UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA E DE MATERIAIS

ANDRESSA APARECIDA PIOVEZAN

POTENCIAL DE MINERAÇÃO SECUNDÁRIA DE METAIS EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE URNAS ELETRÔNICAS

Porto Alegre
2025

ANDRESSA APARECIDA PIOVEZAN

POTENCIAL DE MINERAÇÃO SECUNDÁRIA DE METAIS EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE URNAS ELETRÔNICAS

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Engenharia, modalidade Acadêmica

Orientadora: Profa Dra Rejane Maria Candiota Tubino
Coorientador: Prof. Dr. Weslei Monteiro Ambrós

Porto Alegre
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitora: Profa Dra Marcia Barbosa

Vice-Reitor: Prof. Dr. Pedro de Almeida Costa

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Prof. Dr. Afonso Reguly

Vice-Diretor: Prof. Dr. Ricardo Augusto Cassel

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Coordenador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Vice-Coordenadora: Profa. Dra. Annelise Kopp Alves

ANDRESSA APARECIDA PIOVEZAN

POTENCIAL DE MINERAÇÃO SECUNDÁRIA DE METAIS EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE URNAS ELETRÔNICAS

Esta Tese de Doutorado foi analisada e julgada adequada como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia e aprovada em sua forma final pela Orientadora, Coorientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

_____

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

_____

Profa Dra Rejane Maria Candiota Tubino – Orientadora
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

_____

Prof. Dr. Weslei Monteiro Ambrós – Coorientador
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

BANCA EXAMINADORA:

_____

Dr. Carlos Atalla Hidalgo Hijazin
Consultor Ambiental

_____

Dr. Pedro Jorge Walburga Keglevich de Buzin
Programa de pós graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura e Consultor Ambiental

_____

Prof. Dr. Carlos Otavio Petter
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Concluir esta tese representa muito mais do que o encerramento de um ciclo acadêmico, é o resultado de uma caminhada construída com o apoio, o incentivo e a generosidade de muitas pessoas e instituições que estiveram comigo ao longo desta jornada.

À minha orientadora, Profa. Dra. Rejane Maria Candiota Tubino, expresso minha profunda gratidão pela orientação, pela paciência e pela confiança depositada em meu trabalho. Sua dedicação e rigor científico foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa e para o meu crescimento pessoal e profissional.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Weslei Monteiro Ambrós, agradeço pelas valiosas contribuições, pela disponibilidade constante e pelas discussões técnicas enriquecedoras.

Aos professores e colegas do PPGE3M da UFRGS, pelo ambiente colaborativo, pelas trocas de conhecimento e pelo estímulo à pesquisa de qualidade.

Ao LEAMet e ao LAPROM, em especial aos Bolsistas de Iniciação Científica, vinculados ao Projeto de Pesquisa da Tese.

Ao LACOR, pela infraestrutura, suporte nas análises instrumentais de FRX e ICP-OES e na troca de conhecimentos. Cito agradecimento especial ao Prof. Dr. Hugo Veit, o qual possui notório saber na área e que me auxiliou em diversas questões dos dados da pesquisa.

Ao CMM-BR, onde pude realizar as análises químicas de MEV/EDS e ao Laboratório UNIANÁLISES da UNIVATES, pela condução cuidadosa das digestões ácidas.

Ao Tribunal Superior Eleitoral, pelo fornecimento das urnas eletrônicas que possibilitaram o desenvolvimento deste estudo e pela confiança na pesquisa científica como ferramenta de sustentabilidade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa, fundamentais para a concretização deste trabalho.

Aos amigos e colegas de pesquisa, por compartilharem ideias, dúvidas e descobertas, e por estarem presentes nos momentos de cansaço e de celebração.

Aos meus pais (Anita e Edelar) e minha irmã Danielly, por acreditarem em mim em todos os momentos.

Àqueles que, mesmo à distância, ofereceram palavras de carinho e apoio, o meu mais sincero agradecimento. Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade, direta ou indiretamente, deixo aqui o meu profundo e sincero obrigada.

RESUMO

Esta tese avaliou o potencial de agregação de valor à cadeia de reciclagem das urnas eletrônicas (UEs) por meio da caracterização físico-química de suas Placas de Circuito Impresso (PCIs), denominadas de PCI da placa a (PCIa), da placa b (PCIb), da placa c (PCIc) e da placa d (PCId) e da valoração econômica dos metais ouro (Au), prata (Ag), cobre (Cu) e Estanho (Sn). Foram aplicadas técnicas complementares de preparação e análise, incluindo cominuição, classificação granulométrica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios-X (EDS), Fluorescência de Raio-X (FRX) e Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), possibilitando compreender tanto a distribuição e a liberação dos metais quanto sua contribuição econômica. Os resultados evidenciaram que as PCIs das UEs constituem um depósito urbano altamente enriquecido. As concentrações dos metais analisados foram significativamente superiores às encontradas na mineração primária convencional. As PCIs apresentaram padrões distintos, mas parcialmente agrupáveis. Para Au, as placas b, c e d concentraram o metal predominantemente em frações finas, enquanto a PCI a mostrou comportamento híbrido com picos em fração fina e fração grossa. Para Ag, as PCIs a, b e c concentraram-se em frações finas, ao passo que a PCId apresentou maiores teores nas frações finas e nas frações grosseiras. Para Cu, todas as PCIs concentraram-se em fração intermediária e grossa e para Sn, as PCIs a, c e d mostraram maior concentração em finas e intermediárias, enquanto a b apresentou comportamento bimodal, com enriquecimento simultâneo em frações finas e grossas. Na avaliação econômica individual das PCIs, a PCIb foi a placa de maior valoração, atingindo US$ 7,453 por placa, seguida da PCIa com US$ 7,146. As PCIs c e d apresentaram valores inferiores (US$ 1,797 e US$ 0,709, respectivamente), refletindo suas menores concentrações de Au e Cu. O Au foi o principal responsável pelo valor agregado, respondendo por cerca de 75% da composição econômica das placas. Ao extrapolar os resultados para o parque total de UEs produzidas (1.489.115 unidades), obteve-se um potencial econômico de US$ 25,47 milhões, distribuídos em: US$ 19,1 milhões em Au, US$ 3,03 milhões em Cu, US$ 2,44 milhões em Ag e US$ 0,91 milhão em Sn, considerando os preços médios internacionais. Os resultados confirmam que as PCIs das UEs constituem uma fonte estratégica e altamente concentrada de metais valiosos, apresentando viabilidade técnica e econômica para a mineração secundária. O estudo reforça a importância de desenvolver rotas industriais brasileiras para recuperação de metais, fortalecendo a economia circular e reduzindo a dependência externa.

Palavras-chave: Resíduo Eletroeletrônico. Mineração secundária. Mineração urbana. Placas de Circuito Impresso de urnas eletrônicas. Caracterização**.**

ABSTRACT

This thesis evaluated the potential for adding value to the recycling chain of Brazilian electronic voting machines (UEs) through the physicochemical characterization of their Printed Circuit Boards (PCBs), designated as PCB of board a (PCIa), board b (PCIb), board c (PCIc), and board d (PCId), as well as the economic valuation of the metals gold (Au), silver (Ag), copper (Cu), and tin (Sn). A set of complementary preparation and analytical techniques was applied, including comminution, granulometric classification, Scanning Electron Microscopy with Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM–EDS), X-ray Fluorescence (XRF), and Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). These methods enabled a comprehensive understanding of metal distribution, liberation behavior, and economic significance. Results revealed that UE PCBs constitute a highly enriched urban deposit, with metal concentrations far exceeding those found in conventional primary mining. Although the PCBs exhibited distinct metallurgical behaviors, some grouping patterns were identified. For Au, PCBs b, c, and d concentrated the metal predominantly in fine fractions, while PCB a showed a hybrid behavior, with peaks in both fine and coarse fractions. For Ag, PCBs a, b, and c concentrated in fine fractions, whereas PCB d showed enrichment in both fine and coarse fractions. For Cu, all PCBs concentrated in intermediate and coarse fractions, consistent with the structural role of this metal. For Sn, PCBs a, c, and d displayed higher concentrations in fine to intermediate fractions, while PCB b exhibited a bimodal behavior, with enrichment in both fine and coarse fractions. In the individual economic assessment, PCB b presented the highest valuation, reaching US$ 7.453 per board, followed by PCB a with US$ 7.146. PCBs c and d showed lower values (US$ 1.797 and US$ 0.709, respectively), reflecting their reduced Au and Cu contents. Gold was the dominant contributor to economic value, accounting for approximately 75% of the PCB valuation. When extrapolated to the total number of UEs produced (1,489,115 units), the estimated economic potential reached US$ US$ 25.47 million, distributed as follows: US$ 19.1 million in Au, US$ 3.03 million in Cu, US$ 2.44 million in Ag, and US$ 0.91 million in Sn, based on international average prices. Overall, the findings confirm that UE PCBs represent a strategic and highly concentrated source of valuable metals, demonstrating both technical and economic feasibility for secondary mining. The study reinforces the importance of developing Brazilian industrial routes for metal recovery, strengthening circular economy initiatives and reducing dependence on external supply chains.

Keywords: Electronic Wastes. Secondary mining. Urban mining. Printed Circuit Boards of electronic voting machines. Characterization.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAS	Espectrômetro de Absorção Atômica
ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise do Ciclo de Vida
BFRS	Retardantes de Chama Bromados
BSE	Elétrons Retroespelhados
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CMM	Centro de Microscopia e Microanálise Br-Sul
CONAMA	Conselho Nacional Do Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPU	Unidade Central de Processamento
CT	Centro de Tecnologia
CVAA	Espectrometria de Absorção Atômica de Vapor Frio
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DOU	Diário Oficial da União
DP	Desvio Padrão
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
EDXRF	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia
EEE	Equipamentos Eletroeletrônicos
FAAS	Espectrometria de Absorção Atômica em Chama
FM	Fração Metálica
FNM	Fração não Metálica
FRX	Fluorescência de Raios-X
GFAA	Espectroscopia de Absorção Atômica com Forno de Grafite
ICP-MS	Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado
ICP-OES	Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado
ISO	Organização Internacional de Normatização
JE	Justiça Eleitoral
LACOR	Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais
LAPROM	Laboratório de Processamento Mineral
LEAMet	Laboratório de Estudos Ambientais para Metalurgia
LBMA	*London Bullion Market Association*
LME	*London Metal Exchange*
LOD	Limite de Quantificação
M-XRF	Microfluorescência de Raio-X
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MGP	Metais do Grupo Platina
NBR	Norma Brasileira
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONU	Organização das Nações Unidas
PCBs	Bifenilas Policloradas
PCIs	Placas de Circuito Impresso
PIB	Produto Interno Bruto
PLS	Plano de Logística Sustentável
PNMA	Política Nacional de Meio Ambiente
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos

PPB	Parte por bilhão
PPM	Parte por milhão
PTFE	Politetrafluoretileno
REEEs	Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos
RGB	*Red-Green-Blue*
POPs	Poluentes Orgânicos Persistentes
SEIs	Elétrons Secundários
SEGITEC	Seção de Gestão Integrada da Tecnologia Eleitoral
SILIC	Sistema de Controle de Licitação
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SMD	*Surface Mount Device*
TREs	Tribunais Regionais Eleitorais
TRXRF	Fluorescência de Raios-X de Reflexão Total
TSE	Tribunal Superior Eleitoral
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande Do Sul
UE	Urnas Eletrônicas
UNIVATES	Universidade do Vale do Taquari
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
VPL	Valor Presente Líquido
WDXRF	Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Comprimento de Onda

LISTA DE SÍMBOLOS

Ag	Prata
As	Arsênio
Au	Ouro
Ba	Bário
Bi	Bismuto
Br	Bromo
C	Carbono
ºC	Graus Celsius
Ca	Cálcio
Ce	Cério
Cl	Cloro
Co	Cobalto
Cu	Cobre
Dy	Disprósio
F1	Fração Granulométrica 1 (< 0,25 mm)
F2	Fração Granulométrica 2 (0,25 < n < 0,5 mm)
F3	Fração Granulométrica 3 (0,5 < n < 1,00 mm)
F4	Fração Granulométrica 4 (> 1,00 mm)
Fe	Ferro
g/t	Grama por Tonelada
Hg	Mercúrio
In	Índio
Kg	Quilograma
KV	Kilovolt
LA	Lantânio
Mg	Magnésio
mg	Miligramas
mL	Mililitros
mm	Milímetros
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
Na	Sódio
Nb	Nióbio
Nd	Neodímio
Ni	Níquel
O	Oxigênio
%	Porcentagem
P	Fósforo
Pb	Chumbo
Pd	Paládio
Pt	Platina
R$	Real Brasileiro
Sb	Antimônio
Se	Selênio
Si	Silício
Sn	Estanho
Ta	Tântalo
US$	Dólar dos Estados Unidos

V	Vanádio
W	Tungstênio
Y	Ítrio
Z	Número Atômico
Zr	Zircônio
Zn	Zinco

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização de elementos em Placas de Circuito Impresso (PCIs) de celulares 31
Figura 2 – Modelo de urna eletrônica do ano de 2009 37
Figura 3 – Modelo de urna eletrônica do ano de 2015 37
Figura 4 – Terminais de uma urna eletrônica 37
Figura 5 – Parte frontal ou dianteira do terminal do eleitor de uma urna eletrônica 37
Figura 6 – Parte traseira do terminal do eleitor de uma urna eletrônica 38
Figura 7 – UE1996 38
Figura 8 – UE1998 38
Figura 9 – UE2000 38
Figura 10 – UE2002 39
Figura 11 – UE2004 39
Figura 12 – UE2006 39
Figura 13 – UE2008 39
Figura 14 – UE2009 39
Figura 15 – UE2010 39
Figura 16 – UE2011 39
Figura 17 – UE2013 39
Figura 18 – UE2015 39
Figura 19 – UE2020 40
Figura 20 – UE2022 40
Figura 21 – Cenário do ciclo de vida das urnas eletrônicas anterior ao ano de 2008 43
Figura 22 – Cenário atual do ciclo de vida das urnas eletrônicas 43
Figura 23 – Principais componentes de urnas eletrônicas em % mássica 51
Figura 24 – Fluxo de amostragem, análise e reciclagem da empresa 53
Figura 25 – Processo de reciclagem física de Placas de Circuito Impresso (PCIs) 55
Figura 26 – Gráfico exemplificativo gerado a partir da técnica de Espectroscopia por energia dispersiva 60
Figura 27 – Etapas de aplicação do método de digestão conforme USEPA 3052 64
Figura 28 – Etapas metodológicas da pesquisa 68
Figura 29 – Abertura do local de armazenamento da urna eletrônica e verificação de seus componentes 71
Figura 30 – a) visão frontal e b) traseira da PCIa 71
Figura 31 – a) visão frontal e b) traseira da PCIb 71
Figura 32 – a) visão frontal e b) traseira da PCIc 71
Figura 33 – a) visão frontal e b) traseira da PCId 72
Figura 34 – Pequenos fragmentos da PCIb 73
Figura 35 – Moinho de Facas (Rone Indústria e Comércio de Máquinas LTDA, SRB 2305) 73
Figura 36 – Moinho de Facas (Retsch, SM300) 73
Figura 37 – Passante de 1mm do Moinho de Facas (Retsch, SM3000) 73
Figura 38 – Material após processo mecânico de cominuição no Moinho de Facas (Rone Indústria e Comércio de Máquinas LTDA, SRB 2305) 73
Figura 39 – Material após processo mecânico de cominuição no Moinho de Facas Retsch, SM300 73
Figura 40 – Peneiras utilizadas para separação das frações granulométricas das placas de circuito impresso 74
Figura 41 – Amostra pré-homogeneizada 76
Figura 42 – Amostra dividida em quatro partes iguais 76

Figura 43 – Retirada de duas partes opostas para constituição de uma nova amostra 76
Figura 44 – Volume desejado da amostra, recipiente identificado..... 76
Figura 45 – Montagem de *stub* finalizada 79
Figura 46 – Finalização da montagem das amostras a serem encaminhadas para a metalização de carbono..... 79
Figura 47 – Metalizador (BAL-TEC, SCD 050 9) 80
Figura 48 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), (Zeiss, EVO 10) 80
Figura 49 – Placa de circuito impresso (PCIc - F2), em triplicata 80
Figura 50 – Equipamento de Fluorescência de Raios-X Portátil (Thermo Scientific Niton XL3t Goldd+) acoplado na Estação de Trabalho e conectado a um computador..... 81
Figura 51 – Triplicata de amostra digerida e identificada, conforme USEPA-3052..... 83
Figura 52 – Materiais utilizados na etapa de filtração..... 85
Figura 53 – Etapa de filtração das amostras digeridas 85
Figura 54 – Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) (*Agilent Technologies*, 5110)..... 88
Figura 55 – Cabos (Código 25) 90
Figura 56 – Papel de impressão (Código 10) 90
Figura 57 – Bateria (Código 08)..... 90
Figura 58 – Carcaça (Código 22) 90
Figura 59 – PCIa (Código 24). Dimensões: 14,70 x 13,00 cm 90
Figura 60 – PCIb (Código 12). Dimensões: 20,50 x 27,20 cm 90
Figura 61 – PCIc (Código 04). Dimensões: 14,70 x 17,60 cm 91
Figura 62 – PCId (Código 23). Dimensões: 7,50 x 12,80 cm 91
Figura 63 – Imagens RGB: i) PCIa, ii) PCIb, iii) PCIc; iv) PCId e v) escala de densidade..... 94
Figura 64 – Imagem de retroespelhamento da PCIa obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto “Espectrum 2” corresponde à partícula de Au na F1 (> 0,25 mm) 97
Figura 65 – Mapeamento químico obtido por EDS do “Espectrum 2” corresponde à partícula de Au (54,62%) com presença de O (22,52%) e Br (13%) e demais elementos em proporção menores (C, Fe, Si e Ca) na F1 (> 0,25 mm)..... 97
Figura 66 – Imagem de retroespelhamento da PCIa obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto “Espectrum 3” corresponde à partícula de Au na F1 (> 0,25 mm) 98
Figura 67 – Mapeamento químico obtido por EDS do “Espectrum 3” corresponde à partícula de Au (93,02%) e demais elementos em baixas proporções (O, C, Al e Ca) na F1 (> 0,25 mm) 98
Figura 68 – Imagem de retroespelhamento da PCIa obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto “Espectrum4” corresponde à partícula de Au na F1 (> 0,25 mm) 99
Figura 69 – Mapeamento químico obtido por EDS do “Espectrum 4” corresponde à partícula de Au (68,27%) e demais elementos em baixas proporções (O, C, Ca, Si e Br) na F1 (> 0,25 mm)..... 99
Figura 70 – Imagem de retroespelhamento da PCIb, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto “Espectrum1” corresponde à partícula de Au na F2 0,25 < n < 0,5 mm..... 100
Figura 71 – Mapeamento químico obtido por EDS do “Espectrum 1” corresponde à partícula de Au (89,21%) e demais elementos em baixas proporções (C, O, W, Si e Al) na F2 0,25 < n < 0,5 mm..... 100
Figura 72 – Imagem de retroespelhamento da PCIc, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto “Espectrum1” à partícula de Au na F1 (> 0,25 mm)..... 101
Figura 73 – Mapeamento químico obtido por EDS do “*Espectrum 1*” corresponde à partícula de Au (97,13%) e demais elementos em baixas proporções (C, O e Fe) na F1 (> 0,25 mm) 101

