



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

ALEX MESQUITA VIEIRA

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA RECUPERAÇÃO DE
COBRE ATRAVÉS DE TÉCNICA DE LIXIVIAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO
IMPRESSO EM SOLUÇÃO DE ÁCIDO MURIÁTICO E ÁGUA OXIGENADA**

FORTALEZA – CE

2023

ALEX MESQUITA VIEIRA

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA RECUPERAÇÃO DE
COBRE ATRAVÉS DE TÉCNICA DE LIXIVIAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO
IMPRESSO EM SOLUÇÃO DE ÁCIDO MURIÁTICO E ÁGUA OXIGENADA

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia
Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. MAURO ANDRES
CERRA FLOREZ.

Coorientador: Eng. GABRIEL SARAIVA DA
SILVA

FORTALEZA - CE

2023

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)

V713e Vieira, Alex Mesquita.

Estudo da viabilidade técnica e econômica da recuperação de cobre através da técnica de lixiviação de placas de circuito impresso em solução de ácido muriático e água oxigenada / Alex Mesquita Vieira. – 2023.

70 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez.

Coorientação: Prof. Gabriel Saraiva da Silva.

1. Lixiviação. 2. Resíduos. 3. Placas de circuito impresso. 4. Recuperação. 5. Cobre. I. Título.

CDD 669

ALEX MESQUITA VIEIRA

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA RECUPERAÇÃO DE
COBRE ATRAVÉS DE TÉCNICA DE LIXIVIAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO
IMPRESSO EM SOLUÇÃO DE ÁCIDO MURIÁTICO E ÁGUA OXIGENADA

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia
Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: / /2023.

BANCA EXAMINADORA

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

Dr. Ari Clecius Alves de Lima
Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Eng. Metalurgista Gabriel Saraiva da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha família.

AGRADECIMENTOS

À Instituição Funcap, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

À Instituição Fundatec, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa estágio.

Ao Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões, pela excelente orientação e pelo seu apoio e confiança creditada a mim para a realização deste projeto.

Ao Eng. Gabriel Saraiva da Silva pela coorientação, críticas e sugestões no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Daniel de Castro Girão pelo tempo, pelas valiosas colaborações, pelas sugestões, pelo esforço e empenho em ajudar com os resultados do projeto que foram fundamentais para conclusão deste trabalho.

A todos os colegas de trabalho e amigos do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) cujo auxílio foi fundamental para a realização deste trabalho.

Ao Núcleo de Tecnologia Industrial e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC) pelo suporte à pesquisa.

Aos colegas do Laboratório de Química Industrial da NUTEC pelo excelente trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Raio-X do departamento de Física da UFC pelo excelente trabalho nas caracterizações, em especial a minha amiga Clara.

Ao participante convidado da banca examinadora Dr. Ari Clecius Alves de Lima.

Aos professores entrevistados, pelo tempo concedido nas entrevistas.

A todos os professores e colegas que tiveram, a seu modo, participação na construção e desenvolvimento da minha carreira acadêmica e profissional durante esses anos de formação.

Aos colegas do curso, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

A minha família e todos os meus amigos que não me deixaram desanimar em momento nenhum e sempre me ajudaram como podiam para que eu conseguisse realizar minha graduação da melhor maneira possível.

A minha namorada Natália Sales Aragão cujo incentivo e companheirismo são de valor inestimável para mim ao longo desses mais de sete anos juntos.

Ao meu Pai Alexandre M. Vieira, pelos ensinamentos e por ter forjado o homem que sou hoje.

A minha mãe Vanderlene V. Martins, pelos ensinamentos e por sempre estar presente quando mais preciso.

Aos meus tios Thiago e Joana, por terem me acolhido em sua casa durante o período de estudo na UFC e por todos os outros suportes que me forneceram ao longo dessa jornada pelo qual sem eles não seria possível realizar essa graduação.

A minha avó Haidê M. Vieira, pela ajuda, incentivo e apoio que me forneceu.

Ao meu avô Hermano P. Vieira, por tudo.

RESUMO

Atualmente, existe uma grande preocupação com o destino de resíduos eletrônicos. Sabe-se que hoje o Brasil é o quinto país que mais produz esse tipo de resíduo, porém cerca de apenas 3% desse material é tratado. Devido a isso, este trabalho nasceu com a intenção de melhorar e tornar mais fáceis os métodos existentes de tratamento e recuperação de placas de circuito impresso, que é um tipo de resíduo eletrônico, por meio de 3 etapas. A etapa inicial do trabalho se concentra na caracterização do material recebido, o qual consiste em cerca de 10 kg de placas de circuito impresso previamente fracionadas. Estas placas foram submetidas a um processo de separação granulométrica, onde uma fração foi submetida à calcinação e a outra à dissolvida em meio ácido. Posteriormente, amostras foram empregadas para a identificação da composição química e a quantificação dos metais presentes, utilizando as técnicas analíticas de Fluorescência de Raios-X (FRX) e Espectroscopia de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). Na segunda etapa, ocorre a recuperação dos metais das placas de circuito impresso por meio de duas abordagens distintas: uma que envolve o tratamento exclusivo do material por uma rota hidrometalúrgica, e outra que utiliza um processo de calcinação, que é parte pirometalúrgica, antes da parte hidrometalúrgica, seguido pela subsequente caracterização química. Por fim, a terceira etapa consiste no processo eletroquímico para o estudo da viabilidade da recuperação dos metais das amostras.

Palavras-chave: Lixiviação; resíduos; eletrônicos; recuperação; placas de circuito impresso; cobre.

ABSTRACT

Currently, there is great concern about the destination of electronic waste. It is known that today Brazil is the fifth country that produces this type of waste the most, but only around 3% of this material is treated. Due to this, this work was born with the intention of improving and making existing methods of treating and recovering printed circuit boards, which is a type of electronic waste, easier through 3 stages. The initial stage of the work focuses in the characterization of the material received, which consists of around 10 kg of previously fractionated printed circuit boards. These plates were subjected to a particle size separation process, where one fraction was burned and the other was dissolved in an acidic medium. Subsequently, samples were used to identify the chemical composition and quantify the metals present, using the analytical techniques of X-ray Fluorescence (XRF) and Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES). In the second stage, the metals from the printed circuit boards are recovered through two distinct approaches: one that involves the exclusive treatment of the material through a hydrometallurgical route, and another that uses a burning process, which is partly pyrometallurgical, before hydrometallurgical part, followed by subsequent chemical characterization. Finally, the third stage consists of the electrochemical process to study the feasibility of recovering metals from the samples.

Keywords: Leaching; waste; electronics; recovery; printed circuit boards; copper.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Principais etapas dos processos Hidrometalúrgicos.....	19
Figura 2	Fluxograma dos processos realizados.....	26
Figura 3	Esquema de filtragem de soluções.	29
Figura 4	Esquema de filtragem de soluções.....	30
Figura 5	Gral e pistilo de cerâmica para pós finos.....	32
Figura 6	Gral e pistilo de porcelana para partículas grosseiras.	32
Figura 7	Material PCI após 1h em meio ácido.....	36
Figura 8	Material coloração diferente.....	36
Figura 9	Produto da calcinação.....	40
Figura 10	PCIs de granulometrias A, preparadas para lixiviação em meio ácido.....	41
Figura 11	PCIs de granulometrias B, preparadas para lixiviação em meio ácido.....	41
Figura 12	PCIs de granulometrias C, preparadas para lixiviação em meio ácido.....	41
Figura 13	PCIs de granulometrias D, preparadas para lixiviação em meio ácido.....	41
Figura 14	Solução poucos minutos após começo de reação.....	42
Figura 15	Solução 24h após começo de reação.....	43
Figura 16	Solução 48h após começo de reação.....	43
Figura 17	Solução 72h após começo de reação.....	44
Figura 18	Película formada em cima da solução Z.....	45
Figura 19	Película formada em cima da solução X.....	45
Figura 21	Camada formada em cima do sólido retido Z.....	46
Figura 21	Camada formada em cima do sólido retido X.....	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Percentual em massa 1,18 mm.....	47
Gráfico 2 –	Percentual em massa 2,36 mm.....	47
Gráfico 3 –	Percentual em massa 4,75 mm.....	48
Gráfico 4 –	Percentual em massa 9,50 mm.....	48
Gráfico 5 –	Voltametria do licor obtido.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Peso das amostras para água-régia (g).....	28
Tabela 2	- Massa em gramas das amostras para ácido muriático com água oxigenada 10 vol.....	28
Tabela 3	- Tabela 3 - Massa das amostras para ácido muriático com água oxigenada 10 vol. em gramas.....	33
Tabela 4	- Massa dos papéis filtros secos em gramas.....	37
Tabela 5	- Massa do sólido retido pela filtração em gramas.....	37
Tabela 6	- Massa total retido + filtro em gramas.....	37
Tabela 7	- Massa do dissolvido em ácido em gramas.....	38
Tabela 8	- Massa dos filtros em gramas.....	38
Tabela 9	- Massa retida em gramas.....	38
Tabela 10	- Massa total retido + filtro em gramas.....	38
Tabela 11	- Massa do dissolvido em ácido em gramas.....	39
Tabela 12	- Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução Z de ácido muriático e água oxigenada 10 vol.....	54
Tabela 13	- Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução X de ácido muriático e água oxigenada 10 vol.....	54
Tabela 14	- Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução A de ácido muriático e água oxigenada 10 vol.....	55
Tabela 15	- Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução B de ácido muriático e água oxigenada 10 vol.....	56
Tabela 16	- Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução C de ácido muriático e água oxigenada 10 vol.....	57
Tabela 17	- Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução D de ácido muriático e água oxigenada 10 vol.	58

Tabela 18	- Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução P1 de água-régia.....	58
Tabela 19	- Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução P2 de água-régia.....	59
Tabela 20	- Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução P3 de água-régia.....	60
Tabela 21	- Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução P4 de água-régia.....	61
Tabela 22	- Percentual em massa obtido para as amostras de granulometria de 1.18 mm.....	63
Tabela 23	- Percentual em massa obtido para as amostras de granulometria de 2.36 mm.....	63
Tabela 24	- Percentual em massa obtido para as amostras de granulometria de 4,75 mm.....	64
Tabela 25	- Percentual em massa obtido para as amostras de granulometria de 9,50 mm.....	64
Tabela 26	- Principais resultados da análise em técnica ICP-OES.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
SIBI	Sistema Integrado de Bibliotecas
LQI.	Laboratório de Química Industrial
PCI	Placa de circuito impresso
NUTEC	Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará
UFC	Universidade Federal do Ceará
LPC	Laboratório de Pesquisa em Corrosão
ICP-OES	Espectrometria de Emissão Ótica por Plasma Acoplado Indutivamente
FRX	Fluorescência de Raio-X
LRX	Laboratório de Raio-X
ONU	Organizações das Nações Unidas
UNU	Universidade das Nações Unidas
REEE	Reciclagem de Equipamentos Eletroeletrônicos
StEP	Solving the E-waste Problem
OIT	Organização Internacional do Trabalho

LISTA DE SÍMBOLOS

\$	Dólar
%	Porcentagem
A	Amper
V	Volte
g	grama
ml	mililitro
Kg	quilograma
®	Marca Registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivos Gerais	17
2.2	Objetivos Específicos	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	Placas De Circuitos Impresso	18
3.2	Hidrometalurgia	19
3.3	Lixiviação Ácida	20
3.4	Cominuição e cinética química	21
3.5	Pirometalurgia	22
3.6	Ácido muriático + água oxigenada 10 vol	23
3.7	Água-régia	24
4	METODOLOGIA	25
4.1	Preparação	26
4.2	lixiviações	27
4.3	Licor resultante da água régia	28
4.4	Licor resultante ácido muriático com água oxigenada 10 vol	29
4.5	Filtragem das soluções	29
4.6	Caracterização ICP-OES	30
4.7	Calcinação de PCI para caracterização por FRX	30
4.8	Caracterização em FRX	31
4.9	Rota pirometalúrgica + hidrometalúrgica	31
4.10	Ensaio eletroquímico	33
4.11	Voltametria	33
5	RESULTADOS	35
5.1	Preparação	35
5.2	Rota somente hidrometalúrgica	35
5.3	Lixiviação água régia	37
5.4	lixiviações de ácido muriático e água oxigenada 10vol	38
5.5	Rota pirometalúrgica + Hidrometalúrgica	39
5.5.1	Observações dos produtos da calcinação	39

5.5.2	Lixiviação do pó da calcinação.....	41
5.6	Caraterização.....	47
5.6.1	FRX.....	47
5.6.2	ICP-OES.....	48
5.7	Voltametria cíclica.....	49
6	CONCLUSÃO.....	51
7	ANEXO A – TABELAS DE RESULTADOS DE TÉCNICA ICP-OES.....	54
8	ANEXO B – TABELAS DE RESULTADOS DE TÉCNICA FRX.....	62
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

No cenário global atual, o tema transição energética tem ganhado cada vez mais espaço e importância. Observa-se um crescimento acentuado na demanda por componentes eletrônicos para a produção de eletromecânicos e materiais que possibilitem a substituição de meios antigos de geração de energia para fontes alternativas e mais limpas. Esses meios antigos derivam de fontes de energia que provocam a emissão de gases poluentes para a atmosfera, ocasionando em poluição atmosférica, do solo e de mananciais. Assim, para que fossem alcançados esses objetivos, algumas metas foram propostas por conferências internacionais de meio ambiente promovidas pela Organização das Nações Unidas (ONU), como a elaboração de meios que visem a redução da liberação de gases poluentes e o combate ao aquecimento global com o intuito de fazer os Estados-membros aderirem a essa nova transição energética e diminuir o impacto global. Ainda, segundo pesquisas realizadas pela Organização das Nações Unidas (ONU), apenas 3% do lixo eletrônico produzido na América Latina é descartado corretamente e o restante, 97%, não é monitorado, embora possa conter materiais de alto valor, como ouro e metais, que poderiam ser recuperados. O estudo aponta desperdício de US \$1,7 bilhão ao ano, além dos danos ao meio ambiente.[5]

Diante desse cenário, a demanda pela exploração de materiais estratégicos, como metais específicos com boas propriedades elétricas, tem aumentado gradativamente. Assim, a disponibilidade desses tipos de materiais no mercado favoreceu as empresas de modo a proporcionar uma variedade maior de dispositivos eletrônicos de baixo custo e alta volatilidade das vendas. Em sua maioria, esses tipos de eletroeletrônicos tem uma vida útil bem pequena, fazendo com que os clientes os descartem logo após pararem de funcionar ou quando é lançada uma versão superior do mesmo produto no mercado, a chamada obsolescência programada.

Segundo a revista Edição do Brasil, o Brasil ocupa o quinto lugar no ranking de maior produtor de resíduos eletrônicos no mundo, atrás da China, Estados Unidos, Índia e Japão [4]. Tendo em vista isso, a quantidade gerada de resíduos eletrônicos anualmente tem trazido uma certa preocupação. Em 2019, cerca de 2 milhões de toneladas de resíduos eletrônicos foram produzidos no país e apenas 3% desse total foi recolhido e devidamente reciclado. Esse percentual baixo de reciclagem de lixo eletrônico tem se justificado pela baixa quantidade de empresas especializadas na reciclagem desses tipos de produtos, e as poucas que trabalham com isso, geralmente fazem a catação dos

melhores resíduos, assim efetuando a separação de peças com maior valor ou com mais peso em metais e as vendem para empresas de reciclagem europeias ou americanas.

Diante disso, esse trabalho nasceu com a finalidade de tentar sanar a carência de métodos de recuperação de resíduos eletrônicos, gerando agregação de valor, beneficiando as empresas catadoras ou associações, e garantido a recuperação de materiais e metais estratégicos, além da possibilidade da criação de novos empregos no ramo da reciclagem no nosso país.

A recuperação de cobre metálico a partir do lixo eletrônico e placas de circuito impresso (PCI) no Brasil é motivada por uma série de fatores importantes. Um dos principais objetivos é a redução da poluição ambiental. O descarte inadequado de lixo eletrônico pode levar à liberação de substâncias tóxicas no meio ambiente. Portanto, a recuperação de cobre e outros metais a partir do lixo eletrônico é uma estratégia eficaz para mitigar esse problema.

