



Universidade Federal de Ouro Preto  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas  
Departamento de Engenharia Elétrica



## **Trabalho de Conclusão de Curso**

**Um estudo sobre economia circular e mineração urbana de resíduos eletrônicos na microrregião do Médio Piracicaba-MG.**

**Maycon Duarte Pereira**

João Monlevade, MG  
2022

**Maycon Duarte Pereira**

**Um estudo sobre economia circular e mineração urbana de resíduos eletrônicos na microrregião do Médio Piracicaba-MG.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. MSc Edgard Gregory Torres Saravia

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago

**Universidade Federal de Ouro Preto**  
**João Monlevade**  
**2022**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P436e Pereira, Maycon Duarte.

Um estudo sobre economia circular e mineração urbana de resíduos eletrônicos na microrregião do Médio Piracicaba-MG. [manuscrito] / Maycon Duarte Pereira. - 2022.

66 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Me. Edgard Gregory Torres Saravia.

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Desenvolvimento sustentável. 2. Espectroscopia de absorção atômica. 3. Impacto ambiental. 4. Lixo eletrônico - Reaproveitamento. 5. Microscópios - Sistemas de varredura. 6. Sustentabilidade e meio ambiente. I. Saravia, Edgard Gregory Torres. II. Tiago, Marcelo Moreira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621.3:502

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Maycon Duarte Pereira**

**Um estudo sobre economia circular e mineração urbana de resíduos eletrônicos na microrregião do Médio Piracicaba - MG**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista

Aprovada em 17 de junho de 2022

### Membros da banca

Prof. MSc. Edgard Gregory Torres Saravia - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago - Co-Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto

Profa. Dra. Aline Rocha de Assis – Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. MSc. Felipe Eduardo Moreira Cota - Universidade Federal de Ouro Preto

Profa. Dra. Maria Célia da Silva Lanna – Universidade Federal de Ouro Preto

Profa. Dra. Roberta Eliane Santos Froes – Universidade Federal de Ouro Preto

Edgard Gregory Torres Saravia, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/06/2022



Documento assinado eletronicamente por **Edgard Gregory Torres Saravia, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/06/2022, às 18:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0355274** e o código CRC **36D49FDD**.

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pelos milagres que ele me permite viver. Agradeço os meus pais Marcos Antônio e Márcia, e todos da família que sempre somaram esforços e acreditaram no nosso potencial. Agradeço a minha namorada Laura Nunes pelo apoio, amor e carinho incondicional. Agradeço os amigos e colegas que conheci nessa trajetória, que compartilharam momentos, conhecimentos e experiências frente aos desafios do cotidiano acadêmico.

Agradeço os professores, em especial os meus orientadores MSc Edgard Gregory Torres Saravia e Dr. Marcelo Moreira Tiago, pelo apoio, ensinamentos e disposição. Agradeço a professora Dra. Emanuelli do Nascimento Silva, pelo apoio e orientação nos testes de Espectrometria de Absorção Atômica. Agradeço os técnicos e demais colaboradores da egrégia Universidade Federal de Ouro Preto; em especial, o senhor Reginaldo Moreira, técnico do Laboratório de Química do ICEA, UFOP, pelo suporte nos ensaios de lixiviação.

Agradeço aos colaboradores da ArcelorMittal João Monlevade-MG, em nome do engenheiro metalúrgico Joaquim Costa, da engenheira metalúrgica Letícia Barbosa e do colaborador Sebastião Dávila; pelas orientações e apoio nos testes de Microscópio Eletrônico de Varredura.

No mais, agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para que este trabalho pudesse ser realizado.

*"Na natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma"*  
- (Lourent de Lavoisier)

# Resumo

O aumento da população e o crescimento dos resíduos gerados pela humanidade, além do alto consumo de equipamentos eletroeletrônicos nas últimas décadas; proporcionaram discussões e busca de soluções para o Desenvolvimento Sustentável, que visam minimizar impactos ambientais e riscos à saúde humana, e, também, promover oportunidades econômicas na gestão ambientalmente adequada de resíduos. Com o crescimento populacional, são necessários mais recursos para atender às necessidades básicas e garantir a sobrevivência; o que pode comprometer as gerações futuras, uma vez que os recursos naturais são finitos. O crescimento das tecnologias de informação e comunicação vem ganhando cada vez mais espaço no cotidiano das indústrias e das cidades. As formas adequadas de descarte do que não tem mais utilidade devem priorizar a economia circular, por meio do reaproveitamento ou reciclagem e, em último caso, ir para um aterro sanitário. Atualmente, seja por motivos econômicos, ambientais ou sociais, têm-se buscado alternativas para o gerenciamento adequado dos resíduos eletrônicos, o que evita danos ambientais e desequilíbrio ecológico. O presente trabalho investigou a composição desses resíduos na microrregião do Médio Piracicaba - MG, avaliando alternativas de gestão adequada, impactos econômicos e socioambientais; oportunidades e ameaças no resíduo eletrônico; considerando a existência de metais de alto valor agregado e elementos nocivos à saúde humana contidos neste tipo de resíduo, que são matérias-primas para a fabricação de novos equipamentos eletroeletrônicos. Para tal, realizou-se uma análise do potencial contido nos resíduos eletrônicos por meio da utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura-MEV, onde foi observado os elementos contidos em Placas de Circuito Impresso-PCI presentes em resíduos eletrônicos, que determinou a presença de chumbo, cobre, cromo, estanho, ferro, ouro, níquel, prata e silício. Posteriormente, foram utilizadas técnicas de metalurgia extrativa, através da hidrometalurgia, para o tratamento de PCI de telefones celulares em bancada laboratorial, sendo que o tratamento das PCI foi feito com hidróxido de sódio, além de lixiviação com soluções de ácido clorídrico e água-régia. Para inferir a quantidade de materiais contidos nas soluções lixiviadas de PCI foi utilizado o Espectrômetro de Absorção Atômica-EAA, que determinou a presença de cobalto, cobre, ferro, níquel, ouro, prata e zinco. Através destas análises, foi possível determinar elementos metálicos, inclusive metais de alto valor agregado, nas PCI estudadas; onde foi observado a necessidade de se ter estruturas consistentes para promover a coleta, gerenciamento e tratamento adequado dos resíduos eletrônicos.

**Palavras-chave:** resíduo eletrônico, mineração urbana, microscópio eletrônico de varredura, tratamento de placa de circuito impresso, espectroscopia de absorção atômica.

# Abstract

The increase in population and the growth of waste generated by humanity, in addition to the high consumption of electrical and electronic equipment in recent decades; provided discussions and search for solutions for Sustainable Development, which aim to minimize environmental impacts and risks to human health, and also promote economic opportunities in environmentally sound waste management. With population growth, more resources are needed to meet basic needs and ensure survival; which can compromise future generations, since natural resources are finite. The growth of information and communication technologies has been gaining more and more space in the daily life of industries and cities. Appropriate ways of disposing of what is no longer useful should prioritize the circular economy, through reuse or recycling and, as a last resort, go to a sanitary landfill. Currently, whether for economic, environmental or social reasons, alternatives have been sought for the proper management of electronic waste, which avoids environmental damage and ecological imbalance. The present work investigated the composition of these residues in the micro-region of Médio Piracicaba - MG, evaluating alternatives for adequate management, economic and socio-environmental impacts; opportunities and threats in electronic waste; considering the existence of high added value metals and elements harmful to human health contained in this type of waste, which are raw materials for the manufacture of new electrical and electronic equipment. To this end, an analysis of the potential contained in electronic waste was carried out through the use of the Scanning Electronic Microscope-SEM, where the elements contained in Printed Circuit Boards-PCB present in electronic waste were observed, which determined the presence of lead, copper, chromium, tin, iron, gold, nickel, silver and silicon. Subsequently, extractive metallurgy techniques were used, through hydrometallurgy, for the treatment of PCB from cell phones in a laboratory bench, and the treatment of PCB was done with sodium hydroxide, in addition to leaching with hydrochloric acid and aqua regia solutions. . To infer the amount of materials contained in the leached solutions of PCB, the Atomic Absorption Spectrometer-EAA was used, which determined the presence of cobalt, copper, iron, nickel, gold, silver and zinc. Through these analyses, it was possible to determine metallic elements, including metals with high added value, in the studied PCB; where it was observed the need to have consistent structures to promote the collection, management and adequate treatment of electronic waste.

**Keywords:** e-waste, urban mining, scanning electron microscope, printed circuit board treatment, atomic absorption spectroscopy.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Classificações dos resíduos eletrônicos . . . . .	12
Figura 2 – Métodos de absorção. Em a) a radiação da potência radiante incidente $P_0$ pode ser absorvido pelo analito, resultando na transmissão de um feixe radiante de baixa potência $P$ . Para que ocorra absorção, a energia do feixe incidente deve corresponder a uma das diferenças de energia mostradas em b). O espectro de absorção resultante é mostrado em c).	16
Figura 3 – Diagrama de blocos de um sistema de absorção atômica. . . . .	16
Figura 4 – Amostras grupo 1. . . . .	18
Figura 5 – Amostras grupo 2. . . . .	18
Figura 6 – Amostras grupo 3. . . . .	19
Figura 7 – Amostras grupo 4. . . . .	19
Figura 8 – Amostra A grupo 5. . . . .	19
Figura 9 – Amostra A grupo 6. . . . .	20
Figura 10 – Preparo das amostras para teste no MEV. . . . .	20
Figura 11 – Microscópio Eletrônico de Varredura (modelo XL 30, Philips) . . . . .	21
Figura 12 – Telefone celular coletado e desmontado. . . . .	22
Figura 13 – PCI obtidas dos telefones celulares coletados. . . . .	22
Figura 14 – PCI de telefones celulares utilizadas. . . . .	23
Figura 15 – Resultados de pesquisa dos termos 2G, 3G, 4G e 5G no Brasil. . . . .	26
Figura 16 – Resultados de pesquisa dos termos relacionados a aplicativos de redes sociais, alimentação e transporte no Brasil. . . . .	26
Figura 17 – Resultados de pesquisa dos termos bateria e tela de celular no Brasil. . . . .	27
Figura 18 – Resultados de pesquisa do termo lixo eletrônico no Brasil. . . . .	27
Figura 19 – Resultados teste MEV/EDS da amostra A - Grupo 1 . . . . .	28
Figura 20 – Resultados teste MEV/EDS da amostra B - Grupo 1 . . . . .	29
Figura 21 – Resultados teste MEV/EDS da amostra C - Grupo 1 . . . . .	30
Figura 22 – Resultados teste MEV/EDS da amostra A - Grupo 2 . . . . .	31
Figura 23 – Resultados teste MEV/EDS da amostra B - Grupo 2 . . . . .	32
Figura 24 – Resultados teste MEV/EDS da amostra A - Grupo 3 . . . . .	33
Figura 25 – Resultados teste MEV/EDS da amostra B - Grupo 3 . . . . .	34
Figura 26 – Resultados teste MEV/EDS da amostra C - Grupo 3 . . . . .	35
Figura 27 – Resultados teste MEV/EDS da amostra A - Grupo 4 . . . . .	36
Figura 28 – Resultados teste MEV/EDS da amostra B - Grupo 4 . . . . .	37
Figura 29 – Resultados teste MEV/EDS da amostra C - Grupo 4 . . . . .	38
Figura 30 – Resultados teste MEV/EDS da amostra A - Grupo 5 . . . . .	39
Figura 31 – Resultados teste MEV/EDS da amostra A - Grupo 6 . . . . .	40

Figura 32 – PCI de telefones celulares utilizadas. . . . .	41
Figura 33 – PCI após tratamento com NaOH. . . . .	41
Figura 34 – PCI após lixiviação com HCl. . . . .	42
Figura 35 – PCI após lixiviação com água-régia. . . . .	42

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Componentes dos computadores . . . . .	10
Tabela 2 – Massa das PCI (antes e após o processamento hidrometalúrgico). . . .	24
Tabela 3 – Resultados dos testes de MEV . . . . .	40
Tabela 4 – Resultados dos testes de absorção atômica . . . . .	43

# Lista de abreviaturas e siglas

PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
ONU	Organização Mundial das Nações Unidas
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
MMA	Ministério do Meio Ambiente
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
REEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
RDC	Resíduos de Demolição e Construção
RDO	Resíduos Domiciliares
SNIS-RS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - Resíduos Sólidos
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
EAA	Espectrômetro de Absorção Atômica
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
LAE	Laboratório de Análises Especiais
EEE	Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
PCI	Placas de Circuito Impresso
LEAT	Laboratório de Espectrometria Atômica
PGR	Plano de Gerenciamento de Resíduos
ICEA	Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
ICEB	Instituto de Ciências Exatas e Biológicas
DEQUI	Departamento de Química

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Retrospectiva Histórica sobre a Coleta Seletiva</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>A importância do conhecimento sobre composição do resíduo eletrônico referente ao reaproveitamento e os riscos</b>	<b>3</b>
1.2.1	Recuperação de metais valiosos a partir de lixo eletrônico	4
1.2.2	Consequências da contaminação ambiental de metais pesados dos resíduos eletrônicos para o meio ambiente, animais e homem	4
1.2.3	Políticas públicas atuais sobre o gerenciamento do lixo eletrônico quanto à contaminação química e sobre a economia circular	5
<b>1.3</b>	<b>Gerenciamento da Coleta Seletiva em João Monlevade - MG</b>	<b>5</b>
<b>1.4</b>	<b>Justificativa</b>	<b>6</b>
<b>1.5</b>	<b>Objetivos</b>	<b>6</b>
<b>1.6</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>Saneamento e Sustentabilidade</b>	<b>8</b>
<b>2.2</b>	<b>Equipamentos Eletroeletrônicos</b>	<b>9</b>
2.2.1	Elementos Contidos em Equipamentos Eletroeletrônicos	9
2.2.1.1	Placas de Circuito Impresso	11
<b>2.3</b>	<b>Resíduos Eletrônicos</b>	<b>11</b>
2.3.1	Mineração Urbana e Economia Circular de Resíduos Eletrônicos	13
2.3.2	Reciclagem de Placas de Circuito Impresso	14
2.3.3	Lixiviação de Metais Contidos em PCI	14
2.3.4	Purificação e Recuperação de Metais em Lixiviados	14
2.3.5	Instrumentos para Análise de Metais em PCI	14
2.3.5.1	Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV e Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia	15
2.3.5.2	Espectrômetro de Absorção Atômica - EAA	15
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Descarte de PCI</b>	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>Amostras de PCI</b>	<b>17</b>
3.2.1	Grupo 1 – Amostras de PCI da Tela de Notebook	18
3.2.2	Grupo 2 – Amostras de PCI de Notebook	18
3.2.3	Grupo 3 – Amostras de Solda de PCI	18
3.2.4	Grupo 4 – Amostras de Sucata de PCI	18

3.2.5	Grupo 5 – Amostra de PCI de Teclado . . . . .	19
3.2.6	Grupo 6 – Amostra de PCI de Telefone Celular . . . . .	19
3.2.7	Métodos Analíticos . . . . .	20
<b>3.3</b>	<b>Amostras de PCI de Telefones Celulares . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>3.4</b>	<b>Parte Experimental . . . . .</b>	<b>22</b>
3.4.1	Etapa 1: tratamento com Hidróxido de Sódio (NaOH) . . . . .	23
3.4.2	Etapa 2: tratamento com Ácido Clorídrico (HCl) . . . . .	23
3.4.3	Etapa 3: tratamento com Água-Régia (HCL+HNO <sub>3</sub> ) . . . . .	23
3.4.4	Métodos Analíticos . . . . .	24
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>Descarte de Placas de Circuito Impresso . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>Análises de Elementos em PCI de Resíduos Eletrônicos . . . . .</b>	<b>28</b>
4.2.1	Amostras Grupo 1 . . . . .	28
4.2.2	Amostras Grupo 2 . . . . .	30
4.2.3	Amostras Grupo 3 . . . . .	32
4.2.4	Amostras Grupo 4 . . . . .	35
4.2.5	Amostras Grupo 5 . . . . .	38
4.2.6	Amostras Grupo 6 . . . . .	39
<b>4.3</b>	<b>Análises de Elementos em PCI de Telefones Celulares . . . . .</b>	<b>40</b>
4.3.1	Etapa de Tratamento com Solução de Hidróxido de Sódio . . . . .	41
4.3.2	Lixiviação com Ácido Clorídrico . . . . .	41
4.3.3	Lixiviação com Água-régia . . . . .	42
4.3.4	Análises de Absorção Atômica em Lixiviados de PCI de Telefones Celulares .	42
4.3.5	Recuperação de Metais em Lixiviado . . . . .	43
4.3.6	Análise Econômica dos Elementos Metálicos Determinados . . . . .	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>45</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>47</b>

# 1 Introdução

No Brasil, onde suas cidades possuem diferenças regional, cultural e de renda, a questão do lixo e limpeza urbana também fazem parte do cotidiano dos cidadãos (Eigenheer, 2009). A partir de 2010 com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, houve o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, insentivando diversos setores da economia.

Dentre os resíduos produzidos, o elevado número de resíduos eletrônicos gerados é, muitas vezes, descartado de maneira incorreta; junto ao lixo comum, provocando impactos ambientais, perdas econômicas e riscos à saúde humana (BALDÉ et al., 2017). Globalmente, em 2019, foram gerados aproximadamente 53,6 milhões de toneladas de resíduos eletrônicos e destes, apenas 9,3 milhões de toneladas - 17,4% constam como coletado e reciclado adequadamente (FORTI et al., 2020). O Brasil é atualmente o 5º maior gerador de resíduos eletrônicos, com uma geração de 2,14 milhões de toneladas, reciclando apenas 3%. Sendo o fluxo de resíduo eletrônico, o que mais cresce em todo o mundo (STEP, 2019).

A ausência de infraestrutura tecnológica é um dos principais motivos que provoca o fluxo global de resíduos eletrônicos, como no caso de toneladas de telefones celulares descartados na África, que são enviados à Europa (MORRIS, 2021), enquanto que outros milhares de aparelhos são jogados fora; também por falta de áreas de produção destinadas à desmontagem total dos materiais e unidades fabris destinadas à extração de materiais que possuem alto valor agregado tais como ouro, prata, cobre, lítio, platina; além de materiais vítreos, cerâmicos e poliméricos.

Dentre os recursos naturais necessários para a fabricação de novos produtos tecnológicos, encontram-se nos resíduos eletrônicos, matérias-primas como o chumbo, que está presente em circuitos integrados e soldas de Placas de Circuito Impresso-PCI; o cobre, o ouro e a prata, que são encontrados em condutores e conectores, o alumínio e o níquel, que são encontrados em estruturas e conexões e, também, o ferro, que é encontrado em estruturas de equipamentos eletroeletrônicos (XAVIER; CARVALHO, 2014).

Em decorrência da pandemia da COVID-19, onde os primeiros casos foram detectados em novembro de 2019 na cidade de Wuhan-China (FROES, 2020), grande parte da população vivenciou o isolamento social como medida de controle para conter o avanço da COVID-19; provocando alterações nas rotinas de trabalho e ensino; consequentemente, por meio do trabalho em casa e ensino à distância, acelerou-se a transformação digital em 2020/21 (MEIRELLES, 2020). No ano de 2020 o Brasil contava com 440 milhões de dispositivos digitais tais como computadores e smartphones em uso, aproximadamente 2,1 dispositivos digitais/hab.; sendo 198 milhões de computadores e notebooks, o que equivale a 47% dos dispositivos digitais em uso naquele ano e 242 milhões de smartphones num percentual de 53% (MEIRELLES, 2020).

A publicidade de informação acerca do potencial e riscos presentes em resíduos eletrônicos, exige planejamento por parte dos órgãos públicos e privados para o gerenciamento adequado destes resíduos, por meio da criação de estruturas consistentes capazes de promover a coleta e tratamento eficaz, contribuindo para os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015)) e garantindo recursos para as próximas gerações. De acordo com a Organização Mundial das Nações Unidas (ONU, 2016) a população mundial deve chegar a 9,8 bilhões de pessoas até 2050, e afirma: “... o equivalente a três planetas seriam necessários para prover os recursos naturais necessários para sustentar os estilos de vida atuais”, onde a geração de resíduos é diretamente proporcional ao aumento populacional (RAVALE A. KHADE, 2017).

No século XVIII, o químico francês Antoine Lavoisier (1743/94) declarou: *na natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma*. Logo, rastrear e medir as quantidades de resíduo eletrônico surge como oportunidade para determinar os fluxos destes que são descartados e doados à coleta seletiva (STEP, 2019), que permitirá elaborar estratégias nestes novos mercados; envolvendo multidisciplinas, mineração urbana e economia circular; fatores que somam o desenvolvimento ambiental, econômico e socialmente sustentável; que é, inclusive, uma das diretrizes da Indústria 4.0 (ABINEE, 2018) (LACY; WAUGHROY, 2018).

## 1.1 Retrospectiva Histórica sobre a Coleta Seletiva

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos(PNRS), Lei 12.305/10, regulamentada pelo Decreto Nº 10.936/22, os Resíduos Sólidos Urbanos-RSU são definidos como resíduos sólidos originários de atividades domésticas em residências urbanas e os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana. Dentre dos princípios da PNRS, destacam-se os seguintes: IV - o desenvolvimento sustentável; VI - a cooperação entre as diferentes esferas do poder público, o setor empresarial e demais segmentos da sociedade e VIII - o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania. Princípios estes que norteiam a busca de oportunidade e soluções para o desenvolvimento sustentável da Nação (BRASIL, 2010).

A PNRS propõe mudanças no setor de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, e estabelece a responsabilidade compartilhada sobre a produção e destinação adequada destes resíduos; visando o aumento da reciclagem e da reutilização, a qual institui a responsabilidade compartilhada dos produtores de resíduos eletrônicos e de seus componentes, além de criar metas para a extinção de lixões e elaboração de Planos de Gerenciamento de Resíduos-PGR. Segundo o Ministério do Meio Ambiente, a correta destinação dos resíduos sólidos é condição primordial para uma cidade sustentável (BRASIL, 2019).

O diagnóstico do manejo de resíduos sólidos no Brasil, que atualmente possui 5.570

municípios (IBGE, 2022), é apresentado pelo Ministério do Desenvolvimento Regional, com dados quantitativos municipais destes resíduos: quantidade gerada, custos de coleta, destinação final e taxas de coleta seletiva. Coletar, selecionar e reciclar os resíduos municipais ainda é um desafio a ser superado para várias cidades brasileiras, visto que o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - Resíduos Sólidos-SNIS-RS 2020 identificou a coleta seletiva presente, sob qualquer modalidade - porta a porta, posto de entrega voluntária ou outras- de Resíduos Sólidos Domiciliares-RDO em áreas urbanas de apenas 1.664 municípios (36,3% dos 4.589 municípios que participaram informando dados de seus municípios ao SNIS-RS 2020) (BRASIL, 2021).

No ano de 2020 o Brasil contava com 5.018 unidades de processamento de RSU em operação, dentre estas, por tipo e % do total, destacam-se a quantidade de Lixão - 1.545 (30% do total), Aterro controlado - 617 (12,3% do total) e Aterro sanitário - 652 (13,0% do total) (BRASIL, 2021). O elevado número, mais de 50% do total de unidades de processamento, de lixões e aterros em operação no Brasil, no ano 2020, chama a atenção para o desperdício de materiais e poluição do meio ambiente, desde o solo e atmosfera, até os lençóis freáticos; comprometendo a saúde dos seres vivos.

## 1.2 A importância do conhecimento sobre composição do resíduo eletrônico referente ao reaproveitamento e os riscos

(NETO; SILVA; SANTOS, 2019) realizaram um breve panorama da gestão dos resíduos eletrônicos no Brasil; o qual inclui aspectos técnicos, estudos científicos e os desafios futuros do setor. Nestes estudos, (NETO; SILVA; SANTOS, 2019) categorizaram os artigos de acordo com os seguintes temas de pesquisa: i) estudos com foco no trabalho de catadores; ii) estudos com foco na previsão de produção de lixo eletrônico; iii) estudos com foco no comportamento dos cidadãos; iv) estudos com foco em estratégias de gestão; ev) estudos com foco na composição e recuperação de resíduos eletrônicos. Estudos com foco em estratégias de gestão foram os mais listados; em segundo lugar, os estudos sobre composição e recuperação de lixo eletrônico; em seguida estudos de previsão de produção de lixo eletrônico e estudos sobre o comportamento dos cidadãos; e, por fim; foram encontrados poucos estudos sobre o trabalho de catadores com resíduos eletrônicos. (NETO; SILVA; SANTOS, 2019) concluíram que deve haver um maior número de estudos, com foco na identificação de estratégias que visam gerenciar e recuperar materiais do resíduo eletrônico; apontando uma preocupação central que no Brasil há uma carência de instalações adequadas para extrair metais preciosos, que representa a fase final do resíduo eletrônico; o que provoca o envio de resíduos pré-processados para outros países pelo mercado formal; além de alertar para o crescimento e descontrolado do mercado informal que utiliza processos precários e ambientalmente inseguros para extrair metais preciosos de resíduo eletrônico. .

Poucos estudos relacionados aos custos dos processos de tratamento e recuperação de materiais de resíduos eletrônicos são encontrados na literatura (AZEVEDO et al., 2017). Algumas tecnologias disponíveis na atualidade, que são referenciadas na Indústria 4.0; para o gerenciamento e tratamento de resíduos sólidos: robô comercial para triagem de recicláveis; plataformas e aplicativos móveis para sistemas de reciclagem. Chatbots aplicados no gerenciamento de resíduos e reciclagem estão disponíveis (ISWA, 2017). Plantas automatizadas de recuperação de resíduos eletrônicos também foram desenvolvidas, como; por exemplo, planta de reciclagem de sucata eletrônica, que é comercializada com custo aproximado de R\$ 3 milhões e capacidade de processamento de três toneladas por hora (STEINERT, 2022).

### 1.2.1 Recuperação de metais valiosos a partir de lixo eletrônico

Dentre os recursos naturais, elementos como ouro, níquel e ferro são exemplos de alguns dos recursos minerais do Quadrilátero Ferrífero (ROESER; ROESER, 2010). Além destes elementos, outros elementos como cobre, prata, chumbo e zinco são utilizados na fabricação de Placas de Circuito Impresso-PCI contidas em equipamentos eletroeletrônico; que estão presentes no cotidiano das cidades e indústrias, contribuindo no desenvolvimento das tecnologias da informação e comunicação (LANA, 2015). A convergência do mundo físico, biológico e digital, por meio da Indústria 4.0 Sustentável, pode contribuir para o aumento de pesquisa, desenvolvimento e inovação-P&DI de soluções globais para os problemas locais acerca dos resíduos eletrônicos (ABINEE, 2018). Objetivando o compromisso com a qualidade de vida e o desenvolvimento sustentável da Nação; proporcionando emprego, renda e transformação socioambiental ao se promover o gerenciamento adequado de resíduos eletrônicos.

### 1.2.2 Consequências da contaminação ambiental de metais pesados dos resíduos eletrônicos para o meio ambiente, animais e homem

O elevado consumo de equipamentos eletroeletrônicos tem chamado a atenção e gerado discussão para os impactos ambientais, como a contaminação do solo, da água, lençol freático, ar e, também; os riscos a saúde humana e problemas relacionados com a presença de elementos nocivos como o chumbo, cádmio e níquel, que se encontram nos módulos básicos dos equipamentos eletroeletrônicos, e que podem causar danos como disfunção renal, dermatite e alterações no sistema nervoso, respectivamente (XAVIER; CARVALHO, 2014)

### 1.2.3 Políticas públicas atuais sobre o gerenciamento do lixo eletrônico quanto à contaminação química e sobre a economia circular

(AZEVEDO et al., 2017) fizeram a verificação da sustentabilidade da logística reversa, em Minas Gerais, sugerida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, que foi instituída pela Lei nº.12.305, e obriga a legislação, fabricantes, importadores e comerciante a realizar um projeto de Logística Reversa de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos ou simplesmente resíduo eletrônico por defeitos apresentados durante o uso, substituição de equipamentos obsoletos e facilidade de aquisição de novos equipamentos. Apontando a falta de conscientização do consumidor em relação ao uso, manuseio, armazenamento e descarte de equipamentos eletroeletrônicos. A geração de empregos do setor é possível com investimentos em novas unidades fabris para reciclagem final do material, após ter provado que é economicamente viável reciclar o resíduo eletrônico (AZEVEDO et al., 2017). A ausência de estudos que apontem efetivamente os números financeiros para a coleta e reciclagem de resíduos eletrônicos, demanda aprimoramento e novas pesquisas dos processos finais de reciclagem de metais; onde unidades fabris devem ser otimizadas para maior eficiência e menores custos de produção, contribuindo para a reinserção destes materiais nos processos produtivos, transformando-os em matéria prima, através da mineração urbana e economia circular (AZEVEDO et al., 2017).

## 1.3 Gerenciamento da Coleta Seletiva em João Monlevade - MG

O gerenciamento da coleta seletiva no município de João Monlevade-MG é realizado pela Associação dos Trabalhadores de Limpeza e Materiais Recicláveis-ATLIMARJOM, fundada em 2001. Segundo a ATLIMARJOM, aproximadamente 32% dos bairros do município contam com a coleta seletiva da associação, apontando a falta de infraestrutura para ampliação da coleta e armazenamento de materiais, a associação realiza a coleta de menos de 1/3 da quantidade de resíduos sólidos gerados no município. A ATLIMARJOM recebe resíduos eletrônicos, onde são separados os polímeros e cabos de cobre, devido à limitação de equipamentos e técnicas para aproveitamento dos demais materiais contidos nestes resíduos. Os demais resíduos gerados pela população da cidade, que não são coletados pela ATLIMARJOM, são coletados pelo serviço de limpeza do município e depositados no aterro sanitário do Consórcio Público de Gestão de Resíduos Sólidos, localizado na cidade de Rio Piracicaba-MG; onde, em visita ao local, observou-se o ambiente que recebe os resíduos sólidos urbanos de alguns municípios da região do Médio Piracicaba-MG, onde não há possibilidades de recuperação e reciclagem dos resíduos que foram ali destinados; que podem conter resíduos eletrônicos, que foram descartados junto ao lixo comum, por falta de estruturas eficientes de conscientização, além de coleta e gerenciamento ambientalmente adequado destes materiais.

## 1.4 Justificativa

O elevado número de resíduos eletrônicos gerados, são muitas vezes descartados de maneira incorreta, ocasionando desequilíbrio ambiental e riscos à saúde humana (V. BALDÉ C.P., 2017). A ausência de conscientização que permitiria um destino adequado para o descarte destes equipamentos e a falta de estruturas consistentes capazes de promover a coleta eficaz, não contribuem para os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável e podem comprometer o futuro das próximas gerações (ONU, 2015). O potencial econômico dos elementos presentes nos resíduos eletrônicos tem promovido debates na busca de soluções, através da mineração urbana, que propicia a coleta formal, triagem, tratamento, recuperação e transformação destes resíduos em matéria-prima, reinserindo-os na economia circular; gerando novos mercados, envolvendo multidisciplinas que permitem um desenvolvimento ambiental, econômico e social sustentável (ABRELPE, 2015) (XAVIER; LINS, 2018) (MURTHY; RAMAKRISHNA, 2022).

## 1.5 Objetivos

O presente Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo realizar uma avaliação qualitativa/quantitativa de amostras de resíduos eletrônicos que são descartados pela comunidade acadêmica do campus João Monlevade da Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP. Busca-se averiguar o potencial dos elementos metálicos contidos em Placas de Circuito Impresso-PCI, que estão presentes em equipamentos eletroeletrônicos; com referência em análises microscópica e de absorção atômica; além de experimentar técnicas da metalurgia extrativa, através da hidrometalurgia, para nortear o tratamento e a recuperação dos metais com alto valor agregado. Para o desenvolvimento deste trabalho estão sendo aplicados os conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Elétrica pela UFOP em disciplinas como: Fundamentos de Ciência do Ambiente, Química Geral, Economia e Administração, Direito e Legislação, Materiais Elétricos; além das disciplinas de formação geral no curso de engenharia elétrica.

## 1.6 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. Este primeiro capítulo realizou a apresentação básica sobre as projeções de resíduos eletrônicos, avanços tecnológicos provocados pelas Tecnologias da Informação e Comunicação-TIC, e sua consequente geração de resíduos eletrônicos no âmbito global. O excessivo número de materiais contidos que são descartados e o seu potencial, são as motivações que objetivam a utilização de conceitos de mineração urbana o que é abrangente também a nível nacional e global. No segundo capítulo é apresentada a fundamentação teórica a respeito dos Objetivos do Desenvol-

vimento Sustentável, dados qualitativo/quantitativos de resíduos eletrônicos, Política Nacional de Resíduos Sólidos-PNRS, logística reversa e economia circular por meio da mineração urbana; que tratam da extração de materiais de resíduos eletrônico, dentre os quais se inclui placas de circuito impresso (PCI) que estão presentes nos equipamentos eletroeletrônicos, acumulados no sobressolo; através de técnicas da metalurgia extrativa; para a reciclagem formal destes resíduos; o que permite minimizar os impactos ambientais e riscos à saúde humana. O terceiro capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento prático deste trabalho. Posteriormente, o capítulo 4 sintetiza os resultados obtidos, onde é realizada uma análise crítica sobre os mesmos, descrevendo as possibilidades para etapas futuras do trabalho. Finalizando, no capítulo 5 são concluídos os tópicos propostos para o trabalho com base nos resultados obtidos no capítulo anterior.

## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão tratados estudos relativos aos resíduos eletrônicos; estudos relacionados à geração, composição, tratamento e recuperação dos elementos metálicos contidos nestes materiais. Para isto, é necessário uma revisão na literatura científica com abordagem em conceitos como: sustentabilidade e saneamento, resíduos eletrônicos, Placas de Circuito Impresso-PCI, gerenciamento de resíduos eletrônicos, economia circular, mineração urbana, metalurgia extrativa, microscopia eletrônica de varredura, lixiviação de metais, espectroscopia de absorção atômica, recuperação de metais de lixiviados.

### 2.1 Saneamento e Sustentabilidade

Em 2020, o governo federal do Brasil aprovou o novo marco do saneamento, que objetiva a universalização do saneamento básico (BRASIL, 2020). Dentre os objetivos do marco do saneamento, destaca-se a erradicação de todos os lixões a céu aberto no Brasil. De acordo com a LEI N° 9.605/98, devemos observar as sanções penais e administrativas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, como por exemplo: queimar lixo. Ação, como esta, é considerada um crime ambiental e muitos desconhecem. E, ainda, segundo a lei, atividades lesivas ao meio ambiente resultam ou podem resultar em danos à saúde humana, mortandade de animais ou a destruição da flora.

O gerenciamento ambientalmente adequado de resíduos sólidos urbanos contribui para os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável(ODS) da Organização Mundial das Nações Unidas(ONU), que visa gerar mais qualidade de vida e respeito ao meio ambiente, assim como a criação de comunidades e cidades sustentáveis, consumo e produção responsáveis e diretrizes que diminuam o aquecimento global (ONU, 2015). Para tal, demanda-se estudos e ações práticas para o médio e longo prazo no que tange as soluções dos problemas locais, envolvendo diversos atores sociais, por meio da pesquisa e desenvolvimento, além da inovação; busca-se entender e mensurar, através de indicadores e estratégias, os reais impactos ambientais e sociais envolvidos; além dos fatores econômicos que envolvem a transformação de resíduos em novas oportunidades de negócio, trabalho e renda para os diversos setores da economia global (XAVIER; LINS, 2018).

## 2.2 Equipamentos Eletroeletrônicos

De acordo com o Decreto Nº 10.240/22, os equipamentos eletroeletrônicos são definidos como equipamentos de uso doméstico, em que seu funcionamento seja dado com tensão nominal de trabalho com, no máximo, 240 volts. O decreto citado, também estabelece normas para a implementação de sistema de logística reversa obrigatório de produtos eletroeletrônicos. Os equipamentos eletroeletrônicos são produzidos a partir de ligas de materiais tais como metal, vidro, polímeros e materiais cerâmicos; como exemplo, tem-se os elementos metálicos como cobre, ferro, ouro e chumbo que são encontrados em Placas de Circuito Impresso-PCI de computadores (XAVIER; CARVALHO, 2014).

Diante do desenvolvimento dos equipamentos eletroeletrônicos, constata-se a obsolescência programada, seja por questões estratégicas do capitalismo ou por conta do avanço de sua tecnologia, tornando-o ultrapassado para certas aplicações. De acordo com (TOCCI RONALD J, 2011): *O ciclo de vida para produtos eletrônicos está cada vez mais curto por causa do rápido desenvolvimento de tecnologias e recursos de produtos da geração seguinte.* (V. BALDÉ C.P., 2017) afirma: *Os usuários mudam seus dispositivos com mais frequência para acompanhar as mudanças tecnológicas.*

Logo, considerando que os recursos naturais são finitos; é de se esperar que para a produção de novos dispositivos e equipamentos eletroeletrônicos demandar-se-á mais matérias-primas; o que reflete em um aumento no consumo de energia e novas fontes de recursos minerais; além de outros suprimentos para dar conta das demandas de produção e consumo destes equipamentos (V. BALDÉ C.P., 2017).

### 2.2.1 Elementos Contidos em Equipamentos Eletroeletrônicos

O elevado consumo de equipamentos eletroeletrônicos tem chamado a atenção e gerado discussão no mundo para o riscos e problemas relacionados com a presença de elementos nocivos como o chumbo, cádmio e níquel, que se encontram nos módulos básicos dos equipamentos eletroeletrônicos, e que podem causar danos como disfunção renal, dermatite e alterações no sistema nervoso, respectivamente (XAVIER; CARVALHO, 2014). Além de elementos nocivos, os equipamentos eletroeletrônicos contêm, também, elementos metálicos com alto valor agregado como cobre, ouro e prata; que são utilizados em condutores; outros metais contidos nestes equipamentos podem ser vistos na Tabela 1 que apresenta os elementos minerais contidos em computadores (XAVIER; CARVALHO, 2014).

Além da possibilidade do resíduo eletrônico contaminar o meio ambiente, estudos apontam que a superfície dos telefones celulares podem transmitir patógenos, com potencial de causar doenças nos seres humanos (MENDES et al., 2018), como o micro-organismo da espécie *S. Aureus*, que pode permanecer por longo tempo em partículas de poeira e está relacionada com diversas infecções nos indivíduos.

Tabela 1 – Componentes dos computadores

<b>Metal pesado</b>	<b>Parte onde é encontrado</b>
Alumínio	Estruturas, conexões
Bário	Válvula eletrônica
Berílio	Condutivo térmico, conectores
Cádmio	Bateria, chip, semicondutor, estabilizadores
Chumbo	Circuito integrado, soldas, bateria
Cobalto	Estrutura
Cobre	Condutores
Cromo	Decoração, proteção contra corrosão
Estanho	Circuito integrado, soldas
Ferro	Estrutura, encaixe
Gálio	Semicondutor
Germânio	Semicondutor
Índio	Transistor, retificador
Manganês	Estrutura, encaixes
Mercúrio	Bateria, termostatos, sensores
Níquel	Estrutura, encaixes
Ouro	Conexão, condutivo
Prata	Condutivo
Sílica	Vidro
Tântalo	Condensador
Titânio	Pigmentos
Vanádio	Emissor de fósforo vermelho
Zinco	Bateria

Fonte: Adaptado de (XAVIER; CARVALHO, 2014)

Considerando os elementos presentes na tabela periódica, 31 elementos são usados na fabricação equipamentos eletroeletrônicos; podendo haver até 70 elementos que são utilizados em um smartphone (COLE-HAMILTON, 2019). Dentre os elementos naturais minerais que são a base de tudo que é produzido pela sociedade; incluindo-se os dispositivos digitais, como por exemplo: computadores, telefones celulares e smartphones; estão presentes os elementos que possuem reservas abundantes como silício, alumínio e ferro; outros elementos com reservas em risco, como o cobre, ouro e níquel, devido ao uso excessivo; alguns elementos com possibilidade de escassez como o cobalto, platina e cromo e, também, elementos com risco de escassez nos próximos 100 anos; tais como prata, zinco, gálio e germânio (EUCHEMS, 2019). Diante do exposto, percebe-se a necessidade de se buscar alternativas para reinserir, ao final da vida útil dos equipamentos eletroeletrônicos; estes elementos nos processos produtivos, através da reciclagem formal de resíduos eletrônicos; ao invés de apenas depositá-los em lixões ou aterros, locais onde estes elementos não poderão ser recuperados; podendo ocasionar desperdício de material, danos à saúde humana e contaminação do ambiente.

### 2.2.1.1 Placas de Circuito Impresso

A Placa de Circuito Impresso-PCI é um dos principais componentes dos Equipamentos Eletroeletrônicos-EEE-, as quais suportam mecanicamente os componente eletrônicos e os conectam para funcionar adequadamente; geralmente, estas placas representam 4-7% da massa total de EEE (LI; EKSTEEN; ORABY, 2018). As PCI são constituídas de componentes eletrônicos, tais como: capacitores, resistores, chips; e, também, serigrafia, máscara de solda, revestimentos e camadas de metal e substrato de polímero (LI; EKSTEEN; ORABY, 2018).

Diversas referências científicas apontam para uma ampla concentração de metais, dentre estes; metais normais como ferro, cobre e alumínio; metais preciosos como ouro, prata, paládio e platina; metais terras raras como lantânio, escândio e cério; metais pesados como chumbo, cromo e cádmio; além de não metais, tais como silício, bromo e fósforo; presentes em PCI, que estão presentes nos equipamentos eletroeletrônicos (VEIT, 2010) (JÚNIOR et al., 2013) (LI; EKSTEEN; ORABY, 2018) (XAVIER; LINS, 2018) (MURTHY; RAMAKRISHNA, 2022).

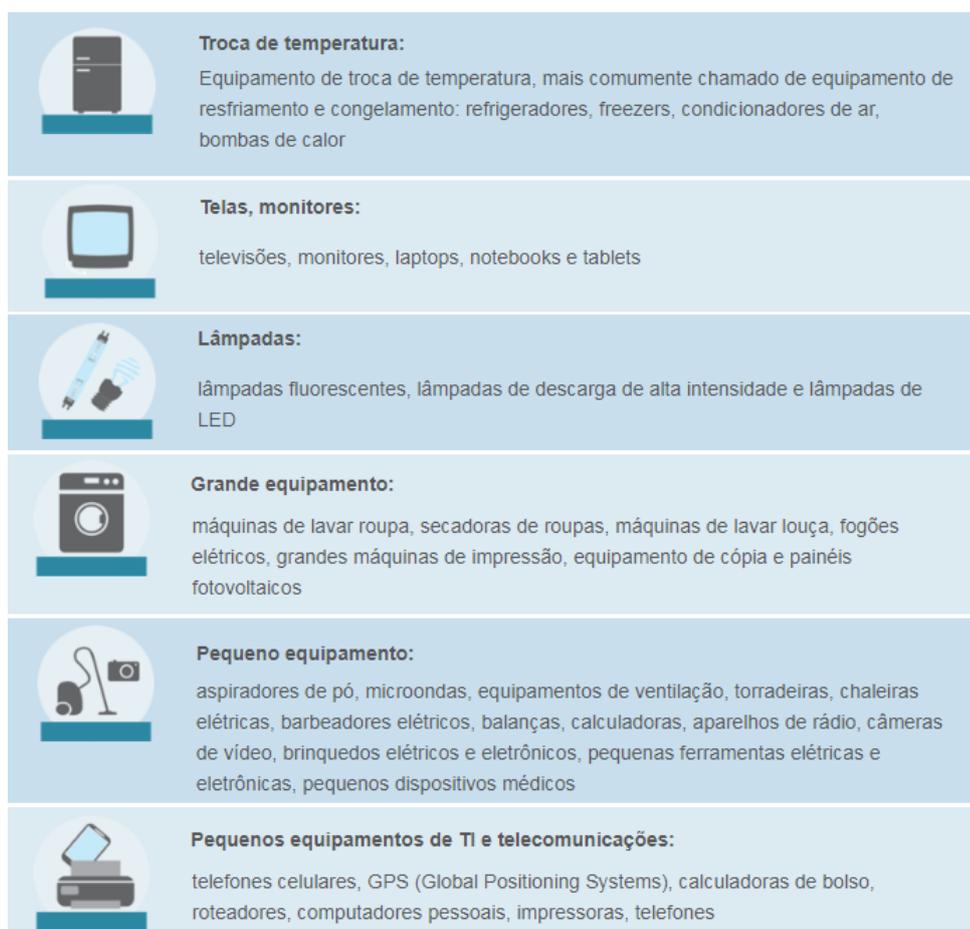
## 2.3 Resíduos Eletrônicos

Dentre os resíduos gerados pela população, encontram-se os resíduos eletrônicos que podem estar sendo descartados sem um tratamento ambientalmente adequado. O resíduo de equipamentos elétricos e eletrônicos, ou resíduo eletrônico, em inglês *e-waste*-tradução livre: lixo eletrônico-, é definido como termo usado para cobrir itens de todos os tipos de equipamento de elétrica e eletrônica, e suas partes que foram descartadas pelo proprietário como lixo sem a intenção de reutilização (STEP, 2019). O resíduo eletrônico é classificado em seis categorias, sendo estas apresentadas na Figura 1.

Existem diferenças na função original das categorias destes resíduos eletrônicos; o que inclui peso, volume e composição do material, assim como o tempo de vida. Existem, também, distinção na quantidade e na qualidade do resíduo eletrônico; dentre estes, alguns com reciclagem mais simples (cabos de cobre e estruturas de ferro); e outros com reciclagem mais complexa, como por exemplo as placas de circuito impresso (PCI,) presentes em equipamentos eletroeletrônicos; resultando em valores econômicos variáveis e potenciais impactos ambiental e na saúde humana diferentes (BALDE et al., 2015). Com isso, diferenciam-se, também; as formas de descarte, coleta, triagem e as tecnologias de reciclagem para cada categoria.

Os resíduo eletrônicos contêm substâncias perigosas, dentre estas: mercúrio, estanho, cádmio, cromo, chumbo, baterias, retardadores de chama e substâncias que empobrecem a camada de ozônio; sendo prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente (XAVIER; CARVALHO, 2014). Estas substâncias podem contaminar o ar, o solo e a água, plantas e animais; além de causar doenças nos seres humanos, tais como: comprometimento do

Figura 1 – Classificações dos resíduos eletrônicos



Fonte: Adaptado de (STEP, 2019)

desenvolvimento mental e danos nos pulmões, rins e fígado, oriundos dos cancerígenos lançados no ar (BALDE et al., 2015). Logo, deve-se alertar e conscientizar toda a população sobre os perigos contidos nos resíduos eletrônicos; além de garantir o uso de equipamentos de proteção individual e coletiva dos trabalhadores envolvidos no setor de gerenciamento destes resíduos.

Quanto aos resíduos sólidos e substâncias perigosas, o código de conduta da *Responsible Business Alliance* (RBA, 2018) estabelece: "Os produtos químicos e outros materiais que representam riscos aos seres humanos ou para o meio ambiente devem ser identificados, rotulados e gerenciados para assegurar um manuseio, movimentação, armazenamento, utilização, reciclagem, reutilização e eliminação seguros." Logo, para que se tenha eficiência e sustentabilidade econômica, é necessário uma revisão na literatura que aborda às formas e práticas para o gerenciamento ambientalmente adequado de resíduos eletrônicos.

O mercado de resíduo eletrônico tem evoluído rapidamente; sendo necessário identificar as oportunidades para a criação de usinas formais de reciclagem, que permitem

o gerenciamento ambientalmente adequado destes resíduos (MURTHY; RAMAKRISHNA, 2022). A capacidade formal é uma das principais deficiências do setor; visto que apenas 20-30% da geração global de resíduo eletrônico pode ser tratada conforme a infraestrutura formal existente, e o restante é depositado em aterros ou acumulado informalmente (MURTHY; RAMAKRISHNA, 2022). Para a caracterização e tratamento de materiais contidos em resíduos eletrônicos é necessário muito conhecimento, experiência e habilidades, que visam promover a capacidade técnica para o entendimento das tecnologias corretas e para implementar as melhores práticas globais; sendo estas, requisito importante na execução formal da reciclagem (MURTHY; RAMAKRISHNA, 2022).

Dados do SNIS-RS (BRASIL, 2021) apontam que na maioria dos municípios brasileiros, encontra-se ausente dados de coleta, reciclagem e disposição final de resíduos eletrônicos. Logo, rastrear e medir as quantidades destes resíduos, surge como oportunidade para identificar os fluxos e potencial de materiais que são encontrados nos mesmos (STEP, 2019). As colaborações industriais e institucionais podem alavancar tecnologias nativas, minimizando a dependência de tecnologia estrangeira (MURTHY; RAMAKRISHNA, 2022).

### 2.3.1 Mineração Urbana e Economia Circular de Resíduos Eletrônicos

A mineração urbana refere-se à reciclagem e ao aproveitamento econômico de recursos no sobressolo, resultantes da geração de resíduos, de diferentes características, e que são provenientes do descarte de produtos e materiais pós-consumo; são consideradas minas urbanas a geração e o acúmulo de Resíduos de Demolição e Construção-RDC e os resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos(REEE) no sobressolo (XAVIER; LINS, 2018).

O consumo de água e energia para a extração de alguns metais como alumínio, cobre, prata e ouro na mineração urbana é bem inferior comparado à mineração tradicional; na mineração tradicional de ouro, por exemplo, gasta-se entre 13.300 e 52.300 MJ/Kg de energia e entre 120.00 e 420.000  $m^3/t$  de água; já na mineração urbana para a extração de ouro consome-se entre 140 e 230 MJ/Kg de energia e 30  $m^3/t$  de água (XAVIER; LINS, 2018).

Já a economia circular de resíduos eletrônicos pode ser desenvolvida através da mineração urbana, que trata do aproveitamento econômico de recursos no sobressolo; e que busca promover a reinserção de materiais e elementos nos processos produtivos, utilizando-os como matérias-primas para fabricação de novos produtos (WEETMAN, 2019).

Tendo em vista estas referências, o presente trabalho faz uma revisão em referências científicas sobre os processos de reciclagem para viabilizar a busca de soluções para o tratamento e recuperação dos metais de alto valor agregado contidos em Placas de

Circuito Impresso-PCI, como demonstrado por (JESUS; CASQUEIRA, 2015); que fez a caracterização e beneficiamento primário de PCI de telefones celulares.

### 2.3.2 Reciclagem de Placas de Circuito Impresso

Com a finalidade de se fazer a reciclagem de Placas de Circuito Impresso-PCI de resíduos eletrônicos; processos mecânicos, químicos e térmicos são utilizados na metalurgia extrativa para o tratamento e recuperação de metais contidos nestas placas (RIBEIRO, 2013) (JÚNIOR et al., 2013) (CALDAS, 2017) (MURTHY; RAMAKRISHNA, 2022). O processo mecânico pode ser feito através de desmontagem, cominuição, moagem, separação magnética, separação eletrostática e separação gravimétrica (KINOSHITA et al., 2003). Já o processo químico envolve a hidrometalurgia, pirometalurgia, biometalurgia e eletrometalurgia (SILVAS, 2014) (SETHURAJAN et al., 2019). O processo geral para reciclagem hidrometalúrgica de PCI envolve: pré-tratamento, lixiviação, purificação, recuperação e obtenção de produtos como metais, ligas e sais de metais (LI; EKSTEEN; ORABY, 2018).

### 2.3.3 Lixiviação de Metais Contidos em PCI

Processos hidrometalúrgicos são utilizados para transferir metais de materiais sólidos para uma solução; para recuperação posterior, sendo necessário à lixiviação desses materiais (LI; EKSTEEN; ORABY, 2018). Neste tratamento, os principais métodos utilizam soluções ácidas tais como ácido clorídrico, ácido nítrico e água-régia para dissolver os metais (KINOSHITA et al., 2003)(RAO et al., 2021), conforme demonstrado por (JÚNIOR et al., 2013) que faz a lixiviação de metais contidos em placas de circuito impresso(PCI) de telefones celulares, utilizando ácido clorídrico e água régia.

### 2.3.4 Purificação e Recuperação de Metais em Lixiviados

Após o processo via metalurgia extrativa escolhido; de lixiviação e caracterização de metais contidos em amostras de placas de circuito impresso(PCI), além de se fazer testes de espectroscopia ou microscopia, para determinações quantitativa e qualitativa de metais presentes nas amostras; utiliza-se métodos de tratamento para posteriormente purificar e recuperar metais com o emprego de técnicas extrativas, tais como: extração por solventes, precipitação química, troca iônica por resina e eletrodeposição (JÚNIOR et al., 2013) (GOUVEIA, 2014) (LI; EKSTEEN; ORABY, 2018) (MURTHY; RAMAKRISHNA, 2022).

### 2.3.5 Instrumentos para Análise de Metais em PCI

A identificação ou caracterização de metais presentes em Placas de Circuito Impresso-PCI de resíduos eletrônicos requer o uso de instrumentos, tais como: microscópio

Eletrônico de Varredura-MEV e espectrômetro de absorção atômica(EAA), conforme demonstrado por (RIBEIRO, 2013) e (CALDAS, 2017) para a determinação de elementos metálicos presentes em amostras de PCI.

### 2.3.5.1 Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV e Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia

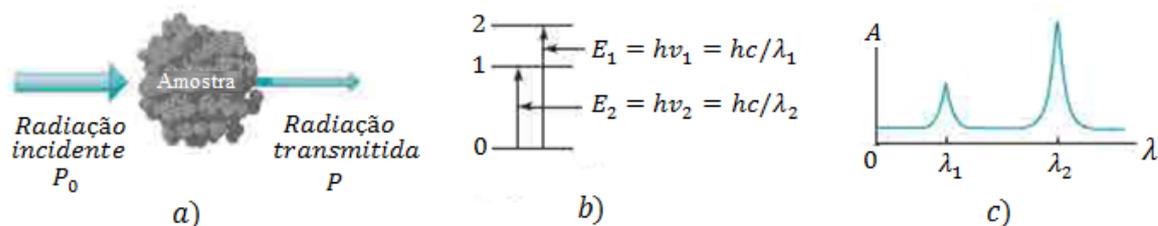
O MEV é um instrumento com bastante versatilidade para avaliação; como por exemplo, exame e análises das características microestruturais de amostras metálicas, plásticas, cerâmicas e biológicas (DUARTE et al., 2003). A utilização deste instrumento permite analisar qualquer material sólido como metais, plásticos e cerâmicas; atendendo a aplicações em necessidades da área de engenharia de materiais; possui como campos de aplicação, a identificação de material e análise microscópica com ampliação de 30000X (DUARTE et al., 2003). Já a Energy-dispersive X-ray spectroscopy (tradução livre, espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS, também abreviada EDX ou XEDS) é uma técnica analítica que permite a caracterização química/análise elementar de materiais em pesquisas, tais como: amostras de bateria, polímeros, metais, óleo e gás, nanopartículas, catálise; e testes de materiais automotivo (THERMOFISHER, 2022). O princípio de funcionamento de um MEV, com EDS acoplado, consiste em utilizar um feixe de elétrons para verificar a superfície de uma amostra, e através da espectroscopia por energia dispersiva(EDS) é obtida análise sobre os elementos presentes na amostra (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

### 2.3.5.2 Espectrômetro de Absorção Atômica - EAA

Métodos de espectroscopia atômica são utilizados para análise qualitativa e quantitativa de mais de 70 elementos (SKOOG et al., 2015). A primeira etapa de todos os procedimentos da espectroscopia atômica é a atomização; processo no qual uma amostra é convertida em átomos e íons elementares em fase gasosa; em que os métodos de atomização mais utilizados são os de plasma acoplado indutivamente, atomizadores de chama e eletrotérmicos (SKOOG et al., 2015). Após a atomização, vários tipos de espectroscopia podem ser feitos, tais como: emissão, massa, absorção e fluorescência. Com átomos e íons em fase gasosa, não há estado de energia vibracional nem rotacional, o que significa que só ocorrem transições eletrônicas; logo os espectros são conformados por um número limitados de linhas espectrais (SKOOG et al., 2015).

Na espectroscopia de absorção atômica mede-se a quantidade de luz absorvida em função do comprimento de onda, onde uma fonte externa de radiação incide sobre o analito em forma de vapor, conforme ilustrado na Figura 2. Se a fonte de radiação é de uma frequência (comprimento de onda) adequada, esta pode ser absorvida pelos átomos do analito e promovê-los para os estados excitados (SKOOG et al., 2015).

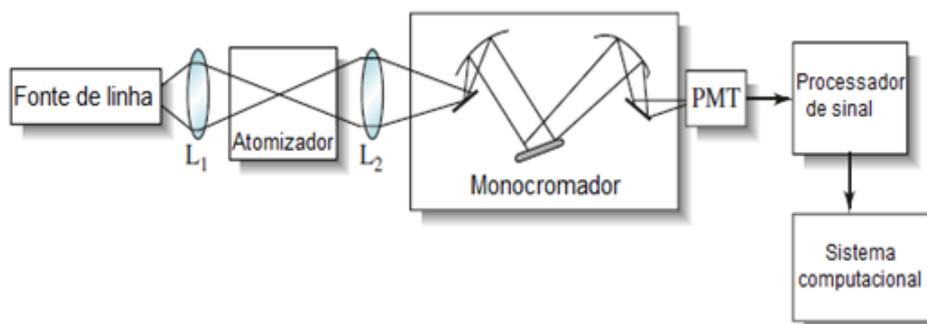
Figura 2 – Métodos de absorção. Em a) a radiação da potência radiante incidente  $P_0$  pode ser absorvida pelo analito, resultando na transmissão de um feixe radiante de baixa potência  $P$ . Para que ocorra absorção, a energia do feixe incidente deve corresponder a uma das diferenças de energia mostradas em b). O espectro de absorção resultante é mostrado em c).



Fonte: Adaptado de (SKOOG et al., 2015).

Na Figura 3 é mostrado o diagrama de blocos de um sistema de absorção atômica, onde ocorre a absorção atômica de uma estreita linha de emissão de uma fonte que é focada em uma chama ou um atomizador eletrotérmico. A linha é absorvida pela linha de absorção mais ampla do analito na chama, resultando em uma atenuação da radiação da fonte, a linha de interesse é isolada por um monocromador, passa por um transdutor e, posteriormente, é feito o processamento do sinal para sua exibição final (SKOOG et al., 2015).

Figura 3 – Diagrama de blocos de um sistema de absorção atômica.



Fonte: Adaptado de (SKOOG et al., 2015).

## 3 Metodologia

A revisão da literatura científica permitiu identificar o potencial de diversos metais contidos em resíduos eletrônicos, incluindo-se Placas de Circuito Impresso-PCI de telefones celulares em desuso, que podem estar sendo descartados sem o devido tratamento, quebrando o ciclo da economia circular. A presente investigação é dividida em quatro etapas relacionadas às PCI: motivos que provocam o descarte, análise qualitativa de metais por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura-MEV, lixiviação de metais e análise quantitativa de metais por meio do Espectrômetro de Absorção Atômica-EAA para verificar o potencial dos elementos metálicos com alto valor agregado presentes em PCI de telefones celulares.

### 3.1 Descarte de PCI

Para a investigação sobre tendências foi necessário à utilização de web scraping - raspagem de rede, em tradução livre - também conhecido como extração de dados da web (BRADLEY; JAMES, 2019), que consiste no processo de coleta de dados estruturados da web de maneira automática na plataforma Google Trends; por meio da utilização do software estatístico R, para verificar os motivos que podem provocar a troca ou o descarte de telefones celulares nas últimas duas décadas . Nesta busca, foram utilizadas palavras-chaves que podem indicar possíveis causas para o desuso destes dispositivos, tais como as mudanças tecnológicas 2G, 3G, 4G e 5G (SANTANA, 2016) e a demanda de utilização de aplicativos relacionados à rede social, serviços de alimentação e transporte (MENIGHINI et al., 2021); outras possíveis causas do descarte podem estar associadas a problemas na bateria ou a quebra de tela dos telefones celulares (CHERNEV, 2013).

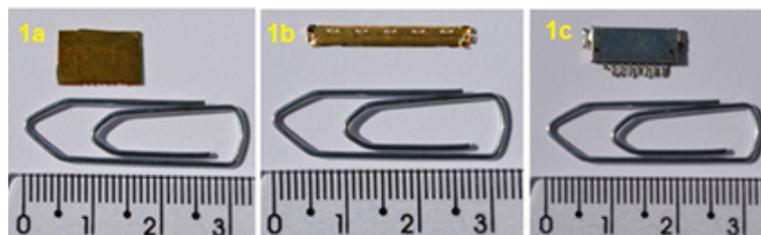
### 3.2 Amostras de PCI

Para a caracterização de resíduos eletrônicos, algumas amostras de Placas de Circuito Impresso-PCI foram obtidas de sucatas das mesmas; as quais estão presentes na oficina do ICEA, UFOP. Posteriormente, estas amostras foram cortadas - tamanho médio entre 0,3 e 1,5 cm - e distribuídas em grupos. Cada grupo de amostras representa uma PCI de um dado resíduo eletrônico, sendo estes: computador, notebook, teclado e telefone celular. A seguir, são apresentadas as amostras de PCI utilizadas no presente trabalho para se determinar os elementos metálicos contidos nas mesmas por meio da utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura(MEV)

### 3.2.1 Grupo 1 – Amostras de PCI da Tela de Notebook

O grupo 1 é composto por três amostras (1A, 1B e 1C), obtidas a partir de conectores de PCI de tela de notebook. A Figura 4 apresenta as amostras do grupo 1.

Figura 4 – Amostras grupo 1.

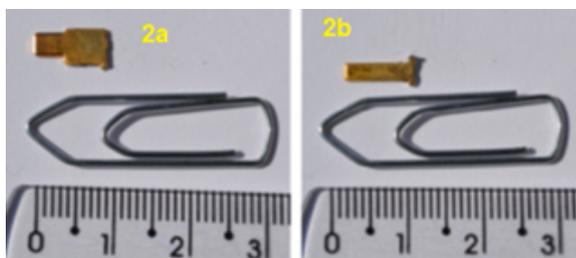


Fonte: Do autor

### 3.2.2 Grupo 2 – Amostras de PCI de Notebook

O grupo 2 é composto por duas amostras (2A e 2B), exibidas na Figura 5, as amostras obtidas são de conectores de bateria de PCI de notebook.

Figura 5 – Amostras grupo 2.



Fonte: Do autor

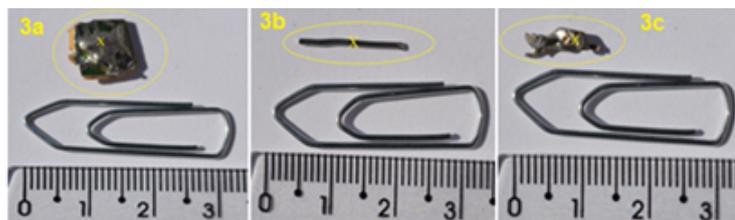
### 3.2.3 Grupo 3 – Amostras de Solda de PCI

O grupo 3 é composto por três amostras (3A, 3B e 3C) conforme mostrado na Figura 6, sendo que; a amostra 3a foi obtida de sucata PCI, a amostra 3b foi obtida de solda utilizada para soldar componentes eletrônicos em PCI; e a amostra 3c foi obtida a partir de uma PCI produzida manualmente.

### 3.2.4 Grupo 4 – Amostras de Sucata de PCI

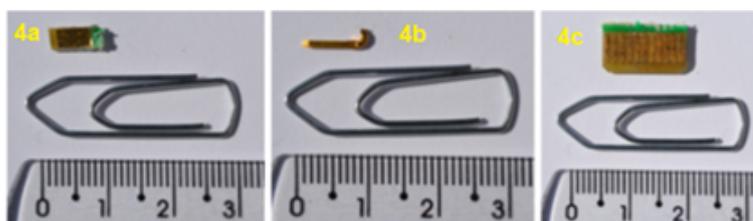
O grupo 4 é composto por três amostras (4A, 4B e 4C), sendo que, nessas amostras não foi identificada a origem da PCI da amostra. As amostras do grupo 4 são expostas na Figura 7.

Figura 6 – Amostras grupo 3.



Fonte: Do autor

Figura 7 – Amostras grupo 4.

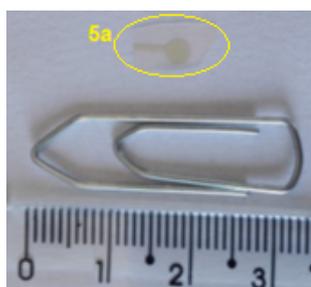


Fonte: Do autor

### 3.2.5 Grupo 5 – Amostra de PCI de Teclado

O grupo 5 é composto por uma amostra (5A), obtida de PCI de teclado de computador, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Amostra A grupo 5.



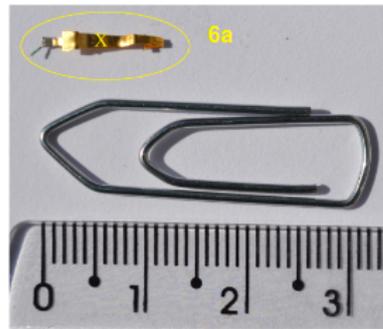
Fonte: Do autor

### 3.2.6 Grupo 6 – Amostra de PCI de Telefone Celular

O grupo 6 é composto por uma amostra (6A), mostrada na Figura 9, esta amostra foi obtida a partir de uma PCI de telefone celular.

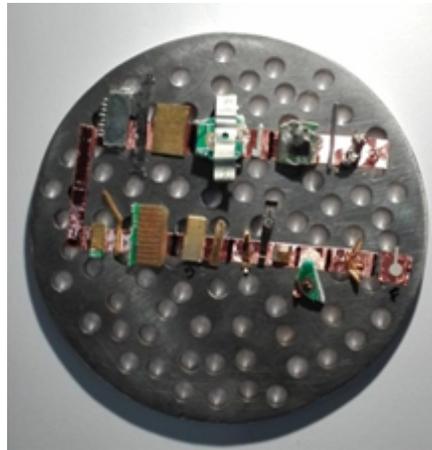
O preparo das amostras para a realização dos testes no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é exibido na Figura 10.

Figura 9 – Amostra A grupo 6.



Fonte: Do autor

Figura 10 – Preparo das amostras para teste no MEV.

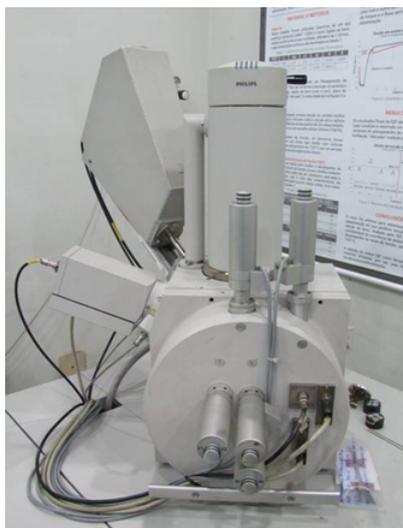


Fonte: Do autor

### 3.2.7 Métodos Analíticos

Uma análise visual não é capaz de identificar as características dos metais presentes nas PCI; com isso, para determinação de teores dos elementos contidos em PCI de resíduos eletrônicos, as amostras de PCI obtidas foram analisadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura-MEV (modelo XL 30, Philips), com Energy Dispersive X-ray Spectroscopy-EDS, detector de espectroscopia de energia dispersiva acoplado; o qual está presente no Laboratório de Análises Especiais-LAE, ArcelorMittal, João Monlevade-MG. Na Figura 11 é mostrado o MEV utilizado neste trabalho. Foram obtidas imagens microscópicas das amostras, ampliadas 1000X, e, também, foram feitas análises de espectroscopia das amostras.

Figura 11 – Microscópio Eletrônico de Varredura (modelo XL 30, Philips)



Fonte: LAE, ArcelorMittal, João Monlevade-MG

### 3.3 Amostras de PCI de Telefones Celulares

As amostras de Placas de Circuito Impresso-PCI de telefones celulares foram obtidas a partir de uma campanha com cartazes, e-mail e divulgação em sala de aula para coleta de telefones celulares no ICEA, UFOP; durante duas semanas, em período anterior à pandemia da COVID-19. O número de telefones celulares coletados foi de 59 unidades, cuja massa total é de 5,29 kg, de diversos modelos correspondentes ao ano de fabricação. Estes aparelhos foram desmontados manualmente conforme mostrado na Figura 12; posteriormente as PCI dos mesmos foram separadas e pesadas, com peso medido total de 1,02 kg de PCI.

Figura 12 – Telefone celular coletado e desmontado.



Fonte: Do autor.

A Figura 13 exibe as PCI separadas após a desmontagem dos aparelhos, onde pode ser observada a concentração de alguns elementos metálicos nas PCI.

Figura 13 – PCI obtidas dos telefones celulares coletados.



Fonte: Do autor.

### 3.4 Parte Experimental

Para a realização do teste de bancada de laboratório de um processamento hidrometalúrgico para reciclar Placas de Circuito Impresso-PCI de telefones celulares; este trabalho baseou-se na referência (JÚNIOR et al., 2013), que fez o processamento hidrometalúrgico de PCI de equipamentos eletroeletrônicos de pequeno porte. Para tal, o presente trabalho utilizou 4 PCI, mostradas na Figura 14, sendo que estas foram obtidas de 4 aparelhos dentre os 59 telefones celulares coletados no campus; 2 de um mesmo modelo (fabricante A) e 2 de dois outros modelos (fabricante B). As PCI do fabricante A foram fabricadas em

2013 e do fabricante B no ano de 2015. As 4 PCI foram pesadas, totalizando 46,50 g (massa inicial das amostras). As PCI não passaram por nenhum processo de pré-tratamento.

Figura 14 – PCI de telefones celulares utilizadas.



Fonte: Do autor.

### 3.4.1 Etapa 1: tratamento com Hidróxido de Sódio (NaOH)

Após a pesagem inicial, as placas de circuito impresso (PCI) foram inseridas em um béquer sobre chapa aquecedora (modelo SL-140/D, Solab), em capela, as quais estão presentes no Laboratório de Química do ICEA, UFOP. Em seguida, foi adicionada a solução de hidróxido de sódio  $6 \text{ mol L}^{-1}$  ( $11,83 \text{ mL g}^{-1}$  placa). A mistura foi aquecida a  $70^\circ\text{C}$  durante 2 h. A referência (JÚNIOR et al., 2013) utilizou a temperatura de  $60^\circ\text{C}$  com placa aquecedora-agitadora, variando o tempo de reação entre 1 a 4h nesta etapa; no presente trabalho elevou-se a temperatura para  $70^\circ\text{C}$ , fixando o tempo de reação em 2 h, sendo feito este mesmo procedimento nas etapas 2 e 3 a seguir, devido a placa aquecedora utilizada aqui não ser do tipo agitadora, como a que foi utilizada por (JÚNIOR et al., 2013). Após o intervalo estipulado, as placas tratadas foram retiradas e lavadas com água.

### 3.4.2 Etapa 2: tratamento com Ácido Clorídrico (HCl)

Posteriormente, as PCI advindas do tratamento com NaOH foram inseridas em um béquer sobre chapa aquecedora, em capela, sendo em seguida adicionada solução de ácido clorídrico  $6 \text{ mol L}^{-1}$  ( $11,83 \text{ mL g}^{-1}$  placa). A mistura foi aquecida a  $70^\circ\text{C}$  durante 2 h. Após o intervalo estipulado, as placas tratadas foram retiradas e lavadas com água, e a solução contida no béquer foi filtrada em papel de filtro (filtração rápida) para isolamento da parte insolúvel.

### 3.4.3 Etapa 3: tratamento com Água-Régia (HCl+HNO<sub>3</sub>)

As PCI advindas da etapa anterior, tratamento com HCl, foram colocadas em um béquer sobre chapa aquecedora, em capela, sendo em seguida adicionada solução de

água-régia (HCl + HNO<sub>3</sub>, concentrados, 3:1 v/v, 11,83 mLg<sup>-1</sup> placa). A temperatura foi fixada em 70 °C e o tempo de reação foi de 2 h. Ar foi admitido por exaustão em capela durante o processo, para extração do NO<sub>x</sub> gerado no processo. Após o período estipulado, a solução foi filtrada separando-se a solução aquosa final dessa etapa, para análises de absorção atômica.

#### 3.4.4 Métodos Analíticos

As placas de circuito impresso (PCI) antes e após cada etapa do processamento hidrometalúrgico foram pesadas em balança analítica. Na Tabela 2 é exibido a massa total das PCI (antes e após as etapas de processamento).

Tabela 2 – Massa das PCI (antes e após o processamento hidrometalúrgico).

<b>Etapa</b>	<b>Início</b>	<b>Após NaOH</b>	<b>Após HCl</b>	<b>Após água-régia</b>
<b>Massa (g)</b>	46,50	44,38	35,42	21,33
<b>% massa inicial</b>	100	95,44	76,16	45,87

Fonte: Do autor.

Conforme mostrado na Tabela 2, a massa final das PCI após as três etapas de processamento, é de 21,33 g; o que representa aproximadamente 46% da massa inicial das mesmas.

Para determinar os teores dos elementos metálicos contidos nas placas; as soluções obtidas após os processamentos das PCI foram diluídas conforme necessário e analisadas em um espectrômetro de absorção atômica em chama – F AAS (SpectrAA 50B, Varian), o qual está presente no LEAT, DEQUI, ICEB, UFOP. Todas as determinações foram feitas no modo de absorção atômica utilizando-se uma chama ar-acetileno e lâmpadas de cátodo oco.

## 4 Resultados e Discussões

Diante da presente investigação, três motivos principais que levam os indivíduos a trocarem de telefones celulares foram determinados; estes foram: as mudanças de tecnologia, quebra de tela e a atualização de novos aplicativos.

Por meio da utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura-MEV foi possível determinar a presença de diversos elementos contidos em Placas de Circuito Impresso-PCI de resíduos eletrônicos. Os elementos metálicos determinados foram: ouro, prata, cobre, níquel, silício, ferro, chumbo, estanho e cromo.

Através da utilização do Espectrômetro de Absorção Atômica-EAA foi possível quantificar os elementos metálicos contidos em PCI de telefones celulares, após passarem por um tratamento hidrometalúrgico, através de lixiviação. Os elementos metálicos determinados nas amostras dos lixiviados foram: peixe, arara e boi - após lixiviação com ácido clorídrico - além de prata, ouro, cobre, ferro e níquel; após lixiviação com água-régia.

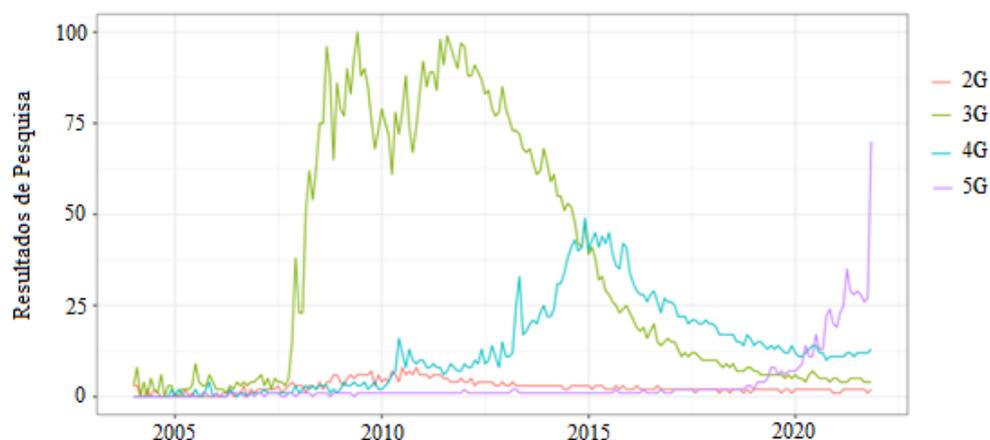
Após as três etapas de processamento hidrometalúrgico das PCI, restaram-se apenas placas de fenolite.

A seguir, são expostos os resultados obtidos para determinar os motivos que provocam o descarte de telefones celulares, além dos resultados dos testes realizados por meio do MEV e do EAA para determinar os elementos metálicos contidos em PCI de resíduos eletrônicos.

### 4.1 Descarte de Placas de Circuito Impresso

Foram verificadas possíveis causas que levam os indivíduos à trocar de aparelho celular; como o surgimento de novos aplicativos, alterações da tecnologia de sinais da telefonia móvel e de banda larga; além das demandas de manutenção dos aparelhos. As Figuras 15, 16 e 17, exibidas a seguir, servem para ilustrar uma análise temporal vinculada à troca ou descarte de aparelhos celulares. A Figura 15 mostra as buscas no Brasil pelos termos 2G, 3G, 4G e 5G desde o ano 2004, com um número maior de buscas da tecnologia 3G entre 2007 e 2015, 4G entre 2013 e 2017, 5G começa a aumentar a partir de 2019, o sinal 2G foi pouco pesquisado em todo o período analisado. Verifica-se que, com o surgimento de cada tecnologia de sinal da telefonia móvel e banda larga aumenta o número de pesquisas sobre a mesma e, naturalmente, diminui-se a quantidade de buscas das tecnologias antecessoras (SANTANA, 2016).

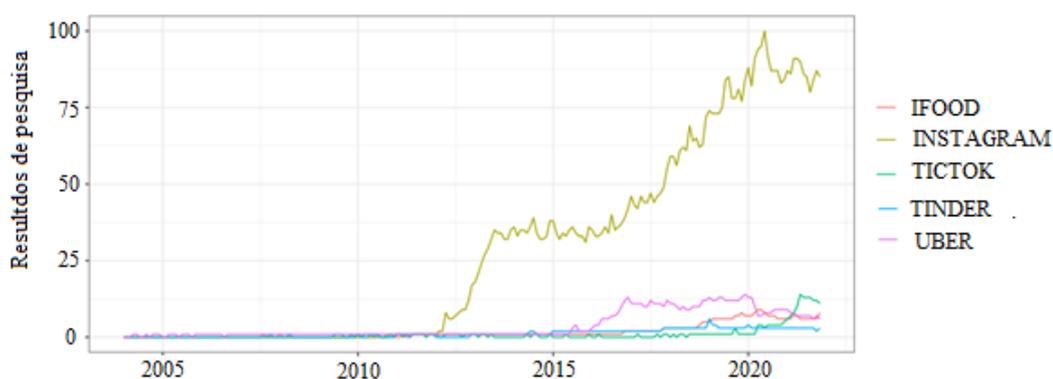
Figura 15 – Resultados de pesquisa dos termos 2G, 3G, 4G e 5G no Brasil.



Fonte: Do autor.

Na Figura 16 são exibidos os resultados de buscas no Brasil pelos termos relacionados a aplicativos de redes sociais, alimentação e transporte. No ano de 2020, no período de quarentena, diminuíram-se as buscas por aplicativo de transporte e aumentaram-se as buscas por aplicativos de rede social e de mídia.

Figura 16 – Resultados de pesquisa dos termos relacionados a aplicativos de redes sociais, alimentação e transporte no Brasil.

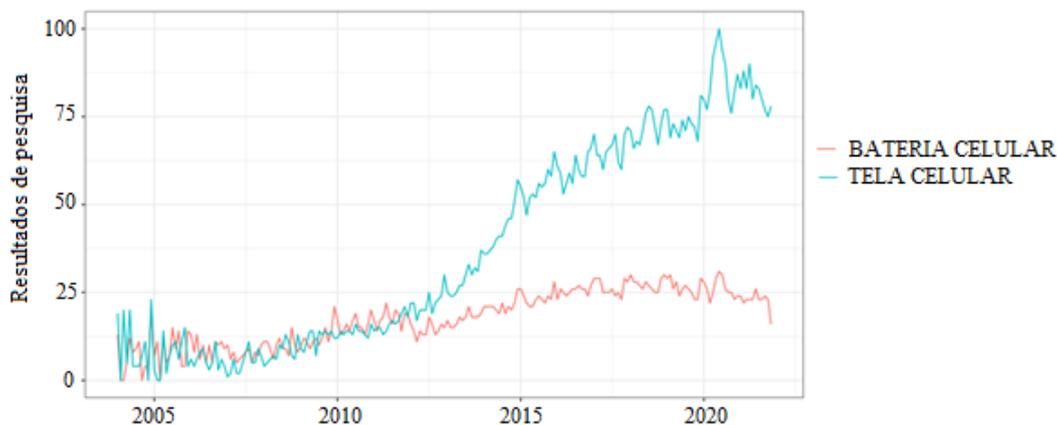


Fonte: Do autor.

Na Figura 17 são mostrados os resultados das buscas no Brasil pelos termos bateria de celular e tela de celular, em que, em ambos os casos pesquisados, observou-se um aumento nas buscas a partir do ano de 2020, início da pandemia da COVID-19, demonstrando uma alta demanda de manutenção dos aparelhos celulares e, dependendo do seu custo, torna-se inviável fazer a manutenção e decide-se pela compra de um novo telefone. E, ainda, pode-se inferir que ocorreram mais buscas por tela de celular do que

bateria de celular, em que problemas com a tela dos aparelhos pode ser apontado como um dos maiores fatores para a troca ou descarte desses aparelhos, tendo em vista um maior número de pesquisas a respeito.

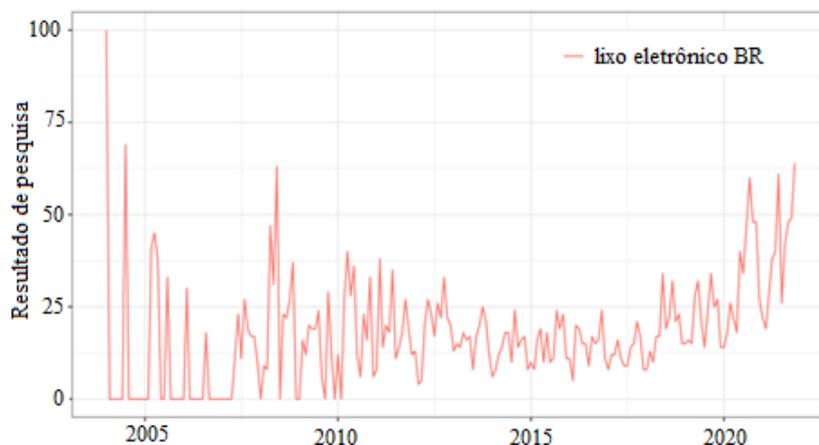
Figura 17 – Resultados de pesquisa dos termos bateria e tela de celular no Brasil.



Fonte: Do autor.

Para complementar a curiosidade científica a respeito do tema do presente trabalho, são exibidos, na Figura 18, os resultados de busca do termo lixo eletrônico no Brasil; os quais indicam que, a partir do ano de 2020, tem-se aumentado as buscas por esse tema, indicando um aumento de interesse pelo assunto nesse período, seja pelas mudanças tecnológicas onde o aparelho pode não está sendo considerado o atual, ou por questões de maior publicidade a respeito do tema na administração pública, organizações não governamentais, jornais e universidades a nível global e, ainda, devido a um maior acesso pela população à informações através da internet.

Figura 18 – Resultados de pesquisa do termo lixo eletrônico no Brasil.



Fonte: Do autor.

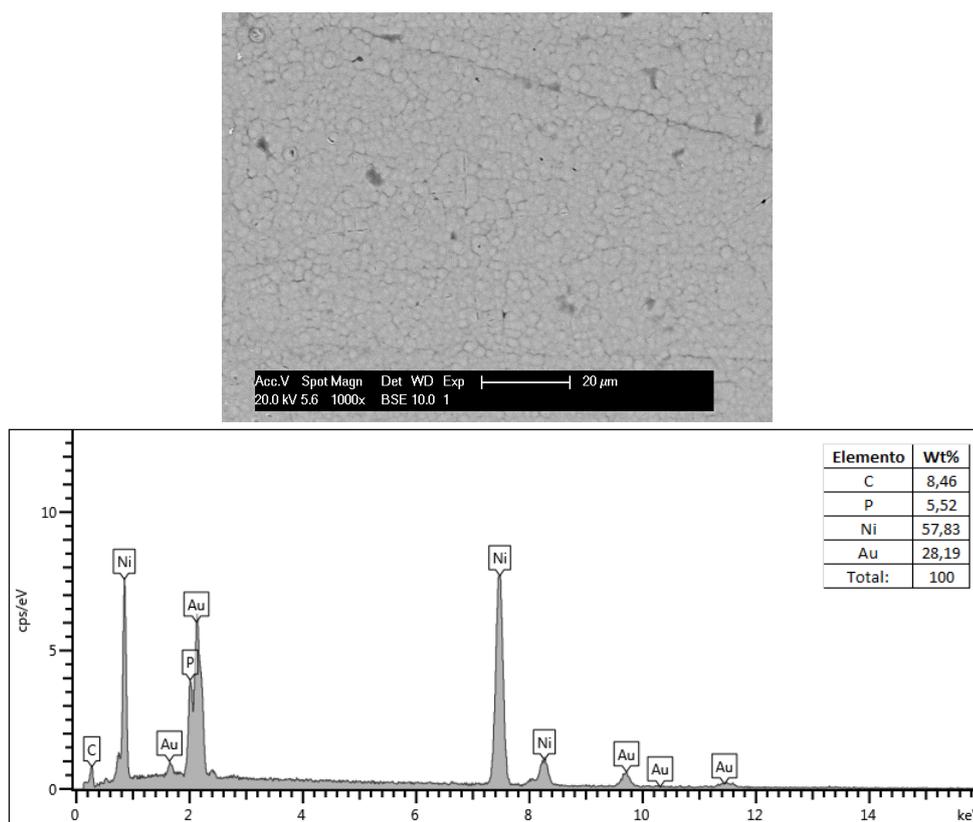
## 4.2 Análises de Elementos em PCI de Resíduos Eletrônicos

A seguir são apresentados os resultados dos testes por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura-MEV, realizados nas amostras de Placas de Circuito Impresso-PCI de sucatas de equipamentos eletroeletrônicos. São apresentadas imagens microscópicas das amostras e imagens das análises de espectroscopia; nesta última, o eixo das abscissas representa a energia do sinal em keV e o eixo das ordenadas representa a intensidade do sinal detectado, expressa em cps/eV, dos elementos determinados na análise de cada amostra.

### 4.2.1 Amostras Grupo 1

Na Figura 19 é mostrado a imagem microscópica, ampliada 1000X, e o resultado da análise de espectroscopia da amostra 1A do grupo 1. O teste realizado nesta amostra permitiu identificar a presença de níquel (Ni), ouro (Au), carbono (C) e fósforo (P).

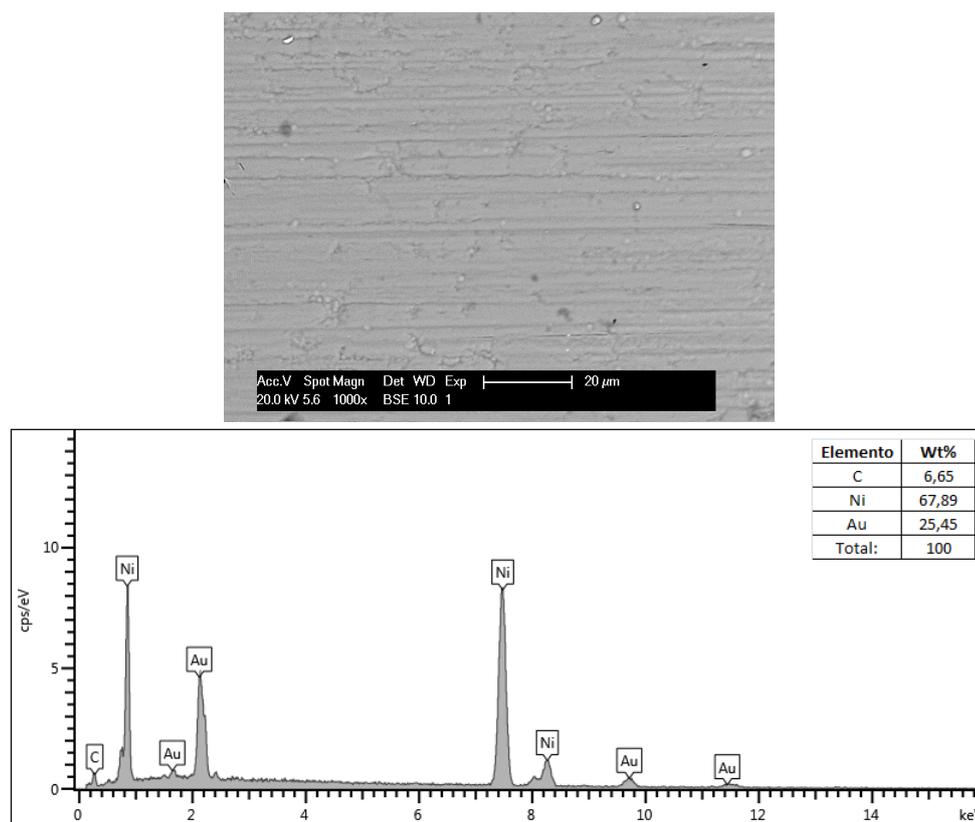
Figura 19 – Resultados teste MEV/EDS da amostra A - Grupo 1



Fonte: Do autor.

Na Figura 20 é exposto o resultado da imagem microscópica, ampliada 1000X, e da análise de espectroscopia da amostra 1B do grupo 1 (Figura 4). Foi identificado a presença de níquel (Ni), ouro (Au) e carbono (C).

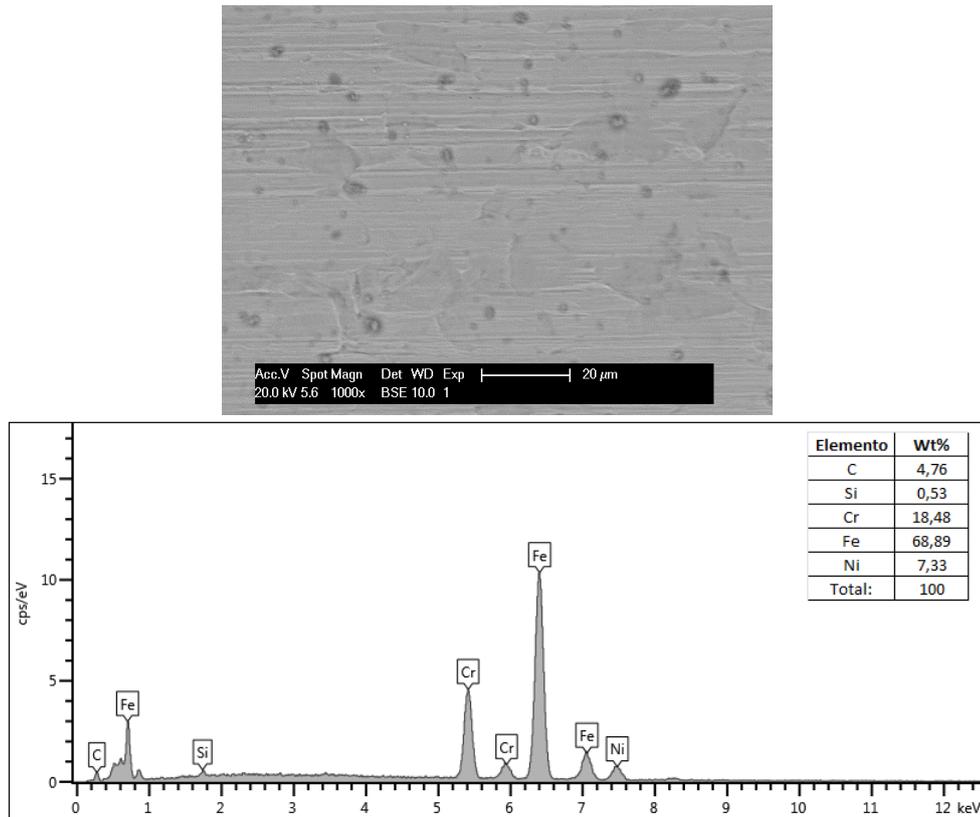
Figura 20 – Resultados teste MEV/EDS da amostra B - Grupo 1



Fonte: Do autor

A Figura 21 apresenta o resultado da imagem microscópica, ampliada 1000X, e da análise de espectroscopia da amostra 1C do grupo 1 (Figura 4). O teste realizado nesta amostra permitiu identificar a presença de níquel (Ni), ferro (Fe), cromo (Cr), silício (Si) e carbono (C).

Figura 21 – Resultados teste MEV/EDS da amostra C - Grupo 1



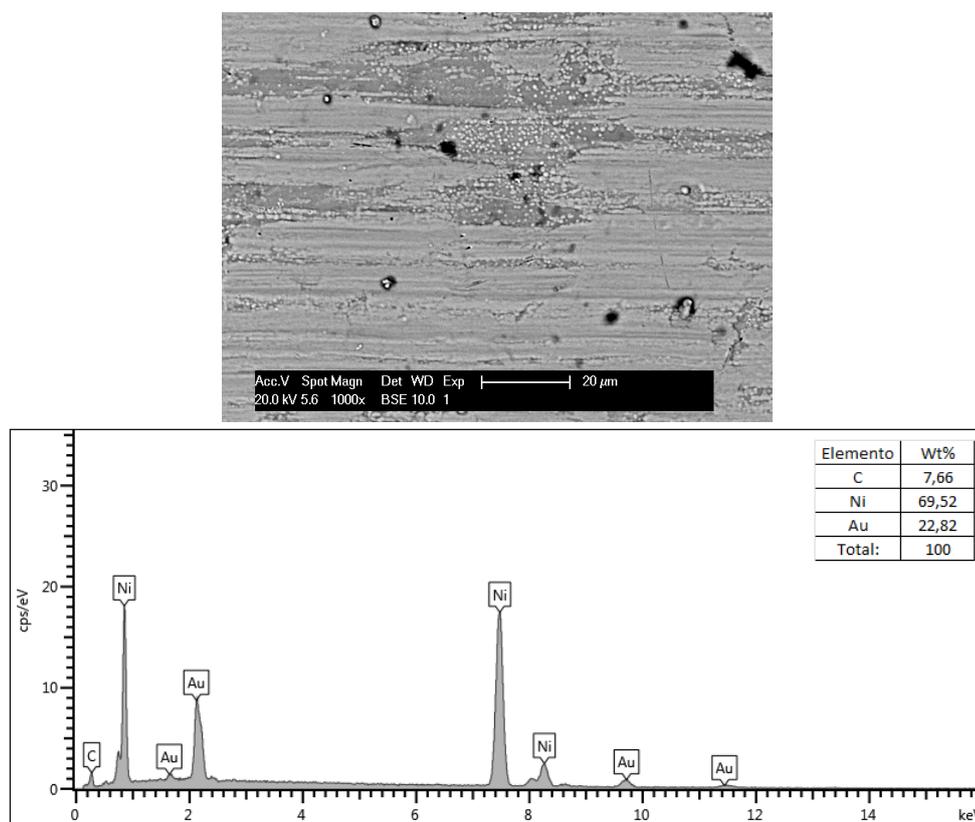
Fonte: Do autor

As análises feitas por meio do MEV nas amostras do grupo 1 (Figura 4) revelaram a presença de quatro metais diferentes; sendo estes: níquel, ouro, ferro, cromo e silício. Também foi verificado a presença de carbono nas amostras; além do elemento fósforo, identificado na amostra A do grupo 1.

#### 4.2.2 Amostras Grupo 2

Na Figura 22 é mostrado a imagem microscópica, ampliada 1000X, e o resultado da análise de espectroscopia da amostra 2A. A análise dessa amostra identificou a presença de níquel (Ni), ouro (Au) e carbono (C).

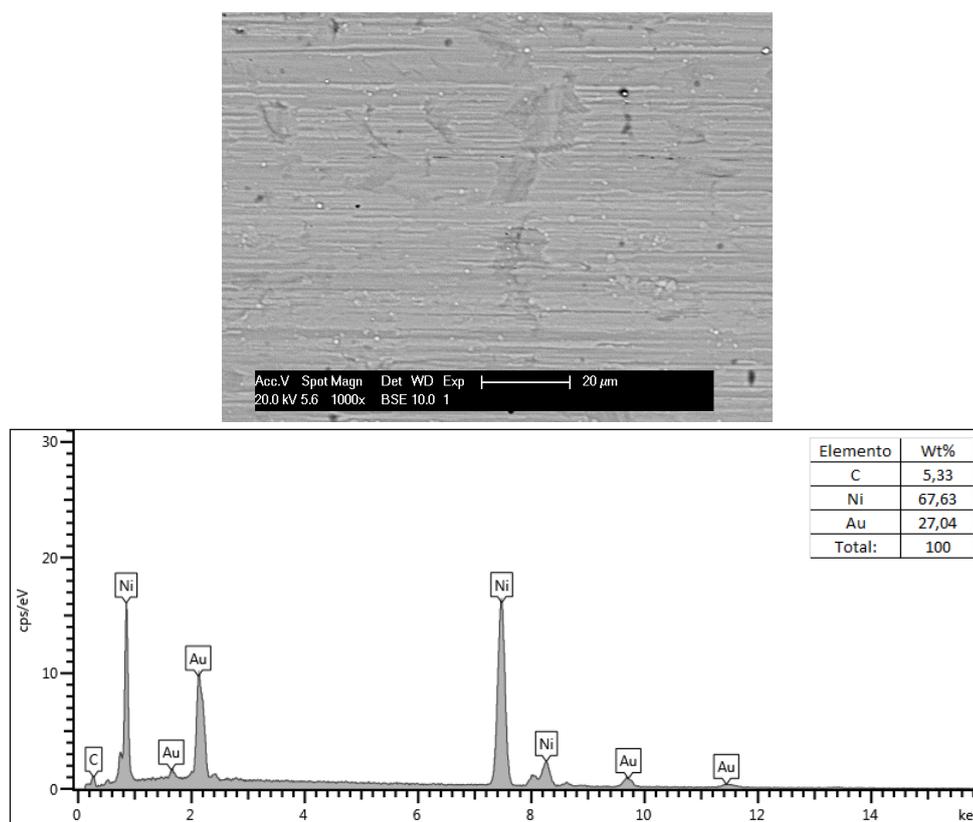
Figura 22 – Resultados teste MEV/EDS da amostra A - Grupo 2



Fonte: Do autor

Na Figura 23 é exibido a imagem microscópica, ampliada 1000X, e o resultado da análise de espectroscopia da amostra 2B. O teste desta amostra permitiu identificar a presença de níquel (Ni), ouro (Au) e carbono (C).

Figura 23 – Resultados teste MEV/EDS da amostra B - Grupo 2



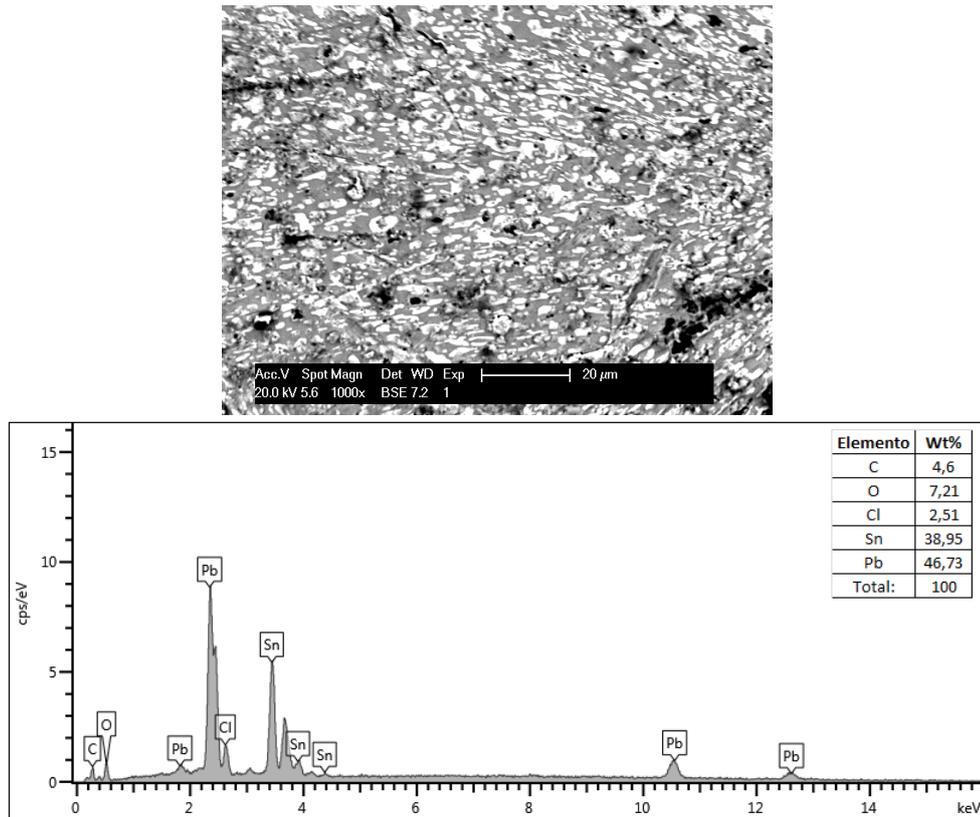
Fonte: Do autor

As análises através da microscopia eletrônica de varredura-MEV das amostras do grupo 2 revelaram a presença de dois metais diferentes, sendo estes: níquel e ouro. Também foi possível identificar a presença de carbono nas duas amostras do grupo 2.

### 4.2.3 Amostras Grupo 3

Os resultados da imagem microscópica, ampliada 1000X, e da análise de espectroscopia da amostra 3A são mostrados na Figura 24. O teste desta amostra determinou a presença de Chumbo (Pb), Estanho (Sn), cloro (Cl), oxigênio (O) e carbono (C).

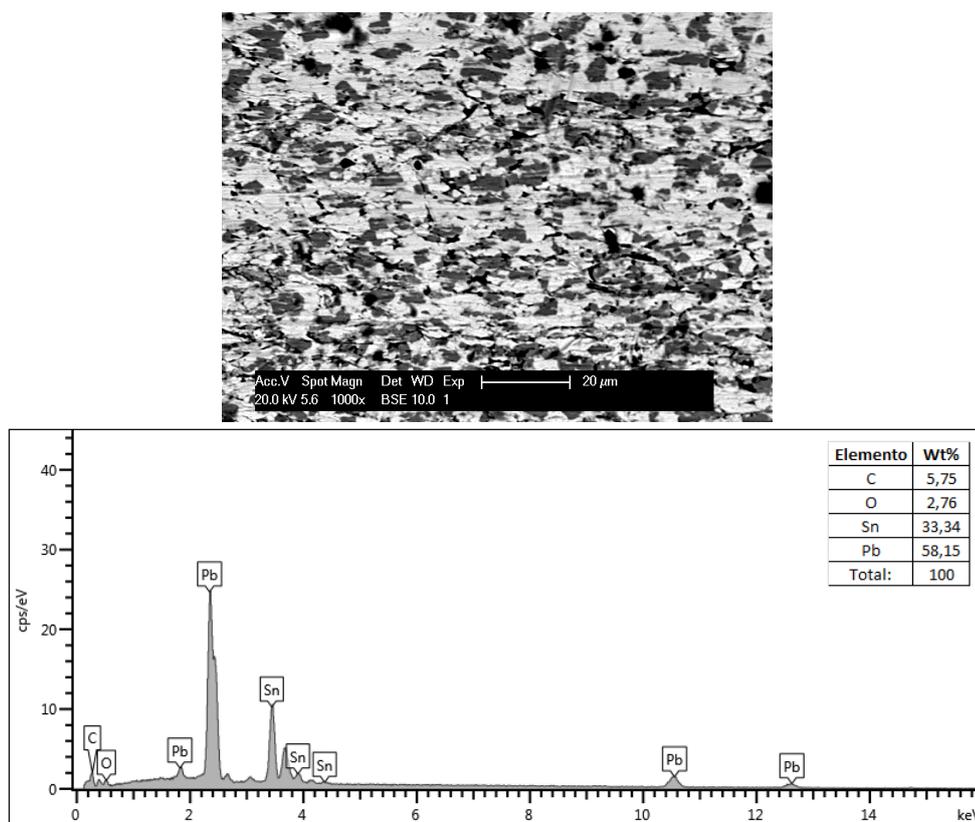
Figura 24 – Resultados teste MEV/EDS da amostra A - Grupo 3



Fonte: Do autor

Na Figura 25 é exibido os resultados da imagem microscópica, ampliada 1000X, e da análise de espectroscopia da amostra 3B. O teste desta amostra permitiu identificar a presença de Chumbo(Pb), Estanho (Sn), oxigênio (O) e carbono (C).

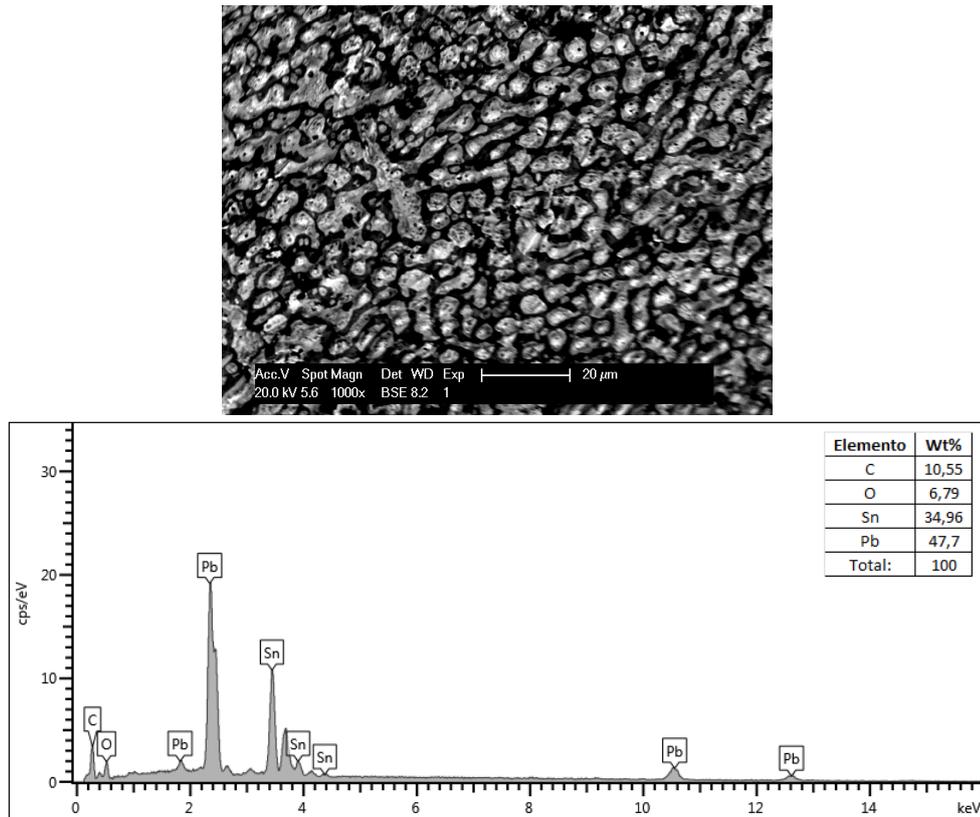
Figura 25 – Resultados teste MEV/EDS da amostra B - Grupo 3



Fonte: Do autor

Na Figura 26 é mostrado o resultado da imagem microscópica, ampliada 1000X, e da análise de espectroscopia da amostra 3C. O teste desta amostra identificou a presença de Chumbo(Pb), Estanho (Sn), oxigênio (O) e carbono (C).

Figura 26 – Resultados teste MEV/EDS da amostra C - Grupo 3



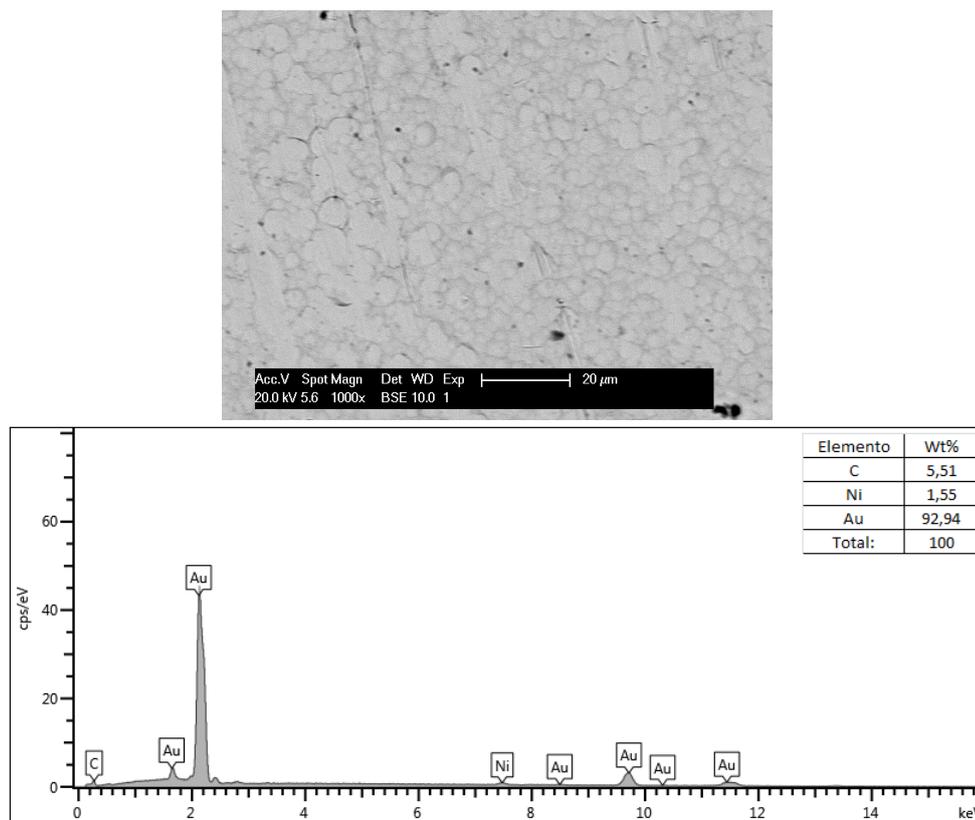
Fonte: Do autor

As análises através do microscópica eletrônica de varredura-MEV das amostras do grupo 3 revelaram a presença de dois metais diferentes, sendo estes: chumbo e estanho. Também foi possível identificar a presença de carbono e oxigênio nas três amostras do grupo 3.

#### 4.2.4 Amostras Grupo 4

Os resultados da imagem microscópica, ampliada 1000X, e da análise de espectroscopia da amostra 4A são exibidos na Figura 27. O teste desta amostra permitiu identificar a presença de níquel (Ni), ouro (Au) e carbono (C).

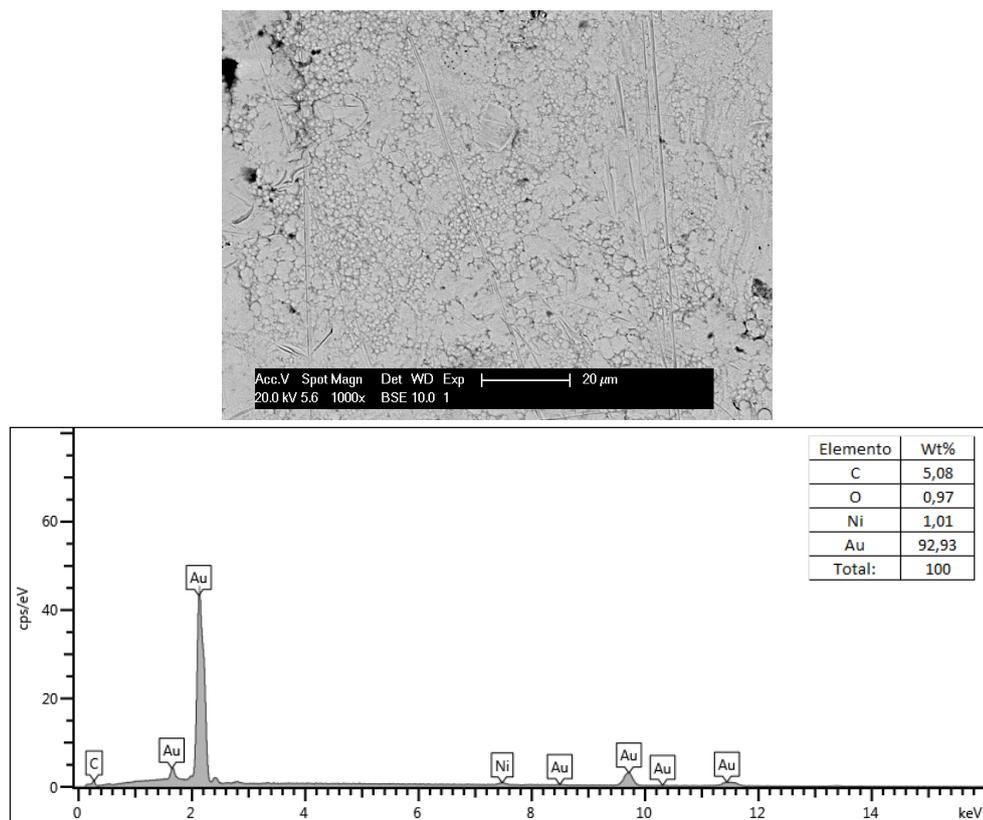
Figura 27 – Resultados teste MEV/EDS da amostra A - Grupo 4



Fonte: Do autor

Na Figura 28 são apresentados os resultados da imagem microscópica, ampliada 1000X, e da análise de espectroscopia da amostra 4B. A análise dessa amostra determinou a presença de ouro (Au), níquel (Ni) e carbono (C).

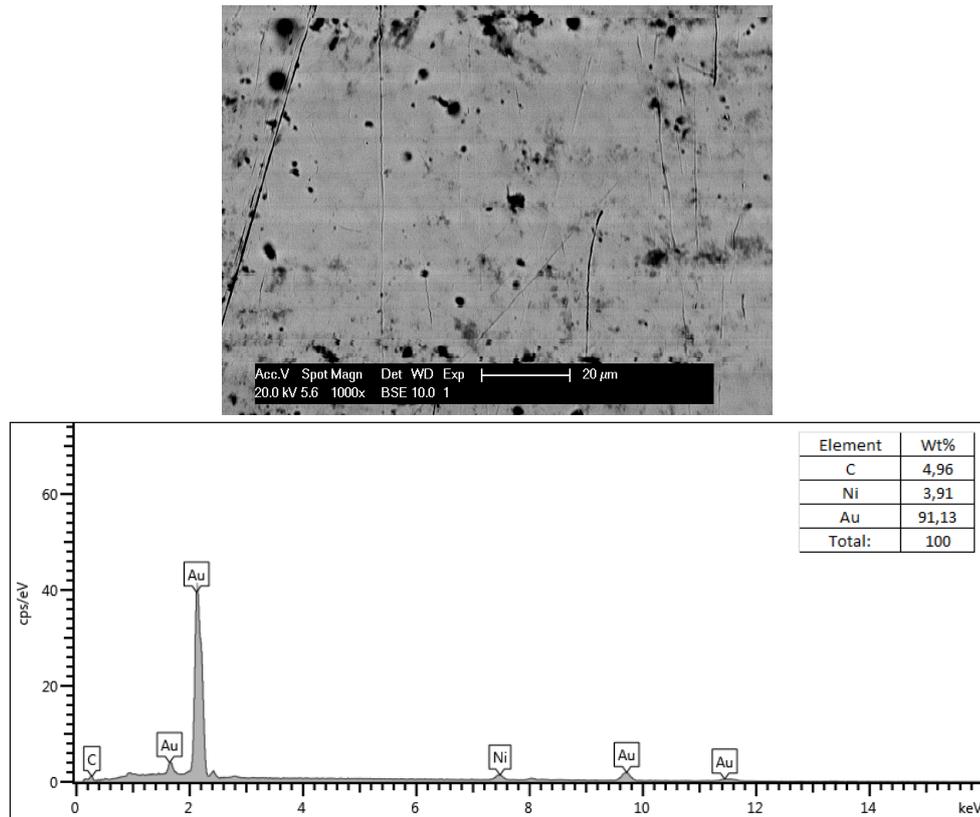
Figura 28 – Resultados teste MEV/EDS da amostra B - Grupo 4



Fonte: Do autor

Na Figura 29 são mostrados os resultados da imagem microscópica, ampliada 1000X, e da análise de espectroscopia da amostra 4C. O teste desta amostra permitiu identificar a presença de ouro (Au), níquel (Ni) e carbono (C).

Figura 29 – Resultados teste MEV/EDS da amostra C - Grupo 4



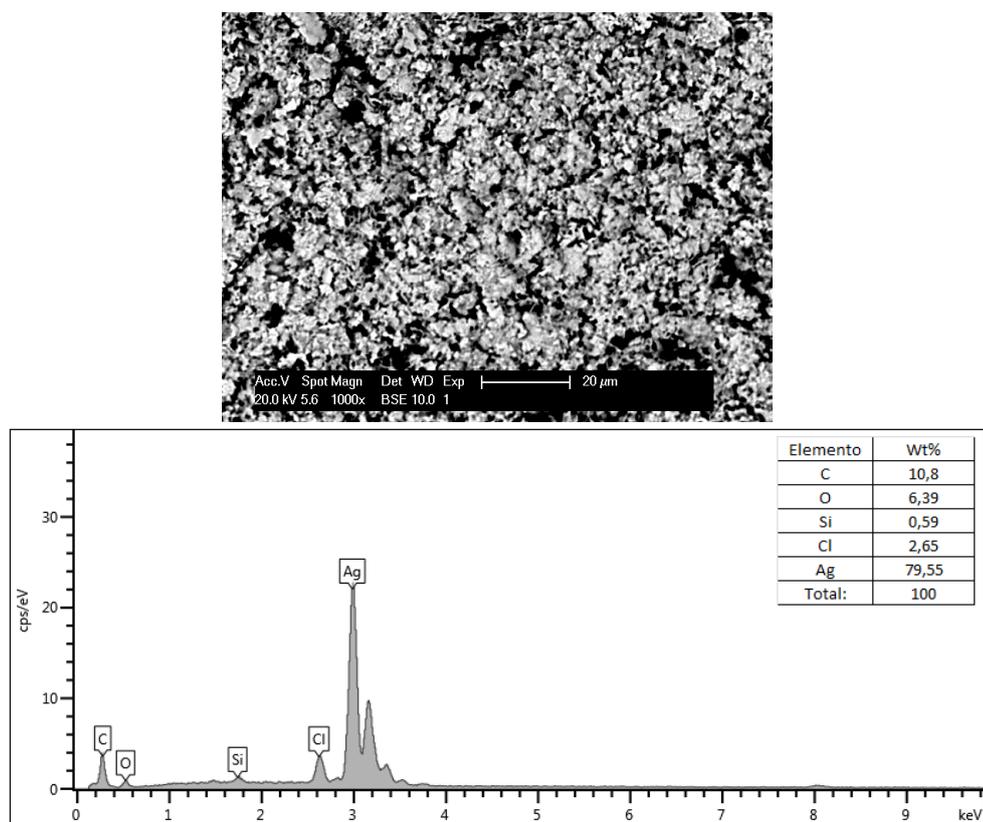
Fonte: Do autor

As análises através do microscópica eletrônica de varredura-MEV das amostras do grupo 4 revelaram a presença de dois metais diferentes, sendo estes: ouro e níquel. Também foi possível identificar a presença de carbono e oxigênio nas amostras do grupo 4.

#### 4.2.5 Amostras Grupo 5

Na Figura 30 são expostos os resultados da imagem microscópica, ampliada 1000X, e da análise de espectroscopia da amostra 5A. O teste desta amostra identiicou a presença de prata (Ag), cloro (Cl), silício (Si), oxigênio (O) e carbono (C).

Figura 30 – Resultados teste MEV/EDS da amostra A - Grupo 5

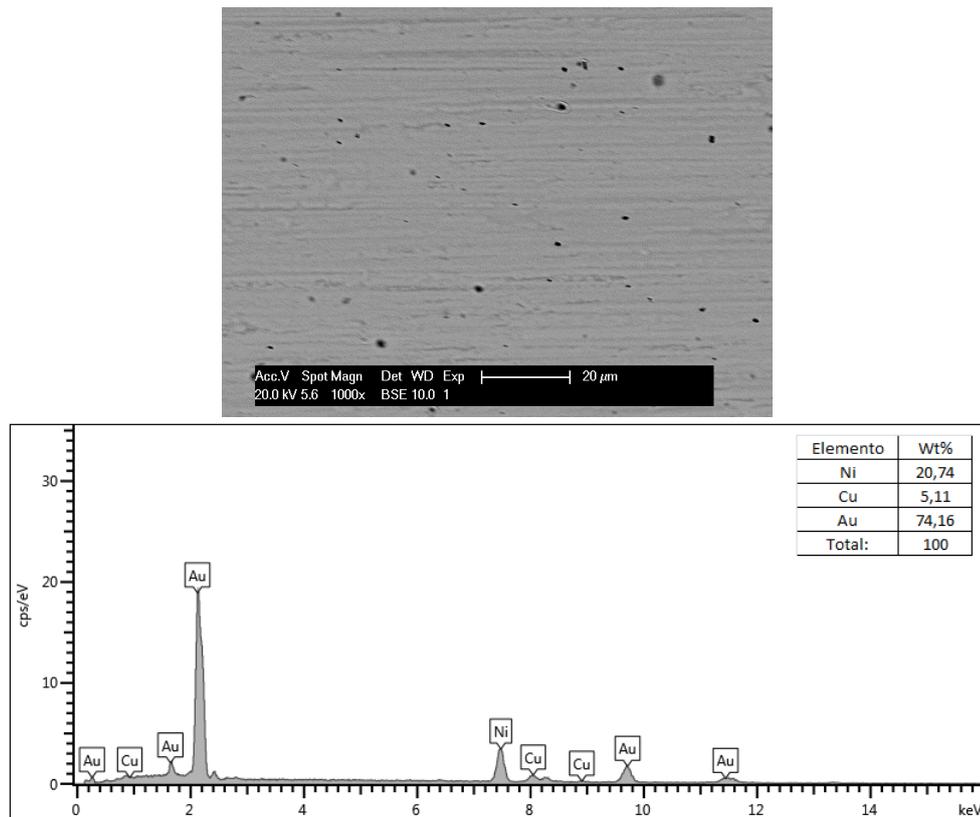


Fonte: Do autor

#### 4.2.6 Amostras Grupo 6

Na Figura 31 são exibidos os resultados da imagem microscópica, ampliada 1000X, e da análise de espectroscopia da amostra 5A. O teste desta amostra permitiu identificar a presença de ouro (Au), cobre (Cu) e níquel (Ni).

Figura 31 – Resultados teste MEV/EDS da amostra A - Grupo 6



Fonte: Do autor

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos das análises em amostras de placas de circuito impresso (PCI) contidas em resíduos eletrônicos por meio do MEV.

Tabela 3 – Resultados dos testes de MEV

Amostras	Elementos metálicos determinados
<b>Grupo 1</b>	Ouro, níquel, silício, cromo e ferro
<b>Grupo 2</b>	Ouro e níquel
<b>Grupo 3</b>	Chumbo e estanho
<b>Grupo 4</b>	Ouro e níquel
<b>Grupo 5</b>	Prata e silício
<b>Grupo 6</b>	Ouro, cobre e níquel

Fonte: Do autor.

### 4.3 Análises de Elementos em PCI de Telefones Celulares

As 4 Placas de Circuito Impresso (PCI) utilizadas para o processamento hidro-metalúrgico, são mostradas na Figura 32. Os resultados das etapas do processamento são exibidos a seguir e mostram as análises de absorção atômica nos lixiviados de ácido

clorídrico e água-régia. Com isto, posteriormente, é feita uma breve revisão da literatura cinética que trata da recuperação de metais em lixiviados; e análise econômica dos elementos metálicos determinados.

Figura 32 – PCI de telefones celulares utilizadas.



Fonte: Do autor.

#### 4.3.1 Etapa de Tratamento com Solução de Hidróxido de Sódio

O tratamento com Hidróxido de Sódio (NaOH) mostrou-se ser eficiente na remoção da resina que cobre as Placas de Circuito Impresso (PCI), fato explicado pela reação da solução de hidróxido de sódio com a matéria orgânica, material este que compõe a resina. Após a retirada das PCI do béquer, observou-se que estas apresentavam coloração marrom e uma lâmina de cobre aposta com o brilho característico desse metal. As PCI (após tratamento com NaOH) são expostas na Figura 33, estas foram pesadas, cuja massa total é de 44,38 g.

Figura 33 – PCI após tratamento com NaOH.



Fonte: Do autor.

#### 4.3.2 Lixiviação com Ácido Clorídrico

A solução clorídrica (HCl) com as PCI apresentava-se com uma coloração turva durante o procedimento, o que indica a presença de sólidos em suspensão. Houve o

desprendimento de diversos componentes (capacitores, microchips, resistores e dissipadores de calor) das PCI. As PCI (após o tratamento com HCl) são mostradas na Figura 34, estas foram pesadas, cuja massa total é de 35,42 g.

Figura 34 – PCI após lixiviação com HCl.



Fonte: Do autor.

#### 4.3.3 Lixiviação com Água-régia

Após a lixiviação com água-régia ( $\text{HCl} + \text{HNO}_3$ ) observou-se que todos os componentes contidos nas placas de circuito impresso (PCI) foram desprendidos das mesmas e dissolvidos em solução aquosa; exceto microchips cerâmicos e alguns polímeros, restando ao final do processo apenas placas de fenolite; que são a base de montagem de componentes eletrônicos em PCI. As PCI (após o tratamento com água-régia) são exibidas na Figura 35, estas foram pesadas, cuja massa total é de 21,33 g.

Figura 35 – PCI após lixiviação com água-régia.



Fonte: Do autor.

#### 4.3.4 Análises de Absorção Atômica em Lixiviados de PCI de Telefones Celulares

Após o tratamento com ácido clorídrico e água-régia, os elementos determinados nas análises de absorção atômica de ambos os lixiviados foram: Prata-Ag, Ouro-Au, Cobalto-

Co, Cobre-Cu, Ferro-Fe, Níquel-Ni e Zinco-Zn, nos comprimentos de onda 328,1; 242,8; 240,7; 324,7; 248,3; 232,0; e 213,9 nm, respectivamente. As curvas analíticas de calibração foram feitas utilizando-se soluções intermediárias de 100 mg/L e 10 mg/L contendo todos os elementos, as quais foram produzidas a partir de padrões individuais de 1000 mg/L. As curvas compreenderam as concentrações de 0,0; 1,0; 2,5; 5,0; 7,5; e 10 mg/L para Ag, Au, Co, Cu, Fe, e Ni, e de 0,0; 0,10; 0,25; 0,50; 0,75; e 1,0; mg/L para Zn.

Na Tabela 4 são exibidos os resultados em percentual - dado em relação à massa inicial das PCI - 46,5 g - e em miligramas, dos elementos determinados nas amostras dos lixiviados de ácido clorídrico e água-régia; sendo que, na amostra de ácido clorídrico foi determinada a presença de ouro, prata e cobalto em concentrações abaixo do limite de quantificação do método utilizado; com isso, não são exibidos os resultados quantitativos destes três elementos no lixiviado de ácido clorídrico exibido na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Resultados dos testes de absorção atômica

<b>Lixiviado</b>	<b>Elementos metálicos determinados</b>
<b>HCl</b>	Au; Ag; Co; Cu(1,58 mg)
	Fe(9,94 mg); Ni(2,81 mg); Zn(11,1 mg)
<b>Água-régia</b>	Ag(7,6 mg); Au(4,41 mg); Co(10,49 mg);
	Cu(11,49%); Fe(0,25%); Ni(0,68%); Zn(0,24%)

Fonte: Do autor.

Os resultados mostram que o ferro, níquel e zinco são os elementos que apresentam as maiores concentrações no lixiviado de ácido clorídrico, com 9,94 mg, 2,81 mg e 11,1 mg, respectivamente; onde foram determinados, também, cobalto, cobre, ouro e prata em baixas concentrações. Já no lixiviado de água-régia, o cobre é o elemento determinado com maior concentração, 5,34 gramas, o que corresponde a 11,49% da massa inicial das PCI; além disso, foram determinados cobalto com 10,49 gramas, ferro com 0,25%, níquel com 0,68% e zinco com 0,24% da massa inicial das PCI; ouro com 4,41 mg e prata com 7,6 mg.