Figura 74 – Imagem de retroespelhamento da PCIc, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto “Espectrum 2” corresponde à partícula de Au na F1 (> 0,25 mm) 102
Figura 75 – Mapeamento químico obtido por EDS do “Espectrum 2” corresponde à partícula de Au (56,51%) e demais elementos em baixas proporções (Cl, Ca, K, C, O, Fe, Al e Si) na F1 (> 0,25 mm) 102
Figura 76 – Imagem de retroespelhamento da PCIa, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto “*Espectrum 1*” corresponde à partícula de Ag na F3 (0,5 < n < 1,00 mm) .. 103
Figura 77 – Mapeamento químico obtido por EDS do “*Espectrum 1*” corresponde à partícula de Ag (71,81%) e demais elementos (C, Ca, O, Cu, Mg, Al e Si) na F3 (0,5 < n < 1,00 mm) 103
Figura 78 – Imagem de retroespelhamento da PCIb, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto “Espectrum1” corresponde à partícula de Ag na F2 (0,25 < n < 0,5 mm) ... 104
Figura 79 – Mapeamento químico obtido por EDS do “Espectrum 1” corresponde à partícula de Ag (93,37%) e demais elementos (C, O e Mg) na F2 (0,25 < n < 0,5 mm) 104
Figura 80 – Imagem de retroespelhamento da PCIa, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto “*Espectrum 4*” corresponde à partícula de Ag na F1 (> 0,25 mm) 105
Figura 81 – Mapeamento químico obtido por EDS do “*Espectrum 4*” corresponde à partícula de Ag (67,50%) e demais elementos (Cu**,** Br, Si, O, Fe e Cl) na F1 (> 0,25 mm)..... 105
Figura 82 – Imagem de retroespelhamento da PCId, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto “*Espectrum 1*” corresponde à partícula de Ag na F2 (0,25 < n < 0,5 mm) .. 106
Figura 83 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Ag (76,80%) e demais elementos (C, O, Zn e Cu) na F2 (0,25 < n < 0,5 mm) 106
Figura 84 – Imagem de retroespelhamento da PCIa obtida por MEV com magnificação de 4000x. O ponto “Espectrum 1” corresponde à partícula de Cu na F4 (> 1,00 mm)..... 107
Figura 85 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Cu (83,24%) e demais elementos (C, O, As, Ta, Al, Pb e Sn) na F4 (> 1,00 mm) 107
Figura 86 – Imagem de retroespelhamento da PCIb obtida por MEV com magnificação de 4000x. O ponto “Espectrum 2” corresponde à partícula de Cu na F4 (> 1,00 mm)..... 108
Figura 87 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Cu (75,02%) e demais elementos (C, O, Ta, Al e Si) na F4 (> 1,00 mm) 108
Figura 88 – Imagem de retroespelhamento da PCIc, obtida por MEV com magnificação de 4000x. O ponto “Espectrum 2” corresponde à partícula de Cu na F3 (0,5 < n < 1,00 mm) .. 108
Figura 89 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Cu (91,60%) e demais elementos (C, O, Fe, Ta e Si) na F3 (0,5 < n < 1,00 mm)..... 109
Figura 90 – Imagem de retroespelhamento da PCId, obtida por MEV com magnificação de 1500x. O ponto “Espectrum 8” corresponde à partícula de Cu na F3 (0,5 < n < 1,00 mm) .. 109
Figura 91 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Cu (95,04%) e demais elementos (C, O, Ca, Ta, Br, Si, Fe e Au) na F3 (0,5 < n < 1,00 mm) 109
Figura 92 – Imagem de retroespelhamento da PCId obtida por MEV com magnificação de 1250x. O ponto “Espectrum 5” corresponde à partícula de Cu na F4 (> 1,00 mm)..... 110
Figura 93 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Cu (95,91%) e demais elementos (C, O, Ca, Fe, Al, Ta, Si) na F4 (> 1,00 mm) 110
Figura 94 – Imagem de retroespelhamento da PCIa obtida por MEV com magnificação de 4000x. O ponto “*Espectrum 1*” corresponde à partícula de Sn e Pb na F1 (> 0,25 mm) 111
Figura 95 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Sn (57,16%) e Pb (38,77) na F1 (> 0,25 mm) 111
Figura 96 – Imagem de retroespelhamento da PCIb obtida por MEV com magnificação de 4000x. O ponto “*Espectrum 1*” corresponde à partícula de Sn e Pb na F2 (0,25 < n < 0,5 mm) 112

Figura 97 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Sn (46,91%), Pb (18,21) e demais elementos (C, O, Cu, Al e Si) na F2 (0,25 < n < 0,5 mm)..... 112
Figura 98 – Imagem de retroespelhamento da PCIb obtida por MEV com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 2*" corresponde à partícula de Sn e Pb na F2 (0,25 < n < 0,5 mm) 112
Figura 99 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Sn (21,46%), Pb (55,07%) e demais elementos (C, O, Cu, Fe, Al e Si) na F2 (0,25 < n < 0,5 mm) 113
Figura 100 – Imagem de retroespelhamento da PCIc, obtida por MEV, com magnificação de 1750x. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Sn e Pb na F3 (0,5 < n < 1,00 mm) 113
Figura 101 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Sn (51,87%) e Pb (42,35%) na F3 (0,5 < n < 1,00 mm)..... 113
Figura 102 – Imagem de retroespelhamento da PCIc, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Sn e Pb na F3 (0,5 < n < 1,00 mm) 114
Figura 103 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Sn (59,18%) e Pb (34,84%) na F3 (0,5 < n < 1,00 mm)..... 114
Figura 104 – Imagem de retroespelhamento da PCId, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto "Espectrum 3" corresponde à partícula de Sn e Pb na F3 (0,5 < n < 1,00 mm) 114
Figura 105 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Sn (69,50%), Pb (16,70%) e demais elementos (C, O, Cu, Al e Si) na F3 (0,5 < n < 1,00 mm) 115
Figura 106 – Imagem de retroespelhamento da PCId obtida por MEV com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Sn na F4 (>1,00 mm) 115
Figura 107 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Sn (19,84%) e Pb (71,52%) na F4 (>1,00 mm)..... 115
Figura 108 – Teor médio por fração granulométrica da Placa de Circuito Impresso (PCIa) (gramas por toneladas)..... 118
Figura 109 – Teor médio por fração granulométrica da Placa de Circuito Impresso (PCIb) (gramas por toneladas)..... 119
Figura 110 – Teor médio por fração granulométrica da Placa de Circuito Impresso (PCIc) (gramas por toneladas)..... 121
Figura 111 – Teor médio por fração granulométrica da Placa de Circuito Impresso (PCId) (gramas por toneladas)..... 122
Figura 112 – Distribuição percentual dos metais: ouro (Au) e prata (Ag) entre as frações granulométricas da Placa de Circuito Impresso (PCIa)..... 123
Figura 113 – Teores médios de ouro (Au) e prata (Ag) em (%) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIa)..... 124
Figura 114 – Teores de ouro (Au) e prata (Ag) em g/t por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIa) 125
Figura 115 – Distribuição percentual dos metais: cobre (Cu) e estanho (Sn) entre as frações granulométricas da Placa de Circuito Impresso (PCIa)..... 126
Figura 116 – Teores médios de cobre (Cu) e estanho (Sn) em (%) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIa)..... 127
Figura 117 – Teores de cobre (Cu) e estanho (Sn) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIa) em Kg/t 128
Figura 118 – Distribuição percentual dos metais: ouro (Au), prata (Ag) entre as frações granulométricas da Placa de Circuito Impresso (PCIb)..... 129
Figura 119 – Teores médios de ouro (Au) e prata (Ag) em (%) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIb)..... 130

Figura 120 – Teores de ouro (Au) e prata (Ag) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIb) em g/t 130
Figura 121 – Distribuição percentual dos metais: ouro (Au), prata (Ag), cobre (Cu) e estanho (Sn) entre as frações granulométricas da Placa de Circuito Impresso (PCIb) 131
Figura 122 – Teores médios de cobre (Cu) e estanho (Sn) em (%) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIb) 132
Figura 123 – Teores de cobre (Cu) e estanho (Sn) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIb) em Kg/t 133
Figura 124 – Distribuição percentual dos metais: ouro (Au), prata (Ag) entre as frações granulométricas da Placa de Circuito Impresso (PCIc) 134
Figura 125 – Teores médios de ouro (Au) e prata (Ag) em (%) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIc) 135
Figura 126 – Teores de ouro (Au) e prata (Ag) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIc) em g/t 136
Figura 127 – Distribuição percentual dos metais: cobre (Cu) e estanho (Sn) entre as frações granulométricas da Placa de Circuito Impresso (PCIc) 137
Figura 128 – Teores médios de cobre (Cu) e estanho (Sn) em (%) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIc) 138
Figura 129 – Teores de cobre (Cu) e estanho (Sn) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIc) em Kg/t 139
Figura 130 – Distribuição percentual dos metais: ouro (Au) e prata (Ag) entre as frações granulométricas da Placa de Circuito Impresso (PCId) 140
Figura 131 – Teores médios de ouro (Au) e prata (Ag) em (%) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCId) 141
Figura 132 – Teores de ouro (Au) e prata (Ag) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCId) em g/t 142
Figura 133 – Distribuição percentual dos metais: cobre (Cu) e estanho (Sn) entre as frações granulométricas da Placa de Circuito Impresso (PCId) 143
Figura 134 – Teores médios de cobre (Cu) e estanho (Sn) em (%) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCId) 144
Figura 135 – Distribuição de ouro (Au) por faixa granulométrica nas quatro Placas de Circuito Impresso 147
Figura 136 – Distribuição de prata (Ag) por faixa granulométrica nas Placas de Circuito Impresso 149
Figura 137 – Distribuição de cobre (Cu) por faixa granulométrica nas Placas de Circuito Impresso 151
Figura 138 – Distribuição de estanho (Sn) por faixa granulométrica nas Placas de Circuito Impresso 153
Figura 139 - Variação da cotação de ouro no período entre 29/11/2022 e 27/11/2025 168

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Mercado global de metais preciosos em resíduos eletrônicos e estimativa de potencial econômico no Brasil.....23
Quadro 2 – Maiores mercados globais de eletrônicos em 2024.....25
Quadro 3 – Principais categorias dos Resíduos Eletroeletrônicos (REEEs).....30
Quadro 4 – Quadro-síntese de resultados de diferentes tipos de placas de circuito impresso (PCIs) retiradas da revisão da literatura.....35
Quadro 5 – Informações retiradas do Sistema de Controle de Licitação (SILIC) quanto à produção, ao descarte e à destinação de urnas eletrônicas.....45
Quadro 6 – Classificação de Placas de Circuito Impresso (PCIs) segundo características físicas e composição.....47
Quadro 7 – Série histórica de descarte entre 2015 e 2020, das urnas eletrônicas.....48
Quadro 8 – Quadro quantitativo de material processado e destinação final por tipo de material.....51
Quadro 9 – Informações de propriedades e dos principais metais para reciclagem.....53
Quadro 10 – Métodos usuais para a caracterização de Placas de Circuito Impresso (PCIs).....67
Quadro 11 – Siglas e frações provindas da etapa de classificação granulométrica.....75
Quadro 12 – Comparação entre autores e os resultados das Placas de Circuito Impresso para ouro (Au).....147
Quadro 13 – Comparação entre autores e as Placas de Circuito Impresso para prata (Ag).....150
Quadro 14 – Comparação entre autores e as Placas de Circuito Impresso para cobre (Cu).....151
Quadro 15 – Comparação entre autores e as Placas de Circuito Impresso para estanho (Sn).....154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição média dos resíduos eletroeletrônicos (REEEs).....32
Tabela 2 – Composição e massa dos componentes de uma Urna Eletrônica UE96.....47
Tabela 3 – Valor mínimo de lance (R$/Kg) de urnas eletrônicas 48
Tabela 4 – Comparação entre as massas das Urnas Modelo 1996 e 2002 89
Tabela 5 – Quantidades e perdas na etapa de cominuição e de classificação granulométrica das Placas de Circuito Impresso das Urnas Eletrônicas.....92
Tabela 6 – Resultados provindos da técnica de Fluorescência de Raio-X para os elementos de interesse na Placa de Circuito Impresso (PCIa).....117
Tabela 7 – Resultados provindos da técnica de Fluorescência de Raio-X para os elementos de interesse na Placa de Circuito Impresso (PCIb) 119
Tabela 8 – Resultados provindos da técnica de Fluorescência de Raio-X para os elementos de interesse na Placa de Circuito Impresso (PCIc).....120
Tabela 9 – Resultados provindos da técnica de Fluorescência de Raio-X para os elementos de interesse na Placa de Circuito Impresso (PCId) 121
Tabela 10 – Teores de ouro (Au) e prata (Ag) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIa) 124
Tabela 11 – Teores de cobre (Cu) e estanho (Sn) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIa) 126
Tabela 12 – Teores de ouro (Au) e prata (Ag) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIb) 129
Tabela 13 – Teores de cobre (Cu) e estanho (Sn) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIb) 131
Tabela 14 – Teores em massa de ouro (Au), prata (Ag) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIc) 135
Tabela 15 – Teores em massa de cobre (Cu) e estanho (Sn) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIc).....137
Tabela 16 – Teores em massa de ouro (Au) e prata (Ag) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCId).....140
Tabela 17 – Teores em massa de cobre (Cu) e estanho (Sn) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCId).....143
Tabela 18 – Teores de ouro (Au) em porcentagem para cada Placa de Circuito Impresso e suas respectivas faixas granulométricas 146
Tabela 19 – Teores de prata (Ag) em porcentagem para cada placa de circuito impresso e suas respectivas faixas granulométricas 148
Tabela 20 – Teores de cobre (Cu) em porcentagem para cada placa de circuito impresso e suas respectivas faixas granulométricas 150
Tabela 21 – Teores de estanho (Sn) em porcentagem para cada placa de circuito impresso e suas respectivas faixas granulométricas 152
Tabela 22 – Resultados provindos das placas de circuito impresso de urnas eletrônicas por Espectrometria de Emissão óptica com Plasma Indutivamente Acoplado.....161
Tabela 23 – Quadro comparativo entre os teores dos metais nas minerações primária e secundária, com o fator de enriquecimento da mineração secundária 165
Tabela 24 – Massa total de cada Placa de Circuito Impresso (a, b, c e d) provindas de uma urna eletrônica 166
Tabela 25 – Teores dos metais Au, Ag, Cu e Sn nas frações granulométricas F1 a F4 das PCIs (A–D), obtidos por ICP-OES e expressos em gramas.....166
Tabela 26 – Preço médio dos elementos de interesse.....168

Tabela 27 – Potencial de valoração econômica dos quatro metais de interesse (Au, Ag, Cu e Sn) de cada Placa de Circuito Impresso com classificação granulométrica (F1-F4) 168
Tabela 28 – Estimativa do potencial de valoração do total de urnas eletrônicas produzidas, descartadas, em processo de descarte, descontinuadas e em uso. 170
Tabela 29 – Estimativa do potencial de valoração do total de urnas eletrônicas descartadas. 171
Tabela 30 – Estimativa do potencial de valoração do total de urnas em processo de descarte. 171
Tabela 31 – Estimativa do potencial de valoração do total de urnas descontinuadas. 171
Tabela 32 – Estimativa do potencial de valoração do total de urnas ainda em uso. 171
Tabela 33 – Sumário das estimativas de valor contido nas diferentes categorias de UEs, em diferentes cenários de precificação de ouro. 172

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18
1.1 Objetivos 20
1.1.1 Objetivo Geral 20
1.1.2 Objetivos Específicos 20
2 REVISÃO DE LITERATURA 21
2.1 Mineração primária, secundária ou urbana e resíduos eletroeletrônicos 21
2.1.1 Conceito de mineração primária e mineração secundária ou urbana 21
2.1.2 Importância ambiental, energética e econômica da recuperação de metais 24
2.1.3 Valoração Econômica de Metais: Cenários e Perspectivas de Mineração Urbana 26
2.1.4 Legislações aplicáveis 27
2.1.5 Principais categorias de equipamentos eletroeletrônicos 29
2.1.6 Composição típica de Resíduos eletroeletrônicos 30
2.1.7 Panorama global da reciclagem de resíduos eletroeletrônicos (REEEs) 36
2.2 Urnas eletrônicas: características e suprimentos 37
2.2.1 Estrutura das urnas eletrônicas e seus componentes principais 37
2.2.2 Placas de Circuito Impresso (PCIs) 40
2.2.3 Ciclo de vida de urnas eletrônicas 42
2.2.4 Dados de fabricação das urnas eletrônicas 43
2.2.5 Dados quanto aos Processos de Licitações 44
2.2.6 Etapa de destinação das urnas eletrônicas 46
2.2.7 Plano de Logística Sustentável 48
2.2.8 Gestão atual e reciclagem de urnas eletrônicas no Brasil 49
2.2.8.1 Gestão de Resíduos Eletroeletrônicos de Urnas Eletrônicas – Empresa 1 49
2.2.8.1.1 Etapa de coleta, transporte e armazenamento temporário das urnas eletrônicas 49
2.2.8.1.2 Etapa de descaracterização das urnas eletrônicas 49
2.2.8.1.3 Triagem e desmontagem manual das urnas eletrônicas 49
2.2.8.1.4 Cominuição das urnas eletrônicas 50
2.2.8.1.5 Comercialização das urnas eletrônicas 50
2.2.8.1.6 Dados obtidos com o descarte final das urnas eletrônicas 50
2.2.8.2 Gestão de Resíduos Eletroeletrônicos de Urnas Eletrônicas – Empresa 2 52
2.2.8.2.1 Etapas de processamento dos Resíduos provindos de Equipamentos Eletroeletrônicos 52
2.2.8.2.2 Informações obtidas através do site da Empresa 2 do ramo de Resíduos Eletroeletrônicos (REEEs) de Urnas Eletrônicas (UEs) 53
2.3 Técnicas de reciclagem e caracterização de placas de circuito impresso (PCIs) 54
2.3.1 Preparo das amostras 56
2.3.2 Técnicas de caracterização sem digestão 58
2.3.2.1 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) 58
2.3.2.2 Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) 60
2.3.2.3 Fluorescência de Raios-X (FRX) 61
2.3.3 Diferentes métodos de digestão de amostras 62
2.3.4 Técnicas analíticas para determinação de elementos 65
3 METODOLOGIA 68
3.1 Obtenção das urnas eletrônicas 69

3.2 Tratamento físico das Placas de Circuito Impresso 69
3.2.1 Desmontagem da urna eletrônica e componente de interesse 70
3.2.2 Cominuição das Placas de Circuito Impresso 72
3.2.3 Classificação granulométrica das Placas de Circuito Impresso 74
3.2.4 Homogeneização e amostragem representativa 75
3.3 Tratamento químico: caracterização 76
3.3.1 Escaneamento em Sensor de Transmissão de Raios-X de Energia Dupla 77
3.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) 78
3.3.3 Fluorescência de Raios-X (FRX) 80
3.3.4 Digestão conforme método da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) 3052 81
3.3.4.1 Etapa de filtração das amostras digeridas 83
3.3.4.2 Etapa de diluição das amostras digeridas e filtradas 85
3.3.5 Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) 86
3.4 Análises dos dados provindos da caracterização das Placas de Circuito Impresso (PCIs) das Urnas Eletrônicas (UEs) 88
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 89
4.1 Percepção sobre as Placas de Circuito Impresso da Urna Eletrônica 89
4.2 Perdas de material nas etapas de cominuição e de classificação granulométrica das placas de circuito impresso da urna eletrônica 91
4.3 Caracterização das Placas de Circuito Impresso da Urna Eletrônica 92
4.3.1 Escaneamento em Sensor de Transmissão de Raios-X de Energia Dupla 92
4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) 94
4.3.2.1 Ouro 96
4.3.2.2 Prata 102
4.3.2.3 Cobre 106
4.3.2.4 Estanho 110
4.4 Fluorescência de Raios-X (FRX) 115
4.4.1 Placa de circuito impresso (PCIa) 116
4.4.2 Placa de circuito impresso (PCIb) 118
4.4.3 Placa de circuito impresso (PCIc) 120
4.4.4 Placa de circuito impresso (PCId) 121
4.5 Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente 122
4.5.1 Placa de circuito impresso (PCIa) 123
4.5.2 Placa de circuito impresso (PCIb) 128
4.5.3 Placa de circuito impresso (PCIc) 134
4.5.4 Placa de circuito impresso (PCId) 139
4.5.5 Comparativo entre as quatro Placas de Circuito Impresso analisadas pela Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) 144
4.5.6 Discussão acerca dos resultados provindos da Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) para as Placas de Circuito Impresso (PCIa, PCIb, PCIc e PCId) 145
4.5.6.1 Comportamento do Ouro (Au) 146
4.5.6.2 Comportamento da Prata (Ag) 148
4.5.6.3 Comportamento do Cobre (Cu) 150
4.5.6.4 Comportamento do Estanho (Sn) 152
4.6 Comparativo de concentrações dos metais de interesse com Placas de Circuito Impresso de outros Equipamentos Eletroeletrônicos 154

4.6.1 Discussão: Metais de interesse (Au, Ag, Cu e Sn) das Placas de Circuito Impresso das urnas Eletrônicas.....154
4.6.2 Discussão: Metais Perigosos e Substâncias Tóxicas em Placas de Circuito Impresso .157
4.7 Comparativo entre a Mineração Primária e a Mineração Secundária das Placas de Circuito Impresso de Urnas Eletrônicas 165
4.8 Valoração econômica dos elementos de interesse contidos nas placas de circuito impresso de urnas eletrônicas 166
4.8.1 Cálculo de potencial econômico de cada elemento de interesse em cada Placa de Circuito Impresso 168
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 173
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 175
REFERÊNCIAS 176
APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO ATRAVÉS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E DA ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA 201
APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO ATRAVÉS DA FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X 224
APÊNDICE C – CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO POR ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA POR PLASMA INDUTIVAMENTE ACOPLADO 227

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por metais, o setor industrial depende de um contexto global de variáveis para importação e exportação de matérias-primas. Com o esgotamento de depósitos primários e de variações no cenário financeiro e geopolítico mundial, se destaca a oportunidade econômica da reciclagem secundária de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEEs).

