ademais, a quantidade de H₂O₂, utilizada nos procedimentos, foi estimada em excesso para garantir que todo cobre presente fosse lixiviado, porém este excesso pode ter diluído o ácido, reduzindo sua capacidade de reagir com os metais presentes. Portanto, é necessário que em trabalhos futuros, sejam realizados testes com maiores e menores quantidades de H₂O₂, para compreender seu comportamento na recuperação de cobre. A eficiência de recuperação de cobre alcançada de 61% está correlacionada ao tempo de reação, certamente, devido à granulometria grosseira e à agitação da solução utilizada, consequentemente, as 6 horas não foram suficientes para a dissolução de todo cobre presente no material posto a reagir. Dessa forma, um fator a se considerar, em trabalhos futuros, é a redução da granulometria para valores menores que 4,75 mm, por meio da utilização de moinho de facas, e aumento velocidade de agitação da solução para valores maiores que 450 rpm. Além disso, outro fator a se considerar, para melhorar a extração seletiva do cobre, é a medição do pH, durante os ensaios, para auxiliar no controle das reatividade da solução. Esse controle pode ser realizado com o uso do equipamento pHmetro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 CORCINI, T. A.; MONNERAT, C. S.; COUTO, H. M. do. Recuperação de metais a partir de sucatas eletrônicas. *Revista Engenharia de Interesse Social*, v. 1, n. 2, 2017.
- 2 FORTI, V.; BALDE, C. P.; KUEHR, R.; BEL, G. The global e-waste monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential. United Nations University/United Nations Institute for Training and Research, 2020.
- 3 GERBASE, A. E.; OLIVEIRA, C. R. d. Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química. *Química Nova, SciELO Brasil*, v. 35, p. 1486–1492, 2012.
- 4 MEHL, E. L. d. M. Conceitos fundamentais sobre placas de circuito impresso. Universidade Federal do Paraná– UFPR. Disponível em: < http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI_Conceitos_fundamentais.pdf>. Acesso em, v. 20, 2017.
- 5 MORAES, V. T. d. Recuperação de metais a partir do processamento mecânico e hidrometalúrgico de placas de circuito impresso de celulares obsoletos. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.
- 6 OLIVEIRA, R. da S.; GOMES, E. S.; AFONSO, J. C. O lixo eletroeletrônico: Uma abordagem para o ensino fundamental e médio. ROCHA, A. C. da; CERETTA, G. F.; CARVALHO, A. de P. Lixo eletrônico: um desafio para a gestão ambiental. *Revista TechnoEng-ISSN 2178-3586*, v. 2, 2020.
- 7 SILVA, E. C. d. Recuperação de metais em placas de circuito impresso. Dissertação (Mestrado) — Brasil, 2018.
- 8 SILVAS, F. P.; Jiménez Correa, M. M.; CALDAS, M. P.; de Moraes, V. T.; ESPINOSA, D. C.; TENÓRIO, J. A. Printed circuit board recycling: Physical processing and copper extraction by selective leaching. *Waste Management*, v. 46, p. 503–510, 2015. ISSN 0956-053X. Disponível em: .
- 9 SOARES, A.; COSTA, A.; SALVADOR, F.; SOUSA, R. Recuperação de cobre contido em placas de circuito impresso via lixiviação Ácida e oxirredução. XXXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados ENEMP 2019, 2019. Disponível em: . Acesso em: 01 dez. 2022.
- 10 TUNCUK, A.; STAZI, V.; AKCIL, A.; YAZICI, E.; DEVECI, H. Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*, v. 25, n. 1, p. 28–37, 2012. ISSN 0892-6875. Disponível em: .
- 11 WIDMER, R.; OSWALD-KRAPF, H.; SINHA-KHETRIWAL, D.; SCHNELLMANN, M.; BöNI, H. Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 25, n. 5, p. 436–458, 2005. ISSN 0195-9255. Environmental and Social Impacts of Electronic Waste Recycling. Disponível em: