



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

GABRIEL SARAIVA DA SILVA

**RECUPERAÇÃO DE COBRE DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO ATRAVÉS DO
PROCESSO DE LIXIVIAÇÃO EM ÁCIDO SULFÚRICO**

FORTALEZA

2022

GABRIEL SARAIVA DA SILVA

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

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez

Coorientador: Prof. Dr. Walney Silva Araujo

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S58r Silva, Gabriel Saraiva da.
Recuperação de cobre de placas de circuito impresso através do processo de lixiviação em ácido sulfúrico / Gabriel Saraiva da Silva. – 2022.
38 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez.
Coorientação: Prof. Dr. Walney Silva Araujo.

1. Recuperação de cobre. 2. Lixiviação. 3. Placa de circuito impresso. I. Título.

CDD 669

GABRIEL SARAIVA DA SILVA

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

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: 19 de Dezembro de 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Walney Silva Araujo (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Daniel de Castro Girão
Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará
(NUTEC)

Dedico este trabalho a todos que fizeram parte da
minha trajetória acadêmica, professores, amigos
e familiares.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Deyvens e Tais, e minhas avós, Maria José e Maria Tusnelda, pelo suporte incondicional durante toda minha vida.

À Alana, por sempre estar ao meu lado nos momentos mais difíceis e nunca ter me deixado desistir.

À minha filha Isabel, por me incentivar a sempre ser melhor.

Aos Professores, Dr. Mauro Andres Cerra Florez e Dr. Walney Silva Araujo pela orientação, ensinamentos e por me dar a oportunidade de finalizar este ciclo.

Ao Dr. Daniel de Castro Girão, por ter aceitado fazer parte da minha banca e dedicado seu tempo a este trabalho.

Ao Dr. Ari Clecius Alves de Lima, por ter fornecido o material para realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) e ao Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial (NUTEC), pela oportunidade de realização deste trabalho.

À Milena, Caio, Luiz, Henrique e Roberta pelo apoio na realização dos ensaios.

Aos meus amigos, Júlio David, Francisco José, Pedro Victor, Gerardo, Elaine, Stefanie, Ingrid, Daniel, Lucas, Valdimir e Diego pela amizade e por estarem presentes neste momento da minha vida.

“A imaginação é mais importante que o conhecimento, porque o conhecimento é limitado, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro.”

(Albert Einstein)

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.

ABSTRACT

The production of electronic waste has been growing in the world along with technological development, which is a problem because the recovery measures for these materials do not grow in the same proportions. Brazil is one of the countries that produce the most electronic waste, and the system for recycling them is inefficient and almost non-existent. Given this problem, the Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC) in association with the Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) of the Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais at the Universidade Federal do Ceará, created a project in a partnership that aims to the development of e-waste recovery technology. This work is an integral part of this project and aims to develop a procedure with simple instrumentation that allows the recovery of copper from printed circuit boards and to identify the variables of this process. In this work, printed circuit boards from obsolete computers, already coarsely ground in a cutting mill, were separated into homogeneous samples and dissolved in aqua regia for 24 hours, of the resulting liquor was taken as a sample, and characterization was performed through the Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP OES) analysis, and the rest of the material was burned and macerated, to carry out a complementary characterization with x-ray fluorescence, all the above to determine the total amount of copper in the samples. From the characterization, it was possible to verify that the composition of the material received was around 30% metals, 30% polymers, and 40% ceramics. After the characterization, a leaching procedure of 3 samples in a solution containing sulfuric acid in an oxidizing medium for 6 hours was elaborated and executed and the results were compared with those of the initial characterization to identify the efficiency of the process. The results had some variations, but an average copper recovery of 60% was found.

Keywords: copper recovery. leaching. printed circuit board.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama cobre-água a 25°C.	17
Figura 2 – Diagrama cobre-água a 50°C.	18
Figura 3 – Diagrama cobre-água a 75°C.	18
Figura 4 – Diagrama ferro-água a 25°C.	19
Figura 5 – Fluxograma do processo realizado.	20
Figura 6 – Material recebido.	21
Figura 7 – Licor de lixiviação.	22
Figura 8 – Equipamento iCAP 6000 SERIES, ICP Spectrometer da marca Thermo Scientific.	23
Figura 9 – Material retido no filtro após lavagem e secagem.	24
Figura 10 – Material retido no filtro dentro de estufa a 60°C.	24
Figura 11 – Equipamento EDX-7000 fabricante SHIMADZU.	25
Figura 12 – Montagem das vidrarias para o ensaio de lixiviação.	26
Figura 13 – Material ao ser retirado do forno.	31
Figura 14 – Recuperação de metais.	33
Figura 15 – Recuperação de metais relativa.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição Média de PCI	15
Tabela 2 – Separação por granulometria.	22
Tabela 3 – Amostras para realização da lixiviação ácida em meio oxidante.	25
Tabela 4 – Distribuição de massa de acordo com granulometria.	28
Tabela 5 – Resultado da caracterização do licor de lixiviação por ICP OES.	29
Tabela 6 – Material retido no filtro.	29
Tabela 7 – Distribuição de massa de acordo com granulometria.	30
Tabela 8 – Resultado da caracterização por FRX.	31
Tabela 9 – Resultado da caracterização do licor de lixiviação com ácido sulfurico.	32
Tabela 10 – Resultado da recuperação de metais.	34
Tabela 11 – Resultado da lixiviação da amostra A.	37
Tabela 12 – Resultado da lixiviação da amostra B.	38
Tabela 13 – Resultado da lixiviação da amostra C.	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo Geral	13
2.2	Objetivos Específicos	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1	Lixo Eletrônico	14
3.2	Placas de Circuito Impresso	15
3.3	Processos hidrometalúrgicos	16
3.3.1	<i>Lixiviação ácida</i>	16
4	METODOLOGIA	20
4.1	Pré-tratamento	21
4.2	Caracterização	21
4.2.1	<i>ICP OES</i>	21
4.2.2	<i>FRX</i>	23
4.3	Lixiviação ácida em meio oxidante	25
5	RESULTADOS	28
5.1	Pré-tratamento	28
5.2	Caracterização ICP OES	28
5.3	Caracterização FRX	30
5.4	Lixiviação ácida em meio oxidante	32
6	CONCLUSÕES	35
	REFERÊNCIAS	36
	APÊNDICES	37
	APÊNDICE A – Ensaio A	37
	APÊNDICE B – Ensaio B	38
	APÊNDICE C – Ensaio C	39

1 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. Conseqüentemente, 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.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Determinar um procedimento com montagem simples, que permita a recuperação do cobre de placas de circuito impresso, através do processo de lixiviação em ácido sulfúrico.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a montagem do processo de lixiviação com ácido sulfúrico e com acréscimo de peróxido de hidrogênio;
- Quantificar as porcentagens dos metais recuperados para cada tipo de amostra;
- Identificar as variáveis que tem maior impacto no processo de recuperação, e sugerir mudanças que possam aumentar a eficiência da recuperação do cobre.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Lixo Eletrônico

Lixo eletrônico ou e-waste é um termo genérico que abrange várias formas de equipamentos elétricos e eletrônicos, que deixaram de ter qualquer valor para seus proprietários (WIDMER *et al.*, 2005). Cada produto tem material, processamento e reciclagem, de maneiras diferentes, e podem apresentar riscos ambientais e de saúde, caso não sejam gerenciados de maneira correta (FORTI *et al.*, 2020).

A inovação tecnológica e a “obsolescência programada” são os grandes responsáveis para que os EEE se transformem em lixo eletrônico num curto espaço de tempo. Outro fator diretamente ligado à sua produção, é a influência do consumismo, este cria a necessidade dos usuários de substituir equipamentos antigos e obsoletos pelos mais novos, de forma compulsória. Existe grande preocupação quanto aos impactos socioambientais associados ao esgotamento dos recursos naturais e ao rápido crescimento desses resíduos, que, por consequência, cria incapacidade de processá-los, gerando um grande risco ao meio ambiente e à saúde pública, devido a extração de insumos necessários para sua produção, acúmulo de resíduos e a presença de metais tóxicos na sua composição (OLIVEIRA *et al.*, ; ROCHA *et al.*, 2020).

De acordo com Forti *et al.* (2020), o consumo de EEE aumenta anualmente a média de 2,5 milhões de toneladas métricas (Mt). Em 2019, o mundo produziu 53 Mt, o que representa um crescimento de 9,2 Mt, desde de 2014. Projeções indicam que em 2030, a produção de lixo eletrônico chegará a 74,7 Mt, isso mostra o quão crítica está essa situação. Já a reciclagem no mundo em 2019 foi de 9,3 Mt, correspondendo à 17,4% do lixo eletrônico gerado no mesmo ano. Dessa forma, mostra-se que as atividades de reciclagem não acompanham o aumento da produção do lixo. O continente com as maiores taxas de coleta e reciclagem é a Europa, com 42,5%, a Ásia ficou em segundo lugar, com 11,7%, América e Oceania foi semelhante, com 9,4% e 8,8%, respectivamente, a África teve a taxa de crescimento mais baixa, com 0,9%. O Brasil é o país da América latina que mais produz lixo eletrônico, com total de 2,14 Mt em 2019, e possui uma taxa de reciclagem muito baixa, menos de 3% (FORTI *et al.*, 2020).

3.2 Placas de Circuito Impresso

As placas de circuito impresso são essenciais para os equipamentos eletroeletrônicos, elas são responsáveis pela interligação dos componentes soldados nas mesmas. A constituição dessas placas é diversa, o que dificulta a sua reciclagem. Porém a concentração de metais em sua composição é bastante superior a encontrada em minérios, destacando a importância da sua recuperação. As PCI são constituídas por uma fina camada de cobre, coberta por laminados que podem ser de fenolite, de fibra de vidro, da combinação das duas, formando um compósito, e de cerâmicos. Outros metais, com alto valor agregado também podem ser encontrados, entre eles o ouro, prata e níquel, em concentrações maiores que nos minérios (GERBASE; OLIVEIRA, 2012). A composição média de uma PCI podem ser encontrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição Média de PCI

Componentes	Composição
Cu	14%
Fe	6%
Ni	2%
Zn	2%
Sn	2%
Ag	0,30%
Au	0,04%
Pd	0,02%
Plásticos	19%
Bromo	4%

Fonte: adaptada de Gerbase e Oliveira (2012)

As PCI podem ser classificadas de duas formas, quanto ao número de faces de cobre e ao tipo de material utilizado na sua laminação. Por sua vez, a placas podem ser classificadas quanto ao número de faces, podendo ser simples, duplas ou de multicamadas, esta com maior tecnologia (MORAES, 2011). Já quanto ao tipo de laminado, são diversas as suas classificações, como podem ser vistas no anexo 1, mas as mais comuns são as do tipo FR-1, FR-2, FR-4 e CEM-1.

Os laminados das placas do tipo FR-1 e FR-2 (FR- resistência ao fogo) são fabricados em celulose e banhadas com resina fenolítica, geralmente na cor marrom claro. Pelo fato da base ser de celulose, as placas FR-1 e FR-2 são hidrocópicas, o que prejudica as características isolantes quando expostas a umidade. Já as placas de FR-4 são de fibra de vidro, com banho de resina epóxi, na cor translúcida amarelada, o que garante sua impermeabilidade, mas são extremamente difíceis de serem cortadas ou furadas. Por fim, a PCI de CEM-1 são laminadas

com resina epóxi e composite, que é um compósito de fibra de vidro com celulose, com a cor variando de branco a amarelo. Os materiais cerâmicos comumente encontrados são a sílica, a alumina, a mica e o titanato de bário (MORAES, 2011; MEHL, 2017).

3.3 Processos hidrometalúrgicos

Os processos hidrometalúrgicos consistem na exposição do material sólido a soluções ácidas ou alcalinas, com a finalidade de recuperação da parte metálica presente, isto faz com que este meio seja viável para a extração de metais das PCI's (SILVA, 2018).

Comparando os processos pirometalúrgicos, a hidrometalúrgia oferece custo de capital relativamente baixo, alto teor de recuperação, com possibilidade de adequação para aplicação em pequena escala, e menor impacto ambiental pela não emissão de gases e pós perigosos. Um dos caminhos hidrometalúrgicos compreende o pré-tratamento mecânico dos resíduos sólidos, lixiviação dos metais, por um lixiviante adequado, purificação do lixiviado e recuperação de metais. Nas PCI's os elementos metálicos são cobertos ou encapsulados por uma variedade de materiais plásticos ou cerâmicos, isto torna necessária a redução de tamanho desses elementos por um pré-tratamento mecânico que expõe os metais de interesse à ação do lixiviante, isso permite uma maior eficiência na extração destes metais (TUNCUK *et al.*, 2012).

Os metais podem estar presentes na forma nativa e/ou como ligas nas PCI's, o que é de grande importância para a seleção ou desenvolvimento do processo de lixiviação adequado. Em geral, a lixiviação ácida em meio oxidativo é necessária para a extração efetiva de alguns metais comuns, como o cobre e preciosos, por exemplo a prata e o ouro (TUNCUK *et al.*, 2012)..

3.3.1 Lixiviação ácida

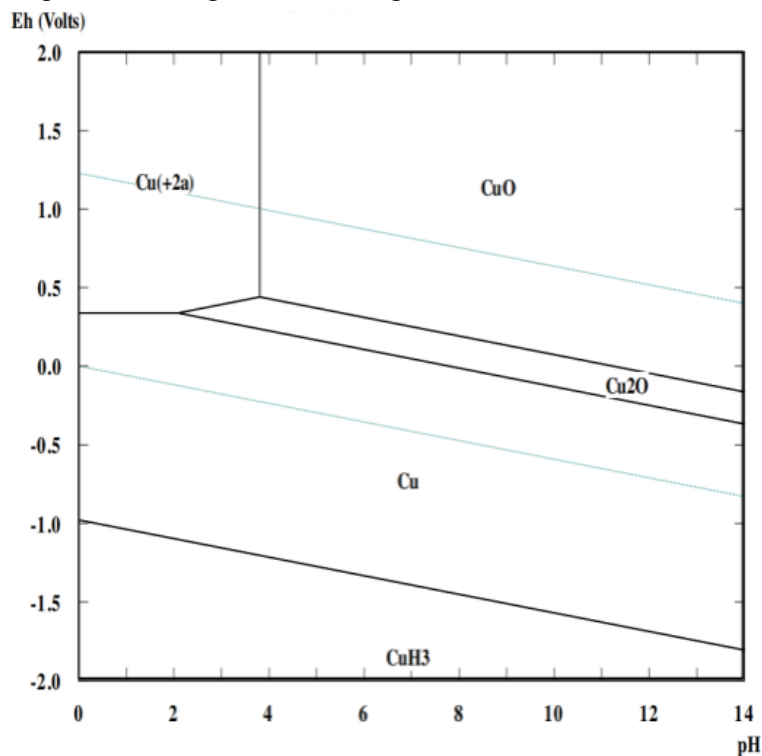
A lixiviação ácida na presença de um oxidante é um dos processos hidrometalúrgicos mais utilizados para a extração de cobre de placas de circuito impresso. A lixiviação oxidativa de amônia pode ser uma alternativa a ser aplicada para esse propósito. Já os agentes de lixiviação mais comuns para recuperação de metais preciosos incluem lixiviações com cianeto, haleto, tioureia e tiosulfato (TUNCUK *et al.*, 2012).

A partir do Diagrama de Pourbaix do cobre-água à 25°C, é possível verificar que na região compreendida por pH de 0 a 4 e potencial de 0,4V a 2V, o cobre se encontra na forma iônica Cu(+2a) e, portanto, solúvel. Dessa forma, mostra-se necessário um agente oxidante para

aumentar o potencial positivo da solução e, com isto, facilitar a transformação de cobre metálico em íon de cobre solúvel (MORAES, 2011). O peróxido de hidrogênio é um oxidante forte, que é comumente usado em combinação com ácidos para aumentar a extração dos metais. Sua reação de oxidação é altamente exotérmica, o que pode tornar necessário o controle da temperatura. A concentração de peróxido de hidrogênio e temperatura são fatores que influenciam a extração de metais do lixo eletrônico (TUNCUK *et al.*, 2012).

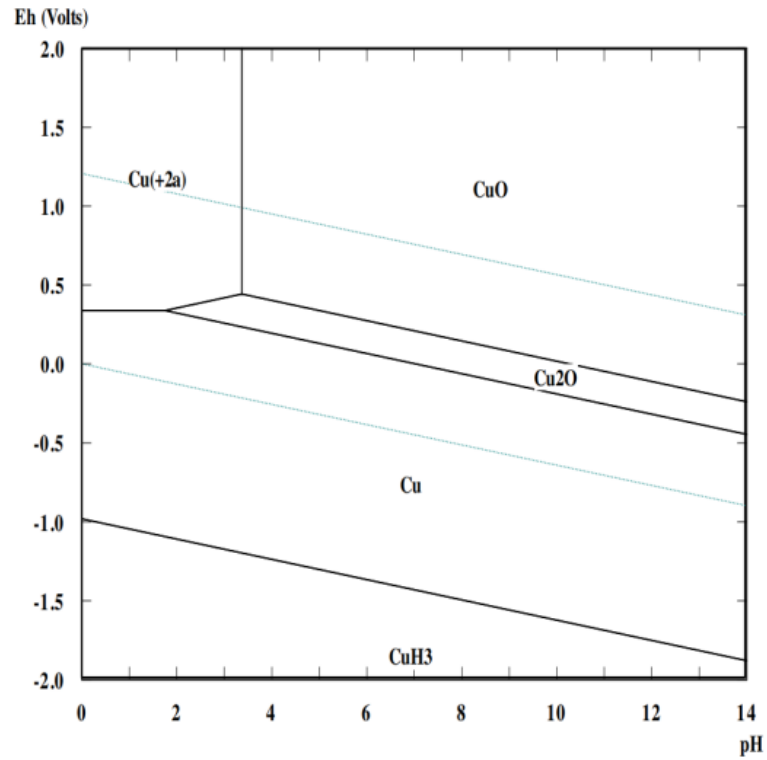
A influência da temperatura pode ser vista nas figura 1 , figura 2 e figura 3. O seu aumento, reduz o campo de estabilidade do Cu^{2+} , reduzindo o pH necessário para a realização da lixiviação (MORAES, 2011). A área de solubilidade é diferente para os diversos metais, o que possibilita a escolha do pH e do potencial de reação para realização da lixiviação. Essa diferença pode ser observada comparando os sistemas ferro-água (figura 4) e o cobre-água (figura 1). Na região com pH variando de 3,0 a 3,8 e potencial 0,4V seria possível remover apenas cobre de uma solução contendo os dois metais, pois nessa região o ferro é insolúvel na forma de Fe_2O_3 (MORAES, 2011).

Figura 1 – Diagrama cobre-água a 25°C.



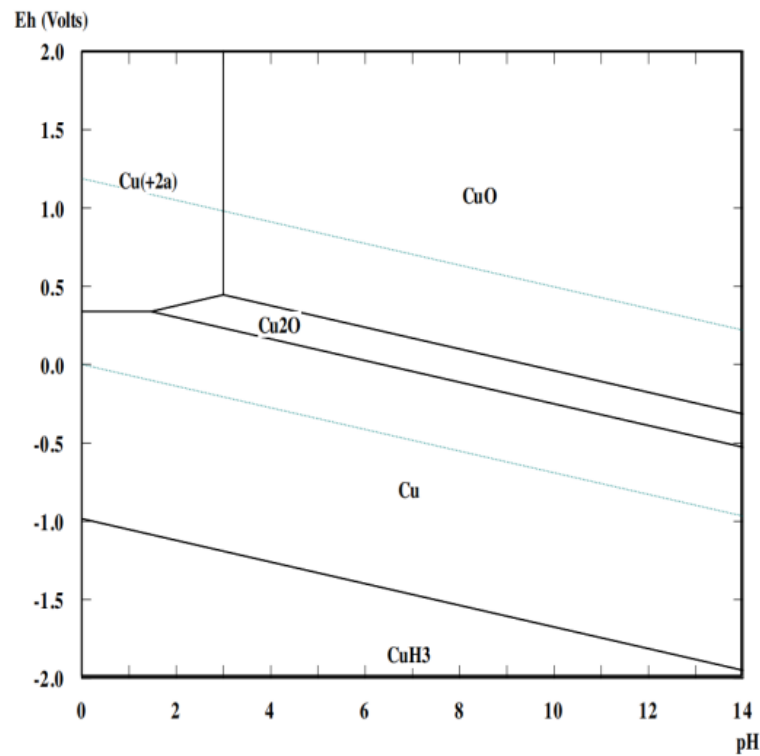
Fonte: Moraes (2011).

Figura 2 – Diagrama cobre-água a 50°C.



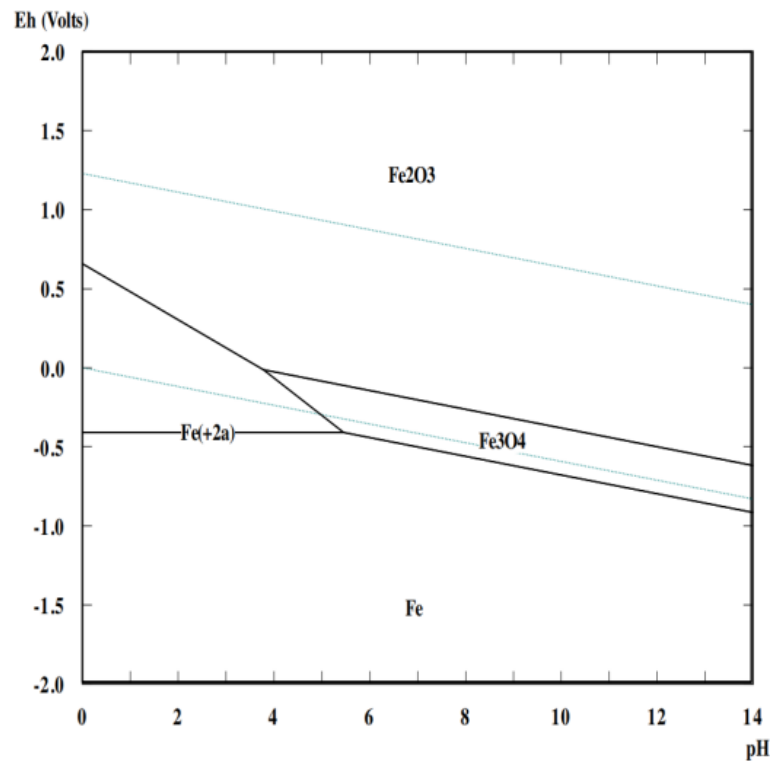
Fonte: Moraes (2011).

Figura 3 – Diagrama cobre-água a 75°C.



Fonte: Moraes (2011).

Figura 4 – Diagrama ferro-água a 25°C.

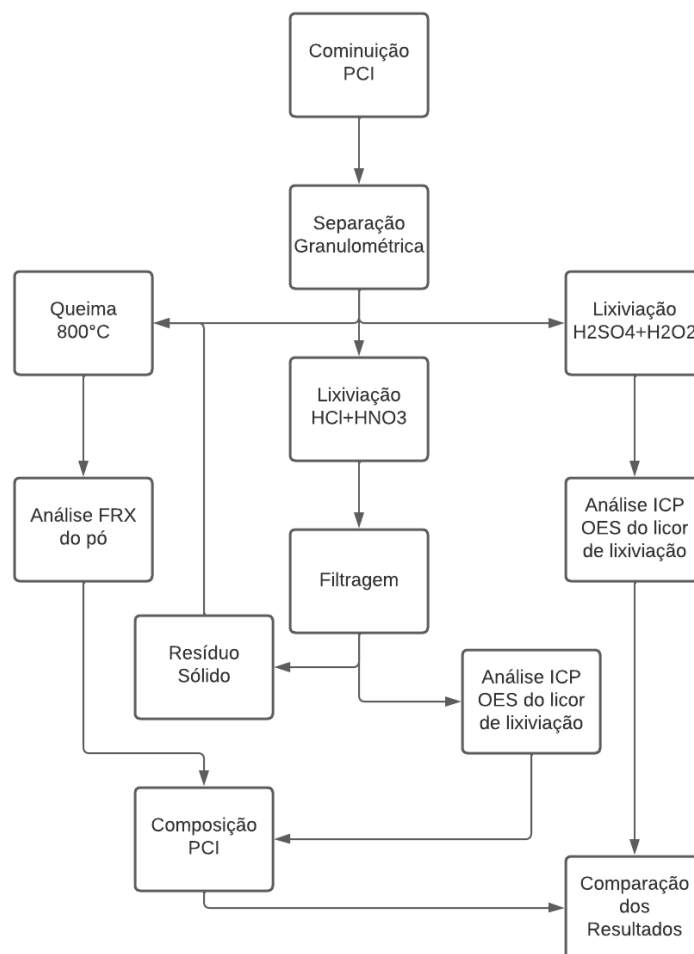


Fonte: Moraes (2011).

4 METODOLOGIA

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 5.

Figura 5 – Fluxograma do processo realizado.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

4.1 Pré-tratamento

Como o material recebido era muito heterogêneo e grosseiro (ver figura 6), foi necessário fazer separação de acordo com a sua granulometria, para então obter amostras mais homogêneas. O material passou por peneiramento em telas de aberturas 9,5 mm, 4,75 mm e 2,36 mm, separando o material em 4 porções.

Figura 6 – Material recebido.



Fonte: autor (2022).

4.2 Caracterização

Após a classificação granulométrica, foram separadas 3 amostras de aproximadamente 15 gramas, sendo formadas por 5 gramas de cada porção peneirada e uma última amostra com granulometria média, o material de fundo foi excluído. A tabela 2 mostra os pesos e granulometrias obtidas.

4.2.1 ICP OES

Foi preparado 3 soluções de 300 mL de água régia com a proporção 3 mL de HCl para 1 mL de HNO₃, ambos concentrados, obedecendo a proporção utilizada por SOARES

Tabela 2 – Separação por granulometria.

Peneiras	2,36 mm	4,75 mm	9,5 mm	Total
Amostra 1	5,356 g	5,359 g	5,279 g	15,994 g
Amostra 2	5,375 g	5,076 g	4,938 g	15,390 g
Amostra 3	5,162 g	5,361 g	5,284 g	15,807 g
Amostra 4	-	3,961 g	-	3,961 g

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

et al. (2019) de 1g de soluto para 20 mL de solvente. 50 mL de solvente adicionais foram preparados para servir como “branco”, com objetivo de avaliar a quantidade de metais presentes na solução antes da solubilização. Após preparada a solução, o material sólido foi colocado junto ao solvente em um béquer deixado para reagir por 24 horas à temperatura ambiente dentro da “capela” com exaustor ligado, cada béquer foi identificado de acordo com a amostra recebida. As soluções, após 24 horas de reação, podem ser observadas na figura 7.

Figura 7 – Licor de lixiviação.



Fonte: autor (2022).

O papel quantitativo foi cortado, pesado e identificado para fazer a filtragem do material sólido remanescente na solução. Após as 24 horas reagindo, a solução foi filtrada em seus respectivos filtros, então alíquotas de 1 mL foram retiradas com utilização de uma pipeta graduada de 1 mL. Por estarem muito concentradas, as alíquotas foram diluídas para 100 mL com água destilada para então realizar o ensaio no equipamento iCAP 6000 SERIES, ICP

Spectrometer da marca Thermo Scientific (figura 8).

Figura 8 – Equipamento iCAP 6000 SERIES, ICP Spectrometer da marca Thermo Scientific.



Fonte: autor (2022).

Os filtros ainda contendo material retido (ver figura 9 e 10), foram lavados com água deionizada para remover qualquer ácido residual e então levados para estufa a 60° C por 24 horas para secagem. Após a secagem, os filtros com material sólido foram novamente pesados, com objetivo de realizar um balanço de massa.

4.2.2 FRX

Para a realização da caracterização por FRX, foi utilizado o resíduo seco restante da amostra 3 e a amostra 4, que ainda não havia passado por processo anterior. As amostras foram colocadas em cadinhos cerâmicos, previamente pesados. A identificação do cadinho foi feita de acordo com o número da amostra, amostra 3 no cadinho 3 e a amostra 4 foi colocada no cadinho 4, e levados ao forno mufla à 800°C por 10 minutos, dentro da capela. Ao final da queima, os cadinhos foram pesados novamente, e o material foi macerado, com o auxílio de um bastão de vidro, até que estivesse fino o suficiente. Após o processamento mecânico, pequenas placas de cobre foram separadas da amostra, com o auxílio de uma pinça, e então foram colocadas 3

Figura 9 – Material retido no filtro apos lavagem e secagem.



Fonte: autor (2022).

Figura 10 – Material retido no filtro dentro de estufa a 60°C.



Fonte: autor (2022).

amostras do pó restante em eppendorfs, uma do sólido restante da amostra 3 e duas da amostra 4. A identificação dos componentes metálicos foi realizada por exposição das superfícies do

material a um espectrômetro de raios-X por dispersão em energia (EDX ou EDS), fabricante SHIMADZU, modelo EDX-7000 (figura 11), operando com fonte de 50 kV, para faixa elementar do Al (alumínio) ao U (urânio), durante 60 segundos, e fonte de 15 kV, para faixa elementar do Na (sódio) ao Sc (escândio), durante 60 segundos.

Figura 11 – Equipamento EDX-7000 fabricante SHIMADZU.



Fonte: autor (2022).

4.3 Lixiviação ácida em meio oxidante

O processamento de lixiviação ácida foi realizado utilizando ácido sulfúrico na proporção material:ácido de 1:10, como proposto por Moraes (2011). As amostras foram pesadas e identificadas como mostrado na tabela abaixo 3.

Tabela 3 – Amostras para realização da lixiviação ácida em meio oxidante.

Peneiras	2,36 mm	4,75 mm	9,5 mm	Total
Amostra A	5,235 g	5,217 g	5,206 g	15,658 g
Amostra B	5,020 g	5,102 g	5,188 g	15,310 g
Amostra C	5,053 g	5,089 g	5,037 g	15,179 g

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Para a execução do ensaio utilizou-se os seguintes materiais: balão de fundo redondo com três bocas, condensador, chapa de aquecimento e agitação magnética, barra magnético, suporte universal com três garras, duas tampas de borracha, para balão de fundo redondo, pirex e 200 mL de glicerol, para o “banho”. A montagem semelhante a Silvas *et al.* (2015) pode ser observada na figura 12. Segundo Corcini *et al.* (2017), o cobre (Cu) não reage com ácido

Figura 12 – Montagem das vidrarias para o ensaio de lixiviação.



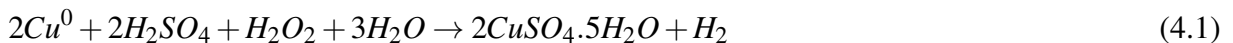
Fonte: autor (2022).

sulfúrico diluído e concentrado à temperatura ambiente. De acordo com os resultados de Moraes (2011), as melhores condições para a solubilização em ácido sulfúrico ocorrem com temperatura em torno de 75°C, com agitação da solução e em meio oxidante. Dessa forma, os ensaios de lixiviação ácida, em meio oxidante, buscaram repetir as condições ideais de reação. Para garantir

uma melhor uniformidade de aquecimento da solução, foi utilizado um banho com glicerol e agitação magnética, com barra magnética. A temperatura foi acompanhada pelo termopar da própria chapa de aquecimento no banho, e não diretamente na soão, para evitar contaminação da solução e o seu desgaste.

Antes de iniciar o ensaio, 150 mL de ácido sulfúrico foi posto em aquecimento no balão, e, ao atingir a temperatura de 75°C, foi adicionado, para reagir com o ácido, o material sólido. A velocidade de agitação magnética foi de 450 rpm e a reação teve duração de 6 horas. A cada 1 hora e 30 minutos, foi retirada 1 alíquota de 1 mL da solução, totalizando, no fim do processo, quatro alíquotas. Durante esse processo foram adicionados 6 mL de peróxido de hidrogênio a cada 30 minutos, totalizando 66 mL ao final das 6 horas de reação.

O tempo de reação foi definido utilizando os resultados de Moraes (2011) como base, e levando em consideração que o material utilizado neste trabalho foi mais “grosseiro”. O peróxido de hidrogênio foi adicionado para garantir que o cobre fosse dissolvido pelo ácido sulfúrico. Assim como no trabalho de Moraes (2011), a quantidade de peróxido foi estimada em excesso a partir do cálculo estequiométrico da reação do cobre sólido com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio:



Foi considerado que as 15 gramas de material adicionado eram apenas cobre, então utilizando a massa atômica do cobre de 63,5 g, a massa atômica do peróxido de hidrogênio de 34 g, com a equação devidamente balanceada é possível notar que para formar sulfato de cobre, são necessários 34g de peróxido de hidrogênio para reagir com 127g de cobre. Realizando regra de três simples, constatou-se que é preciso aproximadamente 4g de peróxido com densidade 1,476 g/mL, portanto 3 mL. O ensaio foi repetido 3 vezes para as amostras A, B e C. As alíquotas foram encaminhadas para o ensaio de Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente após diluição de 1 mL para 100 mL.

5 RESULTADOS

5.1 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 4.

Tabela 4 – 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).

5.2 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 5.

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 correspondente 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 5 – 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 6.

Tabela 6 – 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.

5.3 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 7.), 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 13.).

Tabela 7 – 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 8.

Os resultados do FRX para as amostras A4.a e A4.b confirmaram que a concentração de cobre no material de estudo esta 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 13 – Material ao ser retirado do forno.



Fonte: autor (2022).

Tabela 8 – 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.

5.4 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 10, 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 9 – Resultado da caracterização do licor de lixiviação com ácido sulfúrico.

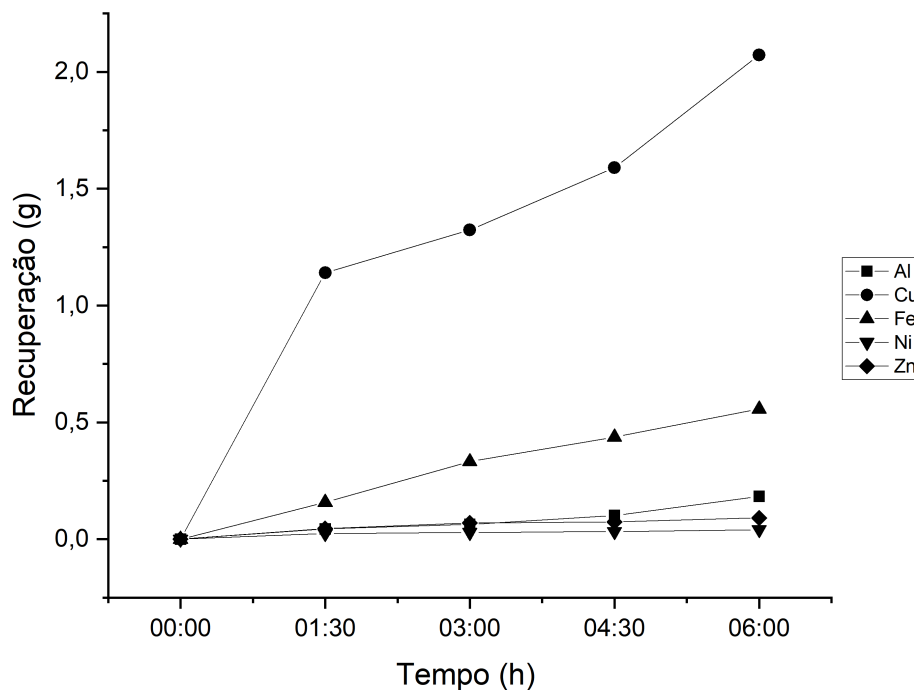
Elemento	m (g)	%m/m	desvpad
Al	0,206951	1,35%	0,12421
As	<LQ	-	-
B	0,006968	0,05%	0,00583
Ba	0,003670	0,02%	0,00423
Be	<LQ	-	-
Bi	<LQ	-	-
Ca	0,147492	0,96%	0,11888
Cd	0,000039	0,00%	0,00003
Co	0,002932	0,02%	0,00276
Cr	0,000547	0,00%	0,00029
Cu	1,550264	10,08%	1,13274
Fe	0,386414	2,51%	0,34744
K	0,054835	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 14, 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 14 expõe a quantidade de massa recuperada em gramas pelo tempo de reação.

Figura 14 – Recuperação de metais.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

As massas dos metais recuperados dos ensaios A, B e C estão dispostos na tabela 10, 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 estão associados 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 10 – Resultado da recuperação de metais.

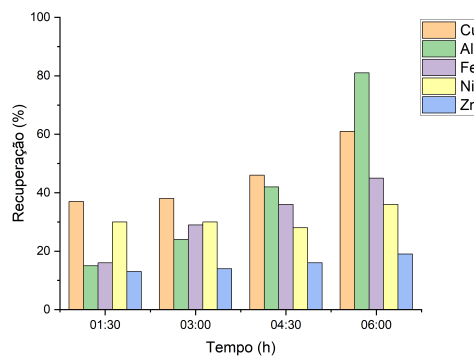
Ensaio	m (g)	%m/m
A	3,16	20,21%
B	4,50	29,41%
C	1,04	6,82%

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 houveram 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 figura15, 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 15 – Recuperação de metais relativa.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

6 CONCLUSÕES

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, conseqüentemente, 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

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- SILVA, E. C. d. **Recuperação de metais em placas de circuito impresso**. Dissertação (Mestrado) — Brasil, 2018.
- 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: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X15300970>>.
- 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: <<https://proceedings.science/enemp-2019/papers/recuperacao-de-cobre-contido-em-placas-de-circuito-impresso-via-lixiviacao-acida-e-oxirreducao-?lang=pt-br>>. Acesso em: 01 dez. 2022.
- 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: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687511003669>>.
- 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: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925505000466>>.

APÊNDICE A – ENSAIO A

Tabela 11 – Resultado da lixiviação da amostra A.

Elem	01:30	03:00	04:30	06:00	m%m
Al	0,02704	0,0625975	0,0848635	0,109798	0,70%
As	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-
B	0,0020528	0,00932225	0,01049465	0,011726	0,07%
Ba	0,00107184	0,0007007	0,00069502	0,00067896	0,00%
Be	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-
Bi	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-
Ca	0,19968	0,20405	0,215935	0,226935	1,45%
Cd	0,00008176	0,00002317	2,69705E-05	3,10575E-05	0,00%
Co	0,0013472	0,00362425	0,00462935	0,0057441	0,04%
Cr	0,00031952	0,000359975	0,00045505	0,000560265	0,00%
Cu	0,73728	1,0584	1,323635	1,616425	10,32%
Fe	0,18496	0,42735	0,580355	0,751735	4,80%
K	0,121024	0,104755	0,104975	0,103812	0,66%
Li	0,0083904	0,00406	0,0043548	0,0046412	0,03%
Mg	0,16848	0,1546825	0,1624595	0,169371	1,08%
Mn	0,00110704	0,0020475	0,0027189	0,0034686	0,02%
Mo	0,0000176	0,000025305	0,000023275	0,000020582	0,00%
Na	0,62608	<LQ	<LQ	<LQ	-
Ni	0,018672	0,0267575	0,0324805	0,038745	0,25%
P	0,0018512	0,0030205	0,0038038	0,0046699	0,03%
Pb	0,0057872	0,00916125	0,01185315	0,0148461	0,09%
Sb	0,0079632	0,004109	0,00643055	0,00906305	0,06%
Sc	<LQ	5,8625E-06	5,8615E-06	0,000005781	0,00%
Se	0,00058624	<LQ	<LQ	0	0,00%
Sn	0,056784	0,029505	0,030894	0,032103	0,21%
Sr	0,0024992	0,003101	0,00325755	0,00339685	0,02%
V	0,00004432	0,000021245	0,000017955	0,000013858	0,00%
Zn	0,030176	0,04172	0,049134	0,057154	0,37%
Total				3,164944304	20,21%

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

APÊNDICE B – ENSAIO B

Tabela 12 – Resultado da lixiviação da amostra B.

Elem	01:30	03:00	04:30	06:00	m%m
Al	0,0606852	0,064161	0,118206	0,257256	1,68%
As	LQ	LQ	LQ	0	0,00%
B	0,003807	0,0034074	0,00577071	0,00855576	0,06%
Ba	0,00132516	0,00046638	0,000541332	0,001288656	0,01%
Be	LQ	LQ	LQ	0	0,00%
Bi	LQ	LQ	LQ	0	0,00%
Ca	0,2673	0,17532	0,198396	0,1989144	1,30%
Cd	0,000057186	0,00003681	0,000034353	0,000069552	0,00%
Co	0,00073791	0,0020358	0,00209583	0,00303048	0,02%
Cr	0,000233928	0,00028593	0,000417285	0,000441288	0,00%
Cu	1,54386	1,5894	1,85526	2,5272	16,51%
Fe	0,1318032	0,23679	0,29403	0,3618	2,36%
K	0,0688338	0,048825	0,0546579	0,0593568	0,39%
Li	0,005589	0,0034578	0,00353331	0,00536112	0,04%
Mg	0,141021	0,09477	0,102465	0,1146312	0,75%
Mn	0,001094796	0,0011637	0,00140085	0,001748736	0,01%
Mo	0,000045036	0,00000099	0,000067716	0,00004752	0,00%
Na	0,46656	0,35739	0,371151	0,416016	2,72%
Ni	0,0293544	0,032058	0,0325611	0,0433944	0,28%
P	0,001030644	0,0015786	0,00236808	0,00834408	0,05%
Pb	0,00706968	0,0066195	0,0115038	0,02058696	0,13%
Sb	0,00267786	0,0033156	0,00415602	0,01177848	0,08%
Sc	LQ	LQ	LQ	0	0,00%
Se	0,000592434	0,00031194	0,000547371	0,001002888	0,01%
Sn	0,1085562	0,053298	0,0909711	0,334152	2,18%
Sr	0,00288198	0,0018711	0,00211365	0,00228312	0,01%
V	0,000045522	0,00003024	0,000013662	0,000029592	0,00%
Zn	0,06237	0,0981	0,099891	0,1253664	0,82%
TOTAL				4,502655432	29,41%

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

APÊNDICE C – ENSAIO C

Tabela 13 – Resultado da lixiviação da amostra C.

Elem	01:30	03:00	04:30	06:00	m%m
Al	0,0292572	0,055458	0,1217304	0,2538	1,67%
As	LQ	LQ	LQ	LQ	0,00%
B	0,000665982	0,0006822	0,000649836	0,000622728	0,00%
Ba			0,01975446	0,00904176	0,06Be
LQ	LQ	LQ	LQ	0,00%	
Bi	LQ	LQ	LQ	LQ	0,00%
Ca	0,01549206	0,0171666	0,01763982	0,01662552	0,11%
Cd	0,000013122	0,000014508	1,33848E-05	1,74528E-05	0,00%
Co	0,000193428	0,0000324	1,51866E-05	2,14056E-05	0,00%
Cr	0,000366444	0,00056754	0,000641322	0,000638496	0,00%
Cu	0,564732	0,26532	0,331056	0,507168	3,34%
Fe	0,0919674	0,092628	0,068409	0,0457056	0,30%
K	0,001030644	0,0014247	0,00164439	0,001337256	0,01%
Li	0,000409536	0,00053172	0,00057123	0,000498096	0,00%
Mg	0,00207522	0,0020502	0,00187308	0,001796256	0,01%
Mn	0,000987552	0,0024372	0,0029502	0,00315792	0,02%
Mo	2,57742E-05	0,00005679	5,15196E-05	0,00004752	0,00%
Na	0,00240084	0,004815	0,0054747	0,00651672	0,04%
Ni	0,0277506	0,01521	0,00385308	0,00827496	0,05%
P	0,00268596	0,005148	0,00806454	0,01085616	0,07%
Pb	0,0245592	0,019206	0,0152955	0,00465048	0,03%
Sb	0,0195372	0,021312	0,0197703	0,0203148	0,13%
Sc	4,698E-07	LQ	LQ	LQ	0,00%
Se	4,55058E-05	0,000073926	8,69616E-05	0,000123941	0,00%
Sn	0,1364202	0,172512	0,1298088	0,1327104	0,87%
Sr	0,000300834	0,00029754	0,000309474	0,00027972	0,00%
V	LQ	0,000004014	1,48896E-05	0,000029808	0,00%
Zn	0,0437562	0,0075564	0,01152756	0,01091016	0,07%
TOTAL				1,035145159	6,82%

Fonte: elaborado pelo autor (2022).