Atreladas ao avanço tecnológico, à inovação de equipamentos eletroeletrônicos (EEEs), e as constantes trocas pelos usuários (por desuso ou por obsolescência programada), a tendência de crescimento na geração de REEEs vem ganhando importância na matriz mundial para obtenção de metais.

Os REEEs possuem Placas de Circuito Impresso (PCIs) como um de seus componentes, que representa uma atrativa matéria-prima por conter metais e ligas metálicas de valor econômico (HUBAU *et al.,* 2019). Na fabricação de PCIs, são utilizadas significativas quantidades de metais preciosos com alta pureza em sua composição (BEZANA, 2019).

Além do viés econômico da reciclagem de REEEs, verifica-se que há um forte apelo ambiental inerente à prática. Neste sentido, os termos "mineração urbana" ou "mineração secundária", introduzidos na década de 1980 pelo professor Hideo Nanjyo, do *Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy da Universidade de Tohoku*, no Japão de acordo com Aldebei e Dombi (2021), surgem como conceitos que se propõem a entender a reciclagem não apenas como oportunidade, mas sim como uma necessidade voltada à maximização da recuperação sustentável de recursos metálicos.

Os impactos ambientais da mineração secundária são minimizados quando comparados com os métodos tradicionais. Releva-se ainda que a mineração a partir de produtos já beneficiados consiste numa ação-chave para o ciclo de vida dos produtos manufaturados, que por muitos anos demandavam destinações responsáveis que geravam custos na matriz de gerenciamento.

Neste contexto, a realização da presente pesquisa justifica-se pelos seguintes motivos:

a) As urnas eletrônicas (UEs) são consideradas sensíveis quanto a sua confidencialidade e devem ser descaracterizadas por questões de sigilo, não podendo ser descartadas de qualquer forma;
b) Pela promoção da economia circular, ciclo de vida de produtos e pelo estímulo à cadeia nacional de reciclagem e de autogeração de metais. Diferentemente de outros REEEs, as UEs ficam armazenadas em locais específicos, de modo que a coleta e transporte

cubra a totalidade do resíduo gerado. A taxa mínima de reciclagem alcançada situa-se em torno de até 98% (TRIBUNAL SUPERIOR ELEITORAL (TSE), 2025);

c) Diante da escassez de estudos voltados à recuperação de metais a partir de PCIs de UEs, e com vistas ao atendimento dos objetivos do Projeto de Pesquisa vinculado aos laboratórios da presente pesquisa, intitulado de "Aplicação de técnicas de separação gravimétrica na reciclagem de resíduos metálicos e eletrônicos", onde buscou-se responder às seguintes questões: quais são as proporções de metais de valor presentes nas PCIs de UEs e qual é o potencial econômico associado à sua recuperação?
d) Pelo fato de o Brasil não executar, em solo nacional, técnicas de recuperação de metais para as PCIs de UEs. A fração mais valiosa das urnas descartadas (PCIs) contém diversos metais nobres de alto valor, como Au, Ag, Cu e Sn, que são enviadas descaracterizadas para empresas no exterior, onde estes e outros metais são extraídos e reciclados. Deste modo, o valor agregado a estes resíduos é subaproveitado, uma vez que os metais contidos nos mesmos poderiam ser extraídos e reutilizados no próprio País, garantindo maior suprimento interno de metais estratégicos, gerando empregos, e fomentando o desenvolvimento da indústria extrativa nacional.

A estrutura desta pesquisa foi organizada em cinco capítulos, de forma a conduzir o leitor pela trajetória metodológica e analítica da pesquisa. O Capítulo 1 buscou apresentar a introdução ao tema, contextualizando a problemática abordada, os objetivos gerais e específicos, as justificativas da investigação e a estruturação adotada para o desenvolvimento do estudo.

O Capítulo 2 foi dedicado à revisão da literatura, no qual foi discutido o panorama acadêmico e industrial dos REEEs, com ênfase em seu potencial econômico e na relevância das PCIs como fração de alto valor. Ainda nesse capítulo, foram abordadas as características das UEs, incluindo seus suprimentos, o ciclo de vida dos equipamentos e as etapas envolvidas em seu descarte. Também foram descritas as legislações aplicáveis à temática e os principais tratamentos físicos e químicos empregados na caracterização e recuperação de metais presentes nas PCIs.

O Capítulo 3 tratou da metodologia empregada na pesquisa, detalhando os procedimentos de obtenção das amostras, o tratamento físico das placas, a preparação das amostras para análise e as técnicas analíticas utilizadas na caracterização química dos metais de interesse.

O Capítulo 4 apresentou os resultados obtidos e suas respectivas análises, abrangendo a interpretação dos dados à luz da literatura técnica e científica, bem como a avaliação do potencial econômico associado à recuperação dos elementos metálicos de interesse detectados nas amostras.

Por fim, o Capítulo 5 reuniu as considerações finais da pesquisa, relacionando os objetivos propostos com os resultados alcançados e apontando contribuições, limitações e no capítulo 6, possíveis desdobramentos futuros do estudo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Verificar o potencial de agregação de valor à cadeia de reciclagem de urnas eletrônicas descartadas por meio de sua caracterização detalhada, com foco na identificação de metais e seu valor econômico contido.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos têm-se os seguintes:

1) Revisar o estado da arte da gestão de resíduos de UEs descartadas;
2) Determinar a composição (quali e quantitativa) das PCIs de UEs;
3) Comparar a similaridade das PCIs, com as placas de outros EEEs e verificar a possibilidade de serem inseridas na comercialização com outras PCIs e com a mineração primária;
4) Elaborar uma avaliação econômica preliminar do valor total associado a recuperação dos metais Au, Ag, Cu e Sn.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão teve por base contextualizar a temática estudada na presente pesquisa através de fundamentação teórica.

2.1 Mineração primária, secundária ou urbana e resíduos eletroeletrônicos

Neste capítulo conceituou-se a mineração primária e secundária/urbana bem como suas distinções. Ainda, tratou-se sobre a importância ambiental, energética e econômica da recuperação de metais.

2.1.1 Conceito de mineração primária e mineração secundária ou urbana

A produção de EEEs pode advir da mineração primária, da mineração urbana e/ou de ambas. A mineração primária relaciona-se à extração de minerais metálicos diretamente da natureza, explorando jazidas minerais formadas por processos geológicos, antes de qualquer uso humano. Sua extração depende de lavras de jazidas minerais, de processamento de minérios, de fatores geográficos, políticos e tecnológicos (XAVIER e LINS, 2018; XAVIER e OTTONI, 2021).

Os teores dos metais extraídos da mineração primária são apresentados através de relatórios públicos, intitulados de “FORM 20-F” das seguintes empresas para os metais de interesse na presente pesquisa: Au (Anglo Gold), Ag (Nexa Resources), Cu (BHP Group Limited) e Sn (Companhia Siderúrgica Nacional (CSN)). Os relatórios apresentam três classes de recursos: medido (pode ser convertido em reserva mineral provada), indicado (pode ser convertido em reserva mineral provável) e o inferido (estimado com base em evidências geológicas e amostragem limitada). O recurso medido possui maior confiança em seus dados (ANGLO GOLD, 2024; NEXA RESOURCES, 2024a; BHP GROUP LIMITED, 2024; CSN, 2024).

Segundo o relatório Form 20-F (2024) da AngloGold Ashanti, os recursos minerais apresentaram teores médios de Au variando entre 1,14 g/t (grama por tonelada) (categorias medidas e indicadas) e 1,21 g/t (inferidos), enquanto as reservas minerais, que correspondem à porção economicamente extraível, apresentaram um teor médio superior, de 1,63 g/t (ANGLOGOLD ASHANTI, 2024). Este valor está dentro do intervalo típico observado em

jazidas auríferas economicamente viáveis, que geralmente apresentam teores superiores a 0,5 g/t (MUDD, 2007; CROWSON, 2020).

Os teores de Au encontrados em depósitos minerais primários variam amplamente conforme o tipo de jazida e o método de explotação. Em operações a céu aberto, os minérios são geralmente de baixa a média lei, apresentando teores típicos entre 0,5 e 2 g/t, podendo atingir até 4 g/t em projetos economicamente mais robustos. Já em operações subterrâneas, onde a seletividade é maior, os teores costumam ser significativamente superiores, variando de 4 a 10 g/t, e podendo ultrapassar 20 g/t em depósitos de alta lei. Assim, considera-se que minérios com menos de 1 g/t são de baixo teor, 1–4 g/t de teor médio e valores acima de 8 g/t representam minérios de alto a muito alto teor (HUSTRULID e KUTCHA, 2013)

Para Ag, a empresa Nexa Resources, com operações significativas no Peru e no Brasil, reportou em seu relatório técnico de reservas (2024) que as minas de Cerro Lindo localizada nos Andes centrais do Peru e de Vazante, localizada em Minas Gerais, Brasil, apresentaram teores médios de 21,4 g/t e 24,2 g/t, respectivamente, com base em modelos geológicos tridimensionais (NEXA RESOURCES, 2024b).

Os teores de Ag reportados na mineração primária apresentam ampla variação conforme o tipo de depósito e as características geológicas. Em operações de grande porte, como o projeto San Cristóbal, na Bolívia, são registrados teores em torno de 63,3 g/t de Ag. Minas de elevada produtividade no México, como Saucito (Fresnillo plc), apresentam faixas típicas entre 160 e 180 g/t de Ag conforme dados operacionais projetados para 2025 (FRESNILLO PLC, 2025a, b).

Enquanto sistemas de alto teor, como Juanicipio, exibem valores ainda mais elevados, entre 380 e 430 g/t de Ag. Outro exemplo de alto teor é dado pelo distrito canadense de Keno Hill, alcançam teores superiores a 700–900 g/t de Ag, situando-se entre os mais ricos mundialmente (METALLIC MINERALS CORP, 2025).

O Cu, um dos principais metais extraídos em escala mundial, varia significativamente conforme o tipo de depósito. Na mina Cerro Lindo, da Nexa Resources, o teor médio foi de 0,52% Cu, o que equivale a 5.200 g/t. Na mina Vazante, o teor é de 0,43% Cu, ou 4.300 g/t (NEXA RESOURCES, 2024b). Já a BHP Group Limited, em suas operações no Chile (Mina Escondida), apresentou teores médios de 1,00% Cu (10.000 g/t), podendo chegar a 1,5% equivalente a 15.000 g/t, em depósitos como o Olympic Dam, na Austrália (BHP GROUP, 2024).

Já para o Sn, mais concentrado no estado de Rondônia, a mina da ERSA, dados históricos do SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM) apresentaram teores típicos entre 0,3% e 0,7% de Sn (CPRM, 2010; DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM, 2013)) correspondentes a 3.000 a 7.000 g/t. Para Menzie, Reed e Singer (1988) teores superiores a 0,5% Sn (5.000 g/t) são considerados de alto valor econômico.

A extração e tratamento de minerais são considerados uma atividade potencialmente poluidora de alto risco, conforme a Lei nº 6.938/1981, intitulada de Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA) (BRASIL, 1981) e Resolução CONSEMA nº 372/2018 (RIO GRANDE DO SUL, 2018).

A mineração urbana, considerada também como mineração secundária, é utilizada na recuperação de matéria-prima, provinda de produtos, de equipamentos e de produtos diversos que já atingiram sua vida útil (COSSU e WILLIAMS, 2015; XAVIER e OTTONI, 2021). A mineração secundária é considerada por Xavier e Ottoni (2021) uma ferramenta da economia circular.

O artigo de Zeng, Mathews e Li (2018) aponta que os custos da mineração primária são mais onerosos quando comparados aos custos da mineração secundária. Enquanto a mineração primária causa maiores impactos ambientais, a mineração secundária vem ao encontro da prevenção/mitigação de impactos (XAVIER e OTTONI, 2021).

Para recuperação da matéria-prima secundária, os riscos inerentes aos processos envolvidos não devem ser considerados como limitantes, mas sim como incentivo a melhorias no desenvolvimento de técnicas seguras e sustentáveis (XAVIER e OTTONI, 2021). O Quadro 1 apresenta o potencial de recuperação de metais, a partir da mineração secundária de REEEs.

Quadro 1 – Mercado global de metais preciosos em resíduos eletrônicos e estimativa de potencial econômico no Brasil (Continuação)

Categoria	Dados	Citação
Quantidade total de REEE (global) (2022)	62 milhões de toneladas	Correio Braziliense (2024)
Metais presentes no REEE (global)	31 milhões de toneladas	
Valor total estimado dos metais (global)	US$ 91 bilhões	
Principais metais recuperáveis (global)	Cu: US$ 19 bilhões, Au: US$ 15 bilhões e Fe: US$ 16 bilhões	
Taxa de reciclagem global (2022)	22,3%	
Mercado global de recuperação de metais preciosos (2023)	US$ 6,39 bilhões	Data Bridge Market Research (2023)
Previsão para 2031 (global)	US$ 10,03 bilhões	

Quadro 1 – Metais extraídos dos resíduos eletroeletrônicos e potencial econômico (dados de 2022 a 2024) (Conclusão)

Categoria	Dados	Citação
Mercado global de metais preciosos eletrônicos (2022)	US$ 9,2 bilhões	Verified Market Reports (2023)
Previsão global para 2030	US$ 21 bilhões	
Potencial econômico no Brasil (nacional)	R$ 800 milhões por ano	Modais em Foco (2024)

Legenda: US$: Dólar dos Estados Unidos.

Além das PCIs, as UEs possuem outros componentes de valor, como por exemplo, cabos, borrachas, bobinas de papel, papelão, placas de patrimônio, plásticos e outros, os quais são descaracterizados, reciclados e comercializados (TSE, 2025).

2.1.2 Importância ambiental, energética e econômica da recuperação de metais

A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) previu a intensificação da competição global por recursos, onde a demanda global de materiais passará de 79 bilhões de toneladas (em 2020) para 167 bilhões de toneladas (em 2060) (SCHRIJVERS *et al*., 2020).

Dentre outras considerações, D'Adamo *et al*., (2019) concluíram que os REEEs possuem crescimento elevado e que se necessita de diretrizes referentes a custos e lucros envolvidos, bem como o impedimento de comércio ilegal e descarte inadequado. O seu trabalho demonstrou que para se obter um valor presente líquido (VPL) positivo, deve-se levar em consideração, no mínimo, as variáveis de preço do metal e de custo de reciclagem.

Segundo dados publicados em Panorama Econômico e Desempenho Setorial da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE, 2020), no seu panorama econômico entre 2012 e 2019, apontou o crescimento de 23,2% da produção física da indústria eletroeletrônica (ABINEE, 2020).

No ano de 2019, o mundo gerou 53,6 milhões de toneladas (Mt) de REEEs, ou seja, aproximadamente 7,3 Kg per capita, representando um aumento de 21% em cinco anos. Projeta-se para o ano de 2030 (a nível mundial) a geração de 74,7 Mt (FORTI *et al*., 2020).

Os autores do livro "Mineração Urbana: conceitos e análise do potencial econômico dos Resíduos Eletrônicos" apontaram que houve intensificação no consumo de EEEs entre 2019 e 2021, devido às novas modalidades de trabalho, produção e comunicação impostas pela pandemia da Covid-19 (XAVIER e OTTONI, 2021). Devido ao estabelecimento de atividades remotas, ocorreu a necessidade de uma maior infraestrutura aos trabalhadores do formato

homeoffice e ensino à distância. Dados de 2019 revelaram o crescimento do consumo de EEEs, onde a China atingiu a marca de US$ 249.253,20 milhões, qualificando o setor como o maior mercado produtor e exportador (XAVIER e OTTONI, 2021).

O Quadro 2 apresenta os maiores mercados globais (países) com maior receita e geração de EEEs. De acordo com o Quadro, a China continua sendo o líder global em receita de eletrônicos de consumo, os Estados Unidos ocupam a segunda posição, seguido pela Índia (que apresentou crescimento em 2024, de 5%) e o Brasil mantém-se entre os cinco maiores mercados, apesar de uma leve queda de 0,6% em relação ao ano de 2023.

Quadro 2 – Maiores mercados globais de eletrônicos em 2024

País	Receita Estimada (US$ bilhões)	Fontes
China	218,60	Stocklytics (2024)
Estados Unidos	160,00	
Índia	73,10	
Japão	44,10	
Brasil	35,50	
Reino Unido	33,30	News.market.us (2024)
Alemanha	28,10	
França	22,70	
Indonésia	21,40	
Turquia	18,80	

As cotações dos elementos contidos nos REEEs podem ser observadas na London Metal Exchange (LME), centro mundial para o comércio de metais industriais, que possuem a cotação da tonelada de cada um dos metais analisados nesta pesquisa. Os preços são usados como referência global.

Outra fonte de pesquisa sobre os índices de mercado em relação aos elementos é dada pelo Índice Kitco Gold. A Kitco é uma plataforma global em metais preciosos e varejistas de produtos de ouro. Foi a primeira empresa de metais preciosos a fornecer aos investidores informações de mercado em tempo real, notícias, análises e serviços de metais preciosos online.

Entre 22 de setembro de 2025 e 21 de novembro de 2025, a média do preço do Au foi de 129,09 US$/g (BULLION RATES, 2025a). Nesse mesmo período, o preço médio da Ag foi de 1,57 US$/g (BULLION RATES, 2025b). A média do preço do Cu entre setembro e outubro de 2025, foi de 0,010 US$/g e para o Sn de 0,035 US$/g (LONDON METAL EXCHANGE, 2025).

Através dos dados citados, nota-se que a recuperação de metais presentes em PCI possui sentido econômico, ambiental e estratégico (HUBAU *et al*., 2019). O artigo de D'Adamo *et al*., (2019), trata a reciclagem de PCI como uma fonte de oportunidade econômica e de

negócios. Alguns aspectos podem ser citados como dificuldade no processamento de EEEs: a falta de conhecimento, a baixa oferta de coleta seletiva, a dificuldade em alcançar uma maior viabilidade econômica, a ausência de estrutura física de coleta e triagem, a não adoção da logística reversa, entre outros (ARAUJO *et al*., 2020).

2.1.3 Valoração Econômica de Metais: Cenários e Perspectivas de Mineração Urbana

A valoração econômica de metais em REEEs, especialmente em PCIs, representa uma das frentes mais promissoras da chamada mineração urbana. Este conceito, consolidado na literatura técnica (LI *et al*., 2020; KUMAR e GUPTA, 2021), refere-se à recuperação de materiais valiosos a partir de resíduos sólidos urbanos, contribuindo simultaneamente para a mitigação de impactos ambientais e para a segurança de suprimento de metais críticos.

Compostos por materiais nobres como Au, Ag, Cu e Sn, os REEEs institucionais (como as UEs) configuram um fluxo específico de resíduo com elevado potencial de valorização. Estimar o valor econômico da recuperação desses metais implica em considerar diferentes cenários, que variam conforme a tecnologia empregada, as eficiências operacionais, os custos envolvidos e a escala do processamento (VATS e SINGH, 2015a; SCHLOTMANN e DORNFELD, 2020).

Estudos de valoração em mineração secundária frequentemente utilizam simulações baseadas em três cenários principais: otimista (idealizado), moderado (industrialmente viável) e conservador (restritivo) (KAYA, 2016; HERATH, GAYAN e BASNAYAKE, 2019). Cada um desses modelos fornece diferentes perspectivas sobre o potencial de retorno financeiro da reciclagem de PCIs, permitindo não apenas mensurar a atratividade econômica, mas também subsidiar decisões políticas e estratégicas.

O cenário otimista assume 100% de recuperação dos metais de interesse e ausência de custos operacionais, uma abordagem comumente usada para estimar o valor bruto máximo (OGUNNIYI, VERMA e STEYN, 2009; GHOSH *et al*., 2015), caso da presente pesquisa.

O cenário moderado parte de parâmetros realistas, considerando eficiências típicas de processos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos em escala industrial (ZHANG *et al*., 2021; CUI e ZHANG, 2008).

O cenário conservador contempla limitações operacionais, técnicas e logísticas, como taxas de coleta abaixo do ideal e infraestrutura deficiente (FORTI *et al*., 2020; BALDE *et al*., 2017).

2.1.4 Legislações aplicáveis

A gestão adequada dos REEE se fundamenta em um conjunto diversificado de legislações, convenções internacionais e normas técnicas que visam disciplinar, orientar e promover práticas sustentáveis de produção, consumo e descarte.

O marco inicial da política ambiental brasileira é a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que institui a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA). Essa legislação estabelece os princípios, objetivos e instrumentos voltados à preservação e melhoria da qualidade ambiental, bem como define o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA). A PNMA representa um divisor de águas ao reconhecer o meio ambiente como bem de uso comum e ao atribuir responsabilidade ao poder público e à coletividade pela sua defesa e preservação (BRASIL, 1981).

Complementando esse arcabouço, a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, conhecida como Lei de Crimes Ambientais, dispõe sobre as sanções penais e administrativas aplicáveis a pessoas físicas e jurídicas em decorrência de condutas lesivas ao meio ambiente. Essa lei é fundamental para o fortalecimento da responsabilização por danos ambientais, inclusive os relacionados à disposição inadequada de resíduos eletrônicos (BRASIL, 1998).

Posteriormente, o Brasil consolidou seu compromisso com a gestão de resíduos sólidos por meio da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Essa norma introduz instrumentos como a logística reversa e a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, exigindo que fabricantes, importadores, distribuidores e consumidores adotem medidas integradas para o gerenciamento adequado de resíduos, incluindo os de natureza eletroeletrônica (BRASIL, 2010).

A PNRS foi posteriormente regulamentada pelo Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022, que detalha os mecanismos de implementação da política, especificando as obrigações dos diversos agentes envolvidos e os procedimentos para o funcionamento dos sistemas de logística reversa (BRASIL, 2022). Nesse contexto, destaca-se também o Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020, que estabelece diretrizes específicas para o sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes, complementando o Decreto nº 9.177/2017 (BRASIL, 2020).

As normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) desempenham papel essencial no suporte técnico à gestão dos REEE, padronizando métodos de classificação, amostragem e análise de resíduos. Dentre elas, destacam-se:

- ABNT NBR 10.004/2004 – Resíduos Sólidos: Classificação: estabelece critérios para classificar os resíduos quanto ao seu potencial de risco ao meio ambiente e à saúde pública (ABNT, 2004a).
- ABNT NBR 10.005/2004 – Procedimento para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos e ABNT NBR 10.006/2004 – Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos: definem métodos laboratoriais utilizados para determinar a mobilidade de substâncias tóxicas em resíduos, auxiliando na avaliação do seu potencial de contaminação (ABNT, 2004b; 2004c).
- ABNT NBR 10.007/2004 – Amostragem de Resíduos Sólidos: fornece diretrizes sobre a representatividade das amostras e o manejo adequado durante a coleta (ABNT, 2004d).
- ABNT NBR 16.156/2013 – Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos: Requisitos para Atividade de Manufatura Reversa: define parâmetros técnicos e operacionais para o desmonte e reaproveitamento de componentes eletrônicos, reforçando a aplicação prática da logística reversa (ABNT, 2013).

Entre as resoluções específicas, destaca-se a Resolução CONAMA nº 401, de 4 de novembro de 2008, que estabelece limites máximos de metais pesados — como Pb, Cd e Hg — em pilhas e baterias comercializadas no Brasil, além de definir critérios para seu gerenciamento ambientalmente adequado (BRASIL, 2008).

No âmbito institucional, a Resolução TSE nº 23.474, de 19 de abril de 2016, determina a criação de unidades e núcleos socioambientais nos Tribunais Eleitorais, bem como a elaboração de Planos de Logística Sustentável (PLS). Essa iniciativa reforça o compromisso do setor público com práticas sustentáveis, incluindo a destinação adequada de resíduos tecnológicos (BRASIL, 2016).

No cenário global, diversas convenções e legislações influenciaram diretamente a formulação de políticas nacionais sobre REEE.

A Convenção da Basileia (1989, em vigor desde 1992), promovida pela ONU, estabelece o controle sobre os movimentos transfronteiriços de resíduos perigosos e seu destino final, buscando evitar o envio de resíduos tóxicos para países em desenvolvimento — prática que frequentemente envolve REEE (ONU, 1992).

De modo complementar, a Convenção de Estocolmo (2001) trata dos Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs), substâncias químicas de alta toxicidade e longa permanência no

ambiente, muitas das quais são encontradas em resíduos eletrônicos, como retardantes de chama e PCI (ONU, 2001).

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) também tem publicado diretrizes técnicas e relatórios orientadores sobre o gerenciamento sustentável de *e-waste*, incentivando boas práticas e tecnologias limpas para países em desenvolvimento (PNUMA, 2011).

Entre os marcos, destaca-se a Diretiva 2012/19/EU da União Europeia (*Waste Electrical and Electronic Equipment Directive – WEEE*), que estabelece metas de coleta, reciclagem e recuperação de materiais, buscando reduzir os impactos ambientais e estimular o ecodesign dos produtos (UNIÃO EUROPEIA, 2012).

Em outros países, legislações pioneiras também contribuíram para a estruturação de sistemas de gestão de REEE. No Japão, a *Home Appliance Recycling Law* (2001) impôs aos fabricantes a responsabilidade de recolher e reciclar equipamentos usados, promovendo uma economia circular efetiva (JAPÃO, 2001). Na China, *as Administrative Measures on the Prevention and Control of Environmental Pollution by EEE* (2007, atualizadas em 2019) definem requisitos ambientais rigorosos para produção, importação e descarte de produtos eletrônicos (CHINA, 2019).

Recentemente, o Brasil também avançou em políticas voltadas à valorização dos minerais estratégicos – essenciais para a produção de equipamentos eletrônicos. O Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021, instituiu a Política de Apoio ao Licenciamento Ambiental de Projetos de Investimentos para a Produção de Minerais Estratégicos (Pró-Minerais Estratégicos), com o objetivo de agilizar processos de licenciamento e fomentar o aproveitamento sustentável desses recursos (BRASIL, 2021a). Em complemento, a Resolução nº 2, de 18 de junho de 2021, definiu a lista oficial de minerais estratégicos para o país, conforme os critérios estabelecidos no referido decreto (BRASIL, 2021b).

2.1.5 Principais categorias de equipamentos eletroeletrônicos

Os REEEs são resíduos advindos de EEEs, que necessitam de energia ou corrente magnética, para a sua operação (ARAUJO *et al.,* 2020). A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define EEE, como:

> Equipamentos e peças cujo funcionamento adequado depende de correntes elétricas ou campos eletromagnéticos, bem como equipamentos para geração, transmissão, processamento e medição dessas correntes e campos, podendo ser de uso doméstico, industrial, comercial e de serviços (NBR 16.156 (ABNT, 2013)).

O setor eletroeletrônico é um dos setores de maior desenvolvimento, de atualizações contínuas e de demanda crescente (ANDRADE, 2002; BEZANA, 2019). Visando a elaboração de um sistema de classificação de REEEs, Xavier *et al.,* (2020) estabeleceram as categorias principais (Quadro 3).

Quadro 3 – Principais categorias dos Resíduos Eletroeletrônicos (REEEs)

Categoria	Descrição e exemplos
Informática e Telecomunicações	Engloba equipamentos eletrônicos voltados ao processamento, comunicação e armazenamento de dados, como computadores (desktops e notebooks), celulares, tablets, impressoras, scanners, roteadores, modems, mídias (CD, DVD, fitas de backup), periféricos (teclados, mouses, fones), acessórios e dispositivos de telecomunicação (PABX, fax, secretárias eletrônicas). Também inclui itens de entretenimento e multimídia, como câmeras digitais, videogames, MP3 players e calculadoras, além de componentes internos como placas de circuito, discos rígidos e unidades externas de armazenamento.
Fios e cabos	São condutores elétricos compostos principalmente de Cu ou Al, metais de alto valor comercial. Devido à sua relevância econômica, esses materiais são amplamente coletados por diversos agentes para fins de reutilização e comercialização.
Pilhas e baterias	São fontes de energia para equipamentos eletrônicos, porém seu descarte ainda carece de práticas amplamente difundidas. Em contrapartida, a recuperação de baterias automotivas já está bem estruturada e consolidada.
Lâmpadas	O maior consumo e descarte de lâmpadas ocorre em ambientes industriais, comerciais e empresariais. Os principais tipos incluem fluorescentes (clássicas e compactas), lâmpadas de Na, de Hg e incandescentes.
Painéis Fotovoltaicos	São compostos por células de diferentes tipos e materiais. Na reciclagem desses sistemas, é possível recuperar componentes valiosos como Al, vidro, Ag, Cu, plástico, silício (Si) e telúrio (Te).

Fonte: Adaptado de Xavier *et al.,* (2020).

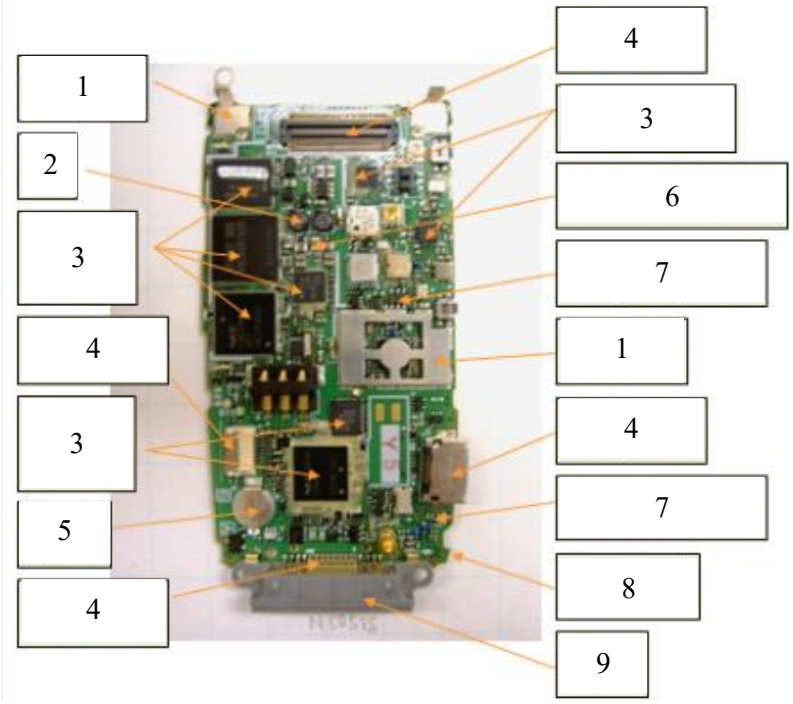
2.1.6 Composição típica de Resíduos eletroeletrônicos

Os REEEs apresentam uma composição complexa, composta por materiais de alto valor econômico e ambiental, bem como por substâncias potencialmente tóxicas. Dentre esses resíduos, as PCIs se destacam como frações de alto valor, tanto pela concentração de metais preciosos quanto pelos desafios que apresentam à gestão ambiental adequada.

Os REEEs contêm uma variedade de metais ferrosos e não ferrosos. De acordo com Zeng, Li e Chan (2019), os principais incluem: Cu – amplamente utilizado em fios e PCIs, Al – encontrado em carcaças e dissipadores de calor, Fe – presente em suportes estruturais e motores. Os metais preciosos, como Au, Ag e Paládio (Pd), ficam concentrados principalmente nas placas de circuito e conectores. Já os metais tóxicos, como Pb, Cd, Hg e arsênio (As), são

comuns em soldas, monitores de tubo e baterias (ZENG, LI e CHAN, 2019). Através da Figura 1 pode se ter uma ideia da localização dos elementos numa PCI de celular.

Figura 1 – Localização de elementos em Placas de Circuito Impresso (PCIs) de celulares



Legenda: 1) Placa de Escudo: Fe, Ni, Cr; 2) Bobina: Cu; 3) Circuito Integrado: Au, Ag, Si, Sn e Cu; 4) Conector: Cu, Ni, Au; 5) Bateria: Ni, H; 6) Conector de cerâmica de ponta: Ag, Sn, Ti, Ni, Pb, Sr, Zr; 7) Resistência: Fe, Ag, Ni, Cu, Pb, Zn; 8) Placa de Circuito: Cu; 9) Plásticos: Sb. Fonte: *The Global E-WasteStatisticPartnership*, 2022.

De acordo com Hagelüken e Corti (2010); Ogunseitan *et al*., (2009); Yamane *et al*., (2011a), as quantidades de metais valiosos detectados em PCIs são significativas, quando comparadas com a concentração de metais encontradas em fontes naturais, como é o caso do Au.

A pesquisa de Takahashi *et al.,* (2009) informou os principais elementos metálicos em PCIs, sendo: Au, Ag, As, Bário (Ba), Bismuto (Bi), Cromo (Cr), Cu, Gálio (Ga), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Pb, Pd, Platina (Pt), Si, Sn, Ta, Titânio (Ti), Zinco (Zn) e Zircônio (Zr). Elementos que podem ser encontrados em celulares, são Au, Pt, Cu, Pd, Sn, Lítio (Li), Al, índio (In), Ga, e Cobalto (Co) (LIU *et al*., 2019).

O estudo de Khaliq *et al*., (2014) apontou que os metais em celulares, podem ser categorizados como metais preciosos (Au, Ag), metais do grupo da platina (Pd, Pt, Ródio (Rh), Irídio (Ir) e Rutênio (Ru), metais básicos (Cu, Al, Ni, Sn, Zn e Fe), metais perigosos (Hg, Berílio (Be), In, Pb, Cd, As e Antimônio (Sb), escassos ou oligometais (Telúrio (Te), Ga, Selênio (Se),

Ta e Germânio (Ge)). Na pesquisa de Vats e Singh (2015a), Au e Ag encontraram-se disponíveis em PCBs de celulares, na faixa de 0,009-0,017% e 0,25-0,79%, respectivamente.

Os elementos terras raras compreendem 17 elementos (Escândio (Sc), Ítrio (Y) e mais 15 lantanídeos). Recebem esse nome por serem difíceis de encontrar e de extrair. São utilizados na indústria para a produção de diversos itens, principalmente de alta tecnologia (BERNARDES, 2021).

Segundo Cucchiella *et al*., (2015), os metais representam entre 40% e 50% da massa total dos REEEs, variando conforme o tipo de equipamento. Os plásticos constituem de 15% a 30% da massa dos REEEs, sendo compostos principalmente por polímeros como ABS (acrilonitrila butadieno estireno), poliestireno, policarbonato e PVC. Muitos desses materiais contêm retardantes de chama bromados (BFRs), substâncias com potencial poluente significativo. Conforme Kiddee, Naidu e Wong (2013), o tratamento inadequado desses polímeros pode resultar na liberação de substâncias tóxicas e POPs.

Vidros e cerâmicas somam aproximadamente 10% a 15% da massa, presentes em monitores, telas LCD e LEDs. Esses materiais podem conter elementos como Pb e P, exigindo tratamento específico. O relatório de Forti *et al*., (2020) aponta que monitores antigos podem conter até 4 kg de Pb por unidade, incorporado ao vidro.

Além disso, os componentes perigosos incluem baterias, capacitores com bifenilas policloradas (PCBs) e lâmpadas com mercúrio, classificados como resíduos perigosos pela Convenção da Basileia. Segundo Widmer, Oswald-Krausel, Kaplan (2005), cerca de 5% dos componentes dos REEEs apresentam elevada toxicidade ambiental. apresenta a composição média dos REEEs. A Tabela 1 apresenta a composição média REEEs.

Tabela 1 – Composição média dos resíduos eletroeletrônicos (REEEs)

Componente	Faixa (%)
Metais	40–50%
Plásticos	15–30%
Vidros	10–15%
Cerâmicas	2–5%
Metais preciosos	<1%
Componentes tóxicos	3–7%

Fonte: adaptado de Cucchiella *et al*., (2015); Forti *et al*., (2020).

Segundo Baker e Willard (2007), as PCIs desempenham um papel central nos REEEs devido à presença simultânea de metais preciosos, metais não ferrosos, metais ferrosos e substâncias tóxicas, o que reforça sua relevância tanto econômica quanto ambiental. A

recuperação de Au, Ag e Pd, mesmo em pequenas concentrações, é economicamente viável, dado o alto valor de mercado desses metais.

Baker e Willard (2007) afirmam que a recuperação de metais preciosos de PCIs pode ser até 40 vezes mais eficiente do que a mineração primária, reduzindo impactos ambientais e fortalecendo práticas de economia circular.

Para Kiddee, Naidu e Wong (2013), a economia circular oferece uma abordagem estratégica para a gestão de REEEs, ao diminuir a demanda por recursos naturais e estender o ciclo de vida útil dos materiais. Além disso, a reciclagem de PCIs pode impulsionar empregos verdes e fomentar tecnologias sustentáveis.

Um dos principais desafios técnicos está na extração ambientalmente segura dos metais preciosos, o que requer tecnologias adequadas e alta capacidade de separação de componentes, condição ainda limitada em muitos países em desenvolvimento (WIDMER, OSWALD-KRAUSEL, KAPLAN, 2005).

Durante a revisão de literatura, observou-se a ausência de estudos sobre a composição de PCIs provenientes de UEs. Assim, foi elaborado o Quadro 4, visando comparar os resultados da presente pesquisa com dados de outras tipologias de PCIs.

A caracterização da pesquisa de Piovezan (2023) foi sobre três modelos de tablets obsoletos, através de digestão em água régia (3 partes de ácido clorídrico (HCl):1 parte de ácido nítrico (HNO_3) (3:1)) e aplicação de ICP-OES e de FRX. A quantificação no ICP-OES detectou Al, Ag, Au, Cu, Fe e Ni. Na análise em FRX, apontaram grande quantidade de Si e Ca (cálcio).

A dissertação de Gomes (2021) investigou a recuperação de ítrio (Y) a partir de PCIs, utilizando lixiviação ácida com HCl, HNO_3 e ácido sulfúrico (H_2SO_4). Foram obtidos rendimentos de lixiviação superiores a 60% nos ácidos HCl, HNO_3, enquanto o H_2SO_4 apresentou menor eficiência. O HCl foi identificado como o agente lixiviante mais promissor, devido à seletividade em relação ao Y, evitando a dissolução excessiva de outros metais presentes em maiores concentrações, como ocorre com o HNO_3, que possui alto potencial oxidante.

O lixiviado foi analisado por ICP-OES, permitindo a determinação de metais comuns (Cu, Ca, Al, Pb, S (enxofre), Fe, Ni, Mg (magnésio)), metais nobres (Ag e Au) e elementos de terras raras (Neodímio (Nd), Lantânio (La), Y, Cério (Ce), Disprósio (Dy) e Hólmio (Ho).

Os resultados evidenciam que as PCIs representam uma fonte significativa de ítrio e outros elementos valiosos, reforçando o potencial econômico da mineração urbana e da recuperação seletiva de metais de alto valor em resíduos eletroeletrônicos.

Nos experimentos de Gomes (2021), a lixiviação de Y a partir de PCIs apresentou rendimentos superiores a 60% quando realizada com HCl e HNO_3, sendo o HCl o agente lixiviante mais eficiente devido à sua maior seletividade, enquanto o H_2SO_4 apresentou menor rendimento, abaixo de 60%, indicando menor eficiência na extração do Y.

O lixiviado foi analisado em ICP-OES, que determinou os elementos: Cu, Ca, Al, Pb, S, Fe, Ni, Mg e outros elementos químicos em teores inferiores a 0,1%. Os teores dos metais nobres foram: Ag e Au. Os teores de elementos de terras raras foram: Nd, La, Y, Ce, Dy e Ho (GOMES, 2021).

A pesquisa de Magalhães (2023) caracterizou amostras de Unidade Central de Processamento (CPU) obtido a partir de PCI de computadores. As amostras foram submetidas à técnica de ICP-OES.

A pesquisa de Pereira (2022) abordou a adaptação de microrganismos mesófilos a PCI como etapa preliminar para biolixiviação de Cu. A análise de ICP-OES quantificou Cu, Ca, Pb e Al.

Sant'ana *et al.,* (2013) estudaram PCIs de celulares. As placas foram divididas em lotes: lote 1, para celulares fabricados até 2001 e lote 2, do ano 2002, em diante. Após a digestão, as amostras foram aplicadas no ICP-OES e quantificaram os elementos listados no Quadro 4. Caldas *et al.,* (2019), caracterizaram quatro lotes de PCIs de computadores, por ICP-OES. O metal mais abundante em todos os lotes foi o Cu.

Jesus (2015) caracterizou as placas de celulares, em três frações granulométricas. Através da técnica de ICP-OES, Cu foi o elemento mais detectado e sua recuperação se mostrou viável, ainda apresentou pequenas quantidades de Au e Ag. Pb ultrapassou os níveis estabelecidos pela NBR ABNT 10004 (ABNT, 2004a).

Bezana (2019) estudou sobre placas de computadores e determinou Ag, Au e Cu por digestão ácida por micro-ondas, seguido de ICP-OES. Em sua pesquisa observou que para a determinação de Pd ocorreram acentuadas interferências espectrais causadas por Fe e Argônio (Ar).

A pesquisa de Caldas *et al*., (2017) trouxe uma comparação entre placas de computadores e de celulares. Os extratos digeridos foram analisados através de ICP-OES. Foi obtido como resultado que a concentração de Cu está aumentando em celulares e permanecendo constante em computadores.

Quadro 4 – Quadro-síntese de resultados de diferentes tipos de placas de circuito impresso (PCIs) retiradas da revisão da literatura

Elemento (%)	PCI de tablets. Adaptado de Piovezan (2023)						Adaptado de Gomes (2021)	PCIs de computadores. Adaptado de Magalhães (2023)	PCIs de computadores. Adaptado de Pereira (2022)	PCIs de celulares. Adaptado de Sant'ana *et al.*, (2013)		PCIs de computadores. Adaptado de Caldas *et al.*, (2019)				PCIs de telefones celulares. Adaptado de Jesus (2015)			PCIs de Computadores. Adaptado de Bezana (2019)			PCI de computadores. Caldas *et al.*, (2017)	PCI de celulares. Caldas *et al.*, (2017)
	Tablet 1 (Ipad)		Tablet 2 (Samsung)		Tablet 3 (Samsung)		PCIs diversas			Lote 1 < 2001	Lote 2 > 2002	Lote A	Lote B	Lote C	Lote D	F1	F2	F3	Am30	Am60	C1		
	Fração granulométrica (mm)																						
	< 0,5	> 0,5	< 0,5	> 0,5	< 0,5	> 0,5	> 1,00	Heterogênea	< 1,68	< 1,00		≥ 3,00				< 0,30	0,30 > d < 0,85	0,85 > d < 1,15	≥ 0,150			2	2
	%																						
Ag	0,11	0,10	0,06	0,08	0,09	0,09	0,06			0,28	0,12	0,03	0,01	0,06	0,03	0,21	0,16	0,02	0,029			0,16	0,21
Pt																							
Au	0,03	0,03	0,02	0,03	0,04	0,04	0,02	0,04		0,06	0,04	0,06	0,01	0,02	0,01	0,08	0,08	0,10	0,009			0,13	0,002
Pd										0,02	0,01												
Al							1,85		1,85	0,62	0,84	0,06	7,5	3,02	3,55	0,59	1,14	0,61				5,7	0,26
Co												0,01		0,01									
Cr							0,024			0,76	2,16												
Cu	70,77	52,42	49,67	69,59	68,58	67,19	26,49	43,89	25,91	26,75	22,81	26,4	22,78	16,67	14,28	31,00	45,80	50,00	17,99			20,19	34,49
Fe	4,02	3,31	5,41	1,18	12,53	0,61	0,14	0,698		9,60	17,42	2,1	0,02	< LD	3,73	0,75	1,07	0,71				7,33	10,57
Li																							
Mg							0,11			0,04	0,14												
Mn							0,005																
Ni	7,89	3,01	7,89	2,91	5,80	1,90	0,12			2,37	2,77	2,24	0,08	0,352	0,46	1,25	1,55	1,04				0,43	2,63
Pb	0,02	0,01	0,01	0,00	0,05	0,03	1,63		2,00	1,33	0,57	1,46	0,28	0,87	0,87	0,73	0,73	0,25					
Zn	6,58	0,60	3,72	0,58	2,91	0,67	0,02			2,25	2,92	2,69	5,38	0,842	2,63	0,19	0,34	0,51				4,48	5,92
Ar																							
Sn	1,87	2,72	1,85	2,05	4,29	1,07				1,81	1,56	2,95	2,7	2,93	1,29	3,40	4,40	1,67				8,83	3,39
Cd								0,017				0,03											
S							0,43																
Ca							5,04		4,91	1,13	0,70	0,07	0,23	0,07	0,09								
Nd							0.002																
La							0,0009																
Y							0,0009																
Ce							0,0006																
Dy							0,0005																
Ho							0,0005																
Be										0,01	0,01												
Ti										0,21	0,18												
Ba										0,63	0,64	0,07	0,02	0,02	0,01								
K										0,03	0,02												
Na										0,03	0,02												
Sb										0,06	0,03												
Sr										0,02	0,01												
V										0,01	0,01												
Zr										0,03	0,02												

Legenda: F1: Fração 1, F2: Fração 2 e F3: Fração 3; Lote A (memória dourada, processador slot e placas de HD); Lote B (refere-se a placas mãe de computador antigo); Lote C (placas de circuito impresso provenientes de equipamentos diversos como impressoras e computadores obsoletos); Lote D (placas ponteiras)

2.1.7 Panorama global da reciclagem de resíduos eletroeletrônicos (REEEs)

O trabalho de Ji *et al.,* (2018) investigou, através de análise quantitativa, a evolução de publicações referente à Conservação e Reciclagem de Recursos nos últimos 30 anos. O estudo apontou tendência positiva na produção de literatura sobre o tema. Pesquisas referentes aos REEEs foram consideradas um dos tópicos emergentes.

Em 2024, o relatório Forti et al., (2024), apontou o volume global dos REEEs de aproximadamente 62 milhões de toneladas em 2022, o que representa uma média de 7,8 kg por habitante. Trata-se de um aumento expressivo em relação a 2019, quando foram registradas 53,6 milhões de toneladas (7,3 kg por habitante). Embora os dados para o ano de 2024 ainda não tenham sido oficialmente divulgados, as projeções apontam para um crescimento contínuo, com estimativa de geração superior a 82 milhões de toneladas até 2030 (FORTI *et al*., 2024).

As regiões com maior geração de resíduos por habitante foram na Europa (16,2 kg/hab), seguida pela Oceania (16,1 kg/hab) e pela América do Norte (13,3 kg/hab). Já em termos absolutos, a Ásia lidera com 24,9 Mt, seguida pelas Américas (13,1 Mt) e Europa (12 Mt) (FORTI *et al*., 2020).

Em relação ao tamanho do mercado que as PCIs deverão atingir é de US$ 76,12 bilhões, em 2024 e US$ 93,87 bilhões, até 2029. Estima-se que a Ásia-Pacífico, será a região que mais crescerá durante o período de 2024-2029. No ano de 2024, a América do Norte foi responsável pela maior participação no mercado de PCIs (THE GLOBAL E-WASTE STATISTIC PARTNERSHIP, 2022).

Apesar da quantidade crescente de REEEs gerados, apenas 17,4% dos resíduos foram formalmente coletados e reciclados em 2019. Isso significa que mais de 44 milhões de toneladas foram descartadas de forma inadequada, o que representa perda de recursos econômicos e impactos negativos ao meio ambiente (FORTI *et al*., 2020).

Os REEEs possuem elevados potenciais econômicos: estima-se que apenas os metais preciosos descartados anualmente em equipamentos eletrônicos obsoletos representem mais de US$ 57 bilhões, valor superior ao PIB de diversos países (FORTI *et al*., 2020).

A logística dos REEEs é um dos principais gargalos para a efetiva reciclagem e recuperação de materiais. Trata-se de um fluxo de resíduos complexo, composto por diversos tipos de materiais (plásticos, metais ferrosos e não ferrosos, cerâmicos e componentes tóxicos), o que exige sistemas sofisticados de triagem, transporte e processamento.

Entre os principais desafios logísticos, destacam-se a coleta seletiva ineficiente, a infraestrutura limitada, os custos logísticos elevados e a regulação internacional (WIDMER,

OSWALD-KRAUSEL e KAPLAN, 2005; CUI e ZHANG, 2008; KIDDEE, NAIDU e WONG, 2013).

2.2 Urnas eletrônicas: características e suprimentos

Neste item foram detalhadas as características e suprimentos das UEs.

2.2.1 Estrutura das urnas eletrônicas e seus componentes principais

A UE é um microcomputador utilizado nas eleições, que possui como características gerais, suas pequenas dimensões, leveza, resistência, autonomia de energia e é provida de recursos de segurança. É composta por dois terminais: o terminal do mesário e o terminal do eleitor. Buscando conhecer melhor as partes das UEs, modelos e seus suprimentos são demonstrados na Figura 2 a Figura 6 (TSE, 2022).

Figura 2 – Modelo de urna eletrônica do ano de 2009



Figura 3 – Modelo de urna eletrônica do ano de 2015



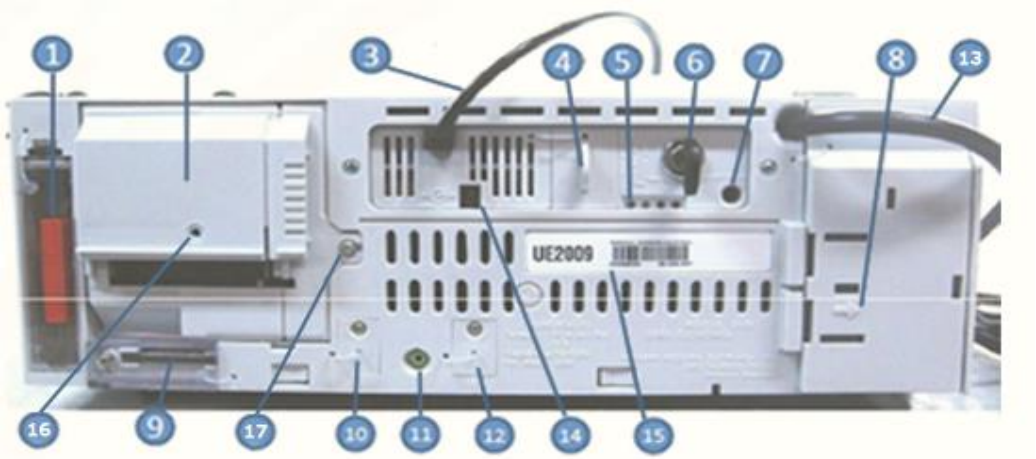
Figura 4 – Terminais de uma urna eletrônica



Figura 5 – Parte frontal ou dianteira do terminal do eleitor de uma urna eletrônica



Figura 6 – Parte traseira do terminal do eleitor de uma urna eletrônica



Legenda: 1 – Drive da memória de resultado ou drive da mídia de resultado; 2 – Compartimento da impressora; 3 – Cabo Ac (cabo de energia); 4 – Tampa dos bornes da bateria externa; 5 – LEDs AC, bateria externa, bateria total e bateria crítica; 6 – Chave liga/desliga; 7 – Controle de luminosidade; 8 – Tampa do compartimento da bateria interna; 9 – Drive de flash externo; 10 – UBS1 (utilizada apenas pela assistência técnica); 11 – Áudio (conexão de fone de ouvido); 12 – UBS2 (utilizada apenas pela assistência técnica); 13 – Cabo de conexão do terminal do mesário ao terminal do eleitor; 14 – Saída CC (para conexão com algum equipamento); 15 – Patrimônio; 16 – Parafuso da UPD (urna plástica descartável). Somente modelos 2009 e 2010 e; 17 – Parafuso da impressora. Fonte: TSE, 2022.

De modo a resumir, foi encontrado no site do TSE, em outubro de 2024, uma compilação de informações técnicas de todos os modelos de UEs (TSE, 2024d), conforme a Figura 7 até a Figura 20. Ao todo, foram produzidas **1.489,115** UEs, entre os anos de 1996 e 2022. Deste quantitativo, **568.591** urnas já foram descartadas, **194.665** estavam em processo de descarte, **152.835** foram descontinuadas e **573.024** em uso**.**

Figura 7 – UE1996



Figura 8 – UE1998



Figura 9 – UE2000



Figura 10 – UE2002



— **Ano de fabricação:** 2002
— **Fabricante:** Unisys Brasil
— **Quantidade adquirida:** 51.559
— **Situação:** Ecologicamente descartada

Figura 11 – UE2004



— **Ano de fabricação:** 2004
— **Fabricante:** Diebold Procomp
— **Quantidade adquirida:** 75.222
— **Situação:** Ecologicamente descartada

Figura 12 – UE2006



— **Ano de fabricação:** 2006
— **Fabricante:** Diebold Procomp
— **Quantidade adquirida:** 25.538
— **Situação:** Ecologicamente descartada

Figura 13 – UE2008



— **Ano de fabricação:** 2008
— **Fabricante:** Diebold Procomp
— **Quantidade adquirida:** 58.000
— **Situação:**Ecologicamente descartada

Figura 14 – UE2009



— **Ano de fabricação:** 2010
— **Fabricante:** Diebold
— **Quantidade adquirida:** 194.665
— **Situação:** em processo de descarte ecológico

Figura 15 – UE2010



— **Ano de fabricação:** 2011
— **Fabricante:** Diebold
— **Quantidade adquirida:** 117.835
— **Situação:** descontinuada

Figura 16 – UE2011



— **Ano de fabricação:** 2012
— **Fabricante:** Diebold
— **Quantidade adquirida:** 35.000
— **Situação:** descontinuada

Figura 17 – UE2013



— **Ano de fabricação:** 2014
— **Fabricante:** Diebold
— **Quantidade adquirida:** 30.142
— **Situação:** Em uso

Figura 18 – UE2015



— **Ano de fabricação:** 2016
— **Fabricante:** Diebold
— **Quantidade adquirida:** 95.885
— **Situação:** Em uso

Figura 19 – UE2020



Figura 20 – UE2022



2.2.2 Placas de Circuito Impresso (PCIs)

EEEs possuem um componente eletrônico denominado de PCI, a qual desempenha função de integração e comunicação entre as partes de um circuito, utilizado para o processamento de dados. As PCIs utilizadas na presente pesquisa são classificadas por Xavier *et al.,* (2020) na categoria de informática e telecomunicações.

A base de PCIs é denominada de laminado, que pode ser de fenolite (papelão impregnado com resina fenólica), fibra de vidro, resinas epóxi, compósita (mistura de resina fenólica com a fibra de vidro) e materiais cerâmicos, considerados não condutores (GERBASE; OLIVEIRA, 2012; HENRIQUE JÚNIOR *et al*., 2013). Esta base é coberta com uma (ou mais) fina película de substâncias metálicas (Cu, Ag, Au e Ni), consideradas como material condutor, sobre as quais são montados os componentes eletrônicos (GERBASE; OLIVEIRA, 2012; AROSSAT, 2024).

Os circuitos integrados e as outras partes eletrônicas são unidos ao laminado por soldagem por meio de uma liga de Pb-Sn. As conexões entre os componentes ocorrem no lado revestido de Cu através de caminhos condutores (GERBASE; OLIVEIRA, 2012).

As películas formam “caminhos” que conduzem a corrente elétrica dos componentes eletrônicos ligados à placa através do processo de montagem, possibilitando o funcionamento das peças individuais que, interligadas, geram a funcionalidade total do sistema (AROSSAT, 2024).

A presença de Pb na solda, fibra de vidro e aditivos antichama bromados (BFRs) nas PCIs torna os processos de recuperação de componentes potencialmente perigosos à saúde. Durante a desmontagem, trituração ou aquecimento das PCIs, trabalhadores podem ser expostos

a poeiras, vapores e fumaças tóxicas, que incluem metais tóxicos e compostos organobromados, capazes de causar toxicidade neurológica, respiratória, hormonal e até efeitos carcinogênicos. Por isso, é fundamental a adoção de medidas rigorosas de proteção, ventilação e controle ambiental para reduzir os riscos ocupacionais associados a essas atividades (HENRIQUE JÚNIOR *et al*., 2013).

Todos os EEEs possuem PCIs, componente de alta quantidade de metais valiosos. As PCIs possuem cerca de 70% de não metais (epóxi, resinas, fibras de vidro e retardadores de chama bromados) (BIRLOAGA *et al*., 2013).

A sucata de PCIs obsoletas contém dois tipos de frações: a fração metálica (FM) e a fração não metálica (FNM). Em média, as PCIs contêm aproximadamente dezessete metais em sua composição (GONÇALVEZ; FERREIRA; PEREIRA, 2015).

Na FM se concentra a maior parte dos metais base, como por exemplo, Cu, Fe, Al e Sn. Elementos raros também são encontrados em PCIs, como é o caso do Ta e do Ga (LI *et al.,* 2004; GUO, GUO e XU, 2009).

Os Metais do Grupo Platina (MGP) se fazem presentes através dos elementos: Platina (Pt), Pd, Rh, Ir e Ósmio (Os). Os metais mais valiosos, conhecidos como metais preciosos, incluem: Au e Ag (GUTIÉRREZ-GUTIÉRREZ *et al.,* 2015).

Aplicando conceitos que envolvem aspectos toxicológicos, LI *et al.,* (2004); Guo; Guo; Xu (2009), citam a presença de metais perigosos, como Cr, Pb, Be, Hg, Cd, Zn e Ni. Pb, Cd e Hg tendem a apresentar maiores concentrações em PCIs (HALL e WILLIAMS, 2007). Estes elementos, em especial o cromo e o Pb, podem impactar significativamente o meio ambiente e trazer riscos toxicológicos quando em contato com seres vivos (ANDRADE, 2002).

Além dos metais perigosos, PCIs podem conter compostos de bifenilas polibromadas e éteres de bifenilas polibromadas (ANSANELLI, 2010). Esses compostos são adicionados a diversos produtos eletrônicos, tecidos e espumas com a função de retardar ou inibir a propagação de chamas (CETESB, 2020a).

