



**Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP**  
**Escola de Minas**  
**Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais**  
**Campus Morro do Cruzeiro**  
**Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil**



**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**“CARACTERIZAÇÃO DE UNIDADES CENTRAIS DE**  
**PROCESSAMENTO DE COMPUTADORES VISANDO À**  
**RECUPERAÇÃO DE METAIS NOBRES”**

**Caio Arantes Magalhães**

**Ouro Preto, março de 2023**

**Caio Arantes Magalhães**

**Caracterização de unidades centrais de processamento de computadores visando à  
recuperação de metais nobres**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalurgista.

**Orientador: Prof. Dr. Versiane Albes Leão.**

**Coorientador: Me. Rodrigo Ferreira Gomes.**

**Ouro Preto, março de 2023**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M188c Magalhães, Caio.

Caracterização de unidades centrais de processamento de computadores visando à recuperação de metais nobres. [manuscrito] / Caio Magalhães. - 2023.

42 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Versiane Leão.

Coorientador: Prof. Me. Rodrigo Gomes.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Metais - Reaproveitamento - Mineração urbana. 2. Economia - Economia circular. 3. Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE). 4. Unidade Central de Processamento (CPU). 5. Placas de Circuito Impresso (PCI). 6. Metais preciosos. I. Leão, Versiane. II. Gomes, Rodrigo. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 62-5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Caio Arantes Magalhães**

### "Caracterização de unidades centrais de processamento de computadores visando à recuperação de metais nobres"

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

Aprovada em 02 de março de 2023

#### Membros da banca

Dr. - Versiane Albis Leão - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Me. - Rodrigo Ferreira Gomes - Coorientador (REDEMAT/Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr. - Gilberto Henrique Tavares Álvares da Silva - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Me. - Matheus Mello Pereira - (REDEMAT/Universidade Federal de Ouro Preto)

Versiane Albis Leão, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 26/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Versiane Albis Leao, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/04/2023, às 10:31, 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 **0515038** e o código CRC **OCAF2E40**.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar expressando minha gratidão à minha família, que me apoiou incondicionalmente durante toda a minha jornada dentro da faculdade. Suas palavras de encorajamento e motivação foram fundamentais para eu superar os desafios e alcançar meus objetivos acadêmicos.

Agradeço, em especial, aos moradores da República FG, que me receberam de braços abertos. O convívio com cada um foi enriquecedor e me ajudou a crescer não só academicamente, mas também como pessoa. Também sou imensamente grato aos ex-alunos da República FG, que me orientaram e compartilharam suas experiências acadêmicas e profissionais comigo. Suas contribuições foram e continuaram sendo essenciais para o desenvolvimento da minha carreira como engenheiro e como pessoa.

Não poderia deixar de agradecer à Escola de Minas e à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) em especial aos professores por me proporcionarem uma educação de qualidade e uma base sólida de conhecimentos técnicos. Estou orgulhoso de ser parte dessa instituição e de sua longa história.

Quero também expressar minha sincera gratidão à AngloGold Ashanti Brasil pela oportunidade de estágio. Em especial a todos da gerência e operação da planta metalúrgica de CDS2, além dos meus colegas estagiários em Santa Barbara - MG. Suas disposições em compartilhar conhecimentos, experiências e informações, fizeram grande diferença para realização desta etapa da minha vida. Foi uma honra trabalhar com profissionais tão experientes e competentes.

Por fim, gostaria de expressar agradecimentos ao meu coorientador Me. Rodrigo Ferreira Gomes e ao meu orientador Prof. Dr. Versiane Albes Leão por todo o enorme apoio durante a elaboração do presente trabalho. Seus esforços e contribuições foram essenciais para o sucesso deste projeto.

## RESUMO

A constante evolução da tecnologia gera uma grande obsolescência de equipamentos eletrônicos e, conseqüentemente, grandes volumes de lixo eletrônico. A adoção de práticas sustentáveis no gerenciamento de resíduos e recursos é reconhecida como uma parte importante na gestão sustentável dos recursos disponíveis. Nesse sentido, a mineração urbana junto à economia circular surge como uma alternativa sustentável para o aproveitamento de recursos que já foram utilizados e não têm mais utilidade. Um exemplo desses recursos são os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), em especial as Placas de Circuito Impresso (PCI) que apresentam um elevado teor de metais de alto valor agregado, tornando sua reciclagem economicamente atraente. No entanto, a recuperação de metais valiosos presentes em componentes eletrônicos como a Unidade Central de Processamento (CPU) ainda é pouco explorada. Sendo assim, nesta monografia teve-se como objetivo caracterizar amostras de CPU obtidas a partir de PCI de computadores *desktop*. Para isso, as CPU utilizadas foram submetidas em um trabalho anterior a etapas de desmantelamento manual, fragmentação, moagem e separação magnética. Com isso, a amostra a ser utilizada foi composta por uma fração de partículas não magnéticas, as quais foram homogeneizadas e quarteadas para que fossem realizados os ensaios de caracterização física e química. Para que fosse submetida à técnica de Espectrometria de Emissão Óptica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) para a quantificação dos elementos químicos presentes, cerca de 0,25g da amostra foram dissolvidos em água-régia invertida e a solução resultante foi encaminhada à técnica de ICP-OES. Além disso, a análise por Difractometria de Raios X (DRX) foi empregada com o objetivo de analisar qualitativamente os metais presentes na amostra. O verso da CPU inteira foi avaliado por meio de análises por Microscopia Eletrônica de Varredura com Energia Dispersiva (MEV-EDS) e foi possível identificar os metais presentes nas amostras. As imagens obtidas a partir dos Elétrons Retroespalhados (BSE) também foram analisadas quimicamente com Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).

**Palavras-chave:** Mineração urbana. Economia circular. Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE). Unidade Central de Processamento (CPU). Placas de Circuito Impresso (PCI). Ensaios de caracterização. Metais.

## ABSTRACT

The constant evolution of technology generates a great obsolescence of electronic equipment and, consequently, large volumes of electronic waste. The adoption of sustainable practices in waste and resource management is recognized as an important part of sustainable management of available resources. In this sense, urban mining, together with circular economy, emerges as a sustainable alternative for the use of resources that have already been used and are no longer useful. An example of these resources is Electronic Waste (e-waste), especially Printed Circuit Boards (PCB), which have a high content of high-value-added metals, making their recycling economically attractive. However, the recovery of valuable metals presents in electronic components such as the Central Processing Unit (CPU) is still underexplored. Therefore, this monograph aimed to characterize CPU samples obtained from desktop computer PCBs. For this, the CPUs used were subjected in a previous work to manual dismantling, fragmentation, grinding, and magnetic separation stages. Thus, the sample to be used was composed of a non-magnetic particle fraction, which was homogenized and quartered for physical and chemical characterization tests. About 0.25g of the sample were dissolved in inverted aqua-regia and the resulting solution was sent to Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) for the quantification of chemical elements present. In addition, X-Ray Diffraction (XRD) analysis was employed to qualitatively analyze the metals present in the sample. The reverse side of the intact CPU was evaluated by Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDS) analysis, and it was possible to identify the metals present in the samples. The images obtained from Backscattered Electrons (BSE) were also chemically analyzed with Energy Dispersive Spectroscopy (EDS).

**Key-words:** Urban mining. Circular Economy. Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Central Processing Unit (CPU). Printed Circuit Boards (PCB). Characterization tests. Metals.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 3.1</b> – Evolução do fluxo de processos da Economia Linear até a Economia Circular. .....	15
<b>Figura 3.2</b> – Exemplo da montagem de uma Unidade Central de Processamento (CPU) .....	17
<b>Figura 3.3</b> – Unidades Centrais de Processamento (CPU).....	19
<b>Figura 5.1</b> – Imagem de elétrons retroespalhados dos pinos conectores de Unidades Centrais de Processamento (CPU) obtida por MEV com magnificação de 407 vezes.....	30
<b>Figura 5.2</b> – Imagem de elétrons retroespalhados do verso de uma Unidades Centrais de Processamento (CPU) obtida por MEV com magnificação de 47 vezes, análises químicas pontuais e mapeamento químico obtidos por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).....	31
<b>Figura 5.3</b> – Imagem de elétrons retroespalhados do verso de uma Unidades Centrais de Processamento (CPU) obtida por MEV com magnificação de 47 vezes e mapeamento químico obtidos por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).....	31
<b>Figura 5.4</b> – Difratoograma gerado a partir da análise realizada por DRX da amostra de Unidades Centrais de Processamento (CPU) cominuídas .....	33



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b> – Levantamento bibliográfico de dados com relação aos teores de metais em Unidades Centrais de Processamento (CPU) e componentes relacionados a CPU .....	21
<b>Tabela 5.1</b> – Análise química das Unidades Centrais de Processamento (CPU) obtida por Espectrometria de Emissão Óptica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) .....	34

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\pm$  – mais ou menos

$\text{Å}$  – angström ( $10^{-10}$  metros)

$\Theta$  – ângulo de varredura

## **LISTA DE SIGLAS**

- AAS – Atomic Absorption Spectrometry (Espectrometria de Absorção Atômica)
- BSE – Backscattered Electrons (Elétrons Retroespalhados)
- CPU – Central Process Unit (Unidades Centrais de Processamento)
- DRX – Difractometria de Raios X
- EC – Economia Circular
- EDS – Energy Dispersive Spectroscopy (Espectroscopia de Energia Dispersiva)
- EEE – Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
- FRX – Fluorescência de Raios X
- ICP-OES – Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (Espectrometria de Emissão Óptica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplado)
- MEV-EDS – Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva
- PCI – Placas de Circuito Impresso
- REEE – Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>13</b>
2.1	Objetivo Geral	13
2.2	Objetivos Específicos	13
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>14</b>
3.1	Mineração Urbana e a Economia Circular	14
3.2	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos	15
3.3	Placas de Circuito Impresso	16
3.4	Unidades Centrais de Processamento	18
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>26</b>
4.1	Preparação da Amostra	26
4.2	Ensaio de Caracterização	27
4.2.1	Espectrometria de emissão óptica com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES)	27
4.2.2	Difratometria de raios X (DRX)	27
4.2.3	Microscopia eletrônica de varredura com energia dispersiva (MEV-EDS)	28
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>29</b>
5.1	Caracterização das Amostras	29
5.1.1	Microscopia eletrônica de varredura com energia dispersiva (MEV-EDS)	29
5.1.2	Difratometria de raios X (DRX)	32
5.1.3	Espectrometria de emissão óptica com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES)	34
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>37</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos está sendo observada uma constante evolução da tecnologia no mundo, onde produtos eletrônicos como celulares, computadores e componentes dos mesmos estão sendo aprimorados rapidamente no decorrer do tempo. Isso, conseqüentemente ocasiona em uma grande obsolescência de equipamentos menos tecnológicos, gerando grandes volumes de lixo eletrônico (CELINSKI *et al.*, 2011). No mundo, foram geradas cerca de 53,6 milhões de toneladas de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) em 2019, com estimativa de crescimento para 74,7 milhões de toneladas até 2030 (FORTI *et al.*, 2020). Segundo Schluep *et al.* (2009), até o ano de 2009 o Brasil era o maior produtor per capita de resíduos eletrônicos, gerando cerca de 0,5kg/per capita por ano. Essa excessiva geração de resíduos eletrônicos causa problemas ambientais e sociais.