Além disso, o cobre é um metal valioso e amplamente utilizado em diversas indústrias. A recuperação de cobre a partir do lixo eletrônico não apenas permite a reutilização desse recurso valioso, mas também pode ser mais econômica do que a mineração de novos recursos. Isso pode resultar em uma redução significativa dos custos, especialmente considerando que essa é uma tecnologia nacional.

Ainda, a indústria de reciclagem pode gerar empregos, contribuindo para o desenvolvimento econômico. Isso demonstra que a recuperação de cobre metálico a partir do lixo eletrônico e PCI não é apenas importante do ponto de vista ambiental, mas também tem um impacto econômico significativo.

Sobre a Reciclagem de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), segundo Forti et.al (2020), da fração de REEE devidamente coletada em 2019, cerca de 4,0 Mt de material era possível de reciclar, sendo uma excelente fonte secundária de metais como Alumínio, Cobre e Ferro [13]. Complementado isso, a Mineração Urbana nos depósitos de REEE localizados nas áreas urbanas são conhecidos também como minas urbanas, uma vez que os REEE apresentam uma quantidade expressiva de matérias-primas críticas e metais valiosos [12]. Para definir melhor o apresentado anteriormente, é considerada mineração urbana tudo que se refere à recuperação de matérias-primas secundárias, que são os produtos e materiais pós-consumo, com o objetivo de minimizar os impactos ambientais, valorizar os resíduos e criar benefícios econômicos sustentáveis [16].

Segundo estudos do StEP (Solving the E-waste Problem) – organização criada pela Universidade das Nações Unidas (UNU), para a criação de soluções de

controle do lixo eletrônico mundo afora -, a reciclagem de uma tonelada de celulares velhos pode render até 3,5 kg de prata, 130 kg de cobre e 340 gramas de ouro [15].

Estudos indicam que processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e biotecnológicos são aplicados na recuperação de metais dos resíduos de PCI [17]. Em um estudo realizado em 2013, sobre a concentração de metais contidos em placas de circuito impresso de computadores descartados, destacou-se o teor total de metais aumentou de 39,5% para 89% com recuperação de mais de 82% para tamanho de partícula na faixa entre 0,2-0,1 mm [18].

No entanto, é importante notar que apenas uma pequena fração do lixo eletrônico é atualmente reciclada. De acordo com a OIT, somente 20% do chamado e-lixo, que é o termo usado para descrever o descarte de dispositivos que funcionam por meio de energia elétrica, pilhas ou baterias, é reciclado formalmente [19]. Portanto, há um grande potencial para aumentar a taxa de reciclagem e a recuperação de materiais através da mineração urbana e da reciclagem de lixo eletrônico.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo geral estudar a viabilidade técnica e econômica da recuperação do cobre através da técnica de lixiviação, abordando caracterizações químicas e quantificações de teores de elementos metálicos contidos em pores e licores obtidos a partir do tratamento das placas de circuito impresso, além de processos eletrolíticos para o estudo da eletrodeposição.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Quantificação e caracterização química das PCIs através de técnica fluorescentes de raio x (FRX) e técnica de Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES).
- Desenvolver rotas para a obtenção de extratos lixiviados ricos em cobre por hidrometalurgia e pirometalurgia.
- Avaliação do potencial de redução metálica do cobre em solução eletrolítica a partir de ensaios de voltametria cíclica para viabilizar a eletrodeposição do cobre.
- Avaliar a eficiência das rotas para obtenção do cobre metálico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Placas De Circuitos Impresso

A Placa de Circuito Impresso (PCIs) é um componente fundamental para o funcionamento de qualquer que seja o dispositivo eletrônico. Elas permitem a otimização de um espaço para a instalação de componentes eletrônicos, além de apresentar um “layout” que permite a facilidade de montagem de projetos, a manutenção dos componentes, a integração de circuitos e a padronização industrial. Elas desempenham um papel fundamental no universo da eletrônica, e sua diversidade de tipos reflete a complexidade e variedade de aplicações. Podemos classificar as PCIs em três categorias principais: simples face, dupla face e multicamadas [2].

As PCIs simples face consistem em apenas uma camada de metal, sendo ideais para circuitos simples e de baixa densidade. À medida que a complexidade dos circuitos aumenta, recorre-se às PCIs dupla face, que possuem duas camadas de metal, uma em cada lado da base. Essa configuração permite acomodar circuitos mais intrincados e de média densidade. Já as PCIs multicamadas, com mais de duas camadas de metal intercaladas por camadas isolantes, são reservadas para circuitos extremamente complexos e de alta densidade [2].

Além da estrutura, o material base das PCIs desempenha um papel crucial. As PCIs fenolite, compostas por papel celulose e resina fenólica, destacam-se por sua acessibilidade e resistência ao calor, embora sejam sensíveis à umidade. Por outro lado, as PCIs de fibra de vidro, com base nesse material e resina epóxi, são mais duráveis, mas também mais frágeis e dispendiosas [2].

Outro aspecto relevante na diversidade das PCIs é a cor do filme de soldagem. As PCIs verdes são as mais comuns, associadas a placas de circuito padrão, representando uma escolha convencional e econômica. As variantes em vermelho e azul, embora não apresentem funcionalidades técnicas específicas, são frequentemente escolhidas por motivos estéticos ou para diferenciar projetos. As PCIs pretas, por sua vez, estão associadas a produtos de alta qualidade e desempenho superior, enquanto as brancas, menos comuns, são escolhidas por razões estéticas ou para projetos específicos [2].

Em resumo, a diversidade de PCIs atende às demandas variadas da indústria eletrônica, oferecendo opções adaptadas a diferentes níveis de complexidade, ambientes e preferências estéticas. Essa variedade reflete a constante evolução e inovação no campo

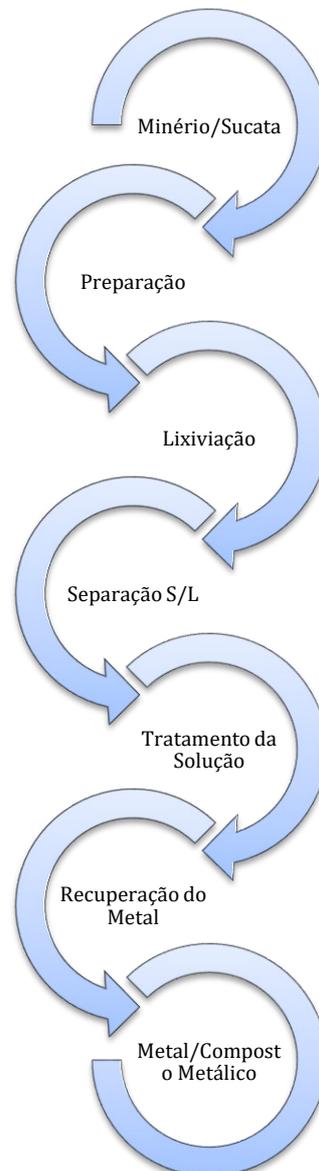
da eletrônica, proporcionando soluções adaptáveis às demandas crescentes e diversificadas da tecnologia [2].

3.2 Hidrometalurgia

Por definição geral o termo Hidrometalurgia designa os processos de extração de metais nos quais a principal etapa de separação metal-ganga envolve reações de dissolução do mineral-minério (mineral contendo os metais de interesse) em meio aquoso [1].

A Hidrometalurgia envolve uma série de etapas, são elas:

Figura 1 - Principais etapas dos processos Hidrometalúrgicos.



Fonte autor

A hidrometalurgia se configura como um método altamente eficaz para a recuperação de cobre proveniente de placas de circuito impresso, empregando soluções químicas para extrair metais a partir do material [8]. Um estudo conduzido na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo concentrou-se na aplicação da hidrometalurgia e biohidrometalurgia para a reciclagem de placas de circuito impresso [6]. De maneira similar, uma pesquisa realizada na Universidade do Porto também explorou a recuperação de metais de placas de circuito impresso por meio da hidrometalurgia [7].

Os processos hidrometalúrgicos utilizados na recuperação de cobre nas placas de circuito impresso envolvem etapas como a lixiviação com ácido sulfúrico, tanto na ausência quanto na presença de peróxido de hidrogênio [9]. Atualmente, já é viável reutilizar o cobre e outros metais presentes nas placas de circuito impresso por meio de processos químicos que empregam ácidos para a extração [10]. Assim, a hidrometalurgia desempenha um papel crucial na eficiente e sustentável reciclagem de placas de circuito impresso.

As placas de circuito impresso (PCIs) são consideradas análogas ao material sucateado ilustrado na figura acima. O material é coletado na forma de resíduos descartados, passando por uma etapa de preparação do PCI que inclui cominuição e separação granulométrica. A última é realizada por meio de peneiras metálicas, retendo o material, enquanto a primeira ocorre através de moinhos de facas ou moinhos de martelos. Após essa preparação, inicia-se o processo de lixiviação.

3.3 Lixiviação Ácida

Por definição a lixiviação é a dissolução de constituintes solúveis de um material em um meio aquoso, em geral, por ação de ácidos, bases ou solventes, podendo haver ainda outros meios lixiviantes não convencionais.

A lixiviação em meio ácido, também conhecida como lixiviação ácida, é um processo metalúrgico que envolve a dissolução de metais por meio de uma solução ácida [22]. Este método é mais eficaz para a extração de metais de minérios de extração mais complexa que a convencional de produtos para as siderúrgicas por exemplo, e é um dos métodos mais testados e comprovados [21].

A lixiviação ácida é comumente realizada agitando uma mistura de minério e ácido por 4 a até 48 horas à temperatura ambiente [19]. Exceto em circunstâncias

especiais, o ácido sulfúrico é o lixiviante utilizado usualmente por ser mais barato; ele é fornecido em quantidades suficientes para obter um licor de lixiviação final [19].

Exemplos incluem a extração de cobre de minério que contém óxido ou sulfeto e a dissolução de urânio de minérios de arenito [19]. A lixiviação ácida pode ocorrer em pilhas de lixiviação ou *in situ* [22].

O ácido muriático, também conhecido como ácido clorídrico, é um líquido poderoso e corrosivo composto por ácido clorídrico (HCl), água e outros minerais [25]. É frequentemente usado para remover produtos de cimento secos, como argamassa, concreto e rejunte, de pedras, tijolos e outras superfícies de alvenaria [25].

A água oxigenada (H₂O₂) é um agente oxidante comum usado em várias aplicações, incluindo o processo de lixiviação. Por exemplo, segundo a revista “The Spruce”, um estudo descreveu o processo de lixiviação de cobre com água oxigenada e ácido fórmico a partir de um concentrado de calcopirita [23].

3.4 Cominuição e cinética química

A cominuição, destacada pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) como um dos temas mais preponderantes no cenário do processamento mineral, assume uma posição de destaque devido a ser a área que absorve o maior investimento na maioria dos empreendimentos de mineração [28]. Em linhas gerais, a cominuição representa o processo fundamental de redução do tamanho das partículas de um material, recorrendo a métodos como esmagamento, moagem, corte, vibração, entre outros [30]. Essa etapa é crucial para a liberação dos minerais valiosos contidos no minério, possibilitando sua posterior recuperação e processamento [30].

No escopo específico deste trabalho, a atenção recai sobre a moagem ou trituração mecânica, uma vez que se configura como o processo mais pertinente para a abordagem proposta. Nesse contexto, partículas maiores, como aquelas provenientes de peças de Placas de Circuitos Impressos (PCIs), são submetidas a esmagamento ou moagem, resultando em sua quebra e refinamento a pó [31]. Este processo assume importância estratégica ao contribuir para o aumento da cinética química da lixiviação, destacando-se por diversas razões fundamentais.

Primeiramente, a cominuição destaca-se por promover o aumento da área de superfície total do material. Essa ampliação fornece mais locais para a ocorrência de reações químicas, acelerando assim as interações moleculares e proporcionando uma

dinâmica mais eficiente [32]. Além disso, ao reduzir o tamanho das partículas, a cominuição desempenha um papel crucial na melhoria da eficiência da lixiviação. Dado que a lixiviação é um processo de difusão, a taxa de difusão é inversamente proporcional ao tamanho das partículas [33].

Outro aspecto relevante é a liberação de minerais proporcionada pela cominuição, especialmente em relação a metais aprisionados por material refratário cerâmico. Esse processo possibilita a extração ou processamento mais eficiente desses metais, tornando-os mais acessíveis para os procedimentos subsequentes [32].

Em resumo, a cominuição não apenas se destaca como um estágio fundamental no processamento mineral, mas também desempenha um papel estratégico ao contribuir significativamente para a eficácia da lixiviação e viabilizar a extração eficiente de minerais valiosos. Seus efeitos benéficos, como o aumento da área de superfície, a melhoria da eficiência da lixiviação e a liberação de minerais, consolidam sua importância no cenário da mineração e processamento de minérios.

3.5 Pirometalurgia

A pirometalurgia se configura como um processo essencial no âmbito da metalurgia, onde minérios e metais são submetidos ao aquecimento para gerar produtos acabados, compostos funcionais, metais puros e ligas. Este método abrange diversas etapas, como secagem, torrefação, fundição, refinação e liga, entre outros [34]. Na pirometalurgia, destacam-se os processos de secagem, calcinação e fundição como os mais relevantes.

A secagem é um estágio fundamental que envolve o aquecimento do material a uma temperatura suficiente para eliminar a água e outros produtos de baixo ponto de ebulição. Esse processo é crucial para preparar o material para etapas subsequentes, removendo elementos voláteis que poderiam interferir nos processos metalúrgicos.

A calcinação, por sua vez, consiste na decomposição térmica de um material mediante o seu aquecimento, sem atingir o ponto de fusão, resultando na eliminação de produtos voláteis. Esse procedimento é particularmente relevante na transformação de minerais complexos, preparando-os para fases posteriores do processo metalúrgico.

A fundição, último processo destacado, ocorre quando o material é elevado acima de seu ponto de fusão, propiciando a redução química de óxidos e a fusão de resíduos metálicos. Este estágio é fundamental para a obtenção de metais em sua forma

pura ou a produção de ligas metálicas, constituindo-se como um ponto crucial na obtenção de produtos metalúrgicos finais.

Em síntese, a pirometalurgia engloba vários processos, desempenha um papel determinante na transformação de minérios em produtos metalúrgicos valiosos. Cada etapa contribui de maneira essencial para o sucesso do processo, desde a remoção de impurezas até a obtenção de metais puros e ligas, consolidando a importância desse método no panorama da metalurgia e na produção de materiais essenciais para diversas indústrias.

3.6 Ácido muriático + água oxigenada 10 vol.

A mistura de ácido muriático (solução com concentração de 10% HCl), de pH igual a -0,5, em água oxigenada 10 volumes (solução com concentração de 3% de H₂O₂), de pH igual a 2,5, é conhecida como ácido peracético, que possui pH igual a 2 quando estável, e tem capacidade de solubilizar alguns metais, como cobre, ferro e níquel, e é frequentemente usado em experimentos de química em processos de hidrometalurgia [37-39]. O ácido clorídrico catalisa uma decomposição exotérmica do peróxido de hidrogênio em oxigênio e água. Em um sistema isolado, o acúmulo de calor e gás não condensável aumenta a temperatura e a pressão neste processo de reação, levando a uma reação, geralmente, descontrolada.

Algumas reações que podem ocorrer em solução com componentes eletrônicos, onde M se refere aos metais, são:

- (1) $2\text{H}_2\text{O}_{(aq)} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+_{(aq)} + \text{OH}^-_{(aq)}$
- (2) $2\text{HCl}_{(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(aq)} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+_{(aq)} + \text{OH}^-_{(aq)} + 2\text{Cl}_{(aq)}$
- (3) $2\text{HCl}_{(aq)} + \text{H}_2\text{O}_2_{(aq)} \rightarrow \text{Cl}_{2(aq)} + 4\text{H}^+_{(aq)} + \text{O}_{2(g)}$
- (4) $4\text{H}^+_{(aq)} \rightarrow 2\text{H}_{2(g)}$
- (5) $\text{Cl}_{2(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(aq)} + \text{Al}_{(s)} = \text{HCl}_{(aq)} + \text{AlO}_{(aq)}$
- (6) $\text{MO}_{2(s)} + \text{HCl}_{(aq)} \rightarrow \text{MCl}_{2(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{2(aq)}$
- (7) $\text{M}_{(s)} + 2\text{HCl}_{(aq)} \rightarrow \text{MCl}_{2(aq)} + \text{H}_{2(aq)}$.

