

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS**  
**ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**DIEGO SOUZA DOS SANTOS**

**ANÁLISE QUÍMICA E MORFOLÓGICA DE METAIS CONTIDOS EM PLACAS DE  
CIRCUITO IMPRESSO (PCI): UMA ABORDAGEM PARA RECUPERAÇÃO  
SUSTENTÁVEL**

**MANAUS-AM**

**2025**

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS**  
**ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**DIEGO SOUZA DOS SANTOS**

**ANÁLISE QUÍMICA E MORFOLÓGICA DE METAIS CONTIDOS EM PLACAS DE  
CIRCUITO IMPRESSO (PCI): UMA ABORDAGEM PARA RECUPERAÇÃO  
SUSTENTÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia de Materiais, da Escola Superior de Tecnologia, da Universidade do Estado do Amazonas, como requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. José Costa de Macêdo Neto

Coorientador: Profa. Dra. Isabel Cristina Dinolá

**MANAUS-AM**

**2025**

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
**Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.**

S237a

Santos, Diego Souza dos

ANÁLISE QUÍMICA E MORFOLÓGICA DE METAIS  
CONTIDOS EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI) : UMA  
ABORDAGEM PARA RECUPERAÇÃO SUSTENTÁVEL / Diego  
Souza dos Santos. Manaus : [s.n], 2025.

34 f.: color.; 21.0 cm.

TCC - Graduação em Engenharia de Materiais- Universidade do  
Estado do Amazonas, Manaus, 2025.

Orientador: José Costa de Macêdo Neto.

Coorientador: Isabel Cristina Dinolá.

1. Análise química. 2. Economia Circular. 3. Placas de circuito  
impresso. 4. Recuperação de metais. 5. Resíduos eletrônicos. I. José  
Costa de Macêdo Neto (Orient.) II . Isabel Cristina Dinolá (Coorient.)  
III. Universidade do Estado do Amazonas. IV. Título

CDU(1997)66.03

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS**  
**ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
**TERMO DE APROVAÇÃO**

**DIEGO SOUZA DOS SANTOS**

**ANÁLISE QUÍMICA E MORFOLÓGICA DE METAIS CONTIDOS EM PLACAS DE**  
**CIRCUITO IMPRESSO (PCI): UMA ABORDAGEM PARA RECUPERAÇÃO**  
**SUSTENTÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Materiais, Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do Amazonas, pela seguinte banca examinadora.

**BANCA EXAMINADORA**



Documento assinado digitalmente  
**JOSE COSTA DE MACEDO NETO**  
Data: 08/12/2025 23:03:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. José Costa de Macêdo Neto - Orientador



Documento assinado digitalmente  
**ISABEL CRISTINA SOUZA DINOLA**  
Data: 09/12/2025 11:26:05-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Isabel Cristina Dinolá - Coorientador



Documento assinado digitalmente  
**ADALBERTO GOMES DE MIRANDA**  
Data: 09/12/2025 22:22:43-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Adalberto Gomes de Miranda - Membro da banca



Documento assinado digitalmente  
**ANTONIO DE LIMA MESQUITA**  
Data: 09/12/2025 12:08:48-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Antônio de Lima Mesquita - Membro da banca

Manaus, 01 de dezembro de 2025.

## RESUMO

A recuperação de metais de resíduos eletrônicos, especialmente das placas de circuito impresso (PCI), é essencial para a preservação ambiental e o desenvolvimento sustentável. Estas placas contêm metais valiosos, como cobre, ouro, prata e tântalo, além de outros materiais cerâmicos e poliméricos. Este estudo avalia a viabilidade da recuperação desses metais, com foco principal no cobre, a partir de PCIs obsoletas, propondo processos mecânicos, hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos ou suas combinações. A pesquisa destaca os desafios do crescimento dos resíduos eletrônicos, a falta de investimentos no tratamento adequado no Brasil e a dependência de processos realizados no exterior. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei n. 12.305/2010) estabelece a responsabilidade compartilhada entre consumidores, indústrias e governos, e a conscientização pública é crucial para a implementação de práticas de gestão de resíduos. A adoção de princípios de economia circular e design para economia circular são fundamentais para reduzir os impactos ambientais do descarte inadequado e promover o reaproveitamento desses materiais. Este estudo analisa a composição elementar de amostras de PCIs provenientes de uma fábrica de celulares no Pólo Industrial de Manaus (PIM), considerando a variabilidade dos materiais conforme o modelo do equipamento e a tecnologia empregada. Além da análise técnica, a pesquisa visa fomentar a sustentabilidade na cadeia produtiva de resíduos eletrônicos, buscando minimizar o desperdício e promover o uso eficiente dos recursos naturais. Ao abordar a recuperação de metais e a gestão de resíduos, o trabalho destaca também a importância da educação ambiental e da inovação na melhoria das práticas de tratamento e reaproveitamento.

**Palavras-chave:** Análise Química. Economia Circular. Placas de Circuito Impresso. Recuperação de Metais. Resíduos Eletrônicos.

## ABSTRACT

The recovery of metals from electronic waste, especially from printed circuit boards (PCBs), is essential for environmental preservation and sustainable development. These boards contain valuable metals such as copper, gold, silver, and tantalum, as well as other ceramic and polymeric materials. This study evaluates the feasibility of recovering these metals—focusing primarily on copper—from obsolete PCBs, proposing mechanical, hydrometallurgical, and pyrometallurgical processes, or combinations thereof. The research highlights the challenges posed by the increasing volume of electronic waste, the lack of investment in proper treatment in Brazil, and the reliance on processes carried out abroad. The National Solid Waste Policy (Law No. 12.305/2010) establishes shared responsibility among consumers, industries, and government, and public awareness is crucial for the implementation of effective waste-management practices. The adoption of circular economy principles and design for circularity is essential to reduce the environmental impacts of improper disposal and to promote the reuse of these materials. This study analyzes the elemental composition of PCB samples from a mobile-phone manufacturing plant in the Manaus Industrial Hub (PIM), considering material variability according to device model and the technology employed. In addition to the technical analysis, the research aims to foster sustainability within the electronic-waste production chain, seeking to minimize waste and promote the efficient use of natural resources. By addressing metal recovery and waste management, the study also underscores the importance of environmental education and innovation in improving treatment and recycling practices.

**Keywords:** Chemical Analysis. Circular Economy. Printed Circuit Boards. Metal Recovery. Electronic Waste.

Dedico este trabalho a Deus, por quem e para quem são todas as coisas, e que tornou esta conquista possível. E à minha família e à noiva, pelo amor incondicional e apoio constante em todos os momentos desta jornada.

## AGRADECIMENTOS

Minha gratidão se inicia a Deus, por ser o sustentáculo e o guia que me concedeu força e perseverança durante toda a trajetória acadêmica. Expresso meu reconhecimento àqueles que foram essenciais para a realização e o sucesso deste trabalho. Ao Orientador Prof. Dr. José Costa de Macêdo Neto e ao Coorientador Prof. Dr. Isabel Cristina Dinolá, pelo apoio constante, pelos valiosos ensinamentos técnicos e profissionais e por guiarem esta pesquisa com excelência. À minha mãe, Indira Abreu, e ao meu pai, Antonio João, por me apoiarem incondicionalmente e por proporcionarem as oportunidades de crescimento que tornaram esta graduação possível. À minha noiva, Bianca Nadini, pelo suporte contínuo, pelo incentivo nos momentos mais desafiadores e por estar ao meu lado em todas as etapas da vida. À Universidade do Estado do Amazonas (UEA), pela excelência na formação oferecida e por ceder as áreas essenciais utilizadas no desenvolvimento do estudo. Ao FIT Instituto de Tecnologia da Amazônia, pelo fornecimento crucial de materiais e instalações que permitiram a execução das etapas experimentais da pesquisa. Aos colegas de curso Gabriel Pádua, Felipe Siqueira, Samuel Correa, Gabriela Rocha e Naland Said, pelo suporte diário, pela colaboração mútua e por tornarem o ambiente de estudo mais leve. Aos técnicos e colaboradores de laboratório, pelo auxílio imprescindível na manipulação e análise dos materiais.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	8
2. OBJETIVOS .....	13
2.1. OBJETIVO GERAL .....	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3. METODOLOGIA .....	14
3.1. MATERIAIS E REAGENTES .....	14
3.2 ETAPAS DO EXPERIMENTO.....	14
3.2.1. PROCESSAMENTO DE PCI's.....	14
3.2.2. PROCESSOS MECÂNICOS DE PCI's DESCARTADOS .....	15
3.2.3. LIXIVIAÇÃO .....	16
3.2.4. FILTRAGEM.....	16
3.2.5. PESAGEM.....	17
3.2.6 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS .....	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	17
4.1. ESPECTROMETRIA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIO-X (FRX).....	17
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	25
6. REFERÊNCIAS.....	27