A preocupação com a sustentabilidade e eficiência no uso de recursos esta cada vez mais presente na sociedade. A adoção de práticas sustentáveis e eficientes no gerenciamento de resíduos e recursos tem sido reconhecida como uma parte importante na gestão sustentável dos recursos disponíveis (COSSU e WILLIAMS, 2015).

A mineração, como uma das principais fontes de produção de matérias-primas, tem sofrido pressão para tornar-se mais sustentável e a Economia Circular (EC) vem sendo considerada como um dos principais mecanismos para alcançar este objetivo. A implementação da EC na mineração exigirá mudanças na cultura organizacional e nos processos produtivos, gerando um modelo de “fazer-e-refazer/usar-e-reusar”. Sendo assim, a mineração urbana surge como uma alternativa sustentável para o aproveitamento de recursos que já foram utilizados e não têm mais utilidade mas ainda apresentam potencial para serem reciclados de maneira viavel economicamente (DUTHIE e LINS, 2017; XAVIER e LINS, 2018).

Certos REEE possuem quantidades significativas de metais nobres em sua composição, o que os torna uma fonte secundária de matérias-primas promissora para a produção mundial, com possibilidade de conversão desses "resíduos" em recursos. Dessa maneira, se torna importante estudar alternativas sustentáveis e viáveis economicamente para a reciclagem desses resíduos (SERPE *et al.* 2015).

Dentre os REEE, as Placas de Circuito Impresso (PCI) apresentam um elevado teor de metais de alto valor agregado, o que torna a reciclagem economicamente atraente. Além de que a presença de materiais tóxicos nas PCI acarreta em dificuldades no descarte destes resíduos (GUO *et al.* 2008). Além disso, de acordo com Bidini *et al.* (2015), existe uma escassez de estudos relacionados à recuperação de metais valiosos presentes em Componentes Eletrônicos (CE), como a Unidades Centrais de Processamento (CPU), que podem apresentar altos teores de metais como cobre (Cu), níquel (Ni), ouro (Au), entre outros, indicando a importância de novas pesquisas nessa área.

Em geral, o descarte de CPU com tecnologias obsoletas devido ao desenvolvimento constante de novas tecnologias, faz notória a importância da reciclagem dos resíduos gerados a partir de CPU (CULVER, 2005). Sendo assim, a presente monografia visa contribuir para o desenvolvimento de métodos mais sustentáveis com relação a recuperação de metais valiosos presentes em lixos eletrônicos.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Na presente monografia teve-se como objetivo caracterizar física e quimicamente amostras de Unidades Centrais de Processamento (CPU) oriundas de computadores *desktop*, com o intuito de estudar a presença e quantidade de metais que ofereçam viabilidade econômica para serem recuperados.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos consistiram em:

- i. Realizar a homogeneização e o quarteamento das amostras pulverizadas e de partículas não magnéticas de CPU;
- ii. Realizar a abertura química e determinar quantitativamente os teores dos metais contidos nas amostras de CPU pela técnica de Espectrometria de Emissão Óptica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES);
- iii. Determinar qualitativamente os metais contidos nas amostras utilizando a Difractometria de Raios X (DRX);
- iv. Realizar análises por Microscopia Eletrônica de Varredura com Energia Dispersiva (MEV-EDS) das amostras de CPU inteiras.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Mineração Urbana e a Economia Circular

De acordo com Cossu e Williams (2015), a adoção de práticas sustentáveis e eficientes no uso de recursos tem ganhado cada vez mais importância na sociedade, com a preocupação crescente em relação ao consumo de recursos não renováveis, escassez de matérias-primas, redução de espaço para disposição de resíduos e necessidade de reduzir a quantidade e o volume de resíduos gerados. A comunidade de gerenciamento de resíduos e recursos tem sido reconhecida como uma parte importante na gestão sustentável dos recursos disponíveis, com políticos, empresários e industriais adotando conceitos como *ecodesign*, pegada ecológica e desperdício zero. A mudança de atitudes sociais em relação ao gerenciamento de resíduos e a necessidade de controlar a contaminação ambiental causada por emissões do tratamento de resíduos também contribuem para essa mudança de paradigma (COSSU e WILLIAMS, 2015).

A mineração tradicional, como a principal fonte de produção de matérias-primas, tem sofrido pressão crescente para tornar-se mais sustentável. Nesse sentido, a Economia Circular (EC) tem sido considerada como um dos principais mecanismos para alcançar esse objetivo. O emprego de técnicas de reciclagem, reutilização e recuperação têm sido de grande interesse para as empresas de mineração, objetivando a redução da quantidade de resíduos gerados, bem como o melhor gerenciamento dos resíduos produzidos (XAVIER e LINS, 2018).

Diferente da mineração tradicional, a mineração urbana busca o aproveitamento de recursos que são resultantes de resíduos caracterizados pelos fatos de já terem sido consumidos e/ou aproveitados. Ou seja, enquanto na mineração tradicional tem-se a exploração de recursos naturais já existentes com viabilidade econômica, na mineração urbana tem-se o aproveitamento de materiais que já foram aproveitados e não tem mais utilidade, mas que ainda podem apresentar valor econômica. Como exemplo, tem-se os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), que possuem em sua composição metais nobres e valiosos economicamente (XAVIER e LINS, 2018).

De acordo com Ramos (2021), a EC visa aumentar a eficiência do uso dos recursos, ao mesmo tempo que reduz custos e aumenta os benefícios financeiros para as empresas, oferecendo soluções e ações como a redução de desperdício, promovendo a sustentabilidade. O foco da EC



é otimizar o ciclo produtivo mantendo o valor dos produtos, materiais e recursos economicamente competitivos. Para a implementação, o modelo exigirá mudanças na cultura organizacional e nos processos produtos, inclusive na mineração, gerando um modelo de “fazer-e-refazer/usar-e-reusar”. A Figura 3.1 ilustra a diferença entre a economia linear e a EC (DUTHIE e LINS, 2017; ASSUNÇÃO, 2019).

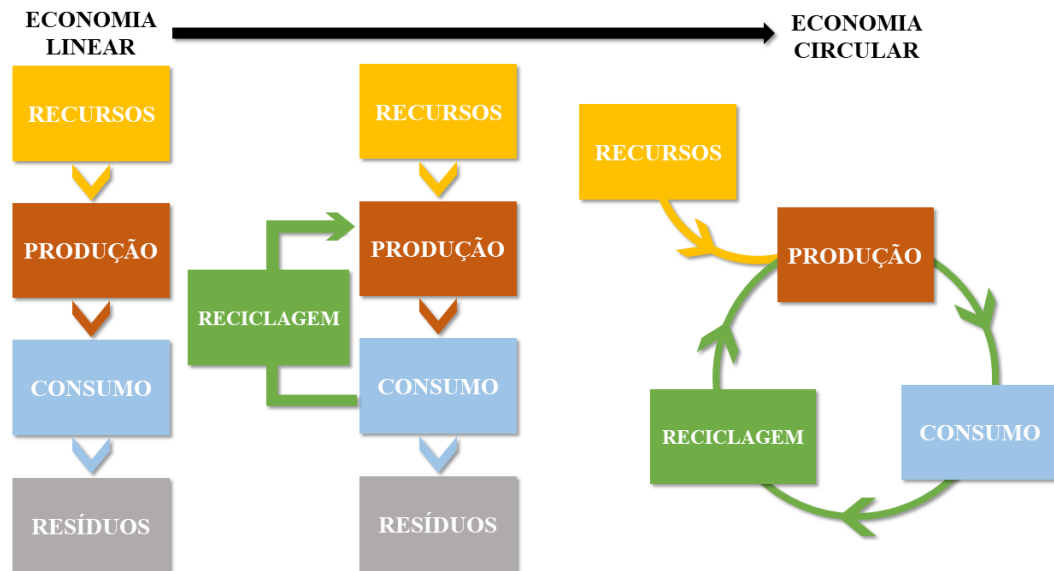


Figura 3.1 – Evolução do fluxo de processos da Economia Linear até a Economia Circular (Adaptado de ASSUNÇÃO, 2019).

### 3.2 Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

Os REEE são aqueles gerados a partir do alcance da sua vida útil ou a partir da sua obsolescência em relação ao desenvolvimento de novas tecnologias. Esses produtos são divididos em 4 (quatro) categorias: linha branca (refrigeradores e congeladores, fogões, lavadoras de roupa e louça, secadoras, condicionadores de ar e etc.), linha marrom (monitores e televisores de tubo e plasma, equipamentos de áudio, filmadoras e etc.), linha azul (batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos, furadeiras, secadores de cabelo, aspiradores de pó, cafeteiras e etc.) e linha verde (computadores *desktop* e *laptops*, acessórios de informática, *tablets* e telefones celulares e etc.). Dessa maneira, são geradas grandes quantidades destes resíduos que devem ser destinados visando à recuperação ou à reciclagem dos mesmos (CUI e ZHANG, 2008; NICOLAI, LANA e SANTOS, 2016; GIESE, LINS e XAVIER, 2021).

Segundo Forti *et al.* (2020), no mundo foram gerados cerca de 53,6 milhões de toneladas de REEE no ano de 2019, sendo possível observar um crescimento de 9,2 milhões de toneladas a partir do ano de 2014. Tendo em vista que foram gerados 44,4 milhões de toneladas. Ademais,

estima-se um aumento deste valor para 74,7 milhões de toneladas até o ano de 2030, comprovando a importância de se estudar esses resíduos, visando aplicar conceitos baseados em mineração urbana e economia circular.

No ano de 2008 o Brasil se encontrava como o maior produtor per capita de resíduos eletrônicos com 0,5kg/per capita por ano, sendo maior até mesmo que a China com 0,4kg/per capita por ano. Até o ano de 2012, cerca de 3 (três) milhões de computadores eram descartados anualmente no Brasil (SCHLUEP *et al.*, 2009; PERES, PEREIRA e MARTINS, 2012). Em decorrência dessa excessiva geração de resíduos eletrônicos, o Brasil dispõe de uma série de problemas, tanto no âmbito ambiental quanto no social. Além disso, as consequências do descarte inadequado desses resíduos eletrônicos acabam por prejudicar países vizinhos. Dessa maneira, tem aumentado cada vez mais o interesse e a motivação para o desenvolvimento de novos estudos, visando alternativas sustentáveis e viáveis economicamente para a reutilização e a reciclagem desse tipo de resíduo (JACINTO, 2010).

Quanto ao valor econômico dado aos REEE, este é proporcional à quantidade de metais com alto valor agregado presentes em sua composição. Dentre esses metais de alto valor agregado, destacam-se os metais nobres, que estão presentes em quantidades que podem variar de acordo com o tipo de componente eletrônico estudado, ou seja, enquanto em uma impressora tem-se maiores quantidade de plástico em relação ao seu peso relativo, em um celular são observadas maiores quantidades de metais. De acordo com ensaios realizados pela empresa de eletrônicos Itautec, um *notebook* possui em sua composição total, cerca de 31% de plástico, 20% de metais (ouro, alumínio, cobre e prata), 18% de vidro, 12% de ferro, 11% de cabos e 8% de Placas de Circuito Impresso (PCI) (XAVIER *et al.* 2012).

Tendo em vista a limitação das fontes naturais de recursos principalmente em relação aos metais nobres, os REEE são uma fonte secundária de matérias-primas bastante promissora para o futuro da produção mundial, visando a conversão desses “resíduos” em recursos (SERPE *et al.* 2015).

### **3.3 Placas de Circuito Impresso**

Da grande quantidade de REEE gerados anualmente no mundo, devido à obsolescência de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) sob as novas tecnologias desenvolvidas a cada dia,

cerca de 3% em peso do total são representados apenas por PCI. Dessa maneira, não só o grande volume gerado, mas também os elevados teores de metais de alto valor agregado presentes em sua composição fazem com que a reciclagem desses resíduos seja economicamente atraente (GUO *et al.* 2008).

As placas de circuito impresso são componentes fundamentais para a fabricação de EEE, permitindo a interconexão elétrica entre seus componentes microeletrônicos. A PCI é composta por um substrato dielétrico e uma camada de cobre, permitindo a definição precisa de circuitos com linhas ou trilhas a partir de processos químicos. Com a impressão de uma máscara de proteção e corrosão das áreas expostas de cobre, é possível definir facilmente um circuito, tornando as PCI um elemento essencial para a fabricação de quase todos os produtos de caráter elétrico e eletrônico. A Figura 3.2 destaca a PCI de uma Unidade Central de Processamento (CPU), além de mostrar a frente e o verso da CPU e indicar os pinos conectores (LADOU, 2006; YAMAMOTO, 2011).

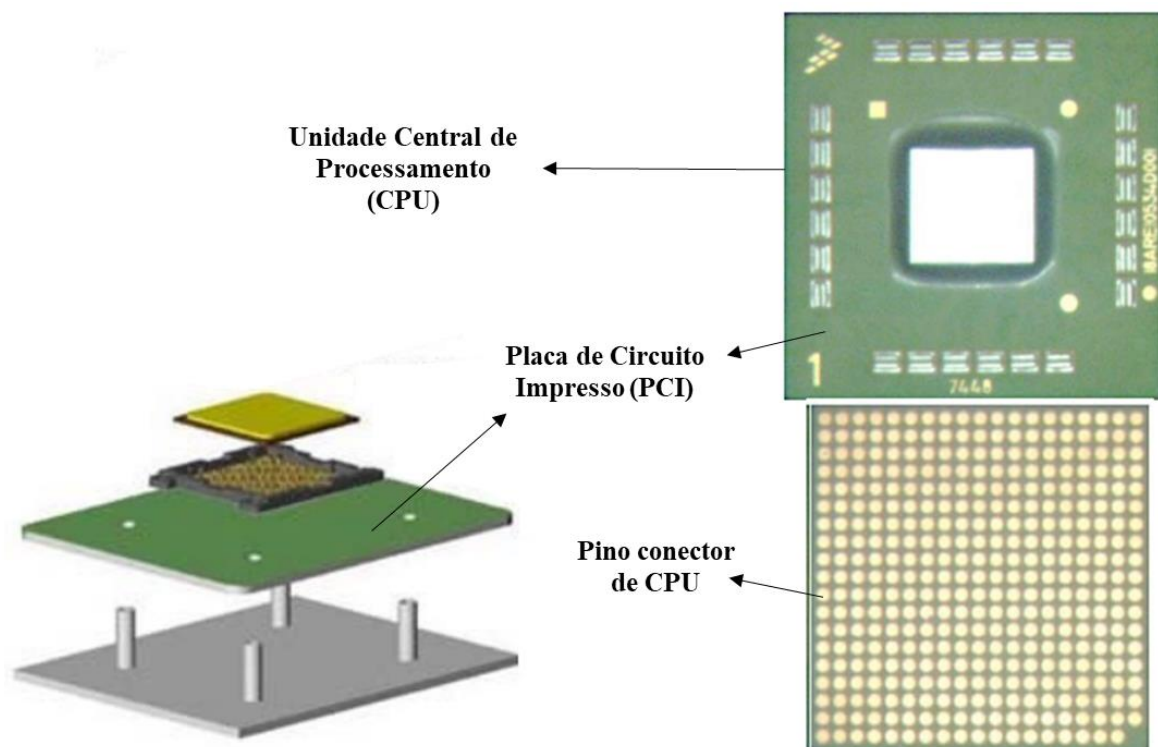


Figura 3.2 - Exemplo da montagem de uma Unidade Central de Processamento (CPU) (Adaptado de YAMAMOTO, 2011).

Em relação às PCI oriundas de computadores *desktop*, estas possuem cerca de 80% de seu valor econômico agregado somente de metais valiosos, como por exemplo cobre, zinco, estanho, ouro, prata, platina, entre outros (VEIT, PEREIRA e BERNARDES, 2002; TERENA *et al.*,

2017). No entanto, cerca de 70% em peso das PCI são constituídas de materiais não metálicos como plásticos e cerâmicas, o que acarreta em dificuldade no tratamento deste resíduo, uma vez que a disposição equivocada em aterros ou a incineração incorreta podem causar problemas ambientais devido à presença de materiais orgânicos (GUO *et al.* 2008).

Apesar da grande quantidade de PCI geradas todos os anos em todo o mundo, grande parte dos trabalhos relacionados a esse tipo de resíduo se concentram apenas no estudo do substrato das PCI. No entanto, existe uma grande escassez de estudos relacionados à recuperação de metais valiosos presentes nos componentes eletrônicos acoplados às PCI, tais como as CPU (BIDINI *et al.*, 2015).

### **3.4 Unidades Centrais de Processamento (CPU)**

A CPU tem como função ser o “cérebro” do computador, uma vez que mesma é responsável por compreender funções lógicas, emitindo ordens para outras partes do computador, como a memória e dispositivos de entrada e saída, ou seja, a CPU realiza a função de tomada de decisões simples do computador. Além disso, esses processos são realizados de maneira bastante rápida, sendo capaz de realizar centenas de milhares de decisões por segundo (THOMPSON, 1979).

Em geral, as empresas utilizam estratégias de mercado baseadas na obsolescência programada das CPU, ou seja, com o tempo é gerada a necessidade de substituir as CPU por equipamentos com novas tecnologias com melhores performances (CULVER, 2005). Como citado nos capítulos anteriores, existe então a necessidade de estudos que visam a reciclagem desses REEE, uma vez que possuem metais valiosos de grande interesse econômico, como por exemplo o ouro que pode ser encontrado no revestimento e pinos de CPU, indicados na Figura 3.3 (BIDINI *et al.*, 2015).

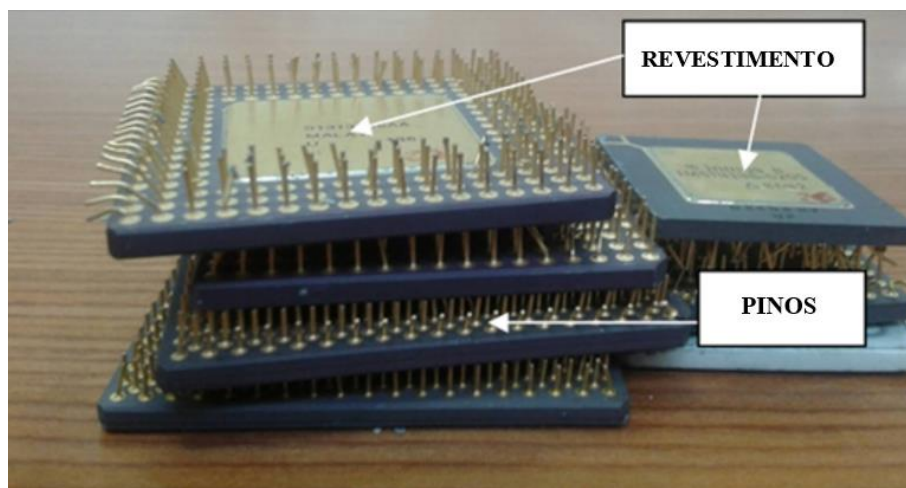


Figura 3.3 - Unidades Centrais de Processamento (CPU) (Adaptado de BIDINI *et al.*, 2015).

Gontijo e Majuste (2020), caracterizaram em seu estudo pinos conectores obtido a partir de 155 CPU oriundas de diferentes fabricantes, as quais geraram 269 gramas de pinos conectores. Foi realizada análise por Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada a Espectrometria por Energia Dispersiva (MEV-EDS) para que fossem gerados os mapas químicos dos pinos conectores. Análises realizadas por Espectrometria de Emissão Óptica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) forneceram resultados quantitativos em porcentagem peso dos teores encontrados para os pinos conectores de CPU, sendo eles: 43,10%  $\pm$  6,70 de Cu; 20,10%  $\pm$  1,20% de Ni; 1,40%  $\pm$  0,10% de Au; 0,15%  $\pm$  0,03 de Ag; 2,30%  $\pm$  0,10 de Pb; 0,84  $\pm$  0,01 de Sn; 26,00%  $\pm$  1,00% de Fe (dados apresentados na Tabela 3.1). Para a abertura química da amostra foi realizado um método com água-régia invertida, proposto no estudo por Mesquita, Silva e Majuste (2018), que consiste na utilização da mistura de HNO<sub>3</sub> com HCl na proporção de 3:1 à temperatura de 55 $\pm$ 5°C e adições sequenciais de HCl objetivando a digestão completa da amostra

Os resultados da análise por MEV-EDS apresentados por Gontijo e Majuste (2020) demonstraram que os principais compostos presentes nas amostras dos pinos conectores são Cu (cobre) e, liga de Fe-Ni (ferro e níquel) ou liga de Fe-Ni-Co (ferro, níquel e cobalto). Também foram identificados revestimentos finos de Au (ouro), além de revestimentos finos de Ni (níquel), Ni-Co (níquel e cobalto) e Co (cobalto). Foi possível identificar também diferentes tipos de ligas residuais de solda nos pinos conectores, para substratos a base de Cu, os metais Ni, Cu e Au foram detectados com altas intensidades relativas, enquanto que para os substratos a base de Fe-Ni e Fe-Ni-Co foram detectadas altas intensidades relativas de Ni, Au, Co e Fe.