O ácido muriático, também conhecido como ácido clorídrico, é um ácido inorgânico forte que pode ser usado para controlar o pH de soluções básicas [40]. A água oxigenada, por outro lado, é um poderoso oxidante. Quando essas duas substâncias são combinadas, elas podem reagir com metais para formar sais e liberar íons hidrogênio [41].

Por exemplo, a mistura pode reagir com o ferro (Fe) para formar cloreto de ferro (FeCl_2) e gás hidrogênio (H_2), conforme a equação: $\text{Fe(s)} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{FeCl}_2(\text{aq}) + \text{H}_2(\text{g})$ [41].

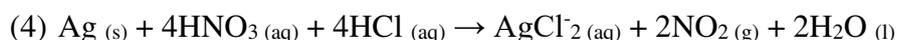
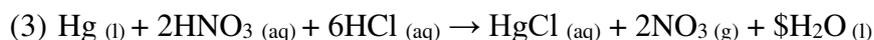
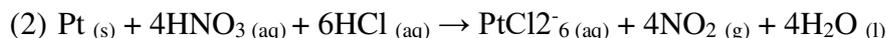
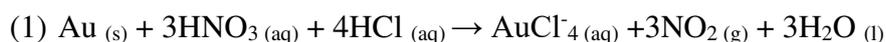
Na hidrometalurgia, essa mistura pode ser usada para lixiviar metais de minérios ou sucatas, permitindo a recuperação e refino de metais preciosos como o ouro [38][39]. No entanto, é importante notar que a manipulação dessas substâncias deve ser feita com cuidado, pois a mistura é altamente corrosiva e pode produzir gases tóxicos [42].

3.7 Água-régia

Água régia é uma mistura altamente corrosiva e oxidante de ácido nítrico (solução de concentração 30% de HNO_3), de pH menor que -2, e ácido clorídrico (solução de concentração 30% de HCl) de pH menor que -1, em uma proporção de aproximadamente 1:3. Essa mistura é conhecida por sua capacidade de dissolver metais nobres, como ouro e platina, que são geralmente inertes a muitos ácidos individuais.

A razão pela qual a água régia é tão eficaz na dissolução desses metais nobres está relacionada à formação de complexos solúveis em água com esses metais. O ácido nítrico é um agente oxidante forte, enquanto o ácido clorídrico fornece íons cloreto que ajudam na formação dos complexos solúveis.

Algumas reações que podem ocorrer em solução com componentes eletrônicos são:



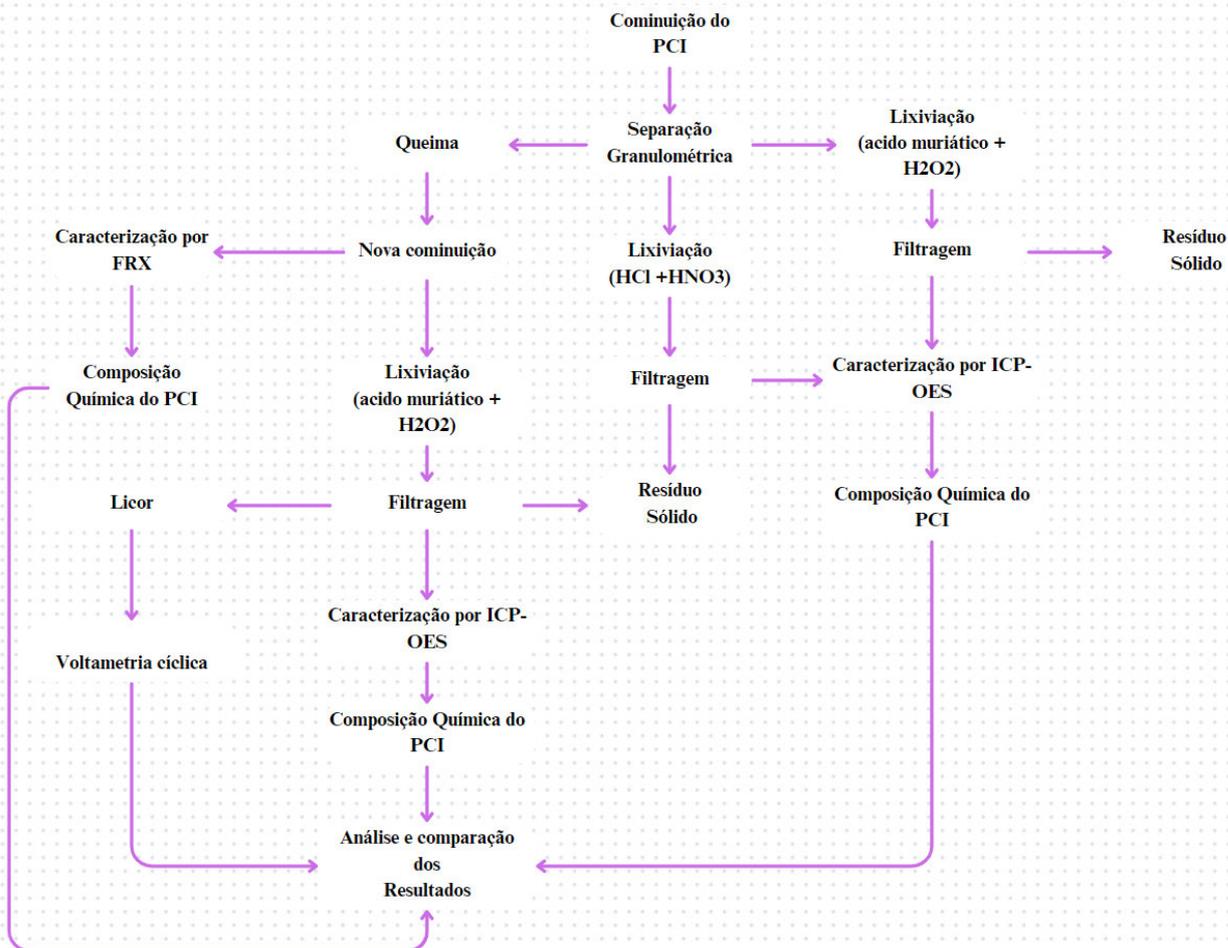
4 METODOLOGIA

Os ensaios realizados ao longo deste trabalho com soluções lixiviantes foram realizados no Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC). A caracterização química dos metais contidos na solução lixiviada foi realizada através de técnica de Espectrometria de Emissão Ótica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) e foram realizadas no Laboratório de Química Industrial (LQI), no Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEQ). A análise de Fluorescência de Raio-X (FRX) foi realizada no Laboratório Laboratório de Raio X (LRX) no departamento de Física da Universidade Federal do Ceará.

Foi disponibilizado para a realização deste trabalho a quantidade de 10 kg de resíduo Eletrônico na forma de PCI verde já cominuído por moinhos de martelos. A partir desse material foram retiradas amostras para a realização de todos os ensaios que serão discutidos neste trabalho.

Durante todas as etapas, que envolveram manipulação de soluções ácidas, manipulação de material em altas temperaturas e nas etapas de cominuição de materiais a pós para a realização deste trabalho, foram realizadas segundo as normas de boas práticas de segurança, sempre que, havendo a necessidade, fazendo a utilização dos EPIs convenientes a cada processo.

Figura 2 - Fluxograma dos processos realizados



Fonte autor

4.1 Preparação

Devido ao recebimento dos resíduos eletrônicos muito heterogêneos e a variedade de tamanho de seus fragmentos cominuídos pelo moinho, foi preciso realizar uma separação granulométrica em peneiras de telas no Laboratório de Materiais Cerâmicos da NUTEC, foram utilizadas 4 (quatro) granulometrias distintas, de 9,50 mm, de 4,75 mm, de 2,36 mm e de 1,18 mm mais o fundo de peneira. Ao final do peneiramento de telas, foi observado que muitos fios de cobre e sujeira passaram pelas peneiras e se depositaram no fundo, que também foi separado dos outros, totalizando 4 granulometrias e material de fundo de peneiração.

Ao se analisar a etapa de cominuição e beneficiamento do material alguns testes mecânicos foram realizados para conseguir reduzir o tamanho do material, sem que

fossem contaminadas as amostras por outros metais, mas não obtive sucesso. Dentre os testes utilizados estão redução de granulometria por ação de moinhos de bolas cerâmicas e liquidificador adaptado para processar o material com lâminas de plástico, não houve redução expressiva.

O passo seguinte foi a análise do teor de metais contido nas placas de circuito impresso por técnica de FRX, o material foi calcinado e reduzido sua granulometria para valores inferiores às 200 mesh para a realização dos ensaios. Em posse dos resultados desse processo, será obtido os percentuais em massa do teor metálico contido nas placas de circuito impresso e de qual é a perspectiva para se obter a recuperação desses metais.

Após esses processos foram iniciadas as etapas de lixiviação e comparação das observações e resultados das soluções de água-régia e ácido muriático com água oxigenada 10 volumes, para análise dos percentuais de beneficiamento de cobre no licor.

4.2 Lixiviações

Para o processo de lixiviação dos PCIs foram utilizadas duas soluções ácidas distintas, 100 ml de água régia que é uma mistura de 25 ml de ácido nítrico com 75 ml de ácido clorídrico e uma solução alternativa não muito convencional de 100 ml com 50 ml de ácido muriático comercial e 50 ml de água oxigenada 10 volumes comercial.

Ao todo foram preparadas 24 soluções, 1 triplicata para cada tipo de granulometria, ou seja, totalizando 12 amostras para água régia e 12 amostras para ácido muriático com água oxigenada 10 volumes.

Foram pesadas e separadas aproximadamente 5g de PCI por amostra para a realização da lixiviação com água régia.

Para cada amostra foi designado um nome:

A = granulometria 1.18 mm

B = granulometria 2.36 mm

C = granulometria 4.75 mm

D = granulometria 9.50 mm

A intenção era utilizar a seguinte proporcionalidade, para cada 1 grama de soluto, 20 gramas seria de solvente. Também foi preparada uma amostra em branco de 10 ml de água régia para acompanhamento e comparação.

A PCI ficou submerso em água régia durante o tempo de 24 horas, de forma estática, após esse tempo foi realizado o processo de filtragem das soluções.

As massas pesadas antes da lixiviação das amostras em triplicatas separadas são:

Tabela 1 - Peso das amostras para água-régia (g).

A		B		C		D	
A.1	5,0733	B.1	5,0503	C.1	5,0079	D.1	5,0460
A.2	5,0429	B.2	5,0519	C.2	5,1948	D.2	4,9801
A.3	4,9972	B.3	5,0734	C.3	5,1369	D.3	5,3381

Fonte autor.

Foram pesadas e separadas aproximadamente 10g de PCI por amostra para a realização da lixiviação com ácido muriático mais água oxigenada 10 volumes.

Para cada amostra foi designado um nome:

A = granulometria 1.18 mm

B = granulometria 2.36 mm

C = granulometria 4.75 mm

D = granulometria 9.50 mm

Por consequência os nomes e as massas pesadas das amostras triplicatas separadas são:

Tabela 2 - Massa em gramas das amostras para ácido muriático com água oxigenada 10 vol.

A		B		C		D	
A.1	10,5497	B.1	10,0758	C.1	10,2893	D.1	10,3466
A.2	10,5588	B.2	10,0276	C.2	10,1092	D.2	10,6609
A.3	10,0335	B.3	10,2539	C.3	10,1926	D.3	9,5704

Fonte autor.

O PCI ficou submerso em solução ácida de 50 ml de ácido muriático comercial mais 50 ml de água oxigenada 10 vol. comercial por 72 horas, de forma estática, após esse tempo foi realizada a filtração de modo análogo ao procedimento anterior.

Os filtros utilizados foram filtros de papéis, eles foram contados em formas circulares e pesados antes da filtração.

4.3 Licor resultante da água régia

A solução líquida resultante foi armazenada em garrafas de vidros. Foram colhidas 30ml de cada uma das 12 amostras para a realização de análise química por ICP-OES. Após isso, os licores de materiais de mesma granulometria foram armazenados em uma mesma garrafa de vidro para descarte adequado em segurança.

4.4 Licor resultante ácido muriático com água oxigenada 10 vol.

A solução líquida resultante foi armazenada em garrafas de vidros. Foram colhidas 0,5 ml de cada uma das 12 amostras para a realização de análise química por ICP-OES, cada amostra foi diluída em 100 ml para análise. Após isso, os licores de materiais de mesma granulometria foram armazenados em uma mesma garrafa de vidro para preservação em segurança.

4.5 Filtragem das soluções

O esquema a seguir detalha o processo de filtragem do material, que é montado o funil com papel de filtro em um tripé que filtra solução e goteja em um becker.

Figura 3: Esquema de filtragem de soluções.



Fonte autor.

Figura 4: Esquema de filtragem de soluções.



Fonte autor.

4.7 Caracterização ICP-OES

Para a realização de análise de ICP-OES, na rota somente hidrometalúrgica, primeiramente, foi retirado uma alíquota de 0,5 ml de cada amostra diluída em 100 ml de solvente para análise de soluções de água régia e de ácido muriático com água oxigenada 10 vol.

Para a realização de análise de ICP-OES, na rota pirometalúrgica e hidrometalúrgica, primeiramente, foi retirado uma alíquota de 0,5 ml de cada amostra diluída em 250 ml de solvente para análise de soluções de água régia e de ácido muriático com água oxigenada 10 vol.

4.8 Calcinação de PCI para caracterização por FRX

Para o processo de calcinação de PCI foram utilizados 12 cadinhos de material refratário cerâmico, eles foram divididos em 4 grupos de 3 amostras, para que fossem analisadas triplicatas das 4 diferentes granulometrias.

Os cadinhos foram levados ao forno mufla e foram aquecidos à temperatura ambiente até 800 °C em uma taxa de aquecimento de 30 °C por minuto. As amostras ficaram no forno por 1 hora e 30 minutos.

4.9 Caracterização em FRX

A análise química por meio da técnica de Fluorescência de Raios X (FRX) foi conduzida utilizando o ZSXMini II, um equipamento fabricado pela Rigaku e pertencente ao Laboratório de Raios X da Universidade Federal do Ceará (UFC). Este aparelho está equipado com dois detectores, denominados de fluxo e cintilante, e faz uso de três monocromadores (LiF, PET e TAP) para realizar a dispersão em comprimento de onda (WDXRF). Os monocromadores são responsáveis por utilizar a equação de Bragg a fim de selecionar os fótons de raios-X característicos de cada elemento atômico [47].

O ZSXMini operou sob uma tensão de 40 kV e uma corrente de 1,20 mA em uma atmosfera a vácuo. Essas condições permitiram que o equipamento realizasse a análise de elementos que vão desde o flúor (F) até o urânio (U). No entanto, é importante notar que elementos de tamanho atômico inferior ao flúor, como o carbono, não podem ser detectados por este equipamento [47].

4.10 Rota pirometalúrgica + hidrometalúrgica

Com o objetivo de melhorar os resultados de beneficiamento do licor resultante da lixiviação por ácido muriático com água oxigenada 10 volumes, foram realizadas calcinações para volatizar materiais que não eram de interesse, como polímeros, e fragilizar o material para se reduzir sua granulométrica.

Para realização da calcinação, foi separada 100 gramas de cada umas das 4 granulometrias, A, B, C e D de PCI e levadas ao forno mufla, em cadinhos, e foram aquecidos à temperatura ambiente até 800 °C em uma taxa de aquecimento de 30 °C por minuto por 1 hora e 30 minutos.

Após a calcinação, o material foi misturado e cominuído com gral e pistilo de porcelana, com resultado de 2 granulometrias de interesse 60 mesh e 20 mesh, na forma de pó.

Para cominuição do material foi utilizados os seguintes materiais:

Figura 5: Gral e pistilo de cerâmica para pós finos.



Fonte autor.

É possível ver na imagem o pó gerado pela cominuição do PCI após a calcinação.

Figura 6: Gral e pistilo de porcelana para partículas grosseiras.



Fonte autor.

Foram preparadas triplicatas para as 2 granulometrias para serem atacadas pela solução ácida composta por 50 ml ácido muriático mais 50 ml água oxigenada 10 vol., totalizando 6 amostras.

As soluções foram cobertas por plástico filme e mantidas em repouso por 72 horas. Após isso, foram filtradas por filtros de papéis, e, posteriormente, todos os sólidos retidos e filtros foram levados à estufa para remoção de umidade excessiva.

Depois deste processo foram realizadas as observações de perdas de massa.

Para cada amostra foi designado um nome:

X = granulometria 20 mesh.

Z = granulometria 60 mesh.

Massas iniciais antes do processo:

Tabela 3 - Massa das amostras para ácido muriático com água oxigenada 10 vol. em gramas.

X		Z	
X.1	10,02	Z.1	10,17
X.2	10,09	Z.2	10,03
X.3	10,05	Z.3	10,02

Fonte autor.

4.11 Ensaios eletroquímicos

Nas amostras X e Z foram realizados vários testes pela técnica de voltametria para identificar o melhor potencial de redução para o cobre. Após esses testes, foi realizado o processo de eletrodeposição, forçando a solução ao potencial encontrado, possibilitando obter a recuperação do cobre da solução lixiviada.

4.12 Voltametria

Foram realizadas voltametrias em licores obtidos das reações da lixiviação do PCI em ácido muriático e água oxigenada 10 vol., preferiu-se a utilização de licores de pó de PCI por ser mais homogêneo.

A voltametria foi realizada no equipamento Autolab PGSTAT100N. Foram realizados 6 testes de voltametria para cada solução Z e X, cujo granulometrias são as menores obtidas neste trabalho, para verificar o melhor potencial de redução da solução.

Foi realizada uma média geral entre todas as amostras e uma margem de erro médio através de desvio padrão médio.

O Autolab PGSTAT100N representa um potencióstato ou galvanóstato modular que oferece uma voltagem de saída de 100 V e uma corrente máxima de 250 mA. Este equipamento atende às exigências de pesquisa no campo da eletroquímica, proporcionando medições em condições extremas, tais como eletrólitos orgânicos, inorgânicos e solos.

Os eletrodos utilizados foram: contra-eletrodo de platina, eletrodo de referência de prata/cloreto de prata e eletrodo de trabalho de cobre. Além disso, para cada teste de voltametria realizava o lixamento e limpeza do eletrodo para remover qualquer camada de material eletro-depositado, para que não ocorra interferência na análise.

O programa utilizado para a análise foi o NOVA versão 2.10 do Autolab e os intervalos de correntes aplicados para a voltametria foram de + 0,2 A à - 0,2 A com tempo médio de 1 minuto por ciclo para ampliar a eficiência do processo.

5 RESULTADOS

5.1 Preparação

Na etapa de peneiramento e separação granulométrica notou-se uma facilidade para os fios de cobre se soltarem por completo do material cominuído. Dessa forma, foi registrado que de 10 kg de massa total de resíduos eletrônicos mediu-se 2,0 kg de fios de cobre que se soltaram e se depositaram ao fundo do pote das peneiras, um método simples e que talvez seja de interesse para indústrias que exploram comercialmente as atividades de reciclagem de sucatas e de materiais similares aos resíduos eletrônicos.

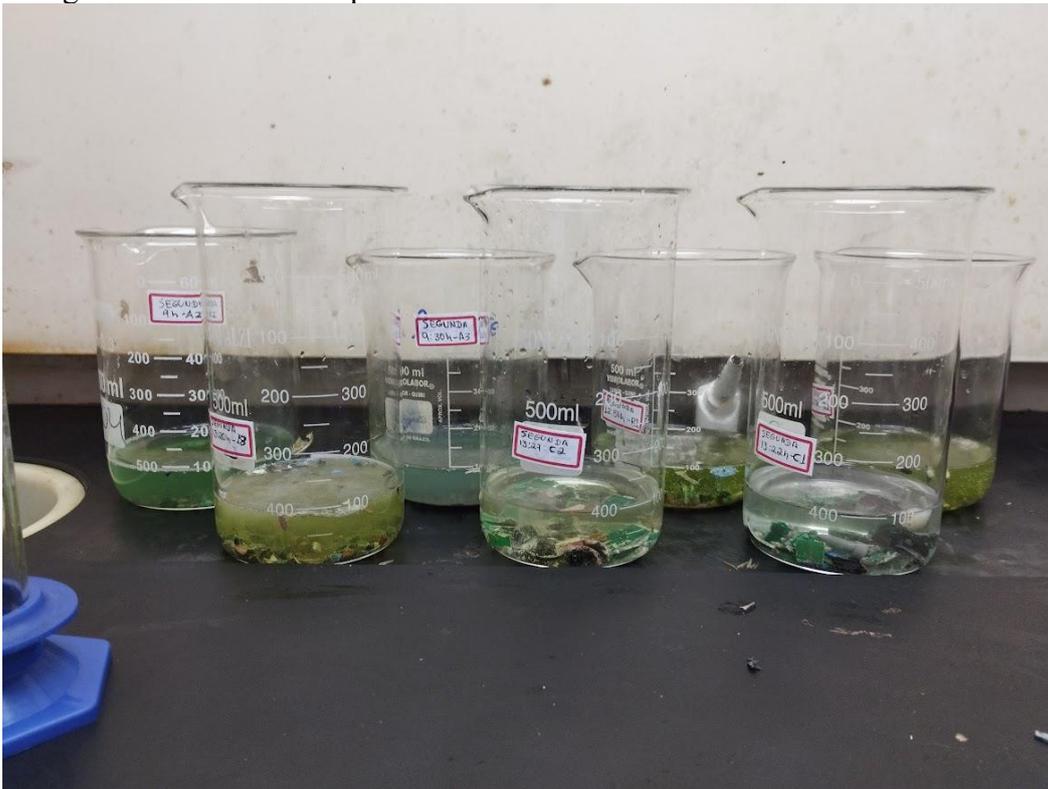
Fazendo uma reflexão sobre esse ponto, a elaboração de um moinho acoplado a um filtro de tambor rotativo por si só já segregaria e beneficiaria muito material reduzindo a mão de etapas de beneficiamento posterior.

5.2 Rota somente hidrometalúrgica

Em primeiro momento, em análise aos materiais lixiviados com ácido muriático mais água oxigenada, não se observou expressiva reação quando posto o sólido em contato com a solução ácida, não foi percebido borbulhamento e nem variação da temperatura.

A fotografia a seguir demonstra que não ocorreu expressiva mudança logo no início do processo, devido a heterogeneidade do material de suas granulometrias e distribuição, todas as soluções se comportam de maneiras distintas umas das outras.

Figura 7: Material PCI após 1h em meio ácido.



Fonte autor.

Demonstra a coloração variada e comportamento distinto para todas as amostras.

Figura 8: Material coloração diferente



Fonte autor.

Para uma mesma granulometria material com coloração diferente, implicando composição química diferente de produtos em solução.

5.3 Lixiviação água régia

Os valores obtidos são os seguintes:

Tabela 4 - Massa dos papéis filtros secos em gramas.

A		B		C		D	
A.1	1,4212	B.1	1,3930	C.1	1,4326	D.1	1,4633
A.2	1,3840	B.2	1,4144	C.2	1,4330	D.2	1,4570
A.3	1,4445	B.3	1,4304	C.3	1,4833	D.3	1,4615

Fonte autor.

Tabela 5 - Massa do sólido retido pela filtragem em gramas.

A		B		C		D	
A.1	2,6036	B.1	3,1324	C.1	3,2055	D.1	4,0324
A.2	2,6743	B.2	2,422	C.2	4,421	D.2	3,9096
A.3	2,4912	B.3	2,8931	C.3	3,7054	D.3	4,1079

Fonte autor.

Após a filtragem, para que fosse realizada a pesagem a seco, os papéis filtros foram levados para processo de secagem em estufa, foram postos a uma atmosfera de 70 °C por 1 hora. Após isso, foi registrada uma nova pesagem com a massa de sólido retida em cada papel de filtro.

Os valores obtidos são os seguintes:

Tabela 6 - Massa total retido + filtro em gramas.

A		B		C		D	
A.1	4,0248	B.1	4,5254	C.1	4,6381	D.1	5,4957
A.2	4,0583	B.2	3,8364	C.2	5,8540	D.2	5,3666
A.3	3,9357	B.3	4,3235	C.3	5,1887	D.3	5,5694

Fonte autor.

A massa de material sólido total que foi dissolvida em meio ácido no do processo de lixiviação com água régia após 24 horas foi a seguinte:

Tabela 7 - Massa do dissolvido em ácido em gramas.

	A	B	C	D			
A.1	2,4697	B.1	1,9179	C.1	1,8024	D.1	1,0136
A.2	2,3686	B.2	2,6299	C.2	0,7738	D.2	1,0705
A.3	2,506	B.3	2,1803	C.3	1,4315	D.3	1,2302

Fonte autor.

5.4 lixiviações de ácido muriático e água oxigenada 10vol.

Os valores obtidos são os seguintes:

Tabela 8 - Massa dos filtros em gramas.

	A	B	C	D			
A.1	1,4212	B.1	1,393	C.1	1,4326	D.1	1,4633
A.2	1,384	B.2	1,4144	C.2	1,433	D.2	1,457
A.3	1,4445	B.3	1,4304	C.3	1,4833	D.3	1,4615

Fonte autor.

Após a filtragem, para que fosse realizada a pesagem a seco, os papéis filtros foram levados para processo de secagem em estufa, foram postos a uma atmosfera de 70 °C por 1 hora. Após isso, foi registrada uma nova pesagem com a massa de sólido retida em cada papel de filtro.

Os valores obtidos são os seguintes:

Tabela 9 - Massa retida em gramas.

	A	B	C	D			
A.1	0	B.1	9,33	C.1	9,1634	D.1	8,9557
A.2	9,697	B.2	9,4836	C.2	9,41	D.2	9,474
A.3	9,8415	B.3	9,1436	C.3	9,4847	D.3	9,4025

Fonte autor.

Tabela 10 - Massa total retido + filtro em gramas.

	A	B	C	D			
A.1	0	B.1	10,723	C.1	10,596	D.1	10,419
A.2	12,465	B.2	10,898	C.2	10,843	D.2	10,931
A.3	11,286	B.3	10,574	C.3	10,968	D.3	10,864

Fonte autor.

A massa de material sólido total que foi dissolvida em meio ácido no do processo de lixiviação com ácido muriático e água oxigenada 10 vol. após 72 horas foi a seguinte:

Tabela 11 - Massa do dissolvido em ácido em gramas.

	A	B	C	D			
A.1	0	B.1	0,7458	C.1	1,1259	D.1	1,3909
A.2	0,8618	B.2	0,544	C.2	0,6992	D.2	1,1869
A.3	0,192	B.3	1,1103	C.3	0,7079	D.3	0,1679

Fonte autor.

5.5 Rota pirometalúrgica + Hidrometalúrgica

5.5.1 Observações dos produtos da calcinação

Ao observar a imagem abaixo temos o resultado do PCI calcinação do no forno mufla, seguindo a ordem da esquerda à direita temos as granulometrias D, C, B e A, respectivamente.

Sendo elas:

A = granulometria 1.18 mm. C = granulometria 4.75 mm.

B = granulometria 2.36 mm. D = granulometria 9.50 mm.

Figura 9: Produto da calcinação.

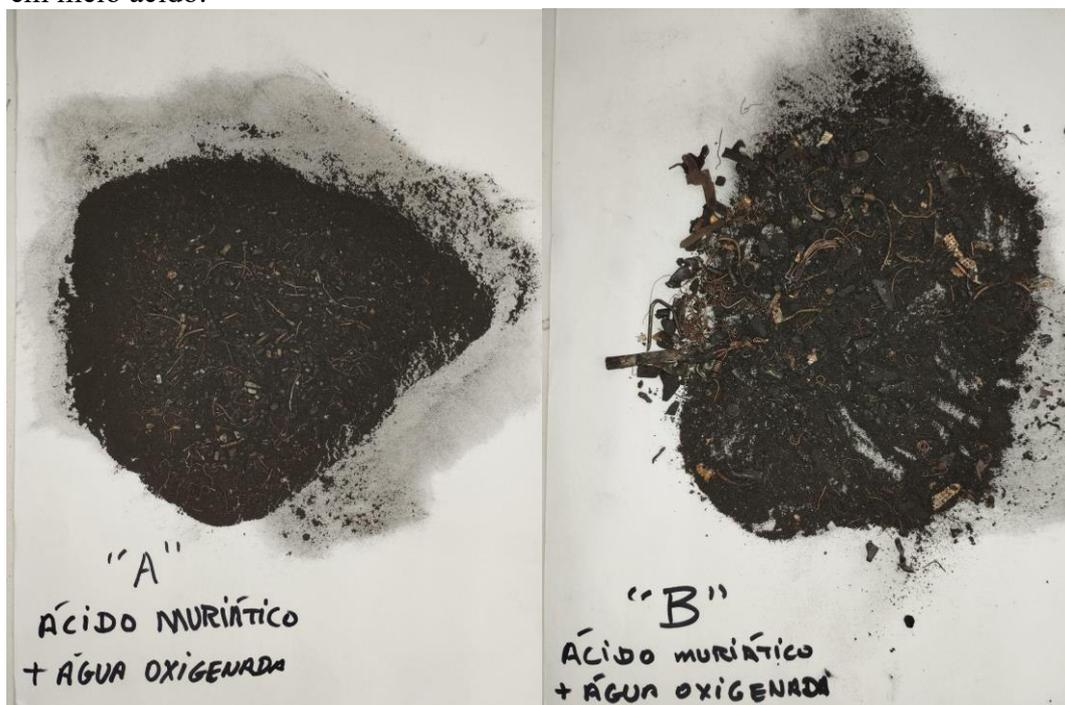


Fonte autor.

Foi observado que houve a formação de pequenas esferas de metais que se fundiram e se misturam devido ao processo de calcinação do material.

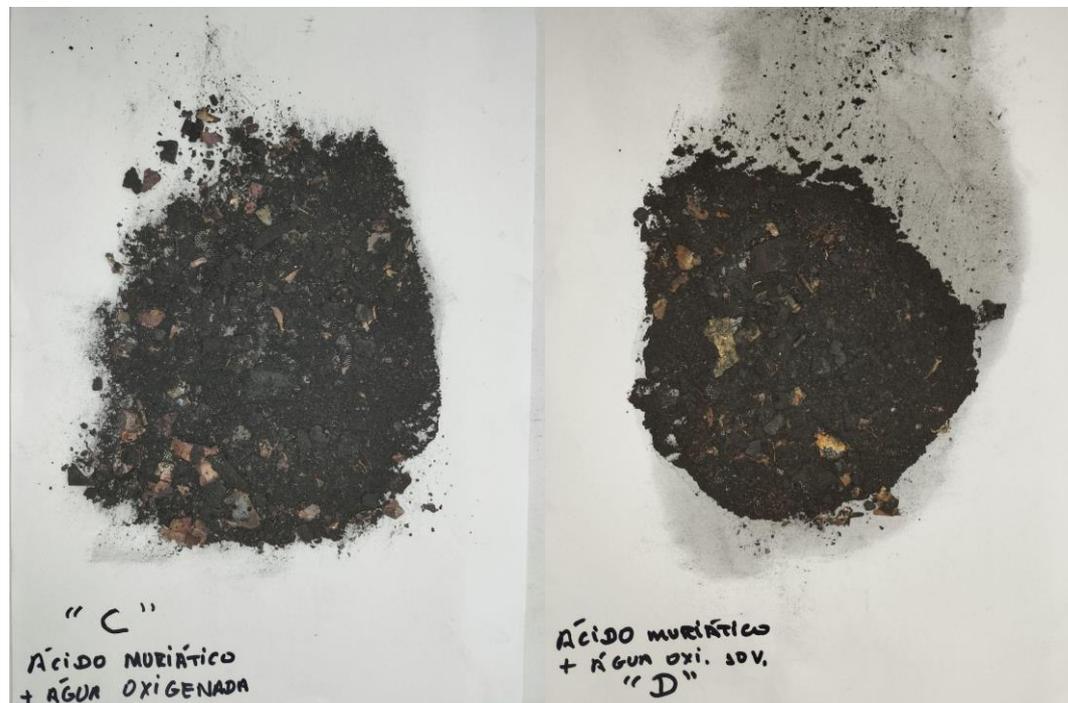
A calcinação das diferentes granulometrias resultou em sobras de materiais metálicos de tamanhos variados de acordo com seu tamanho. Na análise visual da calcinação é perceptível a grande quantidade de cobre e alumínio entre o pó gerado da calcinação e da cominuição. Nas figuras a seguir é possível ver os diferentes metais dispersos no pó, com grande variação no formato e composição, com destaque para a quantidade de fios de cobre dispersos.

Figuras 10 e 11: PCIs de granulometrias A e B, preparadas para lixiviação em meio ácido.



Fonte autor.

Figura 12 e 13: PCIs de granulometrias C e D, preparadas para lixiviação em meio ácido.



Fonte autor.

5.5.2 Lixiviação do pó da calcinação

Em primeiro momento, percebeu-se que a reação foi mais rápida e espontânea do que no processo sem a calcinação do material, assim que o material foi posto em contato com a solução ácida houve um intenso borbulhamento e elevação da temperatura da solução.

Foram registradas as imagens ao longo do processo de lixiviação ácida ao decorrer de cada 24 h do processo, foram utilizados béqueres de 500 ml para armazenar a solução durante o processo.

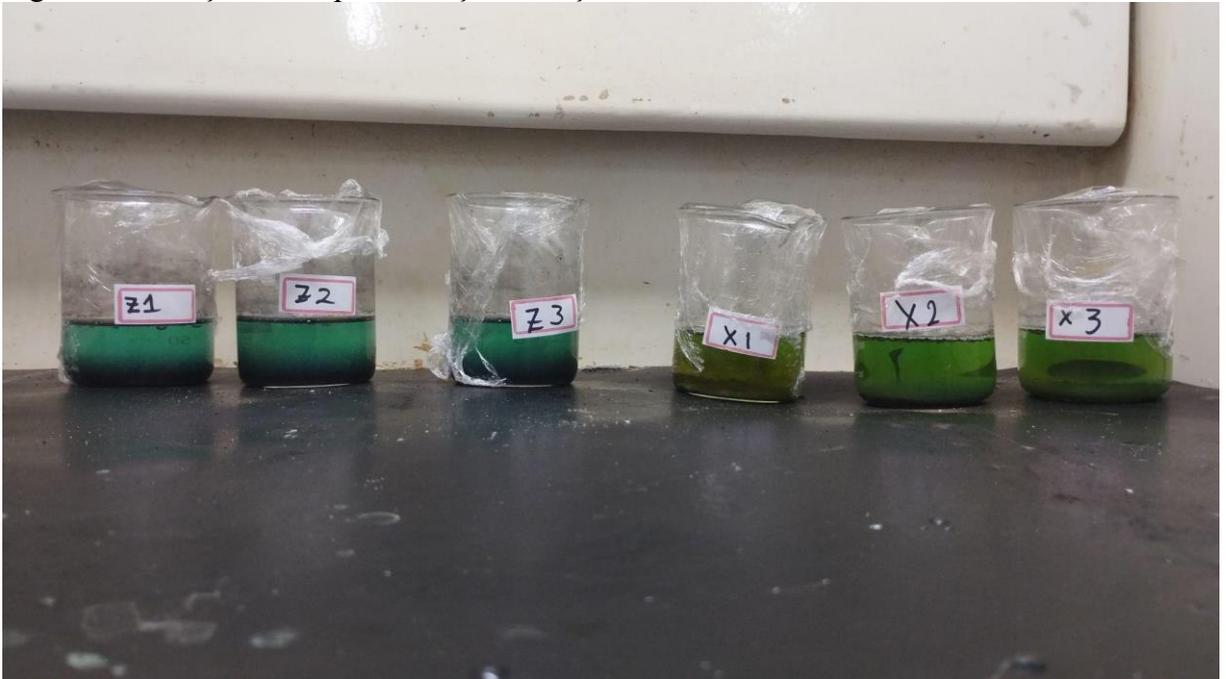
Seguem-se imagens do processo:

Figura 14: Solução poucos minutos após começo de reação.



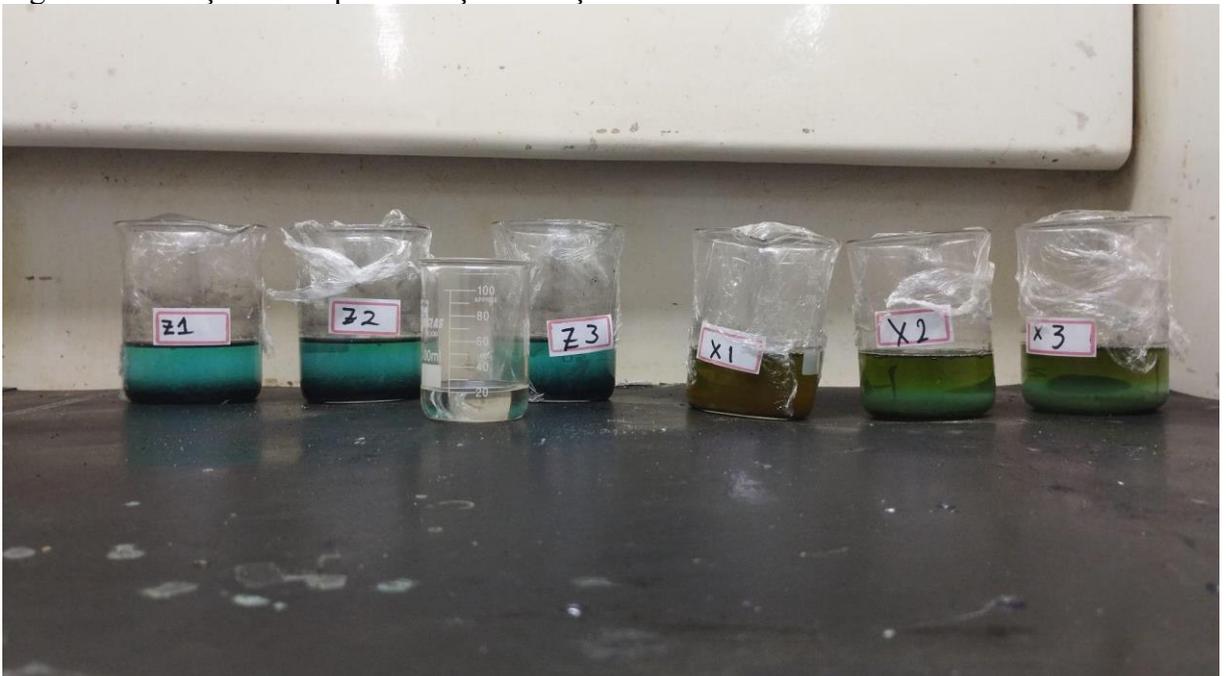
Fonte autor.

Figura 15: Solução 24 h após começo de reação.



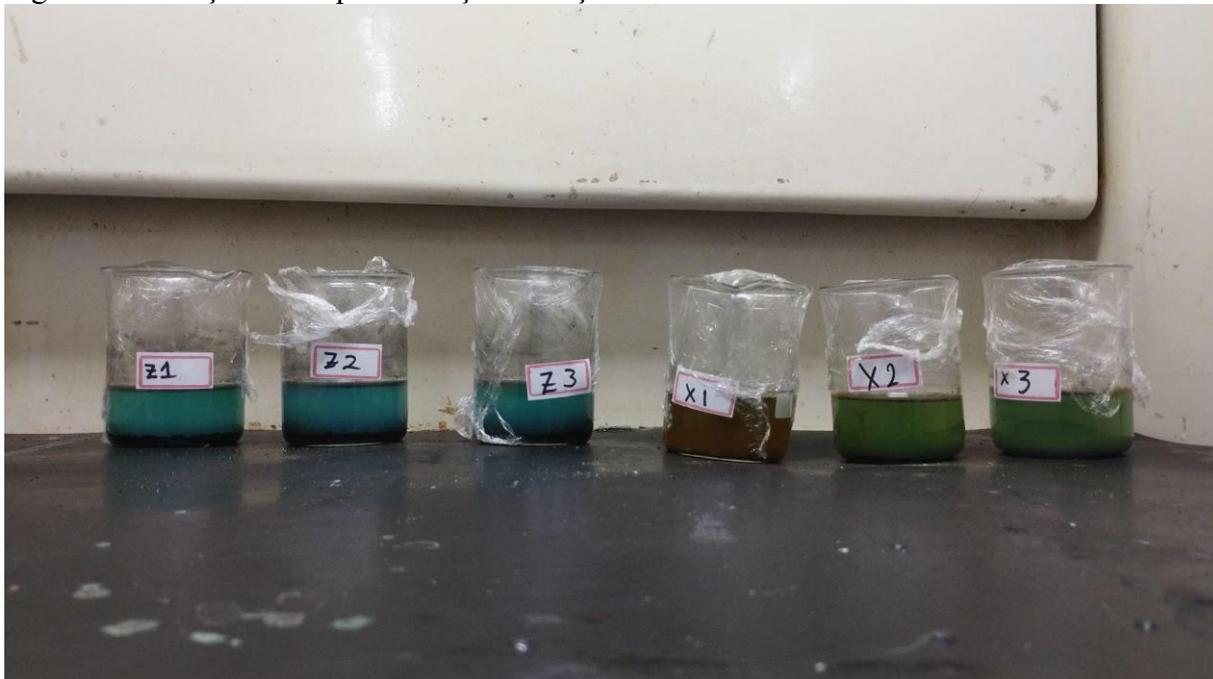
Fonte autor.

Figura 16: Solução 48 h após começo de reação.



Fonte autor.

Figura 17: Solução 72 h após começo de reação.



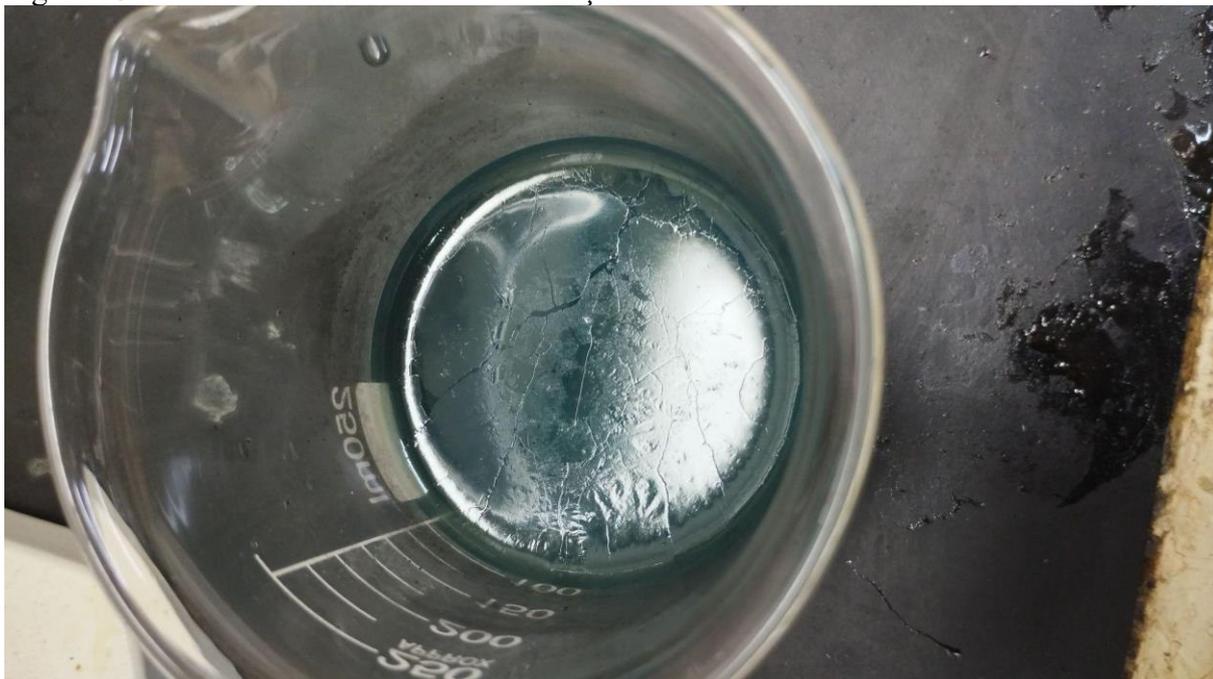
Fonte autor.

É visível a variação de cor das granulometrias mais grosseiras para as mais finas, a mais fina resultou em uma coloração mais azul anil e a mais grossa mais esverdeada e ou amarronzada. No fundo do Baker se deposita o material que está sendo dissolvido de coloração mais escura devido a calcinação realizada anteriormente.

Na etapa pré-filtragem da solução, foi observada a formação de uma película sobre a superfície do líquido, que provavelmente seria óxido de cobre, mais fina na solução X e mais grossa na solução Z.

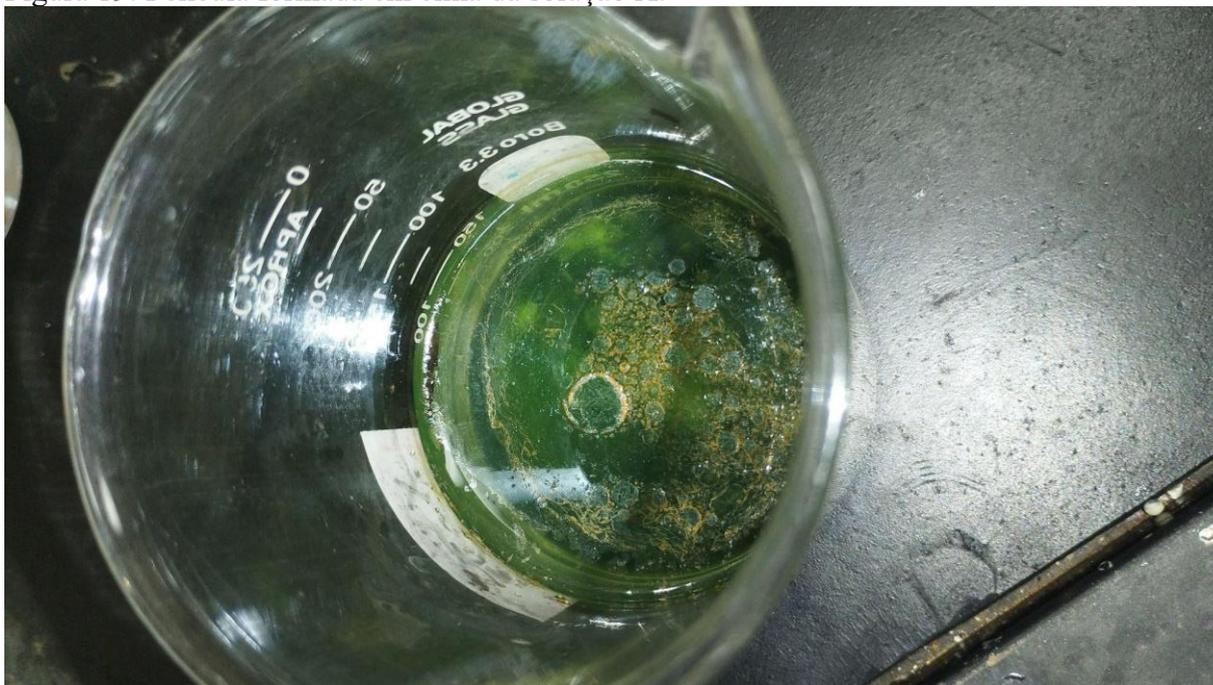
Segue-se fotografias dos observados:

Figura 18: Película formada em cima da solução Z.