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Crescimento de equipamento elétricos e eletrônicos (EEE) colocados no mercado e de quantidade de lixo eletrônico gerado. Fonte: Adaptado de The Global e-waste monitor (2024). .....	8
<b>Figura 2.</b> Total de lixo eletrônico gerado por tipo de EEE. ....	9
<b>Figura 3.</b> Índices de metais (23,4-30% em PCI). .....	11
<b>Figura 4.</b> Fluxograma de operações unitárias para caracterização de PCI's. ....	15
<b>Figura 5.</b> Morfologia das micropartículas do pó obtido das placas PCI por microscopia óptica utilizando o microscópio óptico digital (ISM-DL301, INSIZE, China). ....	22
<b>Figura 6.</b> Morfologia das micropartículas do pó obtido das placas PCI por microscopia óptica utilizando o microscópio óptico (CX31, Olympus, Japão). ....	22

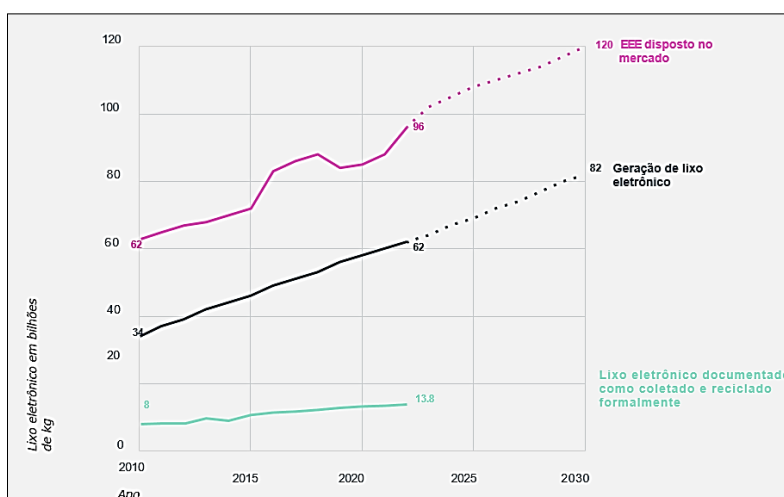
## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Material após a etapa de moagem.....	16
<b>Tabela 2.</b> Composição química total. ....	18
<b>Tabela 3.</b> Composição química. ....	18
<b>Tabela 4.</b> Composição típica de PCI's. ....	21

## 1. INTRODUÇÃO

Muitos teóricos, como Spaargaren (1996) e Zhang e Forssberg (1999), sustentam que os efeitos das tecnologias geram desequilíbrios nos ecossistemas. Eles nos trazem uma reflexão sobre a situação global, com o impacto na produção e consumo da sociedade moderna em geral. Essa produção e o consumo causam o desequilíbrio entre homem e meio ambiente, pois nos trazem diversos tipos de poluições, como: atmosférica, a hídrica e a de resíduos sólidos, tornando assim o impacto ao meio ambiente e a sustentabilidade questões de extrema importância. Desta forma a produção de novos produtos cada vez mais sofisticados tornam obsoletos os dispositivos da geração anterior em um intervalo de tempo cada vez menor, propiciando um acúmulo cada vez maior de resíduo.

De acordo com o *The Global e-waste monitor* (2024), a quantidade de equipamento elétrico e eletrônico (EEE) colocados no mercado cresceu de 62 mil milhões kg em 2010 para 96 mil milhões de kg em 2022. Prevê-se que aumente para 120 mil milhões kg em 2030 (Figura 1). Durante o mesmo período, a quantidade de lixo eletrônico gerado anualmente cresceu de 34 mil milhões de kg para um recorde de 62 mil milhões de kg. Isso é devida a aumentar para 82 mil milhões de kg até 2030. Embora alguns avanços foram feitos na quantidade de lixo eletrônico documentada como formalmente coletados e reciclados, passando de 8 bilhões de kg em 2010 para 13,8 bilhões de kg em 2022, esta conquista é ofuscada pelo rápido crescimento na quantidade do lixo eletrônico em geral.

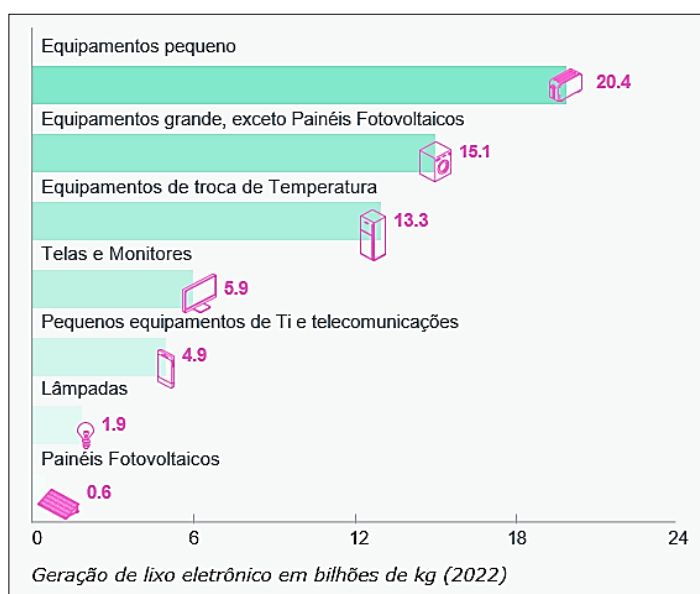


**Figura 1.** Crescimento de equipamento elétricos e eletrônicos (EEE) colocados no mercado e de quantidade de lixo eletrônico gerado.

Fonte: Adaptado de *The Global e-waste monitor* (2024).

Equipamentos pequenos, como câmeras de vídeo, brinquedos, fornos de micro-ondas e cigarros eletrônicos, constitui a maior categoria de lixo eletrônico em termos de massa,

representando 20 bilhões de kg em 2022, ou quase um terço do total de lixo eletrônico do mundo. A segunda maior categoria é a dos equipamentos de grande porte, excluindo os painéis fotovoltaicos (15 mil milhões de kg em 2022). Depois dos painéis fotovoltaicos, a menor categoria são as lâmpadas (2 bilhões de kg). Telas e monitores representam atualmente 10 por cento do lixo eletrônico gerado (5,9 mil milhões de kg). Pequenos equipamentos de TI e telecomunicações - como telefones celulares, Dispositivos GPS, roteadores, computadores pessoais, impressoras e telefones -, totalizaram 5 mil milhões de kg em 2022 (Figura 2). Dessa forma, as placas de circuito impresso (PCI) representam uma fração significativa desses resíduos pois estão presentes em praticamente todos os tipos de EEE.



**Figura 2.** Total de lixo eletrônico gerado por tipo de EEE.  
Fonte: Adaptado de The Global e-waste monitor, 2024.

Neste cenário a sociedade tem um papel importante na melhoria na qualidade de vida das pessoas e no controle ambiental, cuja definição pode ser entendida como a ação humana consciente para prevenir ou reduzir deterioração ambiental e/ou para remediar ou compensar os efeitos da deterioração. O compromisso com o meio ambiente deve estar presente tanto nas empresas, quanto nos órgãos gestores e consumidores em todas as áreas. Destacando a questão dos resíduos sólidos e sua destinação final, que tem um importante marco na legislação brasileira, que é a Lei n.12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

Trata-se de um grande feito, pois leva em conta a responsabilidade ambiental ali prescrita, que estabelece diretrizes, instrumentos, objetivos e princípios que não só fortalecem o poder público nas ações de gerenciamento de resíduos sólidos, mas também

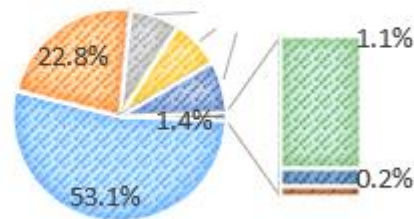
cobram deveres e obrigações para com a saúde ambiental, tanto de empresários, quanto dos consumidores, introduzindo a responsabilidade compartilhada. Outro dispositivo que serve de aplicação para a responsabilidade compartilhada é o conceito de Logística Reversa, em que o produtor é responsável pelo destino final dos resíduos ligados aos itens por ele fabricados.