A FNM é dada por materiais cerâmicos e plásticos, sendo estes retardantes de chama, polímeros halogenados, resinas e fibras de vidro (VEIT, 2001; ANDRADE, 2002; ERNST *et al.,*2003; PARK e FRAY, 2009; MEDEIROS, 2015; BEZENA, 2019).

Dados de LI *et al.,* (2004), He *et al.,* (2006) e Kumar e Gupta (2021) apontam que a composição de PCIs é correspondente a 40% de fração metálica e 30% de polímeros e 30% de cerâmicos. Em virtude desses fatores, a reciclagem é considerada complexa, porém atrativa pela

diversidade e concentrações elementares (ERNST *et al.,* 2003; MUO *et al.,* 2004; HINO *et al.,* 2009; MARQUES, CABRERA e MALFATTI, 2013).

De forma mais detalhada, Hino *et al*., (2009) apontam que as PCIs contêm aproximadamente 30% de material metálico (Cu em circuitos; Sn, Fe e Pb nos quadros de solda; Au, Ag e Pd nos circuitos integrados). A composição e características de cada PCI podem variar conforme o ano de fabricação do equipamento, dos materiais utilizados, do processo de sua fabricação e de outras características (KUMAR; GUPTA, 2021). Para D'Adamo *et al.,* (2019) e Hubau *et al.,* (2019) a PCI é considerada um dos componentes mais valiosos dos REEEs.

2.2.3 Ciclo de vida de urnas eletrônicas

A definição de ciclo de vida do produto é dada pela PNRS (Lei nº 12.305/2010) como uma "série de etapas que envolvem o desenvolvimento do produto, a obtenção de matérias-primas e insumos, o processo produtivo, o consumo e a disposição final" (BRASIL, 2010).

Ciclo de vida, economia circular e REEEs são temas emergentes, de grande interesse em áreas da ciência, tecnologia e de meio ambiente (JI *et al.,* 2018).

O I Seminário de Compras Públicas Sustentáveis do Ministério da Fazenda, ocorrido no ano de 2016, tratou sobre o descarte ecologicamente correto de UEs e materiais das eleições (BRASIL, 2016). Ao mesmo tempo em que o ciclo de vida de produtos diminui, as quantidades de descarte aumentam (ERNST *et al.,*2003).

O órgão responsável pelo processo eleitoral no Brasil é o TSE. A implantação do voto eletrônico no Brasil teve início no ano de 1996, com um percentual de abrangência de 32% dos eleitores. Apenas parte das eleições foi realizada eletronicamente, devido à falta de tempo em fabricar o número suficiente de UEs e por ainda estar sendo uma fase de testes (TSE, 2022).

As eleições do ano de 2000 foram totalmente realizadas através do voto eletrônico. Entre as eleições, as UEs passam por vários testes, revisões e atualizações (*hardware* e *software*). O período de vida útil é de, no máximo, dez anos. Todos os equipamentos e suprimentos de UEs são fabricados por empresa ganhadora de licitação (TSE, 2022).

O ciclo de vida das UEs anteriores ao ano de 2008 passava pelas etapas de: a) processo de fabricação; b) armazenamento, conservação e preparação; c) uso das urnas em eleições (com reutilização de até seis eleições); d) desuso por obsolescência tecnológica; e) armazenamento. Após a etapa de armazenamento, nenhuma etapa adicional era até então implementada (TSE, 2025) (Figura 21).

O ciclo de vida da urna atualmente, após a etapa de desuso por obsolescência tecnológica, onde alguns quesitos de desempenho, de segurança ou de compatibilidade deixam de ser atendidos por sistemas mais novos, como por exemplo, processadores, memórias, placas e entre outros, segue para a desmontagem, descaracterização e reciclagem. Nesta última etapa, 2% do material é destinado a aterro sanitário, enquanto (até) 98% são destinados para reciclagem ou uso social e muitos destes, retornam ao processo de fabricação (TSE, 2025) (Figura 22).

Figura 21 – Cenário do ciclo de vida das urnas eletrônicas anterior ao ano de 2008

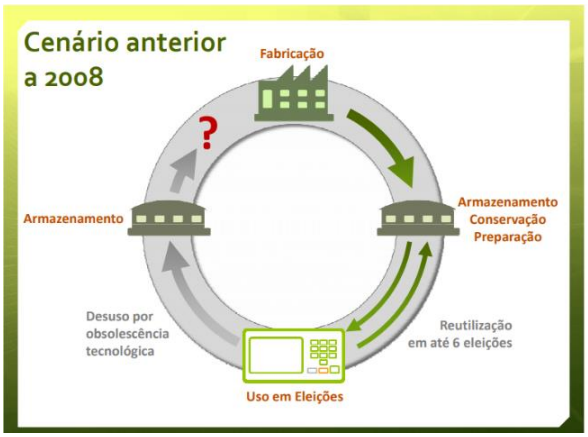
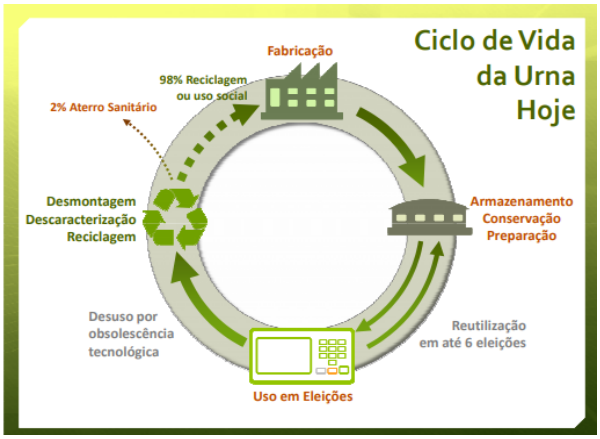


Figura 22 – Cenário atual do ciclo de vida das urnas eletrônicas



Fonte: TSE, 2025.

2.2.4 Dados de fabricação das urnas eletrônicas

De acordo com o TSE (2023a), para a fabricação das UEs são realizadas as seguintes etapas:

Primeira etapa: em local seguro e restrito, ocorre a fabricação da placa mãe, do leitor biométrico, do terminal do mesário e da impressora. No ano de 2023, foi executado pela empresa do grupo Positivo, localizada em Manaus/AM.

Segunda etapa: ocorre a etapa de integração dos módulos mais sensíveis, citados na etapa anterior, aos demais componentes físicos das urnas. As urnas são montadas e testadas, em Ilhéus/BA. Dados apontam que a etapa de montagem das urnas, engloba 120 peças e demora cerca de 70 minutos cada. A capacidade de produção é de 2.100 urnas por dia.

Terceira etapa: ocorre a realização de testes funcionais. A urna é ligada a 90 volts durante 6 horas (sem interrupções). A cada 30 minutos, um operador verifica se o procedimento está de acordo com o estabelecido. Estando em condição adequada, as urnas seguem para os testes finais.

Quarta etapa: é onde ocorrem os testes finais e são repetidas as análises de testes funcionais.

Quinta etapa: com a aprovação dos testes funcionais e finais, as urnas recebem as tampas externas, são embaladas e identificadas conforme o lote de produção.

Sexta etapa: os servidores do Tribunal realizam a etapa de auditoria, de forma amostral.

Sétima etapa: as urnas são encaminhadas para os Tribunais Regionais Eleitorais (TREs). Caso seja verificado qualquer tipo de falha, as urnas retornam para o processo de produção.

Oitava etapa: as urnas são certificadas digitalmente por certificados digitais, gerados na sala-cofre do TSE.

Nona etapa: as urnas recebem os *softwares* desenvolvidos pela Justiça Eleitoral (JE).

Segundo o TSE (2024a), o aumento de produção de urnas é constante, de forma a suprir a necessidade, em virtude do número de eleitores e em relação ao número de urnas descartadas. Dados do TSE (2024b), para as eleições municipais de 2024, apontam que o Brasil possui mais de 155 milhões de eleitores (as) aptos.

A empresa Positivo foi ganhadora da licitação do ano de 2021, para fabricar os componentes físicos (*hardware*), como o teclado e a placa-mãe. Já os programas e sistemas (*softwares*), incluindo o sistema operacional, são desenvolvidos pela Secretaria de Tecnologia da Informação do TSE (TSE, 2024c).

No ano de 2024, ocorreu a produção de 219.998 UEs, modelo 2022, para serem utilizadas nas eleições municipais de 2024. As novas urnas foram produzidas em Ilhéus/Bahia, sob responsabilidade da fábrica da Positiva Tecnologia (TSE, 2024c). As UE2022 substituíram as UEs dos modelos 2009, 2010 e 2011. As novas urnas são mais ergonômicas, possuem um processador mais potente e rápido e com mecanismos de criptografia atualizados (TSE, 2023b).

2.2.5 Dados quanto aos Processos de Licitações

De acordo com TSE (2023c), 6.123 toneladas de equipamentos de UEs foram descartadas de forma adequada, através de leilões, entre os anos de 2009 e 2018. Essa quantidade gerou uma arrecadação de quase R$ 2 milhões, que retornaram aos cofres públicos.

No ano de 2023, com a publicação do edital do Leilão nº 01/2023, 1.779 toneladas de equipamentos de UEs, modelo 2009, foram destinadas adequadamente pela empresa vencedora da licitação do ano (NGB Recuperação e Comércio de Metais), sendo que no mínimo, 95% do total, foram encaminhados ao processo de reciclagem (TSE, 2023c).

No decorrer dos anos, foi notado que um maior número de empresas mostrou interesse em participar dos processos licitatórios. Como por exemplo, no ano de 2021, houve a participação de cinco empresas, e no ano de 2023, de 10 empresas (TSE, 2023c).

No decorrer do tempo de licitações, houve aprimoramentos no sistema de logística das etapas de descarte das urnas. O TSE criou a Seção de Gestão Integrada da Tecnologia Eleitoral (SEGITEC), programou um Plano de Logística Sustentável (PLS) e incluiu mais requisitos de segurança na etapa de transporte das urnas até a empresa vencedora da licitação (TSE, 2023b).

A administração pública ressaltou que todo o processo realizado para o correto descarte e descaracterização das UEs deve-se por ser um bem público, revestido de caráter de segurança nacional. Além de ser uma das metas a serem atendidas no PLS (TSE, 2023b).

Em pesquisa ao Sistema de Controle de Licitação (SILIC), foi possível verificar as licitações de modalidade concorrência para produção de urnas e de leilões para descarte das urnas (Quadro 5).

Quadro 5 – Informações retiradas do Sistema de Controle de Licitação (SILIC) quanto à produção, ao descarte e à destinação de urnas eletrônicas

Nº da Licitação	**Modalidade de licitação**	**Data de abertura**	**Objeto**
Produção de urnas			
76/2009	Concorrência	17/11/2009	Registro de preços para eventual produção e fornecimento de 250.000 urnas eletrônicas (UE2009) (...).
77/2011	Concorrência	08/11/2011	Registro de preços para eventual produção e fornecimento de até 90.000 urnas eletrônicas (UE2011) (...).
53/2015	Concorrência	06/10/2015	Registro de preços para eventual produção e fornecimento de até 150.000 urnas eletrônicas (UE2015) (...).
43/2019	Concorrência	13/09/2019	Registro de preços para eventual produção e fornecimento de até 180.000urnas eletrônicas (UE2020) (...).
03/2021	Concorrência	15/10/2021	Registro de Preços, para eventual produção e fornecimento de até 176.000 urnas eletrônicas (UE2022) (...).
Descarte e destinação de urnas			
31/2009	Não consta	14/05/2009	Alienação de bens e materiais inservíveis para descarte e destinação ecologicamente correta das urnas eletrônicas modelos 2000 e 2002 e componentes relacionados indicados pelo TSE (...).
103/2011	Não consta	22/12/2011	Alienação de bens e materiais inservíveis para descarte e destinação ecologicamente correta das urnas eletrônicas modelos 2000 e 2002 e componentes relacionados indicados pelo TSE (...).
58/2018	Leilão	18/07/2018	Alienação de bens inservíveis para descarte e destinação ecologicamente correta das Urnas Eletrônicas modelos 2004 e 1996 (...).
01/2021	Leilão	08/09/2021	Alienação de bens inservíveis para descarte e destinação ecologicamente correta das Urnas Eletrônicas (UE2006 e UE2008) (...).
01/2023	Leilão	19/09/2023	Alienação de bens inservíveis para descarte e destinação ecologicamente correta das Urnas Eletrônicas (UE2009) (...).

Fonte: TSE (2024c).

No entanto, não foi encontrado os números confirmados de urnas produzidas e urnas descartadas para cada eleição ou tempo por desuso por obsolescência, porém alguns dados encontrados nas pelas fontes do TSE, serviram de base de informação para gerar um quantitativo estimado.

Foram produzidas 219.998 unidades da UE2022 (modelo mais recente), fabricação concluída em 17/04/2024 (JUSTIÇA ELEITORAL, 2024a). O total de UEs disponíveis para as eleições de 2024 foi um quantitativo de 571.024 urnas (posição divulgada pelo TSE para o pleito de 6/10/2024). (JUSTIÇA ELEITORAL, 2024b).

O quantitativo de urnas fora de uso destinadas ao descarte (modelo UE2009) foi de 195.227 unidades (operação de descarte anunciada em 21/02/2025) (JUSTIÇA ELEITORAL, 2025). Considerando as urnas em disponibilidade para 2024 (571.024) mais as urnas fora de uso destinadas ao descarte (195.227), estima-se a produção de 766.251 urnas produzidas ao longo do tempo.

2.2.6 Etapa de destinação das urnas eletrônicas

Quando as urnas e os seus suprimentos são coletados e transportados até as estruturas da empresa ganhadora da licitação, primeiramente, ocorre o seu desmonte e separação dos materiais por tipo: metal, plástico, placas leves (com mais probabilidade de ter metais nobres), placas pesadas (com menor valor de mercado), borracha, bobinas, baterias e outros materiais (TSE, 2020).

No descarte das UEs, do modelo de 1996, a empresa contratada destinou os cabos para a produção de sandálias e as espumas das caixas das urnas, para confecção de pufes. As baterias são destinadas conforme a Resolução CONAMA nº 401 (BRASIL, 2008) e encaminhadas para aterros credenciados (TSE, 2020).

Através do SILIC, foi possível compilar os dados de composição dos diferentes modelos de urnas, massa e valor de venda do material. De acordo com o Projeto Básico, dos Editais de licitações, os conjuntos de urnas são compostos por: urna eletrônica, embalagem, bobina, bateria e urna plástica descartável. A composição pode ser visualizada na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição e massa dos componentes de uma Urna Eletrônica UE96

Material	Massa (kg)
Bateria	2,403 kg
Ferro	1,036 kg
Fio Misto	0,680 kg
Papelão/Papel	1,900 kg
Placa Leve	0,587 kg
Placa Pesada	0,649 kg
Plástico	2,370 kg
Latão	0,020 kg
Resíduo	0,145 kg
Massa total por urna	**9,790 kg**

Fonte: TSE, 2020.

Considerando a literatura técnica e normativa consultada, as PCIs puderam ser classificadas em três categorias principais — leves, intermediárias e pesadas — conforme suas características físicas, composição e aplicação. Essa sistematização encontra-se apresentada no Quadro 6, que consolida informações de normas técnicas e estudos de caracterização de PCIs.

Quadro 6 – Classificação de Placas de Circuito Impresso (PCIs) segundo características físicas e composição

Categoria	Descrição Geral	Principais Componentes	Composição Média (% em massa)	Aplicações Típicas	Referência Técnica
Placas leves (marrons)	Apresentam baixa densidade de componentes eletrônicos e elevada proporção de substrato polimérico (fibra de vidro e resina epóxi). Possuem menor teor de metais valiosos	Resistores, capacitores, conectores simples, trilhas finas de cobre	25–35% metais (principalmente Cu), 60–70% não-metálicos (resina, fibra de vidro), <1% metais preciosos	Fontes de alimentação, periféricos simples, eletrodomésticos básicos	Adaptado de ABNT (2013); UNEP (2011); Bizzo, Figueiredo e Andrade (2014)
Placas intermediárias	Possuem média densidade de componentes e quantidade intermediária de metais. Combinam dispositivos discretos e integrados	Chips simples, relés, resistores, capacitores e trilhas médias	35–45% metais, 50–60% não-metálicos, <1% metais preciosos	Equipamentos de áudio, vídeo e automação	Adaptado de ABNT (2013); PARK & FRAY (2009)
Placas pesadas (verdes)	Apresentam alta densidade de componentes eletrônicos, múltiplas camadas condutoras e elevada concentração de metais valiosos	Processadores, chips BGA, conectores dourados, capacitores eletrolíticos, dissipadores de calor	40–55% metais (Cu, Sn, Pb, Au, Ag, Pd), 40–50% não-metálicos, até 2% metais preciosos	Placas-mãe, servidores, equipamentos de informática e telecomunicações	Adaptado de UNEP (2011); ABNT (2013); Bizzo, Figueiredo e Andrade (2014)

De acordo com os Projetos Básicos, partes integrantes dos Editais referentes aos descartes das urnas, a Tabela 3 foi elaborada para demonstrar o valor mínimo exigido de lance para o quilograma de urnas.

Tabela 3 – Valor mínimo de lance (R$/Kg) de urnas eletrônicas

Leilão	Modelo da UE	Lance mínimo (R$/Kg)
31/2009	UE1996	0,03
103/2011	UE2000 UE2002	0,38
58/2018	UE2004	0,08
01/2021	UE2006 UE2008	0,79
1/2023	UE2009	0,78

Fonte: Adaptado de TSE (2024c).

2.2.7 Plano de Logística Sustentável

O PLS foi elaborado no ano de 2023, com prazo de vigência entre os anos de 2021 e 2026. Através do Plano, foi possível obter informações com maiores detalhes sobre o sistema implantado no Brasil.

O Plano possuía meta de "descartar, de forma ambientalmente correta, 100% do material gerado, em que, no mínimo, 95% devem ser para reciclagem e 5%, para aterros certificados" (45 p.) e dezesseis indicadores (45-46 p.) (TSE, 2023b).

Para cumprimento da meta, o plano apresenta os dados dos indicadores estabelecidos. Para atendimento da meta, o PLS trás o Quadro 7, que apresenta a série histórica de descarte entre os anos de 2015 e 2020.

Quadro 7 – Série histórica de descarte entre 2015 e 2020, das urnas eletrônicas

Indicador	Unidade de medida	2015-2020
Descarte de urnas eletrônicas descartadas	Urnas descartadas	**91.100**
Descarte de bateria	Toneladas	664,15
Descarte de bobina	Toneladas	69,75
Descarte de cabinas	Toneladas	246,18
Descarte de outras peças	Toneladas	546,67
Total descartado	Toneladas	1.526,75
Quantidade de resíduos de urnas destinados à reciclagem	Toneladas	1.476,27
Descarte do material gerado para reciclagem	Porcentagem	**96,7%**
Quantidade de resíduos de urnas destinados a aterros certificados	Toneladas	50,48
Descarte do material gerado em aterros certificados	Porcentagem	3,3%

Fonte: Adaptado de PLS, p. 45, 2023. (Brasil, 2023b).

2.2.8 Gestão atual e reciclagem de urnas eletrônicas no Brasil

Dados e informações de empresas da área de recuperação de resíduos eletroeletrônicos foram contatados e relatados nos itens a seguir.

2.2.8.1 Gestão de Resíduos Eletroeletrônicos de Urnas Eletrônicas – Empresa 1

Através do acesso ao "Relatório Final do Descarte das Urnas Eletrônicas UE1996, UE2004 e Correlatos Previsto" entre TSE e elaborado por uma empresa ganhadora do processo licitatório no ano de 2019 foi possível verificar as etapas do ciclo de vida das UEs bem como a comprovação do descarte ecologicamente correto dos equipamentos.

2.2.8.1.1 Etapa de coleta, transporte e armazenamento temporário das urnas eletrônicas

As etapas se iniciam pelo recolhimento das urnas nos Tribunais Regionais Eleitorais (TREs) no prazo e regiões determinadas a partir do contrato firmado. Os veículos transportadores são vistoriados antes e após o carregamento.