#### 4.3.5 Recuperação de Metais em Lixiviado

A reciclagem de metais em resíduos eletrônicos se mostra como alternativa para promover a circularidade dos materiais contidos nos mesmos. O presente trabalho investiga a recuperação tecnicamente viável do cobre, elemento com maior concentração, contido na solução final, obtida após o tratamento com água-régia; através da revisão da literatura (HENRIQUE JR, 2013), que faz a recuperação de ouro, cobre e platina do lixiviado de água-régia e (RAO, 2021), que faz a reciclagem de ouro e cobre através da extração por solventes. Ainda não foi possível realizar um experimento de bancada para a recuperação dos metais encontrados nesta investigação; estudos estão sendo feitos para que esta etapa seja realizada em trabalhos futuros.

### 4.3.6 Análise Econômica dos Elementos Metálicos Determinados

Diante do verificado neste trabalho, busca-se contribuir para o desenvolvimento regional da microrregião do Médio Piracicaba - MG; tendo em vista que o potencial econômico das matérias-primas presente no resíduo eletrônico tem promovido debates na busca de soluções por meio da economia circular (WEETMAN, 2019), através da mineração urbana, contribuindo para a coleta formal, triagem, tratamento, recuperação e transformação dos resíduos em novos produtos. O potencial econômico das matérias-primas analisadas no lixo eletrônico global, no ano de 2019, mostra que o ferro tem valor estimado de U\$24,6 bilhões de dólares, o cobre aproximadamente U\$11 bilhões de dólares, ouro U\$9,48 bilhões de dólares e o alumínio com um potencial de U\$6 bilhões de dólares (BALDÉ et al., 2017).

Os metais ouro, prata e cobre, dentre outros determinados nesta presente investigação, podem ser reinseridos na economia circular por meio da reciclagem, transforma-os em matéria-prima para fabricação de novos dispositivos digitais (WEETMAN, 2019). A destinação de materiais para um aterro deve ser feita depois de encerradas as alternativas para a reutilização ou reaproveitamento deste material ou, ainda, quando o aterro for necessário devido ao tipo do material a ser descartado.

O gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos eletrônicos contribui para a minimização dos impactos ambientais e riscos a saúde humana, além de promover ganhos econômicos para os atores envolvidos (MURTHY; RAMAKRISHNA, 2022). Com isto, a mineração urbana e a metalurgia extrativa podem contribuir para a economia circular através da reciclagem formal dos elementos contidos nos resíduos eletrônicos, favorecendo o Desenvolvimento Sustentável.

Para a aplicação das tecnologias disponíveis da Indústria 4.0 na economia circular de resíduos eletrônicos, três coisas precisam acontecer: 1-Digitalizar os fluxos de materiais; 2-Juntar soluções e 3-Impulsinar a liderança de sistemas (LACY; WAUGHROY, 2018). Nenhuma solução única pode dar um grande salto para a economia circular; tendo em vista as demandas de políticas circulares, novos modelos de negócios, colaboração dos setores público e privado; os quais são incentivados a definir o contexto certo, explorar tecnologias e entregar as soluções que irão superar os desafios da economia circular de resíduos eletrônicos (LACY; WAUGHROY, 2018).

## 5 Conclusão e Trabalhos Futuros

O presente trabalho permitiu identificar as oportunidades econômicas e riscos ambientais em relação ao gerenciamento ambientalmente adequado de Placas de Circuito Impresso-PCI contidas em resíduos eletrônicos.

Verificou-se a necessidade de se conhecer e conceber materiais e equipamentos com fácil reciclagem após o seu fim de vida útil.

Considerando o estudo desenvolvido neste trabalho, pode-se concluir que os testes por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura-MEV contribuí para o estudo qualitativo/quantitativo de metais em PCI de resíduos eletrônicos; em que foi possível determinar os seguintes metais nas PCI analisadas: Ni, Cu, Au, Ag, Sn, Si, Cr, Fe e Pb. Sendo possível afirmar que os resultados foram satisfatórios para a metodologia desenvolvida.

O tratamento das PCI com NaOH se mostrou eficaz para remoção da resina que recobre as placas. Sendo que este tratamento é aplicado em substituição ao tratamento mecânico de moagem e trituração das PCI; que é largamente utilizado em outras literaturas científicas.

Os testes de espectroscopia de absorção atômica permitiram determinar a quantidade dos elementos metálicos cobalto, cobre, ferro, ouro, níquel, prata e zinco contidos nos lixiviados, obtidos após o tratamento com ácido clorídrico-HCl e água-régia.

Visitou-se a Associação dos Trabalhadores da Limpeza e Reciclagem de Materiais Recicláveis de João Monlevade-MG, onde foi verificado pouco aproveitamento dos resíduos eletrônicos que se acumulam no galpão da associação; sendo o cobre, o metal de maior interesse dos associados, obtido a partir da separação manual destes resíduos.

Foi realizada uma visita na empresa Bioextratos, localizada na cidade de Alvinópolis-MG, em que foi observado que os resíduos eletrônicos gerados pela empresa são encaminhados para empresas de reciclagem destes resíduos fora da microrregião do Médio Piracicaba-MG.

Tais visitas contribuíram para visualizar em campo os desafios, riscos e oportunidades no gerenciamento ambientalmente adequado de resíduos eletrônicos.

Como próxima etapa, o presente trabalho buscará propor uma solução para o tratamento de PCI de equipamentos de pequeno porte, com o objetivo de recuperar os metais de maior valor agregado através da hidrometalurgia. Sendo fundamentado na revisão de literaturas científicas, tais como: (KINOSHITA et al., 2003) que demonstra a recuperação de metais através da hidrometalurgia; (GOUVEIA, 2014) que trata da recuperação de cobre e ouro de PCI por via hidrometalúrgica; (ROCHA; SOBRAL, 2011), que demonstra a extração de metais preciosos a partir de sucata eletrônica por eletrolixiviação; (RAO et al., 2021), que faz a reciclagem de cobre e ouro de lixo eletrônico por um processo de lixiviação e extração de solvente em dois estágios; e (SILVAS, 2014),

que utiliza a hidrometalurgia e biohidrometalurgia para reciclagem de placas de circuito impresso.

Trabalhos futuros poderão ser desenvolvidos na busca e desenvolvimento de inovações e/ou melhorias para a coleta, tratamento, recuperação e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos eletrônicos; estudos de mercado destes resíduos, custos do processo para realizar a mineração urbana; além de associações, cooperativas e empreendimentos que promovam o manejo adequado e responsável destes resíduos na microrregião do Médio Piracicaba - MG, garantindo o desenvolvimento sustentável local. Elaborar um relatório sobre a viabilidade econômica da mineração urbana local de resíduos eletrônicos; propor um sistema de conscientização, por meio de cartilha, para estratégias de coleta em supermercados, escolas, universidades, dentre outros.

# Referências

ABINEE, A. B. d. I. E. e. E. *Propostas para a Inserção do Brasil na 4ª Revolução Industrial*. 2018. <<https://www.abinee.org.br/programas/imagens/prog19/>>. Acesso em 25 de janeiro 2022. 2, 4

ABRELPE. *Estimativas dos custos para viabilizar a universalização da destinação adequada de resíduos sólidos no Brasil*. 2015. <<http://abrelpe.org.br/estimativa-dos-custos-para-viabilizar-a-universalizacao-da-destinacao-adequada-de-residuos-solidos-no-brasil>>. Acesso em 30 de janeiro 2022. 6

AZEVEDO, L. P. et al. E-waste management and sustainability: a case study in brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, Springer, v. 24, n. 32, p. 25221–25232, 2017. 4, 5

BALDÉ, C. P. et al. *The global e-waste monitor 2017: Quantities, flows and resources*. [S.l.]: United Nations University, International Telecommunication Union, and . . . , 2017. 1, 44

BALDE, C. P. et al. E-waste statistics-guidelines on classification, reporting and indicators”, united nations university, ias-scycle, bonn (germany) 2015, 51 pages (isbn print: 978-92-808-4553-2)(with cp balde, k. blumenthal, s. fondeur gill, m. kern, p. micheli, e. UNU, 2015. 11, 12

BRADLEY, A.; JAMES, R. J. Web scraping using r. *Advances in Methods and Practices in Psychological Science*, Sage Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 2, n. 3, p. 264–270, 2019. 17

BRASIL. *Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei 12.305*. 2010. <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em 15 de abril 2019. 2

BRASIL, M. d. D. R. *Novo Marco de Saneamento sancionado e garante avanços para o País*. 2020. <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2020/07/novo-marco-de-saneamento-e-sancionado-e-garante-avancos-para-o-pais#:~:text=O>>. Acesso em 15 de fevereiro 2022. 8

BRASIL, M. d. D. R. *Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Visão Geral ano de referência 2020*. 2021. <<http://www.snis.gov.br/diagnosticos>>. Acesso em 25 de fevereiro 2022. 3, 13

BRASIL, M. d. M. A. *Cidades Sustentáveis*. 2019. <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis.html>>. Acesso em 22 de janeiro 2022. 2

CALDAS, M. P. K. *Síntese de nanopartículas de prata a partir da reciclagem de placas de circuito impresso*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2017. 14, 15

CHERNEV, L. M. *Hábitos de consumo e descarte de aparelhos celulares em Londrina/Pr*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013. 17

- COLE-HAMILTON, D. J. Elements of scarcity. *Chemistry International*, De Gruyter, v. 41, n. 4, p. 23–28, 2019. 10
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. *Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores*. [S.l.]: EdiPUCRS, 2007. 15
- DUARTE, L. d. C. et al. Aplicações de microscopia eletrônica de varredura (mev) e sistema de energia dispersiva (eds) no estudo de gemas exemplos brasileiros. *Pesquisas em Geociências. Porto Alegre, RS. Vol. 30, n. 2 (2003), p. 3-15.*, 2003. 15
- EUCHEMS. *Element Scarcity – EuChemS Periodic Table. European Chemical Society*. 2019. <<https://www.euchems.eu/euchems-periodic-table/>>. Acesso em 17 de dezembro 2021. 10
- FORTI, V. et al. The global e-waste monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential. United Nations University/United Nations Institute for Training and Research . . . , 2020. 1
- FREITAS, E. *Recursos Minerais*. 2022. <<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/recursos-minerais.htm>>. Acesso em 7 de março 2022.
- FROES, F. A pandemia a sars-cov-2: a origem, a inevitabilidade e o que precisamos de aprender. *Revista Militar*, n. 6/7, p. 583–589, 2020. 1
- GOUVEIA, A. R. Recuperação de metais de placas de circuito impresso por via hidrometalúrgica. 2014. 14, 45
- IBGE. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Panoramama do Brasil*. 2022. <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>>. Acesso em 02 de março 2022. 3
- ISWA. *The Impact of the 4th Industrial Revolution on the Waste Management*. 2017. [Urlhttps://www.iswa.org/index.php?eID=tx;swaknowledgebase\\_downloaddocumentUid=4945](https://www.iswa.org/index.php?eID=tx;swaknowledgebase_downloaddocumentUid=4945). Acesso em 12 de fevereiro 2022. 4
- JESUS, T. A. de; CASQUEIRA, R. de G. Caracterização e beneficiamento primário de placas de circuito impresso (pci) de telefones celulares. *Revista Eletrônica TECEN*, v. 8, n. 2, p. 53–64, 2015. 14
- JÚNIOR, S. d. S. H. et al. Processamento de placas de circuito impresso de equipamentos eletroeletrônicos de pequeno porte. *Química Nova*, SciELO Brasil, v. 36, n. 4, p. 570–576, 2013. 11, 14, 22, 23
- KINOSHITA, T. et al. Metal recovery from non-mounted printed wiring boards via hydrometallurgical processing. *Hydrometallurgy*, Elsevier, v. 69, n. 1-3, p. 73–79, 2003. 14, 45
- LACY, P.; WAUGHAY, D. Harnessing the fourth industrial revolution for the circular economy: Consumer electronics and plastics packaging. In: GENEVA, SWITZERLAND, WORLD ECONOMIC FORUM: PLATFORM FOR ACCELERATING THE . . . . [S.l.], 2018. 2, 44
- LANA, Z. M. d. O. A atividade mineradora em minas gerais e em ouro preto: impactos socioambientais e intervenções para a sustentabilidade. 2015. 4

- LI, H.; EKSTEEN, J.; ORABY, E. Hydrometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards (wpcbs): Current status and perspectives—a review. *Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier, v. 139, p. 122–139, 2018. 11, 14
- MEIRELLES, F. S. Pesquisa anual do fgvcia. *Uso da TI—Tecnologia da Informação nas Empresas. Fundação Getúlio Vargas*, 2020. 1
- MENDES, A. B. G. et al. *Aparelhos celulares: importante instrumento de Transmissão de patógenos na comunidade*. [S.l.]: NewsLab, 2018. 9
- MENIGHINI, G. V. et al. Impacto da pandemia na demanda por aplicativo de delivery de alimentação em piracicaba/sp. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 6, p. e28310615945–e28310615945, 2021. 17
- MORRIS, B. *Por que a África tem enviado toneladas de celulares quebrados para Europa. Folha de São Paulo*. 2021. <[https://f5.folha.uol.com.br/voceviu/2021/12/por-que-africa-tem-enviado-toneladas-de-celulares-quebrados-para-europa.shtml?pwgt=kbezvjxx7qdy4pc3lf5wt59449g815hff54em71lpax660hu&utm\\_source=whatsapp&utm\\_medium=social&utm\\_campaign=compwagift](https://f5.folha.uol.com.br/voceviu/2021/12/por-que-africa-tem-enviado-toneladas-de-celulares-quebrados-para-europa.shtml?pwgt=kbezvjxx7qdy4pc3lf5wt59449g815hff54em71lpax660hu&utm_source=whatsapp&utm_medium=social&utm_campaign=compwagift)>. Acesso em 17 de janeiro 2022. 1
- MURTHY, V.; RAMAKRISHNA, S. A review on global e-waste management: Urban mining towards a sustainable future and circular economy. *Sustainability*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 14, n. 2, p. 647, 2022. 6, 11, 13, 14, 44
- NETO, J. F. de O.; SILVA, M. M.; SANTOS, S. M. A mini-review of e-waste management in brazil: Perspectives and challenges. *CLEAN—Soil, Air, Water*, Wiley Online Library, v. 47, n. 9, p. 1900152, 2019. 3
- ONU. *Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. 2015. <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>>. Acesso em 15 de dezembro 2021. 2, 6, 8
- ONU. *Até 2050 serão necessários três planetas para suprir necessidades da população mundial, alerta ONU*. 2016. <<https://nacoesunidas.org/ate-2050-serao-necessarios-tres-planetras-para-suprir-necessidades-da-populacao-mundial-alerta-onu/>>. Acesso em 15 de janeiro 2022. 2
- RAO, M. D. et al. Recycling copper and gold from e-waste by a two-stage leaching and solvent extraction process. *Separation and Purification Technology*, Elsevier, v. 263, p. 118400, 2021. 14, 45
- RAVALE A. KHADE, N. P. S. C. U. Smart trash: An efficient way for monitoring solid waste management. In: *2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1135–1137. 2
- RBA. *CÓDIGO DE CONDUTA DA RESPONSIBLE BUSINESS ALLIANCE (RBA) – Aliança Empresarial Responsável*. 2018. <[https://www.responsiblebusiness.org/media/docs/RBACodeofConduct6.0\\_Portugese.pdf](https://www.responsiblebusiness.org/media/docs/RBACodeofConduct6.0_Portugese.pdf)>. Acesso em 20 de janeiro 2022. 12
- RIBEIRO, P. P. M. Concentração de metais contidos em placas de circuito impresso de computadores descartados. *Projeto de graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro*, 2013. 14, 15
- ROCHA, P. M. d.; SOBRAL, L. G. S. Extração de metais preciosos a partir de sucata eletrônica por eletrolixiviação. CETEM, 2011. 45

- ROESER, H. M. P.; ROESER, P. A. O quadrilátero ferrífero-mg, brasil: Aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados. *Geonomos*, 2010. 4
- SANTANA, Í. L. D. C. Do 1g ao 5g: Evolucao das redes de telefonia movel. 2016. 17, 25
- SETHURAJAN, M. et al. Recent advances on hydrometallurgical recovery of critical and precious elements from end of life electronic wastes-a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, Taylor & Francis, v. 49, n. 3, p. 212–275, 2019. 14
- SILVAS, F. P. C. *Utilização de hidrometalurgia e biohidrometalurgia para reciclagem de placas de circuito impresso*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2014. 14, 45
- SKOOG, D. et al. Fundamentos de química analítica (novena edición ed.). *México: CENGAGE Learning*, 2015. 15, 16
- STEINERT. *Reciclagem de sucata eletrônica*. 2022. <<https://steinertglobal.com/br/reciclagem-de-metais/reciclagem-de-sucata-eletronica/#overlay2081>>. Acesso em 7 de março 2022. 4
- STEP, I. *What is e-waste?* 2019. <<https://www.step-initiative.org>>. Acesso em 11 de fevereiro 2022. 1, 2, 11, 12, 13
- THERMOFISHER, C. *MATERIALS SCIENCE Energy Dispersive Spectroscopy Energy dispersive X-ray spectroscopy elemental mapping for reliable chemical characterization*. 2022. <<https://www.thermofisher.com/br/en/home/materials-science/eds-technology.html>>. Acesso em 11 de março 2022. 15
- TOCCI RONALD J, W. N. S. M. G. L. M. C. *Sistemas digitais: princípios e aplicações*. 11. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 2011. 9
- V. BALDÉ C.P., K. R. F. *E-waste Statistics Guidelines on Classification, Reporting and Indicators, second edition*. [S.l.], 2017. 6, 9
- VEIT, H. M. Geração e destino dos resíduos eletro-eletrônicos. *VII Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental*, 2010. 11
- WEETMAN, C. *Economia Circular: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa*. [S.l.]: Autêntica Business, 2019. 13, 44
- XAVIER, L. H.; CARVALHO, T. C. *Gestão de resíduos eletroeletrônicos*. [S.l.]: Elsevier, 2014. 1, 4, 9, 10, 11
- XAVIER, L. H.; LINS, F. A. F. Mineração urbana de resíduos eletroeletrônicos: uma nova fronteira a explorar no brasil. *Brasil Mineral*, v. 379, p. 22–26, 2018. 6, 8, 11, 13



## TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Um estudo sobre economia circular e mineração urbana de resíduos eletrônicos na microrregião do Médio Piracicaba -MG.” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 20 de junho de 2022.

---

Maycon Duarte Pereira