Por fim, a análise feita por MEV-EDS também sugere que existe a presença de Zn (zinco) ligado ao Cu para alguns fabricantes em específico (GONTIJO e MAJUSTE, 2020).

No trabalho de Pietrelli *et al.* (2018), foi utilizado digestão por microondas para realizar a abertura química das amostras de CPU. Elas foram cominuídas até a granulometria menores que 1 mm e então colocadas em contato com soluções de HNO<sub>3</sub>, HF e HCl na proporção de 2:4:6 e mantidas por 20 minutos no sistema de digestão por microondas. Após a digestão, a solução foi evaporada e recuperada por HNO<sub>3</sub> e o método de análise química utilizado pelos autores foi a Espectrometria de Absorção Atômica (AAS). Essa análise proporcionou os seguintes resultados em porcentagem de peso dos teores: 16,63% de Cu; 7,82% de Ni; 0,33% de Au; 0,07% de Ag; 0,10% de Sn (dados apresentados na Tabela 3.1).

**Tabela 3.1** - Levantamento bibliográfico de dados com relação aos teores de metais em Unidades Centrais de Processamento (CPU) e componentes relacionados a CPU (Elaborada pelo autor, 2023).

Tipo de amostra	Abertura Química	Técnica de Análise	Concentração (%)											Referência
			Cu	Ni	Au	Al	Ag	Pb	Sn	Fe	Zn	Mn	Si	
Slots de CPU	HCl + HNO <sub>3</sub> + HClO <sub>4</sub> + HF	ICP-OES	32,25	1,13	0,01	1,60	0,04	0,16	-	-	-	-	-	(YI <i>et al.</i> , 2019)
CPU	(HCl:HNO <sub>3</sub> :HF) (6:4:2)	AAS	16,63	7,82	0,33	-	0,07	-	0,10	-	-	-	-	(PIETRELLI <i>et al.</i> , 2018)
CPU	[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :(HCl + HNO <sub>3</sub> ):HF] [1:(1):3] + H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	ICP-OES	30,51	3,61	-	5,10	0,13	0,83	1,80	9,44	0,27	0,07	9,56	(ARSHADI, YAGHMAEI e MOUSAVI, 2018)
CPU			7,78	0,89	0,19	34,10	0,38	1,49	3,08	8,61	0,67	-	-	
Pinos conectores de CPU	(HCl:HNO <sub>3</sub> ) (1:3) + HF	AAS	0,06	24,56	35,00	0,13	-	0,07	0,05	26,79	-	-	-	(BIRLOAGA <i>et al.</i> , 2013)
Pinos conectores de CPU	(HCl:HNO <sub>3</sub> ) (1:3)	ICP-OES	43,10 ± 6,70	20,10 ± 1,20	1,40 ± 0,10	-	0,15 ± 0,03	2,30 ± 0,10	0,84 ± 0,01	26,00 ± 1,00	-	-	-	(GONTIJO e MAJUSTE, 2020)

\*Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES); Espectrômetro de Absorção Atômica (AAS).

\*H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>: ácido bórico; HClO<sub>4</sub>: ácido perclórico; (HCl + HNO<sub>3</sub>): água-régia.

Já no trabalho de Yi *et al.* (2019), foi utilizado como material para estudo os *slots* oriundos das CPU, visto que esses materiais possuem uma quantidade significativa de metais economicamente valiosos em sua composição (MENG *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2019). Os *slots* foram desmontados por um sistema de desmantelamento automático para que então fossem triturados e moídos até que fossem geradas partículas com granulometria de 2 mm. Em seguida realizou o processo de secagem das partículas durante o período de 24 horas na temperatura de 70°C. Para o processo de abertura química, as partículas foram digeridas utilizando HCl-HNO<sub>3</sub> (água-régia) junto com HClO<sub>4</sub> e HF. Posteriormente, caracterizou-se as amostras por ICP-OES, e os autores obtiveram os seguintes resultados em porcentagem de peso: 32,25% de Cu; 1,13% de Ni; 0,01% de Au; 1,60% de Al; 0,04% de Ag; 0,16% de Pb (dados apresentados na Tabela 3.1).

Além do método de caracterização quantitativa realizada por ICP-OES, o estudo também utilizou do método qualitativo de Difração de Raios X (DRX) para que fosse comparado com os resultados do ICP-OES. Como resultado, os dados obtidos via DRX concordaram com os resultados obtidos via ICP-OES, confirmando a presença de Cu, Al, Au, Ag e Ni (YI *et al.* 2019).

Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018), citaram que para promover a precisão nas análises das amostras de CPU, foi necessário fragmentar as amostras em um micronizador feito de tungstênio até granulometrias menores que 100µm. Após a fragmentação, foi realizado uma etapa de caracterização do conteúdo metálico por Fluorescência de Raios X (FRX), onde se separou 3 gramas da amostra misturados com ácido bórico e em seguida a mistura foi submetida a uma pressão de 10N e 50W/60kV (potência e tensão) para que fosse gerado um comprimido necessário para realização da análise por FRX. Os autores ainda realizam uma análise por ICP-OES afim de aumentar a precisão e confiabilidade dos resultados, obtendo os seguintes teores em porcentagem de peso: 30,51% de Cu; 3,61% de Ni; 5,10% de Al; 0,13% de Ag; 0,83% de Pb; 1,80% de Sn; 9,44% de Fe; 0,27% de Zn; 0,07% de Mn; 9,56% de Si (dados apresentados na Tabela 3.1). Para essa análise foi separado 1 grama de amostra e misturada com água-régia (HCl-HNO<sub>3</sub>), peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) e ácido fluorídrico (HF) na proporção de 1:1:3 para que ocorresse a abertura química. Além disso, foi adicionado H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> à solução com o objetivo de minimizar o efeito corrosivo do HF (ácido fluorídrico), pois segundo Das e Ting (2017), a mistura de HF com água-régia é a combinação que demonstrou melhores resultados no que diz respeito à extração de metais de REEE.



No trabalho de Birloaga *et al.* (2013), foram utilizados as CPU e os pinos conectores de CPU, sendo dois tipos de amostras diferentes, ou seja, foram obtidos dois resultados de caracterização químicas diferentes. Em um primeiro momento, foram separados 5 gramas de cada amostra e moídos em um moinho de bolas planetário por aproximadamente 15 minutos. Em seguida, foi realizada a análise por AAS para cada uma das amostras (pinos conectores de CPU e CPU). Para as amostras de pinos conectores de CPU foram determinados os seguintes teores em porcentagem por peso: 0,06% de Cu; 24,56% de Ni; 35,00% de Au; 0,13% de Al; 0,07% de Pb; 0,05% de Sn; 26,79% de Fe, e para as amostras de CPU obteve-se 7,78% de Cu; 0,89% de Ni; 0,19% de Au; 34,10% de Al; 0,38% de Ag; 1,49% de Pb; 3,08% de Sn; 8,61% de Fe; 0,67% de Zn (dados apresentados na Tabela 3.1). Aproximadamente 0,3 gramas de cada amostra foram digeridos utilizando uma mistura de água-régia (HNO<sub>3</sub>:HCl) na proporção de 3:1, com ácido fluorídrico (HF) e colocados em micro-ondas por 1 hora.

Embora os resultados dos teores não sejam citados no estudo, foi realizado também uma análise por FRX que resultou na determinação dos metais Cu, Fe, Pb, Au e Ag na composição das amostras de CPU e dos pinos conectores. Porém os autores citam que a concentração destes elementos analisados por FRX foram muito próximos das concentrações analisadas por AAS (BIRLOAGA *et al.*, 2013).

As amostras utilizadas em cada um dos estudos citados estão descritas na Tabela 3.1. Apenas Pietrelli *et al.* (2018) e Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018) utilizaram CPU inteiras para a realização das análises. Birloaga *et al.* (2013) optaram por separar os pinos conectores de CPU da própria CPU buscando análises individuais para os componentes. Gontijo e Majuste (2020) realizou as análises apenas dos pinos conectores de CPU. Por fim, Yi *et al.* (2019) utilizaram os *slots* de CPU para a realização do estudo.

No que diz respeito ao método de abertura química das amostras utilizadas nos trabalhos apresentados na Tabela 3.1, todos empregaram a técnica de digestão das amostras utilizando água-régia. No estudo de Pietrelli *et al.* (2018) utilizou-se água-régia (HNO<sub>3</sub>:HCl) na proporção de 3:1, mas já nos estudos de Birloaga *et al.* (2013) e Gontijo e Majuste (2020) utilizou-se água-régia invertida, ou seja, na proporção de 1:3 (HNO<sub>3</sub>:HCl). Vale ressaltar que os demais estudos não citaram as proporções de água-régia.

Além disso, nos estudos realizados por Birloaga *et al.* (2013), Pietrelli *et al.* (2018), Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018) e Yi *et al.* (2019), além da água-régia também foi utilizado HF na mistura, como descrito na Tabela 3.1. Isso pois, de acordo com Das e Ting (2017), a mistura de HF com água-régia é a combinação que demonstrou melhores resultados do que diz a respeito à extração de metais de REEE. Além disso, de acordo com Pietrelli *et al.* (2018), foi necessária a mistura com HF para dissolver SiO<sub>2</sub>, pois a água-régia sozinha foi ineficaz.

É indicado na Tabela 3.1, que diferente dos demais estudos, Yi *et al.* (2019) utilizam HClO<sub>4</sub> junto à água-régia e, Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018) utilizaram peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) junto à água-régia e HF, na proporção de (1:1:3). Também vale citar que Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018) adicionaram H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> na mistura de digestão, pois segundo os autores o ácido bórico (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) serviu para diminuir o efeito corrosivo do HF.

Quanto às técnicas de análise utilizadas em cada estudo indicadas na Tabela 3.1, foram empregadas apenas duas técnicas diferentes, sendo elas o ICP-OES e AAS. Yi *et al.* (2019), Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018) e Gontijo e Majuste (2020) optaram por utilizar a técnica de ICP-OES. Já Pietrelli *et al.* (2018) e Birloaga *et al.* (2013) utilizaram a técnica de AAS.

Com relação aos resultados dos teores de cada elemento encontrado nas amostras, é possível observar na Tabela 3.1 a diferença entre cada estudo. Em todos os trabalhos o cobre (Cu) foi o metal presente em maior teor nas amostras, com exceção ao estudo de Birloaga *et al.* (2013), no qual os resultados encontrados mostraram menores quantidades de cobre tanto para a CPU (7,78% de Cu) quanto para os pinos conectores de CPU (0,06% de Cu) em relação aos outros elementos presentes em cada amostra.