Envolto nesta questão, a gestão de resíduos, os resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE), se sobressai devido ao seu grande volume e à falta de políticas específicas e investimentos. O Brasil tem proporcionado acessibilidade a equipamentos eletrônicos, decorrente do aumento do poder aquisitivo e da ascensão social nas duas últimas décadas. Como meio necessário para a resolução do problema, além do descarte adequado do resíduo, há também a possibilidade de eliminá-lo, reaproveitando-o e reincorporando-o na cadeia produtiva, adotando o modelo de economia circular.

A reciclagem é um pilar fundamental da economia circular, promovendo um modelo de produção sustentável que se opõe ao modelo linear tradicional. No Brasil, apesar da existência de legislações como o Decreto nº 10.240/2020, que regulamenta a logística reversa de produtos eletroeletrônicos, edificando Acordo Setorial de 2019, ainda persistem desafios significativos. A falta de conscientização dos consumidores, dificuldades na implementação da logística reversa, ausência de incentivos econômicos e infraestrutura inadequada para reciclagem de resíduos eletrônicos dificultam o descarte adequado desses resíduos. Esses obstáculos exigem superação de desafios econômicos, tecnológicos e de manufatura reversa (BRASIL, 2010; Giese *et al.*, 2021; Santos, 2015).

E reciclagem de PCI's, componentes essenciais de dispositivos eletrônicos, por conterem metais de alto valor agregado, como cobre, níquel, ouro, e prata, ao lado de elementos tóxicos como chumbo e cádmio, torna-se uma oportunidade estratégica e ambientalmente necessária. Estas placas possuem majoritariamente em sua composição materiais cerâmicos, poliméricos e metálicos. Analisando a variedade de espécimes químicas, quando tratadas, as PCI's trazem uma grande vantagem econômica pela presença de uma série de metais de alto valor agregado (Figura 3) (Gerbase; Oliveira, 2012; Soares; Ribeiro, 2019).

■ Cu ■ Fe ■ Ni ■ Zn ■ Sn ■ Ag ■ Au ■ Pd



**Figura 3.** Índices de metais (23,4-30% em PCI).  
Fonte: Gerbase; Oliveira, 2012.

E por conterem em sua composição metais de valor significativo, os REE acabam sendo exportados para empresas recicladoras na Europa ou América do Norte pela falta de tecnologias de recuperação no Brasil, quando não, eles são descartados inapropriadamente junto com o resíduo comum. (Franco *et al.*, 2021).

Desse modo, ocorre a disposição inadequada, que segue para o aterro sanitário, onde pode ser incinerado, liberando substâncias tóxicas na atmosfera, ou ficar exposto a céu aberto, entrando em contato com o solo e corpos d'água, causando poluição, prejudicando o meio ambiente e a população que circunda o local. É comum grande parte desses resíduos serem dispostos junto ao resíduo doméstico, acarretando a perda de materiais valiosos e a poluição do meio ambiente. Ou seja, além de degradar o ambiente, os componentes que compõem esses resíduos deixam de ser reutilizados ou reciclados.

Neste contexto estão inseridas nas sucatas eletrônicas as PCI's, elementos essenciais da maioria dos equipamentos eletrônicos e como mencionada, com composição variada, contendo desde metais preciosos, metais-base, metais tóxicos, materiais poliméricos e cerâmicos. Essa mistura heterogênea torna a reciclagem um processo difícil, entretanto, a própria presença de metais a torna uma matéria-prima interessante.

Outro ponto importante e de atenção, é que a presença de substâncias poluentes na sua composição, que podem provocar distúrbios no sistema nervoso, problemas renais e pulmonares, câncer e outras doenças, e que impulsiona estudos para evitar sua disposição direta no meio ambiente e de forma inadequada. Daí a necessidade de resoluções mais efetivas no descarte adequado e reaproveitamento desses resíduos, como o alumínio, o cobre, o níquel etc., o que pode ajudar a solucionar a exploração massiva

de matérias-primas virgens e do grande descarte de resíduo eletrônico sem um determinado fim.

Em foco, o teor de cobre em PCIs é altamente variável. Estudos clássicos em placas de computadores, como o de Veit (2005), reportavam faixas de 14% a 30%. No entanto, em placas de smartphones (WPCBs), similares às utilizadas neste estudo, a composição é geralmente mais rica, com teores de cobre que podem variar de 20% a 40%, além de uma maior concentração de metais preciosos como ouro e paládio (Li; Xu, 2024). Isso se deve, essencialmente, pela fina camada de cobre que normalmente é encontrada dentro desses equipamentos, sendo elas únicas, duplas ou multicamadas, a depender. (Moraes, 2011; Tozzi, 2017; Silva *et al.*, 2020).

A princípio, o cobre não é um metal que origine danos, contudo a atividade de mineração, extração e beneficiamento do cobre causa impactos ambientais negativos e, por muitas vezes, de difícil reversão, como a poluição do ar, da água, do solo, visual (modificação de paisagem natural por ação antrópica) e sonora (ruídos e vibrações), aumentando o risco de contaminação de diversos seres vivos e comunidades estabelecidas em áreas adjacentes (Mendes; Vieira, 2010; Milanez, 2017).

Além disso, o bem-estar é comprometido não só pelos ruídos gerados como também pelas pegadas não desejadas sobre vários ecossistemas consequente dessa produção. Por exemplo, pesquisas realizadas pelo Instituto Butantã, sobre a tragédia de Brumadinho em 2019, afirmaram que as ondas de rejeito de mineração causaram a morte e anomalias em embriões de peixes, afetando não só a cadeia produtiva, como também, a ecológica.

Os resíduos da mineração que continham, em especial, 600 vezes mais cobre que o adequado, não tinham a destinação e o tratamento correto e, quando houve o rompimento da barragem, trouxeram danos severos a saúde humana da população afetada, como doenças através do consumo dos contaminantes; além de danos à saúde ambiental, como a contaminação do ar, solo e água, e a economia prejudicando as ocupações agrícolas (Milanez, 2017; Silva *et al.*, 2020).

Como solução dessas problemáticas, a possibilidade de diminuição da extração do metal recuperando-o preferencialmente após a cadeia produtiva e substituindo o de “primeira” pelo de “segunda” é a abordagem resultante de algumas pesquisas. Para melhor visualização, sabe-se que a mineração de cobre disponibiliza, generalizando, 3% de cobre, sendo os outros 97% resíduos; e que a PCI pode possuir até 30% de cobre. Comparando os dados, uma tonelada de minério é capaz de fornecer 30 quilos de cobre;

já em uma tonelada de PCI – produto que já participou da cadeia produtiva e econômica e foi descartado – a quantidade de cobre recuperado e purificado pode chegar 300 quilos (Veit, 2005; Mendes; Vieira, 2010; Soares; Ribeiro, 2019).

Em outras palavras a extração de uma tonelada de minério de cobre, que necessitam de uma infraestrutura complexa (desde de a chegada de pessoas até a saída de caminhões com o minério) e muita mão de obra, pode ser substituída pelo tratamento de uma tonelada de placa de circuito impresso, a qual, além de diminuir a quantidade de lixo eletrônico, possui a necessidade de infraestrutura menor, pouca mão de obra (se comparado a anterior) e ainda é capaz de gerar renda e retornar um material a economia, agora, verde (Veit, 2005; Soares; Ribeiro, 2019).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Analisar a viabilidade da recuperação de metais, com ênfase no cobre, a partir de amostras de placas de circuito impresso.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar a composição química das amostras de placas de circuito impresso provenientes de resíduos eletrônicos;
- Avaliar a viabilidade da recuperação de metais, com ênfase no cobre, presentes nas placas de circuito impresso analisadas;
- Investigar os métodos de extração mecânicos, hidro metalúrgicos e piro metalúrgicos, identificando aqueles com maior potencial para a recuperação de metais;
- Analisar os impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado de resíduos eletrônicos, relacionando-os aos danos causados ao meio ambiente;
- Relacionar os resultados obtidos aos princípios da economia circular e às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei n. 12.305/2010);
- Promover a conscientização acerca dos riscos ambientais associados ao descarte incorreto de resíduos eletrônicos e da importância de práticas sustentáveis de gestão.

### **3. METODOLOGIA**

O procedimento está descrito detalhadamente abaixo para fins experimentais. Durante a metodologia, houve a necessidade de utilização da capela, em determinados momentos, e equipamentos de proteção individual (luva, jaleco e até mesmo máscara) para a maior proteção do analista.

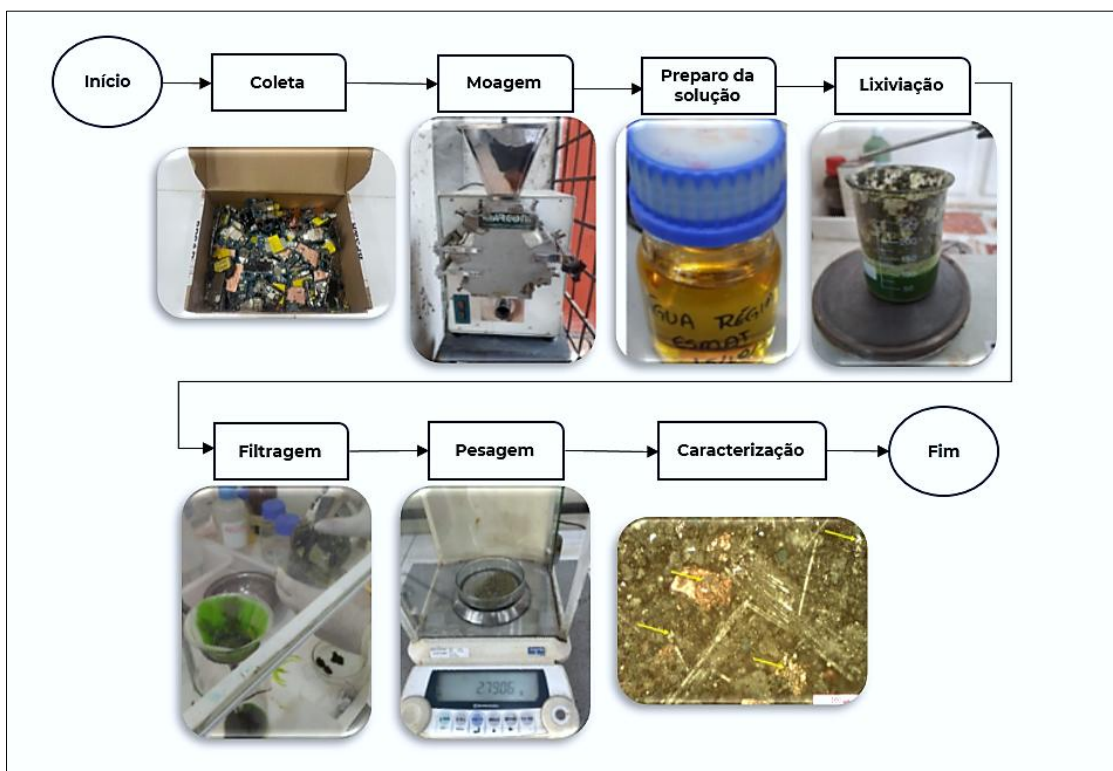
#### **3.1. MATERIAIS E REAGENTES**

Os equipamentos necessários foram moinho de bolas Quimis modelo Q298, modelo MA680, moinho de facas da marca Marconi, equipamento fluorescência de raios X (XRF) da marca Panalytical modelo Epsilon 3-X, microscopia óptica digital (MOD), conta-gotas, agitador magnético da marca SATRA, modelo com capacidade de até 4 litros, balança analítica da marca Shimadzu, modelo AUY 220, balança de bancada da marca Welmy, modelo BCW 6/15/30, capela e estufa. Os materiais necessários foram alicates, tesouras, pinças de ferro, placa de petri, béqueres (de volume a depender), proveta graduada, bastão de vidro, vidro de relógio, funil de vidro, suporte universal, estante de tubos de ensaio, pinças de madeira, papel de filtragem, papel tornassol e fita de pH. Os reagentes utilizados foram ácido nítrico P.A.  $\text{HNO}_3$  da marca Vetec e o ácido Clorídrico P.A.  $\text{HCl}$  da marca Snyth.

#### **3.2 ETAPAS DO EXPERIMENTO**

##### **3.2.1. PROCESSAMENTO DE PCI's**

As placas de circuito impresso obsoletas utilizadas neste experimento foram fornecidas por uma empresa local especializada na montagem de smartphones. Essas placas apresentam variações conforme os diferentes modelos produzidos pela empresa, sendo todas do tipo multicamada. A maioria delas é composta por oito camadas de cobre, o que permite uma maior densidade de circuitos e complexidade nas interconexões eletrônicas. A Figura 4 apresenta o fluxograma de processo desenvolvido neste trabalho. O processo segue a rota típica para recuperação de metais, com as operações unitárias que são: desmantelamento, fragmentação, lixiviação e a recuperação do metal pretendido.



**Figura 4.** Fluxograma de operações unitárias para caracterização de PCI's.  
Fonte: Elaboração própria, 2024.

### 3.2.2. PROCESSOS MECÂNICOS DE PCI's DESCARTADOS

A recuperação de metais a partir de PCI's descartados, especialmente os de menor valor, onde os metais-alvo são cobre e ferro, pode alcançar até 80% por processamento mecânico (Veit *et al.*, 2002). Etapas de cominuição e separação por propriedade diferenciadora, podem ser empregadas como pré-tratamento de processos piro, hidro e biohidrometalúrgicos, a fim de melhorar a eficiência da extração. Os processos mecânicos de separação de metais, plásticos, materiais cerâmicos e outros, tanto em placas de alto valor quanto de baixo valor, permitem adotar processos menos complexos de separação subsequente. Contudo, requerem a fragmentação dos materiais, para reduzir o tamanho das PCIs, no entanto perdas de massa podem ocorrer devido à formação de partículas finas o que pode reduzir a recuperação dos metais (Hagelucken, 2006).

No presente trabalho, inicialmente foram separados as placas e quebradas ao meio para diminuir seu tamanho (Figura 4), após isso as placas foram separadas em 4 partes com cerca de 500 g cada, essa separação ocorreu para fazer a diminuição da sua granulometria no moinhos de facas, sendo adicionado ao moinho de maneira controlada

com aproximadamente 25 g por vez, cada processo de trituração levou aproximadamente 3 minutos, finalizando a cada parte o material foi pesado.

Foi feita a pesagem juntando todas as partes e posteriormente foi feita a separação em material grosseiro e material fino, conforme a Tabela 1, tendo uma perda aproximada de 406 g por causa do processo do moinho de facas.

Deve-se notar que a perda de massa de 406 g durante a cominuição é significativa. Este material, provavelmente pó fino volátil, representa um desafio para a viabilidade econômica do processo, pois pode conter metais valiosos, além de gerar um risco à saúde ocupacional e ao meio ambiente se não for devidamente contido.

MATERIAL	PESO (g)
<b>Material Fino</b>	1.024
<b>Material Grosseiro</b>	0.618

**Tabela 1.** Material após a etapa de moagem.  
Fonte: Elaboração própria, 2024.

### 3.2.3. LIXIVIAÇÃO

Utilizou-se 75 mL de ácido clorídrico (HCl) e 25 mL de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), obtendo-se 100 mL de solução na proporção de 3:1 (HCl:HNO<sub>3</sub>) conhecida como água régia. Optou-se por este lixiviante agressivo, apesar do foco principal ser o cobre, visando garantir a dissolução simultânea de metais nobres (como ouro e prata) também identificados na caracterização. Utilizando-se de um béquer, despejou-se a solução de 100 mL de água régia, pondo-se sobre um agitador magnético. Adicionou-se 25 g do granulado de PCI no béquer, o agitador magnético garante que não haja deposição do material dissolvido sobre o metal de interesse, o que diminuiria a cinética de reação devido a formação de uma camada passivante. O processo prosseguiu por 2 horas etapa lixiviação, conforme a (Figura 4).

### 3.2.4. FILTRAGEM

Após o tempo estipulado, o resíduo foi filtrado em um papel de filtragem e lavado com água destilada, visando neutralizar a reação, conforme etapa de Filtragem (Figura 4). Após isso, o resíduo foi colocado em uma placa de Petri e colocada na estufa, por 12 horas à temperatura de 60 °C, para secagem.

### **3.2.5. PESAGEM**

Realizou-se a pesagem do resíduo seco utilizando uma balança analítica (Figura 4), obteve-se 2,79 g de material lixiviado. Após isso, o material foi enviado para caracterização do mesmo.

### **3.2.6 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS**

Amostras do pó obtido na etapa de moagem (Seção 3.2.2), antes do processo de lixiviação, foram separadas para a análise da composição química inicial no equipamento de FRX, visando quantificar o potencial de recuperação metálica. Foi separado 10 mg desta amostra em pó para a análise.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1. ESPECTROMETRIA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)**

A análise por FRX é uma técnica analítica ágil e não destrutiva, indispensável para a caracterização elementar de materiais. Ela fornece as porcentagens dos elementos presentes na estrutura, sendo considerada neste estudo uma análise semiquantitativa. A quantificação rigorosa por FRX, conforme guias como a norma ASTM E1621-22, exige o uso de materiais de referência certificados (CRMs) com matriz e granulometria idênticas às da amostra (ASTM, 2022). Como o pó de PCI é uma matriz heterogênea complexa (mistura de metais, cerâmicas e polímeros), os resultados são apresentados como semiquantitativos, ideais para determinar a ordem de grandeza e a viabilidade de recuperação.