Fonte autor.

Figura 19: Película formada em cima da solução X.

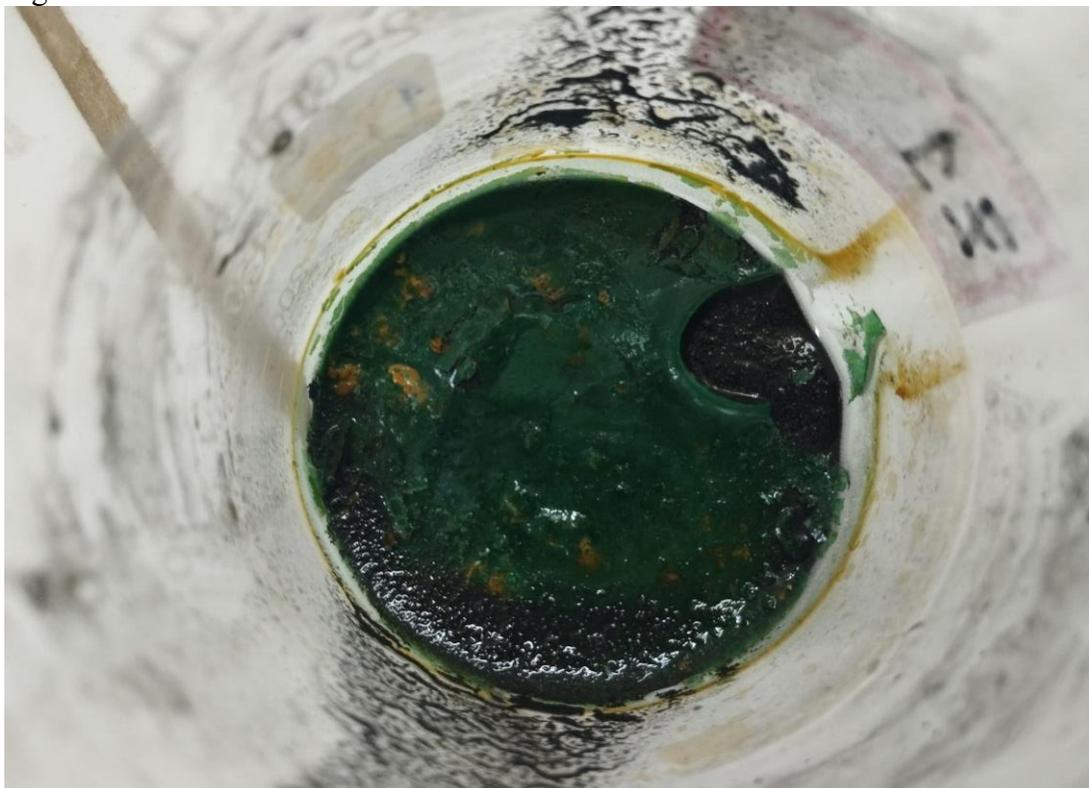


Fonte autor.

Após o processo de filtração, o sólido retido na filtração foi armazenado e deixado em repouso nos backer. No curso de 24 h, observou-se que sobre o material armazenado criou-se uma fina camada esverdeada, provavelmente óxidos ou sulfetos de cobre, essa camada era mais grossa em Z e esverdeada do que em X que era mais amarelada.

Seguem-se fotografias das camadas:

Figura 20: Camada formada em cima do sólido retido Z.



Fonte autor.

Figura 21: Camada formada em cima do sólido retido X.



Fonte autor.

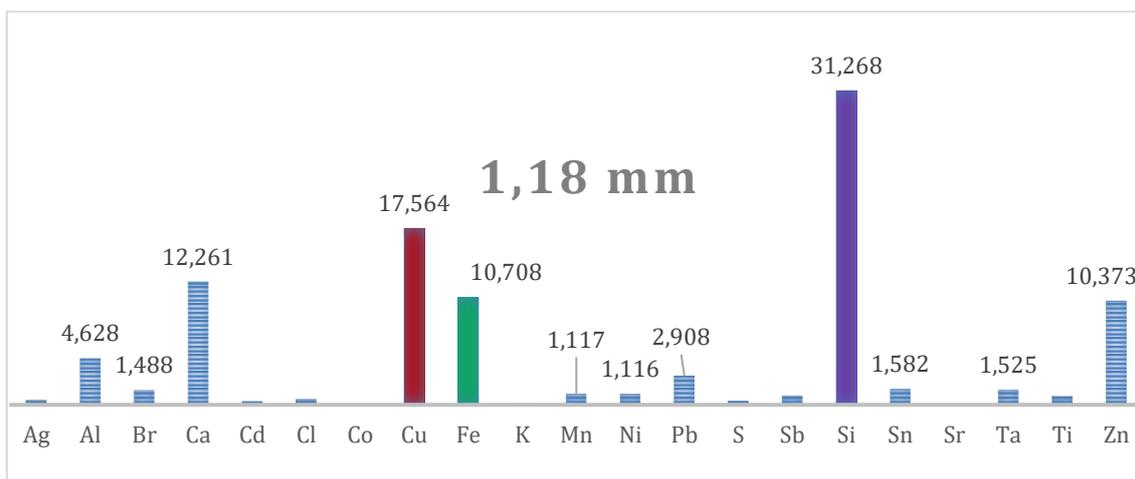
5.6 Caracterização

5.6.2 FRX

Foi observado que os maiores teores em percentual de massa das amostras trabalhadas foram para os elementos silício, cobre e ferro, sendo dentre esses o mais abundante o silício. Além disso, percebeu-se que à medida que aumenta a granulometria do material da análise tem o crescimento de teores de alumínio e cálcio.

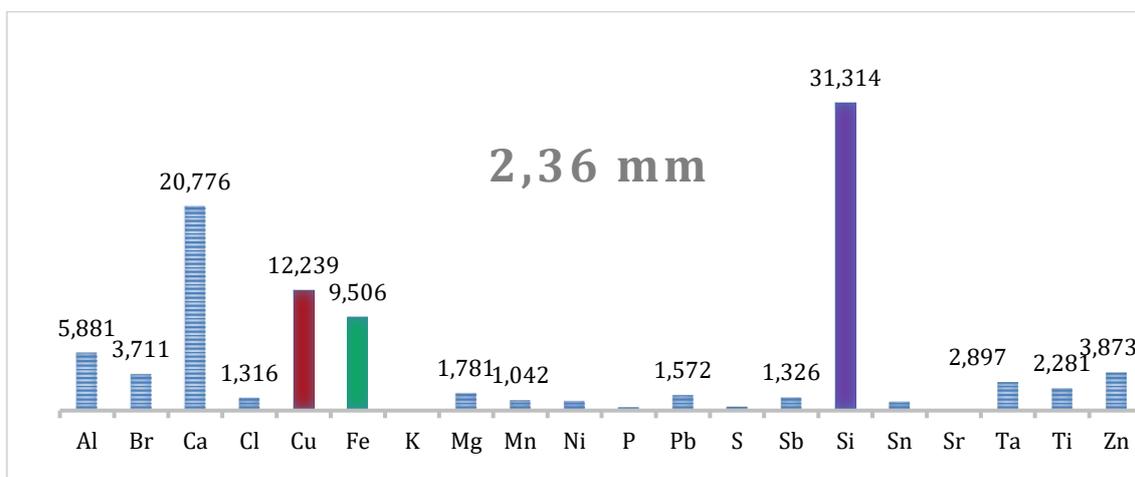
Em posse desses resultados, é possível ter uma estimativa do potencial que se pode ter na recuperação do cobre para cada tipo de granulometria

Gráfico 1: Percentual em massa 1,18 mm.



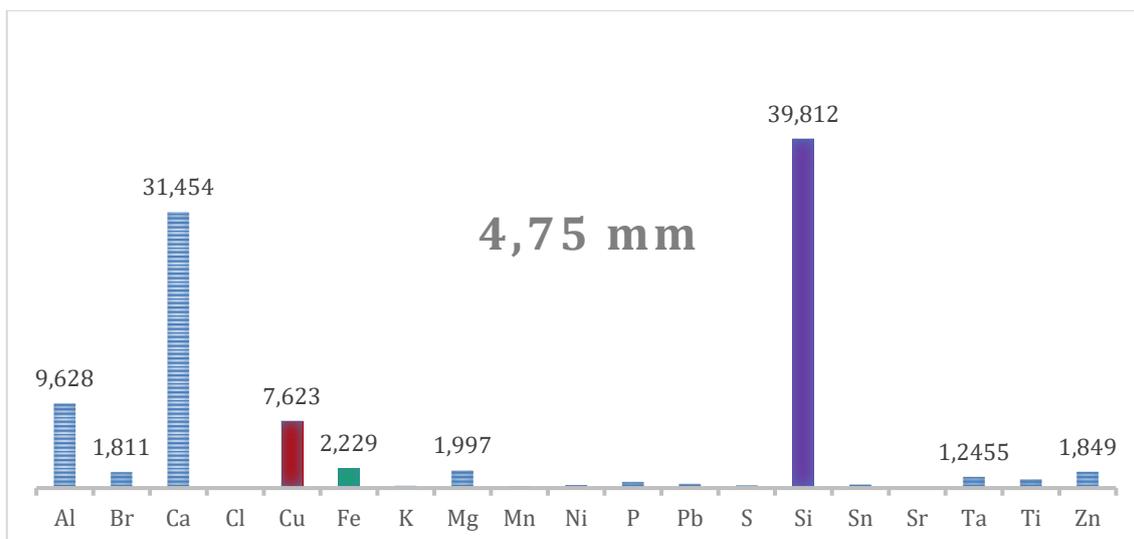
Fonte autor.

Gráfico 2: Percentual em massa 2,36 mm.



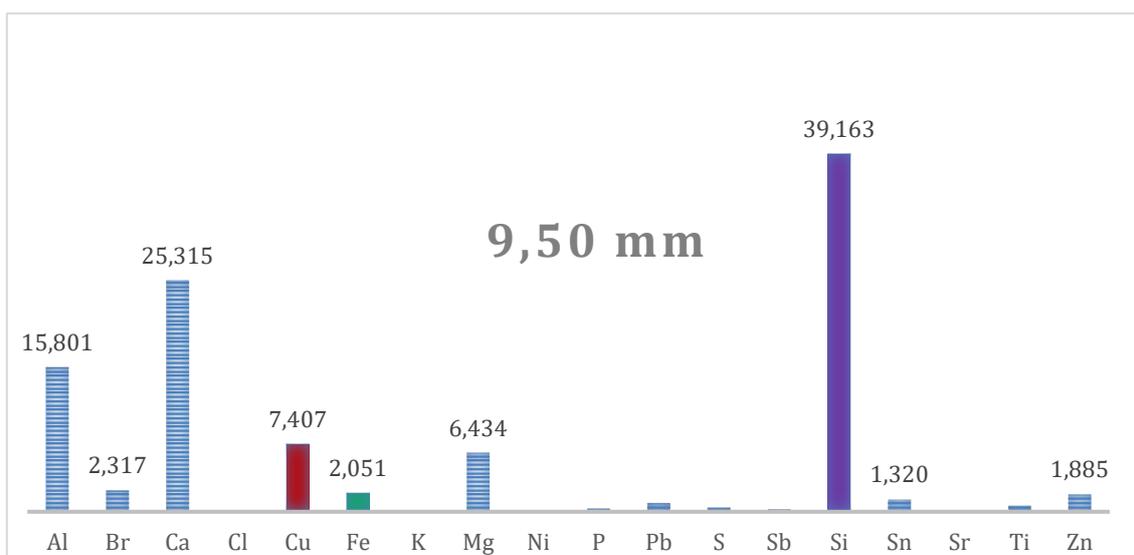
Fonte autor.

Gráfico 3: Percentual em massa 4,75 mm.



Fonte autor.

Gráfico 4: Percentual em massa 9,50 mm.



Fonte autor.

Os valores detalhados da análise de FRX estão ineridos nas tabelas do Anexo B.

5.6.1 ICP-OES

Essa análise permite identificar a composição química dos metais de interesse e de outros elementos presentes na solução. Assim, após o procedimento é emitido um relatório que fornece as informações sobre a solução e, desse modo, podemos calcular as

concentrações dos metais obtidos em g/L e a porcentagem de massa referente do metal a massa total em %m/m.

Os valores registrados pela técnica de ICP-OES foram tabelados a seguir:

Tabela 26: Principais resultados da análise em técnica ICP-OES

Granulometria	Elementos	Ácido muriático + água oxigenada		Água-régia	
		%m/m	m (g)	%m/m	m (g)
A	Cu	2,23%	0,223	16,08%	0,804
	Fe	8,26%	0,826	6,66%	0,333
B	Cu	0,01%	0,001	11,69%	0,585
	Fe	5,08%	0,508	7,78%	0,389
C	Cu	1,10%	0,11	8,33%	0,417
	Fe	3,91%	0,391	8,54%	0,427
D	Cu	0,34%	0,003	9,00%	0,468
	Fe	75,83%	0,758	1,00%	0,075
X	Cu	2,93%	0,293	∅	∅
	Fe	5,23%	0,523	∅	∅
Z	Cu	7,49%	0,749	∅	∅
	Fe	0,28%	0,028	∅	∅

Fonte autor.

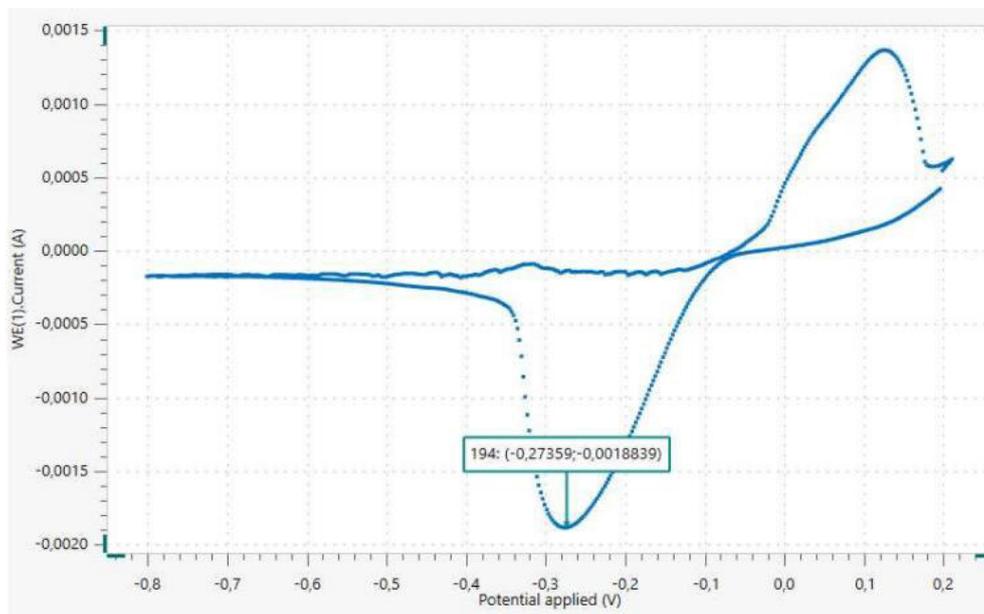
Nota-se que à medida que a granulometria do material lixiviado aumenta, diminui-se a eficiência do processo e menor a quantidade de elementos metálicos solubilizados em solução. A reatividade na lixiviação e na dissolução de elementos pela solução ácida água-régia é muito superior à solução ácida de ácido muriático mais água oxigenada 10vol., mesmo em granulometrias menores, essa última solução mostra resultados bem inferiores como agente lixiviante comparada a água-régia.

5.7 Voltametria cíclica

A voltametria cíclica possibilitou a descoberta da melhor zona de potencial de redução dos licores trabalhados, isso possibilita que posteriormente na etapa de eletrodeposição, já com o melhor potencial em mãos, forcamos o sistema a esse potencial para que a redução ocorra e os metais em solução se agregam ao eletrodo de trabalho.

O gráfico a seguir representa uma média dos valores obtidos com os ensaios de voltametria.