Birloaga *et al.* (2013) ao realizarem o procedimento de caracterização individualmente para CPU e pinos conectores de CPU, encontraram maiores teores de alumínio (34,10% de Al) com relação aos outros estudos e maiores teores de ouro (35,00% de Au), níquel (24,56% de Ni) e ferro (26,79% de Fe) nos pinos conectores de CPU, como observado na Tabela 3.1. Dessa maneira, esse estudo realizado em 2013 apresentou resultados distintos dos demais estudos citados. Com relação ao estudo de Gontijo e Majuste (2020), no qual também se realizou a caracterização dos pinos conectores de CPU, é possível observar na Tabela 3.1 uma grande distinção quanto aos resultados dos teores de cobre (43,10% ± 6,70% de Cu) com relação aos

demais trabalhos. No entanto, existe uma semelhança significativa entre os dois estudos quanto aos teores de níquel.

Nos trabalhos de Yi *et al.* (2019) e Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018) foram obtidos os maiores de teores de cobre, como pode-se observar na Tabela 3.1, com relação aos demais estudos, sendo 32,25% de Cu no trabalho de Yi *et al.* (2019) e 30,51% de Cu no trabalho de Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018) e, além disso teores de Cu observados nos dois estudos são muito semelhantes. No entanto, existe uma distinção muito relevante quando ao tipo de amostra, sendo utilizado a CPU no estudo de Yi *et al.* (2019) e apenas os slots de CPU no estudo de Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018).

Comparando os resultados, observados na Tabela 3.1, dos estudos de Pietrelli *et al.* (2018), Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018) e Birloaga *et al.* (2013) que realizaram a caracterização de amostras de CPU, existe uma discrepância significativa entre os resultados. No estudo de Pietrelli *et al.* (2018), é destacado o cobre (16,63% de Cu) como elemento mais abundante seguido do níquel (7,82% de Ni), assim como no estudo de Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018). Apesar disso é notável a diferença dos teores entre os dois estudos, uma vez que o teor de cobre (16,63% de Cu) no estudo de Pietrelli *et al.* (2018) é aproximadamente a metade do teor de cobre (30,51% de Cu) do estudo de Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018), enquanto o teor de níquel (3,61% de Ni) no estudo de Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018) é aproximadamente a metade do teor de níquel (7,82% de Ni) do estudo de Pietrelli *et al.* (2018). Já na caracterização de Birloaga *et al.* (2013) com relação aos outros dois estudos citados anteriormente a discrepância é ainda maior, como pode ser observado na Tabela 3.1. Isso pode ser justificado pois Birloaga *et al.* (2013) separa os pinos conectores de CPU das CPU em si, fazendo com que seja notável a diferença entre os teores de ouro (35,00% de Au para os pinos conectores e 0,19% de Au para CPU) e cobre (0,06% de Cu para pinos conectores e 7,78% de Cu para CPU), quando comparados aos estudos de Pietrelli *et al.* (2018) e Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018).

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Para a realização do presente estudo, foram utilizadas Unidades Centrais de Processamento (CPU) coletadas em trabalho anterior (PEREIRA *et al.*, 2019) as quais foram submetidas às etapas de desmantelamento manual, fragmentação e moagem. Por meio do desmantelamento manual, os componentes eletrônicos de 100 placas de circuito impresso foram retirados com o auxílio de um alicate de ponta e de um soprador térmico e, posteriormente, as CPU presentes em cada uma das PCI foram fragmentadas, utilizando-se uma tesoura mecânica. Em seguida, fragmentos de aproximadamente 1cm<sup>2</sup> foram processados por um moinho pulverizador de panela orbital da marca Fritsch modelo Pulverisette 9. Por fim, a amostra moída foi encaminhada à etapa de separação magnética, realizada com o auxílio de um separador magnético de rolo induzido a seco da marca Dings modelo 2S504GS-1.

Para a realização do presente trabalho a amostra utilizada será composta por uma fração de, aproximadamente 227,96g de partículas não magnéticas das CPU. Foi selecionada a amostra pulverizada de partículas não magnéticas para a realização das etapas de caracterização física e química, uma vez que a mesma possui maior quantidade em peso. Vale ressaltar que a amostra de partículas não magnéticas foi primeiramente, homogeneizada e quarteada.

### **4.1 Preparação da Amostra**

Para a realização da homogeneização, o material foi disposto sobre uma lona e homogeneizado, elevando as 4 (quatro) laterais da lona alternadamente formando um ciclo. Esse procedimento foi repetido até que fossem completadas 10 sequências. Para a realização do quarteamento, a pilha anteriormente homogeneizada foi dividida em quatro partes iguais enumeradas e reunidas em duas novas pilhas, correspondentes aos índices ímpares e pares. O procedimento foi realizado novamente com uma das duas pilhas obtidas até que a massa fosse reduzida à quantidade apropriada para a realização de cada um dos ensaios de caracterização física e química.

As etapas de homogeneização e quarteamento descritas anteriormente foram realizadas no Laboratório Bio&Hidrometalurgia do Departamento de Engenharia Metalúrgica (DEMET), localizado na UFOP. Ao final dessas etapas, as frações obtidas, foram encaminhadas para a realização de cada uma das análises físicas e químicas.

## 4.2 Ensaios de Caracterização

Nos ensaios de caracterização, as amostras anteriormente homogeneizadas e quarteadas foram submetidas a análises físicas e químicas por meio das técnicas de Difratoimetria de Raios X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura com Energia Dispersiva (MEV-EDS) e Espectrometria de Emissão Óptica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). É importante salientar que para as análises de DRX e ICP-OES as amostras empregadas foram provenientes da fração não magnética pulverizada e a análise por MEV-EDS foi realizado com uma amostra inteiriça, sendo o objetivo analisar a superfície do revestimento do verso da CPU, onde se encontram os pinos conectores.

### 4.2.1 Espectrometria de emissão óptica com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES)

No método empregado, cerca de 0,25g da amostra de CPU foram mensurados com o suporte de uma balança analítica e conduzidos à abertura química, fazendo uso de água-régia invertida (1:3, HCl:HNO<sub>3</sub>) a 85°C, até que fossem completamente dissolvidos. Depois da abertura química, a solução foi filtrada por meio de papel de filtro de faixa azul e transferida a um balão volumétrico de 250ml que foi aferido com água destilada. Posteriormente, a amostra foi direcionada ao ICP-OES para que fossem quantificados os elementos químicos existentes. Salienta-se que o procedimento descrito acima foi executado em triplicidade.

A etapa de caracterização da amostra por ICP-OES, bem como o procedimento de abertura química descritos anteriormente foram realizadas no Laboratório Bio&Hidrometalurgia do Departamento de Engenharia Metalúrgica (DEMET), localizado na UFOP.

### 4.2.2 Difratoimetria de raios X (DRX)

No Laboratório de Microscopia Óptica e Difração de Raios X do DEMIN/UFOP realizou a análise das amostras em pó de partículas não magnéticas utilizando um difratômetro de raios-X da marca PanAlytical modelo X'Pert3Powder. O equipamento utilizado foi operado a uma voltagem de 45kV e corrente de 40mA e foi utilizado um filtro de níquel para obtenção da radiação K $\alpha$ Cu de comprimento de onda de 1,5406Å. Os difratogramas foram coletados pelo *software Data Colector* em um ângulo de varredura (2 $\Theta$ ) que variou de 5° a 90° em

aproximadamente 14 minutos. Posteriormente, os dados foram tratados pelo *software HighScore Plus*.

#### 4.2.3 Microscopia eletrônica de varredura com energia dispersiva (MEV-EDS)

Para avaliar os teores e disposição dos metais da CPU, foram realizadas análises complementares utilizando a técnica de MEV-EDS. Sendo assim possível identificar os elementos químicos presentes na amostra por meio de análises químicas semi-quantitativas realizadas com o auxílio da Espectrometria de Energia Dispersiva (EDS). Vale ressaltar que foi utilizado uma amostra de CPU inteira para a análise por MEV-EDS para que fossem identificados os elementos químicos presentes na superfície das soldas, da Placa de Circuito Impresso (PCI) e dos pinos conectores no verso da CPU.

As imagens de MEV (Tescan, Vega 3LMH) foram obtidas a partir dos Elétrons Retroespalhaodos (BSE), empregando uma aceleração de voltagem de 20 kV. Por meio da técnica de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), as amostras foram analisadas utilizando os modos pontual e de mapeamento. As análises por MEV-EDS foram realizadas no Laboratório de Bio&Hidrometalurgia do DEMET, com o auxílio dos Laboratório de Microscopia Eletrônica – NanoLab e do Laboratório de Tratamentos Térmicos e Microscopia, localizados na UFOP.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização das Amostras

Foi realizada a caracterização das amostras em três etapas, sendo a primeira etapa uma análise qualitativa das espécies cristalinas utilizando o método de Difractometria de Raios X (DRX), em seguida, realizou-se uma análise por Microscopia Eletrônica de Varredura com Energia Dispersiva (MEV-EDS). É importante ressaltar a diferença entre o material utilizado para a análise nessas etapas. Uma vez que, enquanto no DRX foi utilizada uma amostra pulverizada, no MEV-EDS foram feitas análises do verso das Unidades Centrais de Processamento (CPU) com o objetivo de analisar o revestimento dos pinos das CPU, pois de acordo com Bidini *et al.* (2015) é onde se encontra os maiores teores de metais nobres.

Por fim, foi realizada a análise química quantitativa dos elementos presentes na amostra pulverizada, pelo método de Espectrometria de Emissão Óptica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), por meio da qual foi possível quantificar os teores de Au, Cu e Fe. Assim como nos estudos de Birloaga *et al.* (2013) e Gontijo e Majuste (2020), foi utilizada água-régia invertida para a abertura química da amostra a ser analisada por ICP-OES, ou seja, água-régia (HCl:HNO<sub>3</sub>) na proporção de 1:3.

#### 5.1.1 Microscopia eletrônica de varredura com energia dispersiva (MEV-EDS)

Por meio da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi possível observar a estrutura dos pinos conectores e, além disso, determinar os metais presentes. Para isso, as análises físico-químicas se concentraram principalmente no revestimento dos pinos conectores e na superfície do substrato dos pinos, utilizando a Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). Foram realizadas duas análises dos pinos conectores de CPU por MEV-EDS, uma objetivando avaliar o mapeamento químico da imagem (Espectro Geral) e outra análise pontual denominada de Espectro 01, como indicado na Figura 5.1.