As Tabelas 2 e 3 mostram os resultados obtidos no ensaio. Nota-se o cobre apresentou uma concentração de 6,324%, enquanto outros elementos, como prata e ouro, apresentaram concentrações de 3,284% e 0,106%, respectivamente. A presença de cobre (Cu) está em maior concentração quando comparado com os demais elementos metálicos presentes na amostra pois é o metal com o desempenho de condutividade apropriado para esta aplicação e está presente em camadas presentes em toda a área superficial da placa realizando as conexões entre os componentes.

Composto	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	Ti	Mn
Concentração (%)	0,093	10,424	41,559	2,918	2,689	11,605	0,06317	8,645	3,911	0,131
Composto	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ni	Cu	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ag
Concentração (%)	0,886	0,163	3,779	0,004	0,001	0,768	0,019	1,334	0,039	1,893
Composto	Sn	Ba	W	Hg	Pb	Bi	Th	Rh	Eu	Yb
Concentração (%)	0,228	8,053	0,000	0,000	0,002	0,022	0,000	0,001	0,000	0,035

**Tabela 2.** Composição química total.  
Fonte: Elaboração própria, 2024.

Metal	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	-
Concentração (%)	0,069	7,143	25,980	1,774	1,531	16,763	0,078	9,458	6,100	0,211	-
Metal	Fe	Ni	Cu	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Rh	-
Concentração (%)	1,033	0,271	6,324	0,006	0,001	1,322	0,0032	2,317	0,066	0,001	-
Metal	Ag	Sn	Ba	Eu	Yb	W	Au	Hg	Pb	Bi	Th
Concentração (%)	3,284	0,396	14,501	0,001	0,058	1,116	0,106	0,000	0,003	0,037	0,000

**Tabela 3.** Composição química.  
Fonte: Elaboração própria, 2024.

A Tabela 2 mostra a composição química de uma amostra de material analisado por fluorescência de raio-X (FRX). A análise revela as concentrações percentuais dos elementos presentes, com destaque para os seguintes pontos: a amostra apresenta concentrações significativas de SiO<sub>2</sub> (41,559%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10,424%), e CaO (8,645%), os quais são compostos cerâmicos comuns em diversos tipos de materiais, possivelmente relacionados a componentes estruturais. Outros elementos cerâmicos como MgO (0,093%) e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (2,918%) também estão presentes, porém em concentrações menores.

Os metais encontrados em concentrações mais elevadas são o cobre (Cu) com 3,7792%, seguido pela prata (Ag) (1,893%). Esses metais são importantes para a

fabricação de circuitos e conexões, e a maior concentração de cobre sugere que ele desempenha um papel essencial nas propriedades elétricas e de condução do material. Além disso, foram detectados metais pesados como arsênio (As) (0,004%) e rubídio (Rb) (0,001%), embora em concentrações muito pequenas. Isso pode indicar a presença de impurezas ou resíduos no material analisado.

A Tabela 3 oferece uma visão mais detalhada da composição dos metais presentes na amostra, dividindo-os em grupos mais específicos, como: Cobre (Cu) continua com a maior concentração (6,324%), seguido da prata (Ag) (3,284%) e ouro (Au) (0,106%), confirmando a relevância dos metais preciosos no material analisado, com destaque para o cobre, que é amplamente utilizado em PCI's para garantir boa condutividade elétrica. Níquel (Ni) e ferro (Fe) também aparecem em concentrações significativas (0,271% e 1,033%, respectivamente), o que pode indicar a presença de ligas metálicas ou materiais de reforço no dispositivo. Outros metais e elementos raros: A presença de elementos como európio (Eu) e ítrio (Y), embora em concentrações muito baixas (0,001% e 0,0032%, respectivamente), sugere a possível presença de elementos das terras raras, que são comuns em dispositivos eletrônicos avançados.

Conforme destacado por Pereira *et al.* (2024) na estrutura básica das Placas de Circuito Impresso (PCIs), o cobre (Cu) é o principal metal utilizado devido à sua alta condutividade elétrica, essencial para as trilhas que conectam os componentes eletrônicos. Metais preciosos, como ouro (Au), prata (Ag), paládio (Pd) e platina (Pt) são frequentemente empregados em quantidades menores para revestir contatos e terminais de solda, pois possuem excelente resistência à corrosão e garantem alta durabilidade e eficiência nas conexões elétricas, características fundamentais em dispositivos eletrônicos de alta performance.

Por outro lado, metais tóxicos como cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e cromo (Cr), embora presentes em baixas concentrações, têm um impacto ambiental e de saúde significativo. O cádmio é usado em algumas baterias e revestimentos de ligas, mas é altamente tóxico e persistente no meio ambiente. O mercúrio tem sido historicamente utilizado em sensores e interruptores, mas é cada vez mais evitado devido aos riscos de contaminação e toxicidade. O cromo, especialmente em sua forma hexavalente, é um carcinógeno e, embora seja utilizado em revestimentos metálicos e algumas ligas, sua presença é regulada por questões de segurança ambiental e de saúde.

Além disso, elementos das terras raras como tálio (Ta) e gálio (Ga) são essenciais para semicondutores, LEDs e dispositivos de alta eficiência. O gálio é utilizado em diodos

emissores de luz (LEDs) e dispositivos de comunicação devido à sua capacidade de formar compostos semicondutores de alta performance. O tálio, por sua vez, é empregado em capacitores de alta capacitância, devido à sua alta constante dielétrica.

Os retardantes de chama, como brometo (Br) e cloro (Cl), são utilizados em materiais plásticos presentes nas PCIs para prevenir incêndios, aumentando a segurança dos dispositivos. O bromo é comumente encontrado em polímeros halogenados, enquanto o cloro também é usado em alguns materiais plásticos, como o PVC, para melhorar a resistência ao fogo. No entanto, o uso desses elementos também levanta preocupações ambientais, pois podem gerar substâncias tóxicas quando incinerados.

Em outras palavras, os metais e compostos mencionados desempenham funções cruciais nas PCIs, com o cobre sendo o principal condutor, enquanto os metais preciosos garantem a eficácia nas conexões elétricas. No entanto, a presença de metais tóxicos e elementos poluentes exige atenção para a segurança ambiental e saúde pública, e o uso de terras raras e retardantes de chama reflete a busca por melhor desempenho e segurança nos componentes eletrônicos.

A Tabela 4 apresenta uma composição típica de PCIs (Placas de Circuito Impresso), especificando a distribuição entre metais, cerâmicos e plásticos. Os principais pontos a serem observados são: Metais: A concentração de cobre (Cu) em PCIs varia entre 6-27%, o que está em linha com os resultados da análise anterior, onde o cobre foi identificado com alta concentração (3,779%). Outros metais como ferro (Fe), alumínio (Al), estanho (Sn) e níquel (Ni) também estão presentes, com valores que variam dentro dos intervalos mencionados. Esses metais são frequentemente encontrados em PCIs devido às suas propriedades de condutividade elétrica e resistência mecânica. Cerâmicos e plásticos: A composição cerâmica dos PCIs inclui  $\text{SiO}_2$  (15-30%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (6,0-9,4%), substâncias comumente usadas em materiais isolantes. Os plásticos, como PE (polietileno), PP (polipropileno) e PVC (policloreto de vinila), também desempenham um papel importante na estrutura dos PCIs, contribuindo para o isolamento e a proteção dos componentes eletrônicos.

A presença de metais preciosos, como ouro (Au), prata (Ag) e paládio (Pd), é notável, sendo usados em quantidades pequenas em (ppm) para otimizar a condutividade e resistência à corrosão dos PCIs. Os resultados das Tabelas 2 e 3 indicam que o material analisado contém uma boa quantidade de cobre, prata e ouro, o que é típico em componentes eletrônicos, especialmente em PCIs. O cobre, com sua alta condutividade elétrica, é fundamental para a fabricação de conexões e trilhas de circuitos, enquanto os

metais preciosos, como a prata e o ouro, são frequentemente usados em contatos de alta qualidade para garantir eficiência e durabilidade nas conexões.