Gráfico 5: Voltametria do licor obtido.



Fonte autor.

O menor potencial encontrado para a solução X foi o de $-0,275728567$ V com margem de erro de $\pm 0,000134565$. Já o menor potencial encontrado para a solução Z foi de $-0,2749435425$ V com margem de erro de $\pm -0,000325535$.

Sempre ao analisar o eletrodo após os testes, foi percebido forte agregação de material reduzido na face do eletrodo de trabalho em solução.

Isso implica que para uma próxima etapa de eletrodeposição seria mais eficiente infligir à solução potenciais de ordem de grandeza aproximados desses valores para maximizar a redução do cobre no eletrodo de trabalho.

6. CONCLUSÃO

Em conclusão, o estudo abordou um processo abrangente do tratamento de 30 amostras de resíduos eletrônicos. Devido sua complexidade e a necessidade de lidar com um produto muito heterogêneo, sendo o PCI constituído por vários tipos de polímeros, cerâmicos, metais e compósitos em sua composição, além de sua fragmentação em diferentes formas e tamanhos, são obstáculos a serem vencidos para tornar a recuperação do cobre mais eficiente. Porém, o tratamento em si trouxe boas práticas e resultados promissores para a recuperação do cobre.

A recuperação de recursos valiosos a partir de resíduos eletrônicos é uma alternativa promissora à mineração convencional. Esta prática apresenta diversas vantagens, incluindo a independência das extrações de matérias-primas da natureza, a redução dos preços dos materiais, o impacto ambiental reduzido, a limitação de importações, o melhor gerenciamento dos resíduos e a geração de mais trabalho e renda.

Os dados apresentados anteriormente, ao longo de todo o trabalho, indicam que a mineração urbana pode ser mais eficiente em termos de teores de metais por tonelada de matéria prima. Por exemplo, na etapa de lixiviação foi possível beneficiar o teor do cobre em até 8% no licor com a solução de ácido muriático e água oxigenada e em 16% em solução com água-régia. Em contraste, a mineração convencional, que em uma tonelada de terra explorada em uma mina, podemos esperar aproximadamente 5 kg de cobre, considerando um teor de 0,5%. Isso mostra que essas rotas de reciclagem e recuperação de cobre é uma possibilidade muito viável economicamente e ambientalmente mais benéfica comparada a mineração convencional.

A redução do material de PCI e seu beneficiamento só foi possível após o processo de calcinação do material, que fragilizou as estruturas poliméricas e de compósitos, posteriormente prosseguiu-se a redução granulométrica pela ação mecânica apresentada neste trabalho. Por conseguinte, parte da recuperação de cobre foi obtida no processo de peneiração do material, fios de cobre passaram direto para o fundo da peneira, sendo expressivo o valor de reciclagem direta. Portanto, o pré-tratamento antes dos processos eletrolíticos, como cominuição e peneiração, podem contribuir e muito no processo de recuperação do cobre contido em PCIs e sucatas no geral, além de ser uma boa prática para indústrias de reciclagem que venham a trabalhar com esse tipo de produto.

No estudo dos resultados obtidos pela técnica de caracterização química ICP-OES conclui-se que a solução de ácido muriático mais água oxigenada 10vol. não é

indicada para a realização de lixiviação de placas de circuito impresso se o objetivo for a eficiência e eficácia de processo. Porém, visando a questão de custos menores, a solução de ácido muriático mais água oxigenada torna-se uma alternativa mais atrativa economicamente para se trabalhar com esses materiais, utilizando um meio ácido mais concentrada e uma massa de PCI menor que a testada neste trabalho é possível criar um meio mais agressivo que beneficia a dissolução de metais no licor lixiviante. Além disso, o fator tempo de imersão em licor lixiviante também é um potenciador da dissolução, dando mais tempo para que as reações ocorram maior será a concentração de metais em solução. Outrossim, essa solução pode ser utilizada como uma parte de um pré-tratamento para uma segunda lixiviação com um agente ácido mais forte como ácido sulfúrico mais peróxido de hidrogênio ou água-régia, haja vista que em uma primeira lixiviação mais rápida é possível remover boa parte dos materiais que não são de interesse, como polímeros, assim deixando a próxima bem mais eficiente para a obtenção de metais de interesse.

Após observações do sólido retido pelo filtro de papel, no processo de filtragem do licor produzido pela lixiviação de pó de PCI em ácido muriático mais água oxigenada 10vol., houve a formação de finas camadas vítreas óxidos de cobre, de coloração bastante esverdeada, indicando que o material retido estava rico em cobre. Portanto, conclui que a partir deste produto saturado em cobre pode ser interessante a realização de uma segunda lixiviação com ácido mais forte para retirar todo o cobre contido no pó filtrado.

A análise de Fluorescência de raio x mostrou que, além de teores relevantes de cobre, as placas de circuito impresso têm grande potencial na reciclagem de silício. Em todas caracterizações químicas realizadas por técnica FRX os teores de silício sempre foram maiores que 30% em percentual em massa, sendo interessante posteriormente a realização de um novo ramo de estudo com a recuperação do Si de PCI, tendo em vista a grande importância do Si hoje em razão do seu papel estratégico para a indústria moderna e transição energética.

Na análise da voltametria cheguei à conclusão que para materiais que foram lixiviados que continham granulometrias mais grosseiras e de formas e composições heterogêneas apresentaram mais de um vales de redução, no gráfico gerado pelo programa NOVA do Autolab, sugerindo que está ocorrendo mais de um processo de redução ou seja uma redução fracionada, assim o metais de menores potenciais galvânicos vão se depositando subsequentemente e provocando uma eletrodeposição fracionada, o

que não é interessante para o processo. Por esse motivo foi preferível a análise da utilização de licores lixiviados a partir do pó de PCI, dessa forma conseguindo obter uma solução homogênea e resultados mais confiáveis, tendo assim no comportamento do gráfico apenas um vale de redução, onde obtive os valores em torno de $-0,275$ V para potencial ideal para redução do cobre.

Ao longo do estudo, a abordagem meticulosa desde a separação granulométrica até as análises químicas e eletroquímicas proporcionou uma compreensão abrangente do tratamento de resíduos eletrônicos, destacando oportunidades para otimizações e melhorias no processo. O estudo contribui não apenas para a gestão sustentável de resíduos eletrônicos, mas também para o avanço nas técnicas de recuperação de metais valiosos desses materiais complexos.

ANEXO A – TABELAS DE RESULTADOS DE TÉCNICA ICP-OES

Tabela 12: Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução Z de ácido muriático e água oxigenada 10 vol.

Elementos	m (g)	%m/m	Desvpad
Al	0,000	0,000%	0,000
As	0,000	0,000%	0,000
B	0,018	0,179%	0,001
Ba	0,000	0,003%	0,000
Be	0,000	0,000%	0,000
Bi	0,000	0,000%	0,000
Ca	0,148	1,478%	0,008
Cd	0,000	0,000%	0,000
Co	0,000	0,000%	0,000
Cr	0,000	0,000%	0,000
Cu	0,749	7,489%	0,013
Fe	0,028	0,283%	0,012
K	0,000	0,002%	0,000
Li	0,000	0,004%	0,000
Mg	0,017	0,167%	0,001
Mn	0,017	0,170%	0,003
Mo	0,000	0,000%	0,000
Na	0,003	0,027%	0,003
Ni	0,021	0,214%	0,001
P	0,000	0,000%	0,000
Pb	0,049	0,487%	0,007
Sb	0,000	0,000%	0,000
Sc	0,000	0,000%	0,000
Se	0,000	0,000%	0,000
Sn	0,000	0,000%	0,000
Sr	0,001	0,013%	0,000
V	0,000	0,000%	0,000
Zn	0,318	3,177%	0,015

Fonte Autor.

Tabela 13: Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução X de ácido muriático e água oxigenada 10 vol.

Elementos	m (g)	%m/m	Desvpad
-----------	-------	------	---------

Al	0,000	0,000%	0,000
As	0,000	0,000%	0,000
B	0,003	0,029%	0,000
Ba	0,002	0,018%	0,000
Be	0,000	0,000%	0,000
Bi	0,000	0,000%	0,000
Ca	0,024	0,238%	0,000
Cd	0,000	0,000%	0,000
Co	0,000	0,000%	0,000
Cr	0,000	0,000%	0,000
Cu	0,293	2,925%	0,000
Fe	0,523	5,234%	0,000
K	0,004	0,045%	0,000
Li	0,000	0,000%	0,000
Mg	0,009	0,092%	0,000
Mn	0,016	0,156%	0,000
Mo	0,000	0,000%	0,000
Na	0,033	0,328%	0,000
Ni	0,063	0,632%	0,000
P	0,000	0,000%	0,000
Pb	0,067	0,668%	0,000
Sb	0,000	0,000%	0,000
Sc	0,000	0,000%	0,000
Se	0,000	0,000%	0,000
Sn	0,000	0,000%	0,000
Sr	0,000	0,002%	0,000
V	0,000	0,000%	0,000
Zn	0,070	0,697%	0,000

Fonte Autor.

Tabela 14: Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução A de ácido muriático e água oxigenada 10 vol.

Elementos	m (g)	%m	Desvpad
Al	0,172	1,722%	0,065
As	0,000	0,000%	0,000
B	0,009	0,086%	0,001
Ba	0,000	0,004%	0,000
Be	0,000	0,000%	0,000
Bi	0,000	0,002%	0,000
Ca	0,024	0,241%	0,009
Cd	0,000	0,001%	0,000
Co	0,002	0,020%	0,001

Cr	0,001	0,006%	0,000
Cu	0,223	2,227%	0,205
Fe	0,826	8,259%	0,052
K	0,004	0,036%	0,000
Li	0,000	0,002%	0,000
Mg	0,004	0,037%	0,001
Mn	0,056	0,555%	0,022
Mo	0,000	0,002%	0,000
Na	0,002	0,016%	0,001
Ni	0,035	0,354%	0,003
P	0,001	0,012%	0,001
Pb	0,084	0,842%	0,003
Sb	0,000	0,004%	0,000
Sc	0,000	0,000%	0,000
Se	0,000	0,000%	0,000
Sn	0,371	3,705%	0,371
Sr	0,000	0,001%	0,000
V	0,000	0,000%	0,000
Zn	0,200	1,998%	0,095

Fonte Autor.

Tabela 15: Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução B de ácido muriático e água oxigenada 10 vol.

Elementos	m (g)	%m	Desvpad
As	0,110	1,102%	0,110
B	0,004	0,041%	0,004
Ba	0,002	0,017%	0,001
Be	0,000	0,003%	0,000
Bi	0,000	0,002%	0,000
Ca	0,002	0,015%	0,001
Cd	0,001	0,014%	0,001
Co	0,000	0,001%	0,000
Cr	0,002	0,020%	0,001
Cu	0,001	0,010%	0,000
Fe	0,508	5,081%	0,507
K	0,185	1,848%	0,182
Li	0,001	0,012%	0,001
Mg	0,001	0,007%	0,001
Mn	0,003	0,029%	0,001
Mo	0,001	0,012%	0,001
Na	0,005	0,048%	0,005
Ni	0,005	0,053%	0,005

P	0,000	0,000%	0,000
Pb	0,019	0,190%	0,019
Sb	0,002	0,018%	0,002
Sc	0,000	0,000%	0,000
Se	0,000	0,000%	0,000
Sn	0,001	0,010%	0,001
Sr	0,000	0,000%	0,000
V	0,000	0,000%	0,000
Zn	0,021	0,205%	0,021

Fonte Autor.

Tabela 16: Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução C de solução de ácido muriático e água oxigenada 10 vol.

Elementos	m(g)	%m/m	Desvpad
Al	0,143	1,429%	0,089
As	0,000	0,000%	0,000
B	0,003	0,031%	0,002
Ba	0,000	0,005%	0,000
Be	0,000	0,000%	0,000
Bi	0,000	0,001%	0,000
Ca	0,003	0,033%	0,003
Cd	0,000	0,000%	0,000
Co	0,001	0,014%	0,002
Cr	0,001	0,005%	0,000
Cu	0,110	1,102%	0,142
Fe	0,391	3,908%	0,249
K	0,002	0,021%	0,000
Li	0,000	0,000%	0,000
Mg	0,001	0,008%	0,000
Mn	0,001	0,008%	0,001
Mo	0,000	0,002%	0,000
Na	0,010	0,097%	0,001
Ni	0,000	0,000%	0,000
P	0,000	0,003%	0,000
Pb	0,030	0,297%	0,018
Sb	0,000	0,000%	0,000
Sc	0,000	0,000%	0,000
Se	0,000	0,000%	0,000
Sn	0,040	0,404%	0,054
Sr	0,000	0,000%	0,000
V	0,000	0,000%	0,000
Zn	0,025	0,248%	0,032

Fonte Autor.

Tabela 17: Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução D de solução de ácido muriático e água oxigenada 10 vol.

Elementos	m (g)	%m/m	Desvpad
Al	0,169	16,913%	0,046
As	0,000	0,000%	0,000
B	0,006	0,589%	0,001
Ba	0,000	0,043%	0,000
Be	0,000	0,000%	0,000
Bi	0,000	0,031%	0,000
Ca	0,002	0,228%	0,002
Cd	0,000	0,003%	0,000
Co	0,000	0,007%	0,000
Cr	0,000	0,037%	0,000
Cu	0,003	0,341%	0,001
Fe	0,758	75,827%	0,174
K	0,002	0,246%	0,000
Li	0,000	0,000%	0,000
Mg	0,002	0,164%	0,001
Mn	0,004	0,380%	0,002
Mo	0,000	0,000%	0,000
Na	0,009	0,909%	0,001
Ni	0,002	0,164%	0,002
P	0,000	0,000%	0,000
Pb	0,016	1,599%	0,002
Sb	0,000	0,000%	0,000
Sc	0,000	0,000%	0,000
Se	0,000	0,000%	0,000
Sn	0,001	0,125%	0,002
Sr	0,000	0,001%	0,000
V	0,000	0,001%	0,000
Zn	0,054	5,354%	0,045

Fonte autor.

Tabela 18: Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução A de água-régia.

Elementos	m (g)	%m/m	Desvpad
Al	0,039	0,780%	0,013
As	0,000	0,000%	0,000
B	0,001	0,020%	0,000
Ba	0,003	0,050%	0,000

Be	0,000	0,000%	0,000
Bi	0,000	0,000%	0,000
Ca	0,003	0,070%	0,002
Cd	0,000	0,000%	0,000
Co	0,000	0,010%	0,000
Cr	0,001	0,020%	0,001
Cu	0,804	16,080%	0,047
Fe	0,333	6,660%	0,016
K	0,000	0,000%	0,000
Li	0,000	0,000%	0,000
Li	0,000	0,000%	0,000
Mg	0,000	0,010%	0,000
Mn	0,031	0,630%	0,005
Mo	0,000	0,000%	0,000
Na	0,000	0,000%	0,000
Ni	0,024	0,480%	0,005
P	0,002	0,050%	0,000
Pb	0,097	1,930%	0,009
Sb	0,001	0,020%	0,000
Sc	0,000	0,000%	0,000
Se	0,000	0,000%	0,000
Sn	0,199	3,980%	0,012
Sr	0,000	0,000%	0,000
V	0,000	0,000%	0,000
Zn	0,148	2,950%	0,006

Fonte autor.

Tabela 19: resultado da caracterização química de ICP-OES para solução B de água-régia.