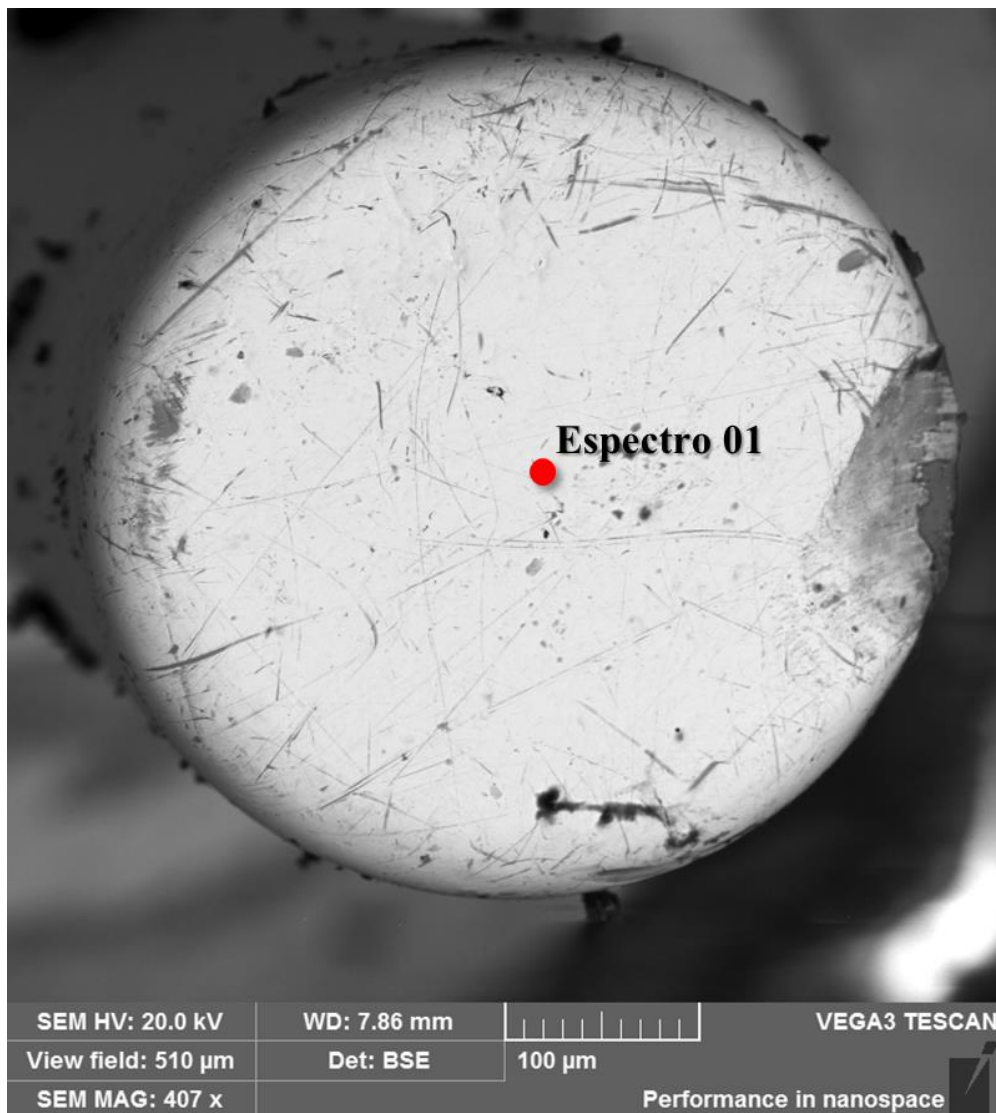
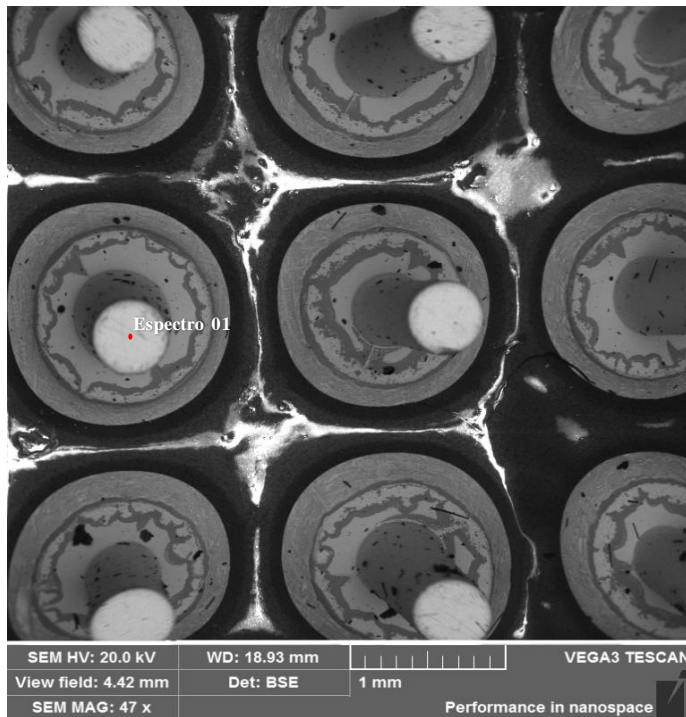


Figura 5.1 - Pino conector de CPU mostrado por MEV em aproximação de 407 vezes (Elaborada pelo autor, 2023).

É possível observar na Figura 5.1 um pino conector de CPU, obtida por meio dos Elétrons Retroespalhados (BSE) com aproximação de 407 vezes. Como visto, a superfície do pino conta com arranhões e algumas fraturas, certamente relacionadas a um longo tempo de uso ou a uma aplicação inadequada. Além disso, a análise pontual (Espectro 01) foi realizada próxima ao centro do pino e pode ser visualizada na Figura 5.2.

A Figura 5.2 mostra com menor aproximação a região dos pinos em uma CPU. De posse dos resultados providos das análises por EDS do revestimento dos pinos conectores de CPU e do substrato da Placa de Circuito Impresso (PCI), é possível observar os resultados da análise geral (Espectro Geral) com teores de Cu (1,67%), Ni (21,37%), Au (44,25%), Pb (19,16%), Sn (4,37%) e Si (2,24%). Assim como os resultados da análise pontual (Espectro 01) com teores de Ni (22,59%) e Au (77,41%).





Espectro Geral	
Elemento	Teor (%)
Cu	1,67
Ni	21,37
Au	44,25
Pb	19,16
Sn	4,37
Si	2,24

Espectro 01	
Elemento	Teor (%)
Ni	22,59
Au	77,41

Figura 5.2 - Resultado das análises quantitativas por MEV-EDS (Elaborada pelo autor, 2023).

Dos resultados decorrentes do mapeamento químico realizado pelo EDS, é possível observar na Figura 5.3 os metais presentes em cada região da CPU, separadas em três pontos denominados (A), (B) e (C) na Figura 5.3. No mapeamento químico foi possível destacar os seguintes metais: Au, Ni, Si e Sn.

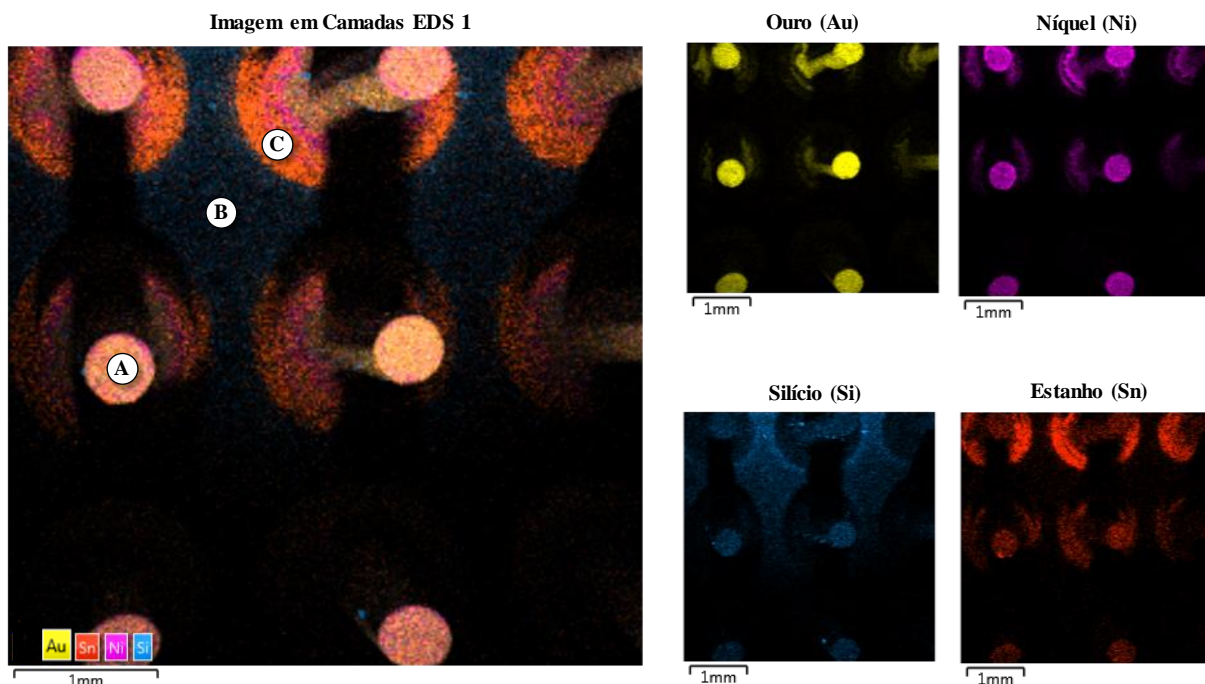


Figura 5.3 - Imagem gerada por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) (Elaborada pelo autor, 2023).

No ponto (A) da Figura 5.3, que é coincidente com o Espectro 01 (indicado na Figura 5.1), é possível observar grande quantidade de Au e Ni (representados no mapeamento em amarelo e roxo, respectivamente), sendo 77,41% de Au e 22,59% de Ni, como mostra a Figura 5.2. Vale ressaltar que como citado anteriormente no tópico 3.4, segundo Gontijo e Majuste (2020) de fato o revestimento dos pinos conectores pode ser composto por Au e Ni.

De acordo com Ladou (2006) e Yamamoto (2011), a PCI possui o objetivo de fornecer interconexões elétricas e eletrônicas entre os componentes de uma CPU, sendo compostas basicamente por uma camada dielétrica (isolante elétrico) e uma camada eletro condutora, das quais geralmente é utilizado para a camada isolante a fibra de vidro e uma película de Cu para a camada eletro condutora. Dessa maneira, como observado na Figura 5.3, é provável que a presença majoritária de Si (representado em azul) no ponto (B) se deve a um substrato de fibras de vidro, composto basicamente por Si. Vale ressaltar que Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018) também encontraram a presença de Si em seu estudo, porém vale ressaltar que foi utilizado a técnica por ICP-OES que possui distinção do método de análise por MEV-EDS.

As bases dos pinos conectores de CPU são soldadas às PCI e a solda mais usual é a base de Sn e Pb (GONÇALEZ *et al.*, 2013). O que pode explicar a grande concentração de Sn (representado em vermelho) no ponto (C) indicado na Figura 5.3, além da concentração de Pb (19,16%) apresentado na Figura 5.2. Nos estudos citados na Tabela 3.1, com exceção de Yi *et al.* (2019), também foram detectados a presença de Sn quando se utiliza as técnicas de análise por Espectrometria de Absorção Atômica (AAS) e ICP-OES, assim como a presença de Pb que não foi detectado apenas pelo estudo de Pietrelli *et al.* (2018).