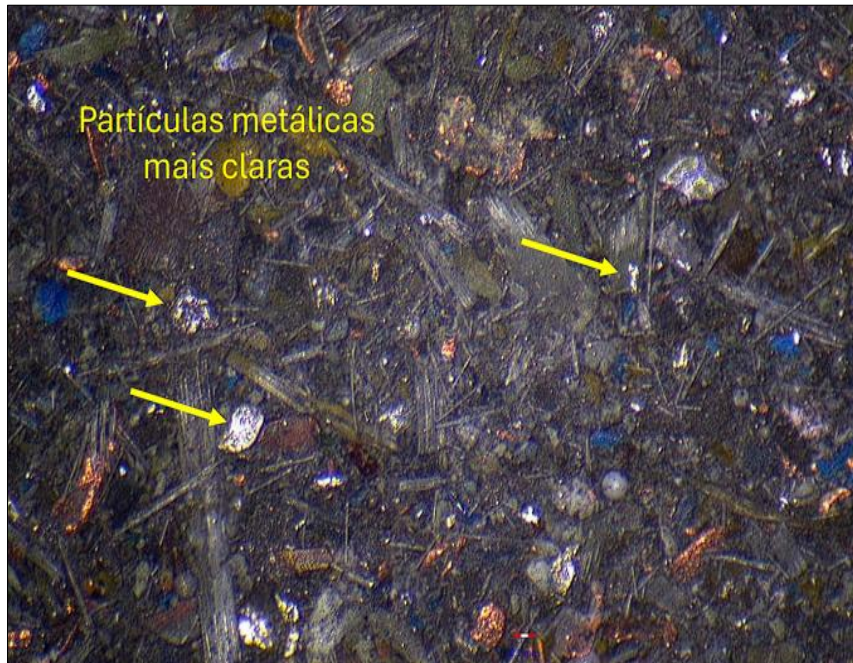
Metais	(%)	Cerâmicos (Cerca de 30%)	(%)	Plásticos (Cerca de 30%)	(%)
<b>Cu</b>	6-27	SiO <sub>2</sub>	15-30	PE	10-16
<b>Fe</b>	1,2-8,0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,0-9,4	PP	4,8
<b>Al</b>	2,0-7,2	Óxidos de terras raras	6,0	OS	4,8
<b>Sn</b>	1,0-5,6	Titanatos e micas	3,0	Epoxy	4,8
<b>Pb</b>	1,0-4,2	-	-	PVC	2,4
<b>Ni</b>	0,3-5,4	-	-	PTPE	2,4
<b>Zn</b>	0,2-2,2	-	-	Nylon	0,9
<b>Sb</b>	0,1-0,4	-	-	-	-
<b>Au (ppm)</b>	250-2050	-	-	-	-
<b>Ag (ppm)</b>	110-4500	-	-	-	-
<b>Pd (ppm)</b>	50-4000	-	-	-	-
<b>Pt (ppm)</b>	5-30	-	-	-	-
<b>Co (ppm)</b>	1-4000	-	-	-	-

**Tabela 4.** Composição típica de PCI's.  
Fonte: Adaptado de Kaya, 2016.

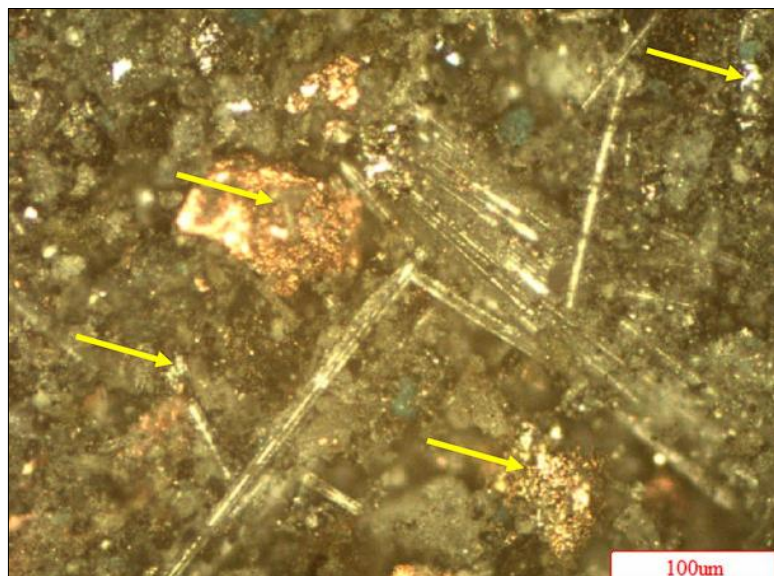
Os dados também indicam a presença de elementos contaminantes em baixas concentrações, como o arsênio (As), o que pode ser resultado de impurezas ou de processos industriais. Embora esses elementos sejam tóxicos, as concentrações encontradas são pequenas, o que pode não representar um risco imediato, mas exige monitoramento contínuo.

A comparação com a Tabela 4, que descreve a composição típica de PCIs, mostra que os valores obtidos para os metais e materiais cerâmicos estão dentro das faixas esperadas para componentes de circuitos impressos. A alta presença de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> também é indicativa de materiais cerâmicos usados para isolamento, enquanto a presença de plásticos como PE e PVC é típica em PCIs modernos, ajudando a proteger os circuitos e a garantir a estabilidade térmica.

A principal conclusão é que a amostra analisada parece ser um tipo de material com boa adequação para uso em circuitos eletrônicos, especialmente devido à alta concentração de cobre, que é ideal para condutividade elétrica. Além disso, a presença de metais preciosos pode indicar que o material é de alta qualidade, projetado para desempenho e durabilidade em componentes eletrônicos.



**Figura 5.** Morfologia das micropartículas do pó obtido das placas PCI por microscopia óptica utilizando o microscópio óptico digital (ISM-DL301, INSIZE, China).  
Fonte: Autorial, 2024.



**Figura 6.** Morfologia das micropartículas do pó obtido das placas PCI por microscopia óptica utilizando o microscópio óptico (CX31, Olympus, Japão).  
Fonte: Autorial, 2024.

A morfologia das micropartículas do pó obtido das placas de circuito impresso (PCI), analisada por microscopia óptica (Figura 5 e 6), revelam características fundamentais para entender o comportamento e as propriedades do material fragmentado. As imagens obtidas mostram uma distribuição variada de partículas, com formas irregulares e superfícies geralmente rugosas, o que é típico de materiais obtidos por processos de fragmentação física, como a cominuição.

Os resultados obtidos a partir das medições realizadas com microscopia, associadas à análise morfológica das micropartículas do pó proveniente das placas de circuito impresso (PCI), refletem diversas questões importantes relacionadas à eficiência do processo de recuperação e separação dos materiais presentes nas placas. A observação das partículas metálicas, que refletem a luz do microscópio e se destacam na amostra, confirma a presença significativa de metais, como cobre, que são de alto valor econômico e estão presentes nas PCIs em formas que são mais visíveis devido à sua natureza refletiva. Essa observação sugere que a separação das partículas metálicas, das não metálicas, como fibras de vidro e polímeros, é um desafio, já que esses materiais não refletem a luz e aparecem mais escuros nas imagens, o que dificulta a separação visual e torna necessária uma abordagem mais refinada para melhorar essa distinção.

Além disso, as partículas presentes na amostra variam significativamente em tamanho, variando de 10 a 500  $\mu\text{m}$ , e apresentam morfologias diferentes, como esférica, lamelar e tubular. Essas variações morfológicas indicam que os fragmentos das PCIs não são uniformes e que o processo de fragmentação resultou em uma ampla gama de formas, o que pode influenciar diretamente a eficiência dos processos de separação e recuperação. A presença de partículas com diferentes tamanhos e formas sugere que, para maximizar o rendimento e eficiência na recuperação de metais, seria necessário refinar o processo de fragmentação, buscando uma granulometria mais fina, o que pode ser alcançado por meio do uso de moedores e moinhos, como sugerido pelos resultados.

A lixiviação, um processo crucial para a recuperação de metais, também se destaca como uma etapa que pode ser otimizada. Os resultados indicam que a lixiviação em fragmentos com menor granulometria pode aumentar a taxa de recuperação dos metais-alvo. Além disso, a agitação do sistema de ataque ácido por um maior intervalo de tempo pode melhorar a eficiência do processo de extração dos metais, refletindo a necessidade de ajustes nas condições operacionais para alcançar maiores rendimentos. Isso também reforça a importância de uma preparação prévia adequada das amostras, por meio de etapas como o desmantelamento e a trituração, que eliminam componentes indesejáveis e melhoram a eficácia da lixiviação, direcionando-a de forma mais eficiente para os metais desejados.