Após o carregamento, os veículos são lacrados pelo servidor regional, que armazena o número do respectivo lacre. As UEs são descarregadas na sede da empresa ganhadora da licitação, onde ficam em armazenamento temporário, caso necessário, anterior à etapa de descaracterização. As etapas de coleta, descarregamento, armazenamento e descaracterização possui o acompanhamento da equipe de fiscalização do TSE.

2.2.8.1.2 Etapa de descaracterização das urnas eletrônicas

A etapa de descaracterização consiste na retirada de marcas ou dados de modo a não possibilitar a identificação ou recuperação de materiais. É realizada pelas etapas de: a) retirada da caixa da embalagem; b) remoção dos fios externos, bateria, placas de patrimônio e adesivos, c) desmontagem do terminal do eleitor e terminal do mesário, d) separação e segregação por tipo de material e, e) moagem ou destruição dos materiais.

2.2.8.1.3 Triagem e desmontagem manual das urnas eletrônicas

A triagem consiste inicialmente na separação do EEE das caixas de papelão. As UEs são enviadas para a desmontagem manual em galpões da empresa detentora de contrato, onde

ocorre a retirada de componentes, como por exemplo, teclas, carcaças, PCIs, parafusos e outros, de forma separada para cada terminal. O papelão é organizado e prensado para ser enviado ao processo de reciclagem.

2.2.8.1.4 Cominuição das urnas eletrônicas

A etapa de cominuição consiste em descaracterizar as UEs com o uso de moinhos de facas ou outro equipamento, que consiga diminuir o tamanho dos componentes (teclas, borracha, cabos, plásticos e outros). Para a moagem das PCIs, é utilizado um moinho exclusivo, de forma a evitar possíveis contaminações.

Os resíduos não passam por pós-tratamento após a etapa de moagem, ou seja, não é realizada a etapa de beneficiamento para a separação das frações metálica e não metálica, sendo as placas comercializadas com composição sem processamento.

2.2.8.1.5 Comercialização das urnas eletrônicas

A etapa de venda consiste na comercialização dos diferentes tipos de resíduos, para diferentes empresas de cada ramo. Comercializa-se as PCIs cominuídas, as sucatas de bateria de chumbo ácido, sucatas não metálicas, resíduos de plásticos diversos com metais e chave de contato mecânico, sucatas mistas soltas (MISS) e graúdas para corte (GRAU), aparas de papelão, de papelão solto, de papel misto solto (bobinas de papel) e de sucatas de papelão, cabos elétricos.

2.2.8.1.6 Dados obtidos com o descarte final das urnas eletrônicas

Conforme a declaração emitida pela empresa responsável, alcançou-se a reciclagem total de 96,69% das UE1996, UE2004 e correlatados. O tipo de resíduo processado ou destinado em aterro sanitário e quantidades são apresentados no Quadro 8.

No relatório não foram disponibilizadas as quantidades coletadas de UEs e correlatados. Porém verificou-se que os dados trazidos no Quadro 7 são os mesmos apresentados pela empresa, no Quadro 8. Ao total 91 mil urnas e correlatos foram destinados entre esses anos e suas massas variam conforme o modelo, por exemplo, a massa total da UE1996 é de 11 kg e da UE2004 de 8 kg (TRE, 2022).

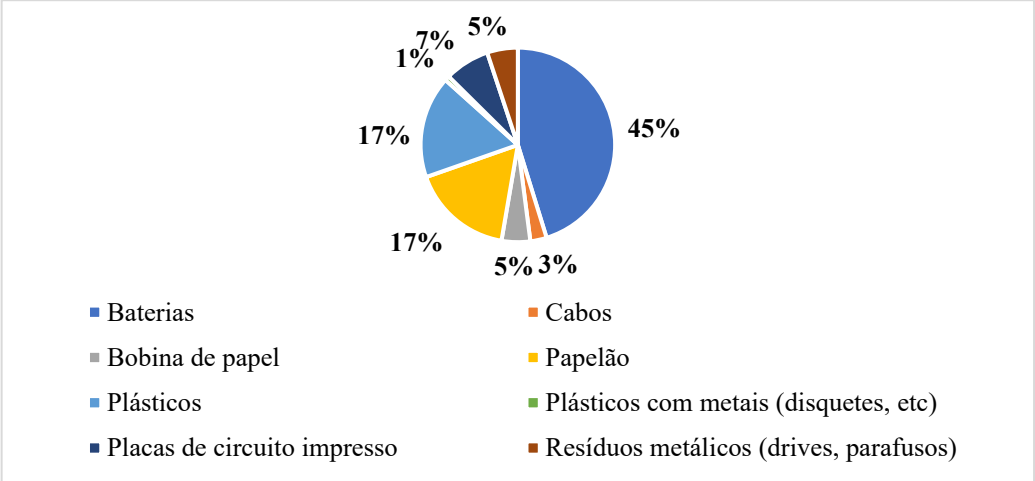
Quadro 8 – Quadro quantitativo de material processado e destinação final por tipo de material

Tipo de resíduo	Quantidade (Ton.)
Resíduo de bateria	664,15
Resíduos de plástico (UE96/UE2004/Terminal do Mesário/MII/MIE 2002)	249,32
Resíduos de bobinas (Bobinas de papel para impressão)	69,75
Resíduos de papelão (Embalagens em geral)	246,18
Resíduos de cabos elétricos (Cabos e fios de energia e transmissão de dados)	40,46
Resíduos de eletrônicos (Placas de circuito interno, memórias, processadores)	109,75
Resíduos de drive/Impressoras/Parafusos e itens metálicos	75,18
Resíduos e sucatas não metálicos (Alumínio - Torre Placa de Energia/Aço Inox - Impressora UE96/Placas de Patrimônio)	9,85
Resíduos de plásticos diversos com metais (Chave de contato mecânico)	11,6
Rejeito	50,48
Total de material processado	1.526,75

Fonte: Adaptado da Empresa correlatada, 2019.

Na Figura 23 é mostrada a composição das urnas eletrônicas com base nas informações diretamente fornecidas pela empresa.

Figura 23 – Principais componentes de urnas eletrônicas em % mássica



Fonte: Empresa correlatada, 2019.

Através de uma pesquisa qualitativa e de um questionário (instrumento de coleta de dados), o trabalho de Menezes (2019) objetivou realizar um estudo de caso referente a organização de descarte de REEEs do TRE de Sergipe. O trabalho concluiu que o TSE, é um órgão envolvido e preocupado com a adequada destinação de seus EEEs (computadores e UEs), e que realiza supervisão contínua para que os TREs executem as etapas de descarte segundo diretrizes impostas pelo TSE. Os procedimentos de descarte adotados pelo TSE podem servir como modelo para o setor público e privado.

2.2.8.2 Gestão de Resíduos Eletroeletrônicos de Urnas Eletrônicas – Empresa 2

Através de contato via correio eletrônico com colaborador da Empresa, entre julho e agosto de 2024 e através do *site* da empresa, informações referentes à área das PCIs foram obtidas.

2.2.8.2.1 Etapas de processamento dos Resíduos provindos de Equipamentos Eletroeletrônicos

A Logística ocorre de diversas maneiras, porém a empresa não atua na coleta de EEEs para a desmontagem. Essa atividade é realizada por sucateiros e empresas de gestão. A empresa realiza a compra dos metais contidos nas placas: Au, Ag, Pd e Cu, são os metais que a empresa valoriza após realizar as etapas de amostragem e análise dos materiais. Após a identificação das quantidades de metais, fixa-se o dólar e a cotação dos metais para posterior valorização do lote.

Os REEEs provem de vários clientes e o controle quanto à composição dos REEEs recebidos na empresa é dado pelos fornecedores. A empresa os recebe, amostra, analisa, compra e exporta para a empresa matriz para a reciclagem.

A empresa realiza uma caracterização rigorosa das PCIs antes do envio para suas instalações (ou para processamento em outros países). As PCIs são pré-classificadas pelos fornecedores conforme sua composição e valor, a empresa realiza amostragem interna para avaliação precisa dos teores metálicos e composição e remove previamente elementos indesejados (baterias, Al e Fe) antes do envio.

Para a exportação das PCIs do Brasil para unidades em outros países, é necessário realizar todos os trâmites de movimentação transfronteiriça, por serem classificadas como resíduos perigosos. Os materiais são exportados para a unidade de reciclagem localizada em Hoboken, na Bélgica.

No Brasil, a empresa desempenha apenas as etapas industriais, que consistem no processo mecânico de amostragem e análise. A reciclagem e a recuperação dos metais acontecem na unidade na Bélgica.

Segundo informações provindas da empresa, as etapas do processamento das PCIs são demonstradas na Figura 24. Seguem os dados:

- Primeira etapa: as placas passam por um processo de trituração e homogeneização;
- Segunda etapa: no material resultante da primeira etapa, são coletadas amostras para determinação da composição química do lote;

- Terceira etapa: os materiais são enviados a um forno de alta temperatura. A pasta orgânica é queimada e os metais se concentram em uma fase líquida. Depois de retirada do forno, os metais concentrados em lingotes, seguem para separação e refino. As escórias (sem metais) são destinadas para a pavimentação de estradas.

Figura 24 – Fluxo de amostragem, análise e reciclagem da empresa



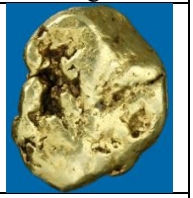
Fonte: Empresa 2, 2024.

2.2.8.2.2 Informações obtidas através do site da Empresa 2 do ramo de Resíduos Eletroeletrônicos (REEEs) de Urnas Eletrônicas (UEs)

A empresa recupera e vende metais preciosos (Ag, Au, Pt, Pd, Rh, Ir e Ru), metais menores (In, Se, Te, Sb, Sn e Bi) e metais básicos (Pb, Cu e Ni). O foco é na recuperação e venda de Ag, Au, Pd e Cu. Al e Fe não são valorizados pela empresa. O Quadro 9 apresenta detalhes dos principais elementos.

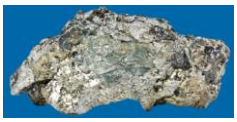
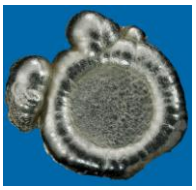
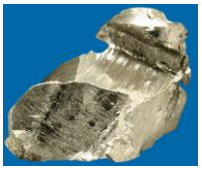
Quadro 9 – Informações de propriedades e dos principais metais para reciclagem

(Continuação)

Elemento	Propriedades	Principais usos	Imagem
Au	É o metal mais maleável e dúctil conhecido. Tem coloração amarelo brilhante, densidade elevada e excelente condutividade térmica e elétrica, comparável apenas ao Cu e à Ag.	Utilizado na indústria eletrônica (fios, revestimentos, conectores e PCIs), em joias e em dispositivos portáteis devido à sua alta condutividade e resistência à corrosão.	
Cu	Altamente condutor de eletricidade, é um dos poucos metais com coloração distinta (rosa-salmão), embora muitas vezes pareça vermelho devido à oxidação superficial.	Empregado em fios, cabos, motores, equipamentos eletrônicos e eletrodomésticos obsoletos, além de estar presente em sucata eletrônica e em frações de trituração de veículos e aparelhos em fim de vida útil.	

Quadro 9 – Informações de propriedades e dos principais metais para reciclagem

(Conclusão)

Co	Metal ferromagnético, capaz de se magnetizar sob campo magnético. Forma superligas que mantêm resistência sob altas temperaturas e estresse.	Utilizado como pigmento na Antiguidade; atualmente empregado em baterias recarregáveis, catalisadores petroquímicos e ligas para aplicações aeroespaciais.	
Li	Metal alcalino branco-acinzentado, de menor densidade entre os metais e extremamente reativo. Apresenta a maior eletropositividade metálica.	Baterias recarregáveis, dispositivos portáteis, veículos elétricos, produção de vidro e cerâmica, graxas para engrenagens, catalisadores, ligas de alumínio para aviação, sistemas de resfriamento e medicamentos antidepressivos.	
Mn	Metal duro e quebradiço, de cor cinza-rosada. Quando puro, é muito reativo e pode queimar em contato com O. Oxida facilmente e reage com água como o Fe.	Utilizado em baterias e relógios de aço inoxidável. Também é um elemento traço essencial ao corpo humano, concentrado principalmente nos ossos.	
Ni	Metal cinza-prateado, duro, resistente, maleável e flexível. Forma superligas resistentes a altas temperaturas e estresse.	Presente em baterias de íons de lítio (celulares, e-bikes, veículos elétricos), em produtos da indústria química e de construção, em utensílios domésticos (talheres, panelas), arquitetura e revestimentos anticorrosivos.	
Pd	Metal branco-prateado, dúctil, maleável, pouco reativo e altamente resistente à corrosão.	Aplicado em joias, implantes dentários, componentes eletrônicos (computadores, celulares), conversores catalíticos de veículos e capacitores cerâmicos multicamadas.	
Ag	Metal branco brilhante, mais dúctil que o Cu, com as maiores condutividades elétrica e térmica entre todos os metais. Ao solidificar, forma bolhas por liberação de O.	Usada em joias, talheres, dispositivos eletrônicos, espelhos, odontologia, roupas antibacterianas, fotografia, catalisadores, motores, radiadores, serras e refrigeradores.	
Pt	Metal branco-prateado, 30 vezes mais raro que o ouro, altamente denso, dúctil, maleável, com alto ponto de fusão e resistência extrema à corrosão.	Conversores catalíticos veiculares, joias, ligas odontológicas, utensílios de laboratório, marcapassos, medicamentos contra o câncer, discos rígidos e termopares.	

Fonte: Adaptado da Empresa 2, 2024.

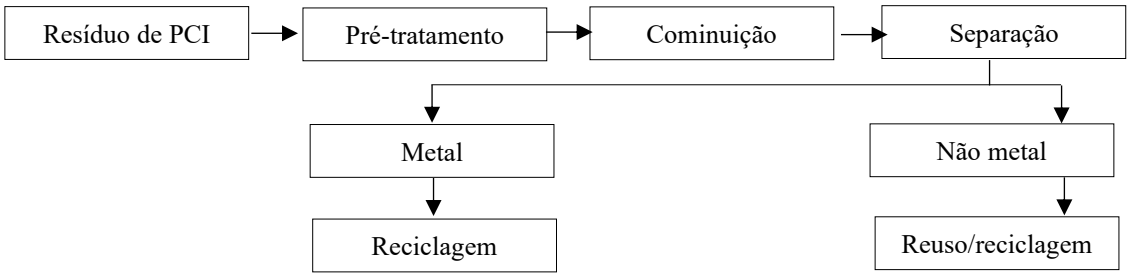
2.3 Técnicas de reciclagem e caracterização de placas de circuito impresso (PCIs)

Na reciclagem de PCIs, diferentes tipos de processos têm sido utilizados. Citam-se os processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos, bio-hidrometalúrgicos e processos físicos (CUI e ZHANG, 2008). Para Xavier e Ottoni (2021), a reciclagem de REEEs pode ser descrita pertencendo a três grandes áreas: hidrometalurgia, bio-hidrometalurgia e pirometalurgia.

A reciclagem de PCIs geralmente se inicia na fase de pré-tratamento (desmontagem do material reutilizável e retirada de peças perigosas) (MUO *et al.,* 2004). A fase de pré-tratamento anterior à aplicação de métodos de separação magnéticos, eletrostáticos e de densidade diminuem as perdas de metais entre 10 e 35%, devido à liberação suficiente dos metais de outros materiais existentes (CUI e ZHANG, 2008).

O trabalho de Hadi *et al.,* (2014) concluiu que os processos físicos são eficientes para a separação da FM da FNM. Para Muo *et al.,* (2004), o processo físico para reciclagem pode ser definido em quatro etapas: a) pré-tratamento; b) cominuição; c) separação e; d) reciclagem/reutilização. A Figura 25 demonstra o fluxograma do processo de reciclagem física.

Figura 25 – Processo de reciclagem física de Placas de Circuito Impresso (PCIs)



Fonte: Adaptado de Muo *et al.,* (2004).

As rotas pirometalúrgicas estão entre as mais empregadas na recuperação de Cu e metais preciosos a partir de REEEs. Tais processos, concebidos inicialmente para a extração de metais não ferrosos, como Cu, Pb e Ni, vêm sendo adaptados e aplicados ao contexto específico desses resíduos. Para sua implementação, contudo, torna-se necessário o pré-tratamento dos REEEs, de modo a assegurar uma composição estável e a maximizar os teores de metais, sobretudo os de maior valor econômico. Apesar de sua eficiência, essa abordagem apresenta limitações importantes, destacando-se o elevado consumo energético, a emissão de gases tóxicos (MUO *et al*., 2004) e a perda de metais na escória, incluindo elementos de terras raras e Ta (KHANNA *et al*., 2018).

Estas restrições limitam a aplicação de processos pirometalúrgicos na reciclagem de REEEs a algumas poucas empresas especializadas (Aurubis, Glencore e Umicore), localizadas em partes específicas do globo (WIESZCZYCKA, TYLKOWSKI e STASZAK, 2018).

Os processos hidrometalúrgicos envolvem a dissolução de metais em meio alcalino ou ácido. É considerado eficaz para a lixiviação seletiva de metais básicos e preciosos (TUNCUK *et al.,* 2012; HUANG, GUO e XU, 2009).

Os metais são dissolvidos em soluções por agentes lixiviantes (ácidos ou básicos), como por exemplo, o cianeto, HNO_3, H_2SO_4, HCl e outros. Após, é necessário prosseguir com técnicas adicionais para extração dos metais (ASHIQ, KULKARNI e VITHANAGE, 2019).

Ainda conforme Muo *et al.,* (2004), processos hidrometalúrgicos têm como desvantagem a geração de quantidades expressivas de efluentes ácidos e básicos, que necessitam ser descartados adequadamente, o que onera o processo.

Na bio-hidrometalurgia são utilizados microrganismos (bactérias, fungos e algas) para a extração de metais, convertendo-os em sais solúveis em meio aquoso. Na primeira fase (biolixiviação) os microrganismos oxidam ou liberam agentes oxidantes para a solubilização dos metais. Na segunda fase (biosorção) os organismos não precisam estar vivos para interagirem e extraírem os metais, por se tratar de um fenômeno passivo (KIDDEE, PRADHAN e MANDAL, 2020).

O estudo de Holgersson *et al*., (2018) evidenciou que os teores de Pb em *smartphones* mais recentes são significativamente inferiores aos observados em modelos mais antigos, em função da substituição da solda convencional. A partir de 2006, diversos fabricantes de equipamentos eletrônicos passaram a adotar placas consideradas *lead free*, compostas por ligas de Ag, Cu e Sn, ou ainda apenas por Cu e Sn, em substituição à solda tradicional formada por aproximadamente 60% de Sn e 40% de Pb (60:40), classificada como altamente tóxica. No que se refere aos metais preciosos, observou-se que os teores de Ag e Au permaneceram em níveis semelhantes. O trabalho também ressalta que outros equipamentos, como roteadores, *modens* e *hubs* de Internet, configuram-se como potenciais fontes de metais preciosos. O Quadro 10 apresenta uma síntese dos métodos usuais para a caracterização de PCIs.

2.3.1 Preparo das amostras

Na realização de caracterização de PCIs é necessário a aplicação de um método de redução de tamanho (cominuição) visando a liberação de metais (HUBAU *et al.,* 2019), visto que ela é essencial na caracterização de REEEs (OTUNNIYI, VERMAAK e GROOT, 2009; PRIYA e HAIT, 2017).

A etapa de cominuição antecede à etapa de separação granulométrica, geralmente efetuada por meio de peneiramento (MORAES, 2011). As PCIs contêm partes de aço, característica que a torna de difícil cominuição. Também possuem folhas de Cu e são reforçadas por fibra de vidro, tornando um material de alta rigidez e tenacidade, necessitando assim de equipamento adequado para aplicação dessa etapa (MUO *et al.,* 2004).

Os autores Bi *et al.,* (2010) recomendam os moinhos de facas como forma eficiente de liberação de metais. Após as PCIs serem cominuídas até o tamanho desejado, pode-se aplicar a etapa de separação granulométrica (MUO *et al.,* 2004).