### 5.1.2 Difractometria de raios X (DRX)

Assim como no estudo de Yi *et al.* (2019), a análise por DRX foi realizada com o objetivo de corroborar com os resultados dos teores dos metais encontrados na técnica de MEV-EDS descritas no tópico anterior (5.1.1) e também na técnica de ICP-OES, que será exposta no tópico subsequente (5.1.3). A Figura 5.4 mostra o difratograma gerado a partir da análise da amostra pulverizada de CPU.

Como citado no tópico 5.1.1, é esperada a presença de fibras de vidro provindo das PCI na amostra pulverizada, uma vez que as CPU possuem PCI. E a fibra de vidro sendo um material

amorfo, pode ter prejudicado a identificação de outros metais. Ainda, vale ressaltar que a técnica de DRX é qualitativa e só é possível identificar metais que possuem teor maior que aproximadamente 5% na amostra.

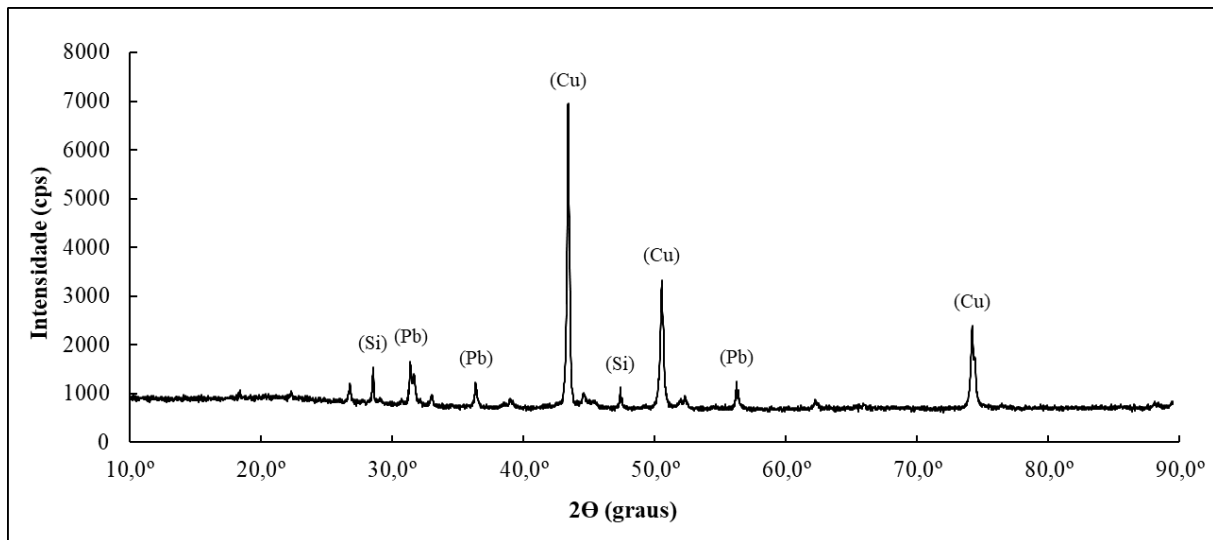


Figura 5.4 - Difratograma gerado a partir da análise realizada por DRX (Elaborada pelo autor, 2023).

É possível observar na Figura 5.4 a quantidade de oito (8) picos de maiores intensidades gerados durante a análise. Os picos são característicos dos metais de acordo com a posição angular ( $2\theta$ ) indicados no eixo horizontal, para os quais foi possível encontrar os metais, Si (em  $28,5^\circ$  e  $47,4^\circ$ ), Pb (em  $31,4^\circ$ ,  $36,3^\circ$  e  $56,2^\circ$ ) e Cu (em  $43,4^\circ$ ,  $50,5^\circ$  e  $74,2^\circ$ ).

A presença de Si pode ser justificada pelas fibras de vidro presentes nas PCI das CPU. Além disso, a identificação de Pb pode ser explicada pelas soldas a base de Sn e Pb e o alto teor de cobre é oriundo tanto do substrato dos pinos conectores quanto das PCI. É importante ressaltar que esses resultados corroboram com os encontrados na técnica de MEV-EDS, descritos no tópico anterior (5.1.1).

Na análise por DRX realizada por Yi *et al.* (2019) também foi possível identificar picos de grande intensidade característicos do Cu metálico. Embora a amostra utilizada tenha sido de *slots* de CPU (como indicado na Tabela 3.1), as mesmas também possuem PCI assim como as CPU e, de acordo com Yamamoto (2011) existe a presença de películas de cobre em sua montagem.

### 5.1.3 Espectrometria de emissão óptica com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES)

As frações obtidas na análise por ICP-OES foram digeridas utilizando água-régia invertida [(HCl:HNO<sub>3</sub>) na proporção de 1:3]. Como indicado na Tabela 3.1, nos estudos de Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018), Yi *et al.* (2019) e Gontijo e Majuste (2020) também foi utilizada água-régia invertida para a abertura química. A Tabela 5.1 apresenta os metais analisados, bem como seus respectivos teores médios em parte por milhão (ppm) e percentagem (%), além do desvio padrão obtido a partir das análises em triplicata.

**Tabela 5.1** – Resultado da análise realizada por ICP-OES.

<b>Metal</b>	<b>Teor médio (ppm)</b>	<b>Teor médio (%)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Cobre (Cu)</b>	438946,080	43,895	0,813 (%)
<b>Ouro (Au)</b>	474,061	0,047	92,214 (ppm)
<b>Ferro (Fe)</b>	6981,958	0,698	0,043 (%)

É possível observar na Tabela 5.1 que a fração de Cu (43,895%) foi a maior entre os metais analisados (Au e Fe), assim como na maioria dos estudos da literatura apresentados na Tabela 3.1. Entre os estudos que utilizaram ICP-OES, Gontijo e Majuste (2020) identificou a maior fração de Cu (43,10% ± 6,70%), seguido de Yi *et al.* (2019) que identificou 32,25% de Cu e Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018) com 30,51% de Cu. No estudo de Pietrelli *et al.* (2018) foi utilizada a técnica de análise por ASS e o cobre apresentou o maior teor entre os metais analisados, sendo este 16,63% de Cu. O desvio padrão calculado para as frações em percentagem para o cobre foi próxima de zero (0,813), evidenciando uma boa uniformidade entre os teores encontrados nas triplicatas.

A concentração de Cu corrobora com a resultado qualitativo obtido por DRX (apresentada na Figura 5.4), na qual a identificação de Cu é alcançada devido ao seu teor ser maior que 5%. Por outro lado, na análise por MEV-EDS (apresentada na Figura 5.2) foi identificado um baixo teor para o Cu (1,67%) e, de fato, como descrito no tópico 5.1.1, a análise semi-quantitativa por MEV-EDS foi realizada superficialmente nas CPU, onde se encontra o revestimento de Au e Ni dos pinos conectores e também um possível substrato de fibra de vidro na PCI da CPU.

Quanto ao teor de Au (474,061ppm ou 0,047%) indicado na Tabela 5.1 é possível observar uma semelhança dos resultados com a literatura apresentada na Tabela 3.1, onde a grande maioria encontrou baixos teores de Au em suas análises por ICP-OES e AAS. No estudo de Yi *et al.* (2019) o teor de Au determinado (0,01%) foi próximo ao encontrado no presente trabalho (0,047% de Au). No entanto, existe uma exceção no estudo realizado por Birloaga *et al.* (2013) que encontraram a maior fração sendo a de Au (35,00% de Au para os pinos conectores). Esse resultado pode ser justificado pelo fato de que os pinos conectores de CPU analisados pelos autores podem ser compostos por revestimento mais espessos de Au, diferente dos outros estudos que possivelmente analisaram pinos com finos revestimentos de Au.

O desvio padrão indicado na Tabela 5.1 para o teor de Au em ppm foi bastante elevado (92,214) o que indica baixa uniformidade entre os teores encontrados. No entanto, isso pode ser explicado devido à baixa concentração de Au (0,047%) na amostra pulverizada quando comparado aos demais metais (Cu e Fe), o que pode ter gerado dificuldades em sua quantificação por ICP-OES.

Como descrito no tópico 5.1.2, o DRX não identifica metais os quais possuem teores abaixo de 5% na amostra. De fato, não foi possível observar os picos de Au no difratograma apresentado na Figura 5.4. Já nos resultados obtidos por MEV-EDS apresentados no tópico 5.1.1, foi possível observar altas concentrações de Au (44,25% para espectro de soma de mapas e 77,41% para o Espectro 01) sobre a superfície do revestimento dos pinos conectores. Como a amostra analisada por ICP-OES foi pulverizada e composta não só de pinos conectores, mas de todos os componentes da CPU, é compreensível a baixa concentração de Au (0,047%) encontrada nessa análise.

Por fim, foi analisado o teor de Fe na amostra onde foi possível encontrar 0,698% de Fe. Os teores encontrados pela literatura (apresentados na Tabela 3.1) são mais elevados que o teor encontrado no presente trabalho, sendo 9,44% de Fe no estudo de Arshadi, Yaghmaei e Mousavi (2018), 8,61% de Fe para a amostra de CPU e 26,79% de Fe para a amostra de pinos conectores no estudo de Birloaga *et al.* (2013) e, 26,00%  $\pm$  1,00% de Fe no estudo de Gontijo e Majuste (2020). Essa grande diferença entre o presente estudo e os trabalhos da literatura pode ser explicada devido à etapa de separação magnética realizada na amostra pulverizada (como citado no capítulo 4), uma vez que o ferro sendo um elemento com alto magnetismo foi

concentrado na amostra de partículas magnéticas (HUBBARD, 1979). Dessa maneira, é esperado que o teor de Fe encontrado na análise por ICP-OES da fração não magnética seja comparativamente baixo. Vale ressaltar que o desvio padrão encontrado para os teores de Fe em percentagem peso apresentou baixo valor (0,043) indicando uma boa uniformidade entre os resultados encontrados nas triplicatas.

Em comparação com os resultados obtidos no tópico 5.1.1 e tópico 5.1.2, é possível observar que não foi possível detectar a presença de Fe pelas técnicas de análises de MEV-EDS e DRX. Isso devido ao fato de que o MEV-EDS só realizou a análise superficial das CPU e o teor de Fe (0,698%) presente na amostra pulverizada de partículas não magnéticas não alcançou o teor mínimo necessário, maior que 5%, para a detecção por DRX.

## 6 CONCLUSÃO

Em conclusão, a crescente evolução da tecnologia tem gerado um aumento significativo na geração de resíduos eletrônicos, resultando em problemas ambientais e sociais. A implementação da Economia Circular (EC) na mineração urbana surge como uma alternativa promissora para o aproveitamento de recursos já utilizados e não mais úteis. Dessa maneira, faz-se interessante dar atenção para estudos que abordem novos métodos para a reciclagem e a recuperação de metais valiosos presentes em componentes eletrônicos, tais como as Unidades Centrais de Processamento (CPU).