De acordo com Pereira *et al.* (2024), a morfologia das micropartículas em processos de fragmentação de materiais compostos, como as PCI, é fortemente influenciada pela natureza dos componentes que compõem as placas. Essas placas geralmente contêm uma combinação de materiais metálicos (como cobre), poliméricos

(como resinas epóxi) e cerâmicos (como fibras de vidro). A fragmentação pode resultar em partículas compostas, onde os diferentes materiais permanecem associados, ou em partículas mais puras, dependendo da intensidade do processo e do tamanho das partículas.

Por exemplo, revisões recentes sobre processamento mecânico confirmam que a fragmentação é a etapa chave para a liberação dos metais. Para atingir uma taxa de liberação metálica superior a 99%, geralmente são necessários processos de moagem multi-estágio para alcançar granulometrias finas, tipicamente abaixo de 1 mm (Huang *et al.*, 2025).

A estrutura irregular das partículas e a possível aglomeração de diferentes fases materiais (metálicas, cerâmicas e poliméricas) podem dificultar a separação completa dos materiais, conforme observado na análise morfológica. Isso também foi evidenciado por Murugan *et al.* (2008), que notaram que, em faixas de tamanho de partículas menores, a liberação do metal não ocorre de maneira eficaz. Estudos mais recentes, utilizando análises avançadas como a microtomografia computadorizada (micro-CT), explicam o porquê: durante a fragmentação, os metais (sendo o cobre o mais dúctil) tendem a ser "amassados" ou "esfregados" contra as superfícies poliméricas, em vez de se quebrarem limpamente (Rochat; Thiébaud, 2025). A presença de partículas metálicas brilhantes associadas a matrizes cerâmicas ou poliméricas, como observado na (Figura 6), está de acordo com essa dificuldade de liberação total do cobre relatada na literatura. . As partículas metálicas mais brilhantes tendem a ser compostos de cobre ou ligas de cobre, enquanto as partículas associadas a materiais não metálicos apresentam menor brilho, o que reflete a composição cerâmica ou polimérica.

A análise morfológica das micropartículas do pó obtido das PCI revela uma complexa interação entre diferentes materiais, e os resultados observados (partículas irregulares, associadas e com superfícies rugosas) são consistentes com a literatura existente sobre a fragmentação de PCI e os desafios associados à liberação dos componentes materiais, como os metais e as fibras de vidro.

Por fim, o contexto relacionado ao tratamento de resíduos de PCI reflete a necessidade urgente de melhorias nas tecnologias de recuperação de metais, especialmente em um cenário onde as tecnologias ainda estão em estágio emergente. O incentivo às indústrias, especialmente aquelas responsáveis pela fabricação e reciclagem das PCI, para adotar métodos mais eficazes de tratamento, é fundamental. O desenvolvimento de processos que permitam a recuperação eficiente das espécies

metálicas com valor econômico pode não só reintegrar esses materiais à economia, mas também gerar oportunidades de emprego e renda, principalmente nas etapas de coleta e reciclagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). Isso não apenas contribuiria para a economia circular, mas também teria um impacto ambiental positivo, ao reduzir a quantidade de resíduos de PCI descartados inadequadamente.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após as análises utilizando a fluorescência de raio x e as microscopias óticas das PCI's, percebemos que uma série de metais são descartados pois não possuem outra reutilização. Com este trabalho foi possível a realização da determinação de metais que constituem as placas de circuito impresso produzidas, destacando aqueles de alto valor agregado, como o cobre, que apresentou uma concentração de 6,324%, enquanto outros elementos, como prata e ouro, apresentaram concentrações de 3,284% e 0,106%, respectivamente.

Pelas medidas de microscopias realizadas foi possível observar que partículas metálicas, refletem a luz do microscópio e se destacam na amostra em pó. As amostras de pó mostram a presença de fibra de vidro e polímeros que não refletem a luz do microscópio e ficam mais escuros, ou seja, é preciso trabalhar ainda em uma separação melhor das partículas metálicas dos outros tipos de materiais. E que estas variam de tamanho e formato, entre 10-500µm com morfologias esférica, lamelar e tubular. Portanto, para se obter maiores rendimentos, é necessário aplicar a lixiviação em fragmentos com menor granulometria (alcançados com o uso de moedores e moinhos) e, também, que a agitação do sistema de ataque ácido tenha um maior intervalo de tempo.

Para um melhor aproveitamento do resíduo, o desmantelamento e a trituração também são etapas importantes, pois eliminam alguns componentes e melhoram a eficácia dos processos químicos de lixiviação direcionados aos metais-alvo.

Quantitativamente, os materiais das placas, podem causar um impacto econômico significativo se forem recuperados e se não, impactos ambientais, pois o resíduo que deveria ser tratado, tanto pela presença de polímeros e cerâmicos que também possuem contaminantes.

De acordo com a previsão teórica, seria esperado maiores concentrações (presença) de prata (Ag) e ouro (Au), elementos que foram detectados, no entanto, em concentrações muito baixas, menor que 1%. O elemento paládio (Pd) não foi detectado na amostra estudada, mas presente em outros estudos.

Ainda, foi identificado pelo presente artigo que a recuperação do cobre (Cu) pode ser promissora, mesmo utilizando PCI's diferentes, por diferentes métodos, mas que precisam ser eficientes economicamente. Embora a rota hidrometalúrgica com ácidos fortes, como a água régia aqui testada, seja eficaz para a dissolução, ela gera efluentes de alta toxicidade. A pesquisa recente tem focado em lixiviantes alternativos "verdes", como ácidos orgânicos (Jadhav *et al.*, 2025) ou aminoácidos, que, embora possam ter cinéticas de reação mais lentas, reduzem drasticamente o impacto ambiental do processo.

Paralelamente, a bio-hidrometalurgia (bioleaching) surge como uma rota promissora, utilizando microrganismos para extrair seletivamente os metais, alinhando-se com os princípios da economia circular (Park *et al.*, 2025). Embora os métodos aqui demonstrados não sejam completamente amigáveis ambientalmente, os efluentes gerados por estes processos podem e devem ser tratados adequadamente. A quantificação do Cu é de extrema importância para dados mais comprobatórios sobre a quantidade do metal em uma PCI e sobre sua reciclagem e venda para o mercado consumidor, pois o cobre possui um grande valor econômico mundialmente e sua recuperação, assim como a de outros metais, torna-se benéfica ao meio ambiente. Visto que tecnologias de recuperação de metais de PCI's ainda são emergentes, é necessário incentivar as indústrias, principalmente àquelas que fabricam estas peças e são responsáveis legais por sua coleta e reciclagem, aplicarem métodos de tratamento que consigam recuperar as espécies que estão presentes e possuem valor econômico. Uma vez que identificados, é possível se criar procedimentos mais benéficos para a recuperação de um ou mais metais, devolvendo-os ao mercado e reintegrando-os a economia, além de, durante o processo, criar oportunidades de renda e emprego, principalmente com a coleta desse REEE.

É importante ressaltar que o setor eletroeletrônico brasileiro já deu um passo significativo rumo à sustentabilidade com o Acordo Setorial de Eletroeletrônicos, firmado em 31 de outubro de 2019. Este acordo estabeleceu metas para a gestão de resíduos eletroeletrônicos, promovendo a responsabilidade compartilhada entre fabricantes, importadores e distribuidores. Posteriormente, o Decreto nº 10.240/2020 regulamentou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) para o setor, fortalecendo a logística reversa e a reciclagem de eletroeletrônicos. Essas iniciativas demonstram um compromisso com a economia circular e a redução do impacto ambiental, alinhando-se às diretrizes globais de sustentabilidade.

## 6. REFERÊNCIAS

ASTM. E1621-22: Standard Guide for Elemental Analysis by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. Disponível em: <https://www.astm.org/e1621-22.html>. Acesso em: 21 de Julho de 2024.

BALDÉ, Cornelis P. *et al.* THE GLOBAL E-WASTE MONITOR 2024. International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), 2024. Disponível em: [https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2024/03/GEM\\_2024\\_18-03\\_web\\_page\\_per\\_page\\_web.pdf](https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2024/03/GEM_2024_18-03_web_page_per_page_web.pdf). Acesso em: 21 de Julho de 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=12305&ano=2010&ato=e3dgXUq1keVpWT0f1>. Acesso em: 27 de Julho de 2024.

CUI, J.; FORSSBERG, E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 99, n. 3, p. 243-263, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X0200161X>. Acesso em: 20 de Outubro de 2024.