Elementos	m (g)	%m/m	Desvpad
Al	0,0480	0,956%	0,0390
As	0,0000	0,000%	0,0000
B	0,0010	0,022%	0,0000
Ba	0,0000	0,007%	0,0000
Be	0,0000	0,001%	0,0000
Bi	0,0000	0,009%	0,0010
Ca	0,0010	0,023%	0,0010
Cd	0,0000	0,000%	0,0000
Co	0,0000	0,004%	0,0000
Cr	0,0080	0,168%	0,0070
Cu	0,5850	11,690%	0,2370
Fe	0,3890	7,780%	0,1470
K	0,0000	0,000%	0,0000

Li	0,0000	0,000%	0,0000
Li	0,0000	0,000%	0,0000
Mg	0,0000	0,002%	0,0000
Mn	0,0190	0,380%	0,0060
Mo	0,0000	0,001%	0,0000
Na	0,0000	0,000%	0,0000
Ni	0,0110	0,220%	0,0010
P	0,0030	0,051%	0,0010
Pb	0,0460	0,916%	0,0270
Sb	0,0010	0,020%	0,0010
Sc	0,0000	0,000%	0,0000
Se	0,0000	0,000%	0,0000
Sn	0,1030	2,069%	0,0170
Sr	0,0000	0,000%	0,0000
V	0,0000	0,000%	0,0000
Zn	0,0750	1,504%	0,0200

Fonte autor.

Tabela 20: Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução C de água-régia.

Elementos	m (g)	%m/m	Desvpad
Al	0,028	0,568%	0,030
As	0,000	0,000%	0,000
B	0,001	0,025%	0,000
Ba	0,001	0,019%	0,000
Be	0,000	0,000%	0,000
Bi	0,000	0,000%	0,000
Ca	0,001	0,023%	0,001
Cd	0,000	0,000%	0,000
Co	0,015	0,303%	0,019
Cr	0,001	0,014%	0,000
Cu	0,417	8,331%	0,014
Fe	0,427	8,541%	0,049
K	0,000	0,003%	0,000
Li	0,000	0,000%	0,000
Li	0,000	0,000%	0,000
Mg	0,000	0,000%	0,000
Mn	0,002	0,036%	0,001
Mo	0,000	0,001%	0,000
Na	0,000	0,000%	0,000
Ni	0,036	0,710%	0,036
P	0,001	0,025%	0,000
Pb	0,033	0,659%	0,026

Sb	0,000	0,003%	0,000
Sc	0,000	0,000%	0,000
Se	0,000	0,000%	0,000
Sn	0,068	1,363%	0,025
Sr	0,000	0,009%	0,001
V	0,000	0,000%	0,000
Zn	0,007	0,144%	0,008

Fonte autor.

Tabela 21: Resultado da caracterização química de ICP-OES para solução D de água-régia.

Elementos	m (g)	%m/m	Desvpad
Al	0,005	0,000%	0,002
As	0,000	0,000%	0,000
B	0,001	0,000%	0,000
Ba	0,001	0,000%	0,000
Be	0,000	0,000%	0,000
Bi	0,000	0,000%	0,000
Ca	0,003	0,000%	0,002
Cd	0,000	0,000%	0,000
Co	0,000	0,000%	0,000
Cr	0,002	0,000%	0,002
Cu	0,468	9,000%	0,079
Fe	0,075	1,000%	0,092
K	0,000	0,000%	0,000
Li	0,000	0,000%	0,000
Li	0,000	0,000%	0,000
Mg	0,000	0,000%	0,000
Mn	0,002	0,000%	0,002
Mo	0,000	0,000%	0,000
Na	0,000	0,000%	0,000
Ni	0,002	0,000%	0,001
P	0,002	0,000%	0,002
Pb	0,049	0,000%	0,015
Sb	0,000	0,000%	0,000
Sc	0,000	0,000%	0,000
Se	0,000	0,000%	0,000
Sn	0,128	3,000%	0,008
Sr	0,000	0,000%	0,000
V	0,000	0,000%	0,000
Zn	0,020	0,000%	0,010

Fonte autor.

ANEXO B – TABELAS DE RESULTADOS DE TÉCNICA FRX

Tabela 22: Percentual em massa obtido para as amostras de granulometria de 1,18 mm.

Elementos	%m	Desvio padrão
Ag	0,530	0,000
Al	4,628	1,193
Br	1,488	0,535
Ca	12,261	0,633
Cd	0,373	0,000
Cl	0,609	0,121
Co	0,087	0,000
Cu	17,564	3,927
Fe	10,708	1,518
K	0,163	0,000
Mn	1,117	0,356
Ni	1,116	0,281
Pb	2,908	0,215
S	0,436	0,322
Sb	0,935	0,623
Si	31,268	1,486
Sn	1,582	0,788
Sr	0,129	0,025
Ta	1,525	1,352
Ti	0,899	0,057
Zn	10,373	0,556

Fonte autor.

Tabela 23: Percentual em massa obtido para as amostras de granulometria de 2,36 mm.

Elementos	%m	Desvio padrão
Al	5,881	0,704
Br	3,711	0,753
Ca	20,776	3,224
Cl	1,316	0,461
Cu	12,239	1,731
Fe	9,506	3,069
K	0,164	0,000
Mg	1,781	0,082
Mn	1,042	0,225
Ni	0,987	0,468

P	0,318	0,008
Pb	1,572	0,187
S	0,394	0,113
Sb	1,326	0,059
Si	31,314	0,172
Sn	0,900	0,245
Sr	0,157	0,027
Ta	2,897	1,395
Ti	2,281	1,869
Zn	3,873	1,126

Fonte autor.

Tabela 24: Percentual em massa obtido para as amostras de granulometria de 4,75 mm.

Elementos	%m	Desvio padrão
Al	9,628	0,764
Br	1,811	0,321
Ca	31,454	3,507
Cl	0,109	0,01
Cu	7,623	2,874
Fe	2,229	0,756
K	0,226	0,017
Mg	1,997	0,331
Mn	0,191	0,027
Ni	0,324	0,028
P	0,669	0,3
Pb	0,44	0,157
S	0,286	0,077
Si	39,812	4,39
Sn	0,396	0,309
Sr	0,114	0,073
Ta	1,245	0
Ti	0,961	0,303
Zn	1,849	0,553

Fonte autor.

Tabela 25: Percentual em massa obtido para as amostras de granulometria de 9,50 mm.

Elementos	%m	Desvio padrão
Al	15,801	1,560
Br	2,317	0,429
Ca	25,315	1,550
Cl	0,074	0,000

Cu	7,407	1,562
Fe	2,051	1,560
K	0,120	0,050
Mg	6,434	0,000
Ni	0,129	0,040
P	0,345	0,027
Pb	0,926	0,321
S	0,431	0,088
Sb	0,260	0,000
Si	39,163	2,065
Sn	1,320	0,929
Sr	0,171	0,027
Ti	0,662	0,103
Zn	1,885	0,086

Fonte autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CIMINELLI, Virgínia Sampaio T. Hidrometalurgia. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG.
2. TEC-CI CIRCUITOS IMPRESSOS. Disponível em: <https://tec-ci.com.br/>. Acesso em: 27/11/2023.
3. SILVA, Gabriel Saraiva da. Recuperação de cobre de placas de circuito impresso através do processo de lixiviação em ácido sulfúrico. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/70063>>. Acesso em: 27/11/2023.
4. NOVA ELETRÔNICA. Disponível em: <https://blog.novaeletronica.com.br/>. Acesso em: 27/11/2023.
5. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br>.
6. INFORCHANNEL. Pesquisa da ONU alerta que apenas 3% do lixo eletrônico da AL é reciclado. Disponível em: <https://inforchannel.com.br/2022/11/16/pesquisa-da-onu-alerta-que-apenas-3-do-lixo-eletronico-da-al-e-reciclado/>. Acesso em: 02 nov. 2023.
7. COSTA, Ana Beatriz. Estudo dos lixivantes de rotas hidrometalúrgicas para extração de metais a partir do lixo eletrônico. 2022. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.
8. SILVAS, Flávia Paulucci Cianga. Utilização de hidrometalurgia e biohidrometalurgia para reciclagem de placas de circuito impresso. 2014. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
9. SOUSA, Mayara Naghly Viana. Extração de metais das placas de circuito impresso - Reciclagem do lixo eletrônico. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Bacharelado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
10. MORAES, Viviane Tavares de. Recuperação de metais a partir do processamento mecânico e hidrometalúrgico de placas de circuito impresso de celulares obsoletos. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
11. YAMANE, Luciana Harue; MORAES, Viviane Tavares de; ESPINOSA, Denise Croce Romano; TENÓRIO, Jorge Alberto Soares. Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. Waste Management, v. 31, n. 12, p. 2553-2558, 2011. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.07.006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.006>>.
12. "LAREX - Laboratório de Reciclagem, Tratamento de Resíduos e Extração." Disponível em: <<http://larex.poli.usp.br/hidrometalurgia/>> .

13. FORTI, Vanessa et al. The global e-waste monitor 2020. Quantities, flows, and the circular economy potential, p. 1-119, 2020.
14. FAONSO, Júlio Carlos. Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos: O Antropoceno bate à nossa porta. Revista Virtual de Química, v. 10, n. 6, 2018.
15. GREEN ELETRON. 10 razões para reciclar o lixo eletrônico. Disponível em: <https://greeneletron.org.br/blog/10-razoes-para-reciclar-o-lixo-eletronico/>. Acesso em: 02 nov. 2023.
16. GIESE, Ellen Cristine et al. Mineração urbana e cooperativismo: uma abordagem sobre a reciclagem de resíduos de eletroeletrônicos. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2021.
17. FRANCO, Rosana Gonçalves Ferreira; BARROS, Raphael Tobias de Vasconcelos. Revisão das técnicas utilizadas na recuperação de metais em resíduos de placas de circuito impresso (RPCI). In: VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2016, Campina Grande. Anais... Campina Grande: UFMG, 2016.
18. RIBEIRO, P. P. M. Concentração de metais contidos em placas de circuito impresso de computadores descartados. 2013. Projeto de Graduação (Engenharia Metalúrgica) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Orientador: Achilles Junqueira Bourdot Dutra.
19. MINDAT.ORG. Definition of acid leach. Disponível em: https://www.mindat.org/glossary/acid_leach. Acesso em: 03 nov. 2023.
20. AZOMINING.COM. Leaching - Mining Fundamentals. Disponível em: <https://www.azomining.com/Article.aspx?ArticleID=1227>. Acesso em: 03 nov. 2023.
21. BRITANNICA. Acid leaching | industrial process. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/acid-leaching>. Acesso em: 03 nov. 2023.
22. WIKIPEDIA. Leaching (chemistry). Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Leaching_\(chemistry\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Leaching_(chemistry)). Acesso em: 03 nov. 2023.
23. NORTON, Joe. What Is Muriatic Acid? Cleaning Uses and Safety. The Spruce, 2023. Disponível em: <<https://www.thespruce.com/how-to-use-muriatic-acid-2132784>>. Acesso em: 27/11/2023.
24. SPRINGER. Chalcopyrite Leaching with Hydrogen Peroxide in Formic Acid Medium. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12666-020-01896-x>. Acesso em: 03 nov. 2023.
25. WISDOM ANSWER. Will hydrogen peroxide and muriatic acid dissolve gold?. Disponível em: 26. <https://wisdomanswer.com/will-hydrogen-peroxide-and-muriatic-acid-dissolve-gold/>. Acesso em: 03 nov. 2023.
26. SILVA, C. S. M.; ZEBA, G. T. C.; ROCHA, C. M. R.; GISMONTI, P. R.; AFONSO, J. C.; SILVA, R. S.; VIANNA, C. A.; MANTOVANO, J. L. PROCESSING OF A METAL CONCENTRATE FROM GROUND WASTE PRINTED CIRCUIT BOARDS

IN ACIDIC MEDIA USING HYDROGEN PEROXIDE AS OXIDAN. Rio de Janeiro: Departamento de Química Analítica, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: [link para o artigo]. Acesso em: 03 nov. 2023.

27. POPULAR MECHANICS. Muriatic Acid - How to Use Muriatic Acid. Disponível em: <https://www.popularmechanics.com/home/a34285564/how-to-safely-use-muriatic-acid/>. Acesso em: 03 nov. 2023.

28. SILVA, C. S. M.; ZEBA, G. T. C.; ROCHA, C. M. R.; GISMONTI, P. R.; AFONSO, J. C.; SILVA, R. S.; VIANNA, C. A.; MANTOVANO, J. L. PROCESSING OF A METAL CONCENTRATE FROM GROUND WASTE PRINTED CIRCUIT BOARDS IN ACIDIC MEDIA USING HYDROGEN PEROXIDE AS OXIDANT. Rio de Janeiro: Departamento de Química Analítica, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170575>. Acesso em: 03 nov. 2023.

28. CETEM. Comminution 14: pesquisador apresenta dois trabalhos. Disponível em: <https://www.gov.br/cetem/pt-br/assuntos/noticias/comminution-14-pesquisador-apresenta-dois-trabalhos>. Acesso em: 03 nov. 2023.

29. Kanda, Yoshiteru; Kotake, Naoya (2007). "Chapter 12: Comminution Energy and Evaluation in Fine Grinding". In Salman, Agba D.; Hounslow, Michael J. (eds.). Handbook of Powder Technology, Volume 12: Particle breakage. Elsevier. pp. 529–551. ISBN 9780080553467. Retrieved August 20, 2010.

30. CETEM. Analysis of the microwave heating effect in the efficiency of. Disponível em: <https://cetem.gov.br/antigo/images/congressos/2015/CAC00510015.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2023.

31. WALLNER, S. Powder Production Technologies. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00501-019-0832-2>. Acesso em: 03/11/2023.

32. ABDUL-WAHAB, H. H.; N.A, El-Hussiny; ALI, M. M.; OMAR, A. A.; M.E.H., Shalabi; MOHARAM, M. R. The Relationship between Grinding Time of Mill Scale and Physicochemical Properties of the Produced Pellets and Its Reduction Kinetics in a Static Bed via Hydrogen. Disponível em: <https://www.mpif.org/IntrotoPM/MakingMetalPowder.aspx> >. Acesso em: 03/11/2023.

33. OZER, D. Mechanochemistry: A Power Tool for Green Synthesis. In: Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, 2021. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-67884-5_2. Acesso em: 03/11/2023.

34. MEC NICA INDUSTRIAL. Pirometalurgia. Disponível em: <https://www.mecanicaindustrial.com.br/317-pirometalurgia/>. Acesso em: 03 nov. 2023.

35. SOUZA, Líria Alves de. "Água-régia"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/agua-regia.htm>. Acesso em 27 de novembro de 2023.

36. NOBEL PRIZE. The Nobel Medals and the Medal for the Prize in Economic Sciences. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/about/the-nobel-medals-and-the-medal-for-the-prize-in-economic-sciences/>. Acesso em: 04 nov. 2023.
37. SOUZA, Líria Alves de. "Água-régia"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/agua-regia.htm>. Acesso em 27 de novembro de 2023.
38. OURO DO LIXO. Refino de ouro com ácido muriático e água oxigenada. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=nfJrIZAr09g>. Acesso em: 04 nov. 2023.
39. OURO DO LIXO. Recuperando Ouro com água oxigenada e ácido muriático. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=yYBIrcUdzsI>. Acesso em: 04 nov. 2023.
40. Mendham, J.; Denney, R. C.; Barnes, J. D.; Thomas, M.J.K.; Denney, R. C.; Thomas, M. J. K. Vogel's Quantitative Chemical Analysis. [S.l.: s.n.] ISBN 978-0-582-22628-9.
41. SOUZA, Líria Alves de. "Água-régia"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/agua-regia.htm>. Acesso em 27 de novembro de 2023.
42. HELPR. O que acontece quando você mistura ácido muriático e água oxigenada. Disponível em: <https://pt.help.me/18006-what-happens-when-you-mix-muriatic-acid-and-hydrogen-peroxide>. Acesso em: 04 nov. 2023.
43. SOUZA, Líria Alves. "Ácido Muriático"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/acido-muriatico.htm>. Acesso em 27 de novembro de 2023.
44. TONI ELETRÔNICA. Tutorial Confecção caseira de placa de circuito. Disponível em: <https://www.tel.com.br/2011/05/video-tutorial-confeccao-de-placa-de-circuito-impresso-metodo-termico-com-impressora-laser-e-papel-fotografico/>. Acesso em: 04 nov. 2023.
45. GENTIL, Vicente; CARVALHO, Ladimir José de. Corrosão. 7. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.
46. ATKINS, Peter; JONES, Loretta. Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.
47. MACIEL, Clara Ferreira. Caracterização microestrutural do metal de solda de trilho ferroviário soldado por centelhamento. 2023. 46 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.