Em conclusão às análises realizadas, foi possível observar que as CPU são compostas por vários materiais, incluindo metais com elevado valor econômico agregado. Na análise por Espectrometria de Emissão Óptica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), o cobre (Cu) apresentou a maior concentração com 43,89%, seguido do ferro (Fe) com 0,69% e do ouro (Au) com 0,047%. A análise por Difractometria de Raios X (DRX) mostrou picos de Cu, corroborando com os resultados da técnica por ICP-OES. Por outro lado, a análise por Microscopia Eletrônica de Varredura com Energia Dispersiva (MEV-EDS) encontrou baixa concentração de Cu e alta concentração de Au, o que pode ser explicado devido à análise semi-quantitativa ter sido realizada apenas na superfície do verso da CPU. Os resultados para Au foram semelhantes aos encontrados na literatura, com concentrações de aproximadamente 474ppm. A análise por DRX não foi capaz de identificar metais com concentrações abaixo de 5%, o que explica a não identificação de picos característicos de Au e Fe no difratograma apresentado.

Portanto, as técnicas de caracterização empregadas no presente trabalho elucidaram as quantidades de metais presentes na amostra de CPU, bem como os componentes que concentram os maiores teores de elementos de interesse e podem servir como uma importante contribuição para o desenvolvimento de estratégias eficazes para a reciclagem e recuperação desses materiais. A conscientização e adoção de práticas sustentáveis são fundamentais para minimizar os impactos negativos da obsolescência tecnológica e garantir a preservação do meio ambiente e dos recursos naturais para as gerações futuras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARSHADI, M.; YAGHMAEI, S.; MOUSAVI, S. M. Content evaluation of different waste PCBs to enhance basic metals recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 139, p. 298–306, 2018.

ASSUNÇÃO, G. M. A gestão ambiental rumo à economia circular: como o Brasil se apresenta nessa discussão. **Sistemas e Gestão**, v. 14, n. 2, p. 223–231, 2019.

BIDINI, G.; FANTOZZI, F.; BARTOCCI, P.; ALESSANDRO, B. D.; AMICO, M. D.; LARANCI, P.; SCOZZA, E.; ZAGAROLI, M. Recovery of precious metals from scrap printed circuit boards through pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 111, p. 140–147, 2015.

BIRLOAGA, I.; MICHELIS, I.; FERELLA, F.; BAZATU, M.; VEGLIO, F. Study on the influence of various factors in the hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards for copper and gold recovery. **Waste Management**, v. 33, n. 4, p. 935–941, 2013.

CELINSKI, T. M.; CELINSKI, V. G.; REZENDE, H. G.; FERREIRA, J. S. Perspectivas para reuso e reciclagem do lixo eletrônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2, 2011, Uvaranas, Ponta Grossa/PR. **Anais [...]. IBEAS**, 2011, p.1-4.

COSSU, R.; WILLIAMS, I. D. Urban mining: Concepts, terminology, challenges. **Waste Management (New York, N.Y.)**, v. 45, p. 1–3, 2015.

CUI, J.; ZHANG, L. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 158, n. 2, p. 228–256, 2008.

CULVER, J. **CPU History - The CPU Museum**. Life Cycle of the CPU. 2005. Disponível em: <https://cpushack.com/life-cycle-of-cpu.html>. Acesso em: 27 jan. 2023.

DAS, S.; TING, Y. Evaluation of Wet Digestion Methods for Quantification of Metal Content in Electronic Scrap Material. **Resources**, v. 6, n. 4, p. 64, 2017.



DUTHIE, A. C. R.; LINS, F. A economia circular e o papel da mineração. **Jornada do Programa de Capacitação Interna do CETEM**, v. 6, p. 7-14, 2017.

FORTI, V.; BALDE, C. P.; KUEHR, R.; GARAM, B. **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential**. Bonn, Genebra e Rotterdam: United Nations University: United Nations Institute for Training and Research, International Telecommunication Union, and International Solid Waste Association, 2020. 120p. Disponível em: <https://collections.unu.edu/view/UNU:7737>. Acesso em: 18 dez. 2022.

GIESE, E. C.; LINS, F. A. F.; XAVIER, L. H. Desafios da reciclagem de lixo eletrônico e as cooperativas de mineração urbana / Challenges of e-waste recycling and urban mining cooperatives. **Brazilian Journal of Business**, v. 3, n. 5, p. 3647–3660, 2021.

GONÇALEZ, M. V.; SILVA, J. P.; AVANÇO, L. J.; APARECIDO, E. J.; LUCIO, L. C. CNC-like injection machine applied into smd devices with paste solder technique. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 1, n. 1, p. 1–5, 2013.

GONTIJO, T. B. Z.; MAJUSTE, D. Selective acid leaching of connector pins removed from waste central processing units with focus on gold recovery. **Hydrometallurgy**, v. 196, p. 105–432, 2020.

GUO, J.; CAO, B.; GUO, J.; XU, Z. A Plate Produced by Nonmetallic Materials of Pulverized Waste Printed Circuit Boards. **Environmental Science & Technology**, v. 42, n. 14, p. 5267–5271, 2008.

HUBBARD, J. The magnetism of iron. **Physical Review B**, v. 19, n. 5, p. 2626–2636, 1979.

JACINTO, F. M. **O lixo eletroeletrônico e risco ambiental – a amma e os impactos socioambientais oriundos de descarte de produtos de informática na cidade de Goiânia – GO**. 2010. 122f. Dissertação (Mestrado em Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente), Centro Universitário de Anápolis, Anápolis, Goiás, Brasil.

LADOU, J. Printed circuit board industry. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 209, n. 3, p. 211–219, 2006.

LIU, W.; XU, J.; HAN, J.; JIAO F.; QIN, W.; LI, Z. Kinetic and Mechanism Studies on Pyrolysis of Printed Circuit Boards in the Absence and Presence of Copper. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 7, n. 2, p. 1879–1889, 2019.

MENG, L.; GUO, L.; ZHONG, Y.; WANG, Z.; CHEN, K.; GUO, Z. Concentration of precious metals from waste printed circuit boards using supergravity separation. **Waste Management**, v. 82, p. 147–155, 2018.

MESQUITA, R. A.; SILVA, R. A. F; MAJUSTE, D. Chemical mapping and analysis of electronic components from waste PCB with focus on metal recovery. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 120, p. 107–117, 2018.

NICOLAI, F. N. P.; LANA, S. L. B.; SANTOS, M. C. L. O lixo eletrônico (e-waste) na mineração urbana: design sustentável, uma responsabilidade compartilhada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM DESIGN, 12, 2016, Belo Horizonte, Brasil. **Proceedings [...]**. Editora Blucher, 2016, p. 2088–2100.

PEREIRA, M; GOMES, R; RODRIGUES, M; LEÃO, V. Mechanical processing and characterization of printed circuit boards. In: EUROPEAN METALLURGICAL CONFERENCE. PROCEEDINGS OF EMC 2019, 2019, Düsseldorf, Germany, Clausthal-Zellerfeld. **Processdings [...]** GDMB, 2019, p. 1-18.

PERES, A. E. C.; PEREIRA, C. A.; MARTINS, A. H. Tin recovery by recycling of printed circuit boards from obsolete computers in Brazil. **Revista Ingeniería**, v. 27, p. 45–50, 2012.

PIETRELLI, L.; FRANCOLINI, I.; PIOZZI, A.; VOCCIANTE, M. Metals Recovery from Printed Circuit Boards: The Pursuit of Environmental and Economic Sustainability. **Chemical Engineering Transactions**, v. 70, p. 271–276, 2018.

RAMOS, M. A. F. G. S. **A economia circular aplicada à gestão de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos: implementação de uma linha de desmantelamento e de um novo**

**método de separação de componentes numa empresa gestora de resíduos.** 2021. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biológica - Tecnologias Ambientais), Universidade do Minho, Braga, Guimarães, Portugal, 2021.

SCHLUEP, M.; HAGELÜKEN, C.; KUEHR, R.; MAGALINI, F.; MAURER, C.; MESKERS, C.; THIEBAUD, E.; WANG, F. **Sustainable innovation and technology transfer: industrial sector studies: Recycling - from e-waste to resources.** Oktoberdruck AG, Berlin, Germany: United Nations Environmental Program (UNEP) & United Nations University (UNU), 2009. 120p. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/278849195\\_Recycling\\_-\\_from\\_e-waste\\_to\\_resources](https://www.researchgate.net/publication/278849195_Recycling_-_from_e-waste_to_resources). Acesso em: 22 jan. 2023.

SERPE, A.; RIGOLDI, A.; MARRAS, C.; ARTIZZU, F.; MERCURI, M. L.; DEPLANO, P. Chameleon behaviour of iodine in recovering noble-metals from WEEE: towards sustainability and “zero” waste. **Green Chemistry**, v. 17, n. 4, p. 2208–2216, 2015.

TERENA, L. M.; ALMEIDA NETO, A. F.; GIMENES, M. L.; VIEIRA, M. G. A. Characterisation of Printed Circuit Boards of Mobile Phones Discarded in Brazil. **Chemical Engineering Transactions**, v. 56, p. 1945–1950, 2017.

THOMPSON, T. J. An Overview of Microprocessor Central Processing Units (CPUs). **Educational Technology**, v. 19, n. 10, p. 41–44, 1979.

VEIT, H. M.; PEREIRA, C. C.; BERNARDES, A. M. Using mechanical processing in recycling printed wiring boards. **The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)**, v. 54, n. 6, p. 45–47, 2002.

XAVIER, L. H.; LINS, F. Mineração Urbana de resíduos eletroeletrônicos: uma nova fronteira a explorar no Brasil. **Brasil Mineral**, v. 379, n. 1, p. 22-26, 2018.

XAVIER, L. H.; SANTOS, M. C. L.; FRADE, N. B.; CARVALHO, C. M. B. **Aspectos socioambientais e técnicos da gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos.** São Paulo: IEE-USP: CEDIR, 2012. 42p. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/257017076\\_ASPECTOS\\_SOCIOAMBIENTAIS\\_E](https://www.researchgate.net/publication/257017076_ASPECTOS_SOCIOAMBIENTAIS_E)

\_TECNICOS\_DA\_GESTAO\_DE\_RESIDUOS\_DE\_EQUIPAMENTOS\_ELETRONICOS.

Acesso em: 15 dez. 2022.

YAMAMOTO, S. D. **Integração de sistema transceptor de 60 GHz para aplicações sem fio de interface multimídia de alta definição.** 2011. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica - Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica), Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, São Paulo, Brasil, 2011.

YI, X.; QI, Y.; LI, F.; SHU, J.; SUN, Z.; SUN, S.; CHEN, M.; PU, S. Effect of electrolyte reuse on metal recovery from waste CPU slots by slurry electrolysis. **Waste Management**, v. 95, p. 370–376, 2019.