FRANCO, A. *et al.* Danos causados à saúde humana pelos metais tóxicos presentes no lixo eletrônico. *Diversitas Journal*, v. 6, n. 2, p. 2025-2039, 2021. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/352139359\\_Danos\\_causados\\_a\\_saude\\_human\\_a\\_pelos\\_metais\\_toxicos\\_presentes\\_no\\_lixo\\_eletronico](https://www.researchgate.net/publication/352139359_Danos_causados_a_saude_human_a_pelos_metais_toxicos_presentes_no_lixo_eletronico). Acesso em: 4 de setembro de 2024.

GERBASE, A.E.; OLIVEIRA, C.R. Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a Química. *Quim. Nova*, v. 35, n. 7, p. 1486-1492, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/KSRbFmmLnrkxcrKY37QS9m/>. Acesso em: 30 de agosto de 2024.

GIESE, E.C. *et al.* Desafios da reciclagem de lixo eletrônico e as cooperativas de mineração urbana. *Brazilian Journals of Business*, Rio de Janeiro, v. 3, n. 5, p. 3.647-

3.660, 2021. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BJB/article/view/32094>. Acesso em: 20 de agosto de 2024.

HAGELÜKEN, C. Recycling of electronic scrap at Umicore's integrated metals smelter and refinery. *ERZMETALL*, v. 59, n. 3, p. 152–161, 2006. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/240629115\\_Recycling\\_of\\_Electronic\\_Scrap\\_at\\_Umicore's\\_Integrated\\_Metals\\_Smelter\\_and\\_Refinery](https://www.researchgate.net/publication/240629115_Recycling_of_Electronic_Scrap_at_Umicore's_Integrated_Metals_Smelter_and_Refinery). Acesso em: 10 de outubro de 2024.

HUANG, L. *et al.* Liberation and physical separation of metals from waste printed circuit boards: A 2025 state-of-the-art review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 485, p. 134567, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134567> - Acesso em: 6 novembro de 2025

JADHAV, U. *et al.* Cost-effective and eco-friendly copper recovery from waste printed circuit boards using organic chemical leaching. *Materials Today: Proceedings*, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.12.167>. Acesso em: 25 outubro de 2025.

KASPER, A.C. *et al.* Printed wiring boards for mobile phones: Characterization and recycling of copper. *Waste Management*, v. 31, n. 12, p. 2536-2545, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X11003734?via%3Dihub>. Acesso em: 4 de novembro de 2024.

KAYA, M. Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. *Waste Management*, v. 57, p. 64–90, 2016. Acesso em: 4 de novembro de 2024.

LI, J.; XU, Z. Metal content and sustainable recovery from waste smartphone PCBs: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 201, p. 107258, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rcc.2023.107258> - Acesso em: 6 novembro de 2025

LI, P. J. *et al.* Printed circuit board recycling: a state-of-the-art survey. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, v. 27, n. 1, p. 33-42, 2004. Acesso em: 4 de novembro de 2024.

MENDES, A.F.; VIEIRA, R. Gestão Ambiental na Indústria de Mineração no Brasil: Técnicas para Minimizar Potenciais Impactos Ambientais na Extração do Cobre. In: 1º Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, IBEAS, nov. 2010. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2010/XI-009.pdf>. Acesso em: 20 de setembro de 2024.

MILANEZ, B. Mineração, ambiente e sociedade: impactos complexos e simplificação da legislação. Boletim Regional, Urbano e Ambiental (IPEA), v. 16, p. 93–101, 2017. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/poemas/wp-content/uploads/sites/513/2014/07/Milanez-2017-Mineração-ambiente-e-sociedade.pdf>. Acesso em: 20 de setembro de 2024.

MORAES, V.T. Recuperação de metais a partir do processamento mecânico e hidrometalúrgico de placas de circuito impressos de celulares obsoletos. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-19042011-100037/es.php>. Acesso em: 10 de setembro de 2024.

MOZETO, A.A.; JARDIM, W.F.A Química Ambiental no Brasil. Quim. Nova, v. 25, Supl. 1, p. 7-11, 2002. Disponível em: <https://www.studocu.com/pt-br/document/centro-universitario-jorge-amado/engenharia-do-trabalho/a-quimca-ambiental-no-brasil-9406/14131578>. Acesso em: 22 de setembro de 2024.

MURUGAN, R.V. *et al.* Milling and separation of the multi-component printed circuit board materials and the analysis of elutriation based on a single particle model. Powder Technology, v. 183, n. 2, p. 169-176, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591007003634?via%3Dihub>. Acesso em: 5 de novembro de 2024.

PARK, G. H. *et al.* Research Trends in Bioleaching for the Recovery of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Batteries and Waste Printed Circuit Boards. Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, v. 62, n. 4, p. 456-475, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.32390/ksmer.2025.62.4.456>. Acesso em: 25 outubro de 2025.

PEREIRA, M.M. Pré-Tratamento e Caracterização de Placas de Circuito Impresso de Computadores com Ênfase no Conteúdo Metálico. *Quim. Nova*, v. 47, n. 8, p. 1-10, 2024. Disponível em: <https://quimicanova.sbgq.org.br/pdf/AR2023-0195>. Acesso em: 20 de outubro de 2024.

ROCHAT, F.; THIÉBAUD, E. Advanced characterization of metal-polymer interfaces in crushed PCB fractions using micro-CT analysis. *Waste Management*, v. 180, p. 112-121, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.03.012> - Acesso em: 6 novembro 2025

SANTOS, J.M. Uso de técnicas espectroanalíticas na avaliação de amostras de placas de circuito impresso de lixo eletrônico. Tese (Doutorado em ciências) – Universidade Federal de São Carlos - UFSC, São Carlos, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/7818/TeseJMS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 30 de agosto de 2024.

SILVA, M.L.L. *et al.* Risco Ambiental e Biotecnologia na Recuperação de Metais da Placa de Circuito Impresso (PCI). *Brazilian Applied Science Review*, Rio de Janeiro, v. 4, n. 4, p. 2494-2505, 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/343423181\\_Risco\\_Ambiental\\_e\\_Biotecnologia\\_na\\_Recuperacao\\_de\\_Metais\\_da\\_Placa\\_de\\_Circuito\\_Impresso\\_PCI](https://www.researchgate.net/publication/343423181_Risco_Ambiental_e_Biotecnologia_na_Recuperacao_de_Metais_da_Placa_de_Circuito_Impresso_PCI). Acesso em: 10 de setembro de 2024.

SILVA, M.A. *et al.* Sobreposição de Riscos e Impactos no Desastre Vale em Brumadinho. *Ciência e Cultura*, v. 72, p. 21-28, 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/343841349\\_Sobreposicao\\_de\\_riscos\\_e\\_impactos\\_no\\_desastre\\_da\\_Vale\\_em\\_Brumadinho/link/612621ad76fa33409df9e09b/download](https://www.researchgate.net/publication/343841349_Sobreposicao_de_riscos_e_impactos_no_desastre_da_Vale_em_Brumadinho/link/612621ad76fa33409df9e09b/download). Acesso em: 20 de setembro de 2024.

SOARES, A.C.; RIBEIRO, Y.D. Avaliação do processo de extração do cobre contido em placas de circuito impresso via hidrometalurgia e recuperação por oxirredução. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 5, n. 8, p. 11521-11531, 2019. Disponível em: <https://research.amanote.com/publication/UIp-z3MBKQvf0BhiBgTD/avaliacao-do-processo-de-extrao-do-cobre-contido-em-placas-de-circuito-impresso-via>. Acesso em: 2 de setembro de 2024.

SPAARGAREN, G. The ecological modernization of production and consumption. Tese (Doutorado) - Landbouw Universiteit Wageningen, Wageningen, 1996. Disponível em: <https://edepot.wur.nl/138382>. Acesso em: 15 de julho de 2024.

TOZZI, L.P. Reciclagem de placas de circuito impresso para obtenção de metais não ferrosos. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017. Disponível em: [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16560/1/PG\\_COENQ\\_2017\\_2\\_17.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16560/1/PG_COENQ_2017_2_17.pdf). Acesso em: 11 de setembro de 2024.

VEIT, H.M. Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: [https://oasisbr.ibict.br/vufind/Record/URGS\\_7c09fb7df94a947dc6af7bcdd5f92902](https://oasisbr.ibict.br/vufind/Record/URGS_7c09fb7df94a947dc6af7bcdd5f92902). Acesso em: 8 de setembro de 2024.

VEIT, H. M. *et al.* Using mechanical processing in recycling printed wiring boards. *Recycling Electronic Scrap*, v. 54, n. 6, p. 45–47, 2002. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02701850>. Acesso em: 8 de setembro de 2024.

ZHANG, S.; FORSSBERG, E. Intelligent liberation and classification of electronic scrap. *Powder Technology*, v. 105, p. 295-301, 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591099001515>. Acesso em: 17 de julho de 2024.