O processamento mecânico é considerado menos agressivo por produzir resíduos menos poluentes quando comparado a métodos piro e hidrometalúrgicos (SANTOS, LIRA e MORAES, 2016), sendo aplicado isoladamente, ou antes, destes para concentração da fração metálica e redução de custos associados à recuperação dos metais.

Para a alimentação no moinho de facas, as PCIs do trabalho de Ernst *et al.,* (2003) foram inicialmente quebradas em pequenos pedaços de aproximadamente 3 cm x 3 cm e no trabalho de Hall e Williams (2007) em 2 cm x 2 cm para alimentação no reator de pirólise.

O estudo de Rebello *et al.,* (2020) relatou que metais em polímeros e cerâmicos não são totalmente liberados em partículas maiores que 1 mm.

No estudo de Birloaga *et al*., (2013) sobre a influência de diversos fatores no processamento hidrometalúrgico de resíduos de PCIs para recuperação de cobre e ouro, foi necessário obter um menor tamanho de partículas, para garantir exposição ao metal para os reagentes de lixiviação.

Os autores Hubau *et al.*, (2019), utilizaram grandes trituradores seguidos de moinhos de facas para a cominuição de PCIs de EEEs (computadores, equipamentos de áudio e vídeo, brinquedos, produtos de higiene pessoal e pequenos utensílios de cozinha), atingindo partículas menores que 1mm. No mesmo estudo, os autores afirmam que metais são liberados, ou disponibilizados dos polímeros, cerâmicos e vidros a partir da cominuição em partículas desse tamanho.

O uso de processo mecânico no trabalho de Veit (2001), com amostras de granulometria abaixo de 1 mm, recuperou cerca de 80% dos metais existentes. Das três frações granulométricas (0,25mm, 0,50mm e 1mm) concluiu que é possível uma concentração maior de metais nas frações mais grosseiras (0,50mm < fração < 1mm).

A cominuição das amostras utilizadas no trabalho de Veit *et al.,* (2006) e Veit *et al.,* (2008) foi dado em moinhos de facas, atingindo granulometria inferior a 1mm, objetivando garantir um ótimo grau de liberação dos metais. Amostras cominuídas abaixo de 1 mm apresentaram metais como Cu, Zn, Pb, Fe, Ni, Cd, Cr e Mn em grande quantidade (PRIYA e HAIT, 2017).

2.3.2 Técnicas de caracterização sem digestão

A caracterização de PCI auxilia na escolha de qual processo de reciclagem é o mais adequado material de estudo (JESUS, 2015). O estudo de Ernst *et al*., (2003) mostrou que as técnicas de preparação de amostras desempenham um papel decisivo para a precisão de análises.

É importante o controle quanto aos fornecedores de produtos químicos, as técnicas para manusear os equipamentos e o cuidado de utilizar equipamentos de proteção (KLOEPFFER, 2001; ERNST *et al.,* 2003).

Com a elaboração de um planejamento experimental é possível definir a estratégia de preparo de amostra e da técnica de determinação (OTUNNIYI, VERMAAK e GROOT, 2009). O Quadro 10, já apresentado, traz os métodos usuais para a caracterização de PCIs.

2.3.2.1 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Analisar os materiais é uma etapa essencial para a caracterização, pois permite identificar as suas estruturas, os seus defeitos e as suas propriedades. A técnica de MEV é um tipo de microscopia em que um feixe de elétrons focalizado varre a superfície da amostra, interagindo com a matéria, gerando diferentes tipos de sinais que podem oferecer informações sobre a morfologia e composição química do material (MALISKA, 2020).

O MEV é um equipamento versátil, de fácil preparação das amostras, de alta resolução da superfície de material sólido (capaz de atingir uma resolução de até 1 nm), que possibilita a visualização tridimensional das amostras, aumento espacial e profundidade do foco (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007; AFINKO SOLUÇÕES EM POLÍMEROS, 2020).

A montagem das amostras para uso no MEV se inicia pela deposição de certa quantidade da amostra em uma fita dupla-face geralmente metalizada de C ou Cu, fixada em um suporte metálico (*stub*). As fitas são utilizadas para a melhora da condutividade do material (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007).

A preparação das amostras se dá pela necessidade de interação do feixe eletrônico com a amostra. Faz-se necessário que as amostras sejam condutoras, e quando não forem elas podem se tornar através de processo de recobrimento por metalização. O recobrimento das amostras melhora o nível de emissão de elétrons, facilitando a construção da imagem (GOLDSTEIN *et al*., 1992).

O recobrimento de amostras com metais ou C permite que amostras que não são condutoras elétricas, possam ser analisadas no MEV. Além disso, o recobrimento das amostras reduz o carregamento de elétrons, melhora a emissão de elétrons secundários, protege amostras sensíveis ao feixe e reduz possíveis danos que o feixe possa causar na amostra (GOLDSTEIN, 2017).

O recobrimento por deposição metálica de Au, de liga Au-Pd ou Pt, são alguns dos mais utilizados. O recobrimento é realizado por um equipamento denominado de metalizador, onde parâmetros, como a corrente aplicada, o tempo de deposição, a altura entre a amostra e alvo, podem ser ajustadas. No equipamento, ocorre o aquecimento de fibras de C (em torno de 2000 ºC), em vácuo, que evaporam sob a amostra (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007).

A metalização por recobrimento de C é utilizada em grande escala e recomendada para quando a amostra é heterogênea e de diferentes alturas, pois se espalham na amostra, de modo uniforme (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007).

A resolução de uma imagem é determinada pelo diâmetro de formação da imagem. Esta pode ser dada por elétrons secundários (SEIs), elétrons retroespelhados (BSE) ou raios-X (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007), sendo os dois primeiros, os sinais de maior interesse para a formação de uma imagem (MALISKA, 2020).

Os SEIs fornecem o contraste das amostras, através do relevo de sua superfície. São mais sensíveis para se observar a rugosidade da amostra, correspondem aos elétrons da própria amostra, provindos do resultado de interações inelásticas do feixe com a própria superfície (AFINKO SOLUÇÕES EM POLÍMEROS, 2020; MALISKA, 2020).

Os BSEs geram imagens características de variação de composição, resultantes de interações elásticas entre os elétrons primários do feixe e regiões mais profundas da amostra. Diferentemente dos SEIs, cujo contraste está associado principalmente ao relevo superficial, os BSEs fornecem contraste em função do número atômico dos elementos constituintes: áreas mais claras na micrografia correspondem a elementos de maior número atômico, enquanto as regiões mais escuras indicam elementos mais leves (AFINKO SOLUÇÕES EM POLÍMEROS, 2020; MALISKA, 2020). Além disso, por operarem em faixas mais elevadas de energia, os BSEs apresentam maior energia do que os SEIs (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007).

A análise dessas interações é viabilizada por detectores acoplados ao MEV, que permitem avaliar a energia dos elétrons durante sua interação com a superfície. Adicionalmente, o MEV pode ser equipado com detectores de raios X, como EDS, possibilitando a identificação qualitativa dos elementos químicos presentes na amostra.

2.3.2.2 Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)

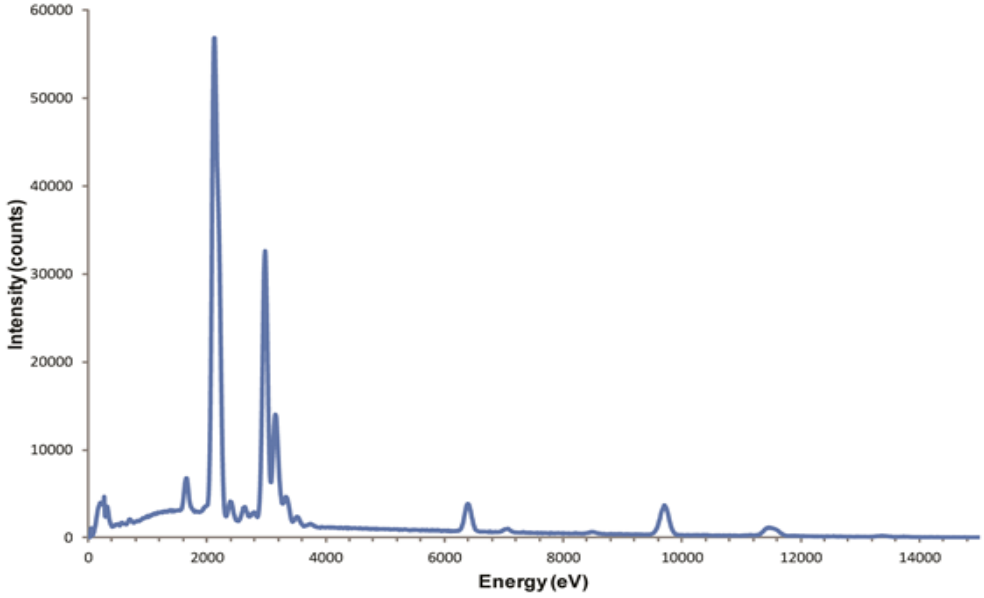
O equipamento de EDS separa os raios-X característicos dos diferentes elementos num espectro de energia, permitindo a realização de análise química na amostra (MALISKA, 2020).

Segundo *Thermo Fisher Scientific* (2024) "... uma amostra excitada por uma fonte de energia (como o feixe de elétrons de um microscópio eletrônico) dissipa parte da energia absorvida ejetando um elétron da camada central (...)". Dessa forma, um elétron da camada externa, preenche o lugar do elétron da camada central e libera a diferença de energia desta troca, em forma de um espectro característico (MALISKA, 2020).

O processo mencionado é possível, pois cada elemento químico libera fótons com frequências específicas (MALISKA, 2020). A detecção dos raios-X, pode ser feita utilizando diferentes métodos de detecção: por dispersão de comprimento de onda (WDXRF), por dispersão de energia (EDXRF); com reflexão total (TRXRF); por radiação síncrotron (RXRF); com microssonda (μ-XRF) (KRUMMENAUER, 2017). Na pesquisa foi escolhido o método analítico EDXRF.

Os resultados obtidos por EDS são apresentados na forma de espectro de energia em função da intensidade relativa dos picos (Figura 26), acompanhado de uma tabela contendo a composição elementar estimada e as respectivas porcentagens em caráter qualitativo (AFINKO SOLUÇÕES EM POLÍMEROS, 2020).

Figura 26 – Gráfico exemplificativo gerado a partir da técnica de Espectroscopia por energia dispersiva



Fonte: Maliska, 2020.

A Análise possui características como a sensibilidade às baixas concentrações, devido aos limites de detecção mínima ser inferiores de 0,1%, alto grau de precisão relativa (2–4%), não destrutivo, fácil preparação da amostra e rapidez na execução (THERMO FISHER SCIENTIFIC, 2024).

2.3.2.3 Fluorescência de Raios-X (FRX)

A técnica de FRX é considerada uma técnica não destrutiva, que identifica os elementos presentes na amostra analisada e determina as suas concentrações. Baseia-se no número de raios-X característicos detectados por unidade de tempo (NASCIMENTO FILHO, 1999).

O uso das técnicas de análise direta de sólidos vem sendo ampliado (EDS, FRX, Espectroscopia com emissão Ótica por Plasma Induzido por Laser, Ablação a Laser (LIBs), entre outros) (KRUG e ROCHA, 2016).

Na metodologia de análises diretas, o preparo de amostras é simplificado. Para a FRX, por exemplo, a agregação em pastilha não é um requisito e as amostras podem ser colocadas desagregadas em suportes apropriados de material transparente aos raios-X (KRUG e ROCHA, 2016). A técnica de FRX determina a constituição química elementar e os resultados são expressos, geralmente, em percentual (%) ou parte por milhão (ppm) (PAUMANN *et al.,* 2018).

No trabalho de Birloaga *et al.,* (2013) a composição química das amostras foi determinada por análise de FRX. Esse tipo de análise química permitiu identificar os elementos químicos presentes nas amostras e estabelecer a concentração de cada elemento.

A análise por fluorescência de raios-X consiste em três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios-X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios-X.

De acordo com Jenkins (1999); IAEA, (1999); Bleicher e Sasaki (2000) descreveram o processo para leitura da amostra da seguinte forma:

> Quando os elétrons da camada mais interna do átomo (por exemplo, K e L) interagem com fótons com energia na região dos raios-X, pode ocorrer a foto ejeção desses elétrons, criando-se uma vacância. Para promover a estabilidade, ocorre imediatamente o preenchimento das vagas eletrônicas por elétrons das camadas mais próximas. Como resultado, há um excesso de energia no processo, que é manifestado na forma de emissão de raios-X característicos de cada átomo presente na amostra, que estão relacionadas com a concentração.

De acordo com a Fábrica Carioca de Catalisadores (2024), esta técnica, como qualquer outra, possui interferências, que podem ser causados pelos exemplos a seguir:

i) presença de outros elementos que podem afetar a intensidade do sinal emitido;

ii) equipamento e calibração: deve-se utilizar padrões de referência certificados e verificar de forma periódica os parâmetros de calibração ou sempre que o equipamento sofrer manutenção ou algum tipo de modificação;

iii) interferências Espectrais: quando diferentes elementos têm energias próximas, podendo causar sobreposição de picos no espectro;

iv) Construção de uma Curva Analítica com Padrões: a precisão na quantificação dos elementos depende significativamente da qualidade da curva analítica construída com padrões adequados, de forma a assegurar a linearidade e a robustez da resposta do detector.

A Dissertação de Krummenauer (2017), foi baseada no ensaio usando o método de espectrometria de fluorescência de raios-X por dispersão de energia e no equipamento NITON XL3t GOLDD+, mesmo equipamento utilizado na presente pesquisa, pertencente ao LACOR (Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais)/UFRGS.

A limitação do equipamento foi citada no trabalho, quanto à detecção de elementos leves (POTTS e WEST, 2008). O espectrômetro EDXRF NITON com detector GOLDD+, não consegue analisar elementos mais leves do que o magnésio (número atômico 12) e pode fazer medições desde 10 ppm (KRUMMENAUER, 2017).

2.3.3 Diferentes métodos de digestão de amostras

Em técnicas analíticas, as amostras do material de estudo, podem ser introduzidas em equipamentos na forma sólida, gasosa ou líquida, geralmente a forma líquida é a mais utilizada. Para tal é necessária a etapa de extração ou decomposição das amostras sólidas. Os métodos mais comuns para a abertura de amostras são dados por sistemas abertos em blocos digestores e sistemas fechados sob pressão em fornos micro-ondas (ZUFFO, 2019).

Nos sistemas abertos, utilizam-se combinações de diferentes ácidos inorgânicos a elevadas temperaturas, como por exemplo, métodos provindos da Organização Internacional de Normatização (ISO) 11466, USEPA 3050B. Para digestão em sistema fechado, citam-se a ISO 12914, USEPA 3051, USEPA 3051A e USEPA 3052 (ZUFFO, 2019).

Salienta-se que não existe método de digestão amplamente debatido e consagrado como o mais aplicável. O método a ser utilizado deve levar em consideração as condições de cada material, a quantidade disponível, o tipo e a origem. Entretanto, os métodos com misturas ácidas menos agressivas e os sistemas fechados apresentam maior segurança operacional, menor susceptibilidade à contaminação e a menor perda de elementos voláteis (ZUFFO, 2019).

O trabalho de Priya e Hait (2017) sobre liberação qualitativa e quantitativa de metais para caracterização de PCI para reciclagem comparou procedimentos de digestão USEPA 3050B, USEPA3051A e USEPA 3052. A comparação dos métodos mostrou significativas diferenças estatísticas, a maior dissolução dos metais se deu pelo método USEPA 3052, devido a fatores como a utilização de HF e pela alta pressão gerada no forno microondas, a qual expõe partículas metálicas não liberadas no ataque ácido (PRIYA e HAIT, 2017).

As conclusões de Priya e Hait (2017) recomendaram a aplicação do método de digestão USEPA 3052 para dissolução e reciclagem de metais presentes em REEE. O método é apropriado para aplicações que requerem uma decomposição total para fins de pesquisa ou em resposta a um regulamento (USEPA 3052, 1996). O item 1.2 da USEPA 3052 aponta que esse método é adequado para:

> Espectrometria de Absorção Atômica em Chama (FAAS), Espectrometria de Absorção Atômica de Vapor Frio (CVAA), Espectrometria de Absorção (GFAA), Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), Espectrometria de Massa de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS) e outros elementos analíticos técnicas de análise, quando aplicável (USEPA 3052, 1996).

Cita-se como vantagens dos métodos EPA 3050B, EPA 3051 e EPA 3052, a rapidez de execução, menor tempo de digestão das amostras, menores riscos de contaminações, apresentam uma dissolução mais completa das amostras, menor perda de elementos voláteis em relação aos demais métodos e redução de interferentes (ABREU, ANDRADE e FALCÃO, 2006).

Além das vantagens citadas acima, o método EPA 3052, que envolve o HNO_3, HCl e o HF, solubiliza a sílica por usar o HF, propiciando uma solubilização total da amostra (USEPA 3052).

Salienta-se que o HCl é usado para decomposição de silicatos ou materiais de alta resistência química, como por exemplo, o elemento Nd, o Ti, Zr e tungstênio (W). Este ácido é considerado perigoso e requer cuidado quando manuseado (COSTA *et al.,* 2007; KRUG e ROCHA, 2016). O método da água régia é muito utilizado e eficiente para extração de metais e há menos riscos associados ao seu uso (QUINÁGLIA, 2001).

A digestão com HNO_3 é considerada de alta pureza, o extrato é usado em técnicas que requerem baixos limites de quantificação, como ICP-MS (KRUG e ROCHA, 2016). Ao manusear os ácidos utilizados na digestão das amostras, prevenções e medidas devem ser

adotadas para que não ocorram danos à saúde e ao meio ambiente. A seguir foram citados os efeitos que podem ser causados a este tipo de exposição:

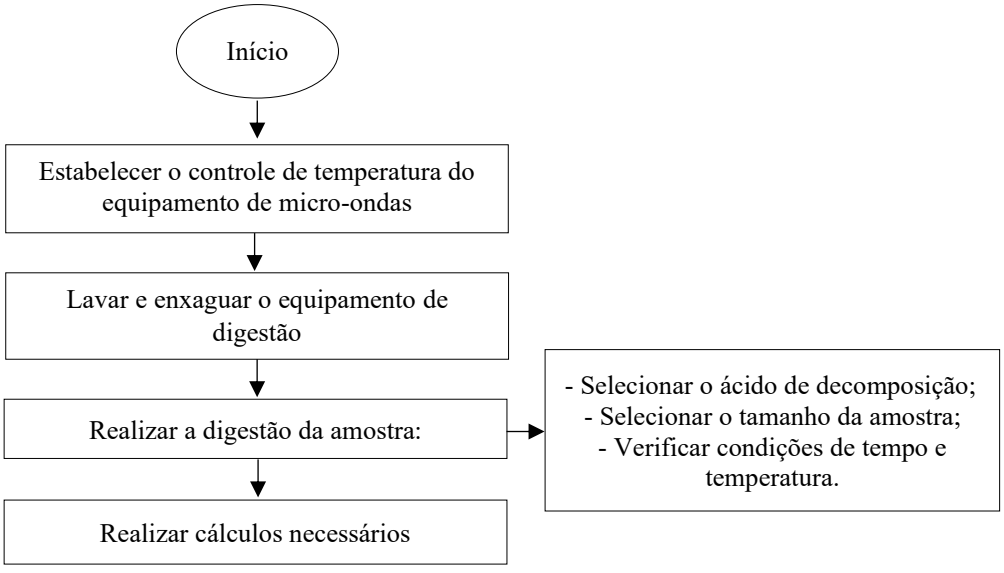
i) exposição ao HNO_3: tóxico e corrosivo para pele (queimaduras, irritação moderada a sérias lesões, manchas amarelo-acastanhadas, formação de bolhas ou lesões necróticas), olhos (irritação até a perda da visão), aparelho digestivo e trato respiratório (asfixia por edema de glote, convulsões e coma) (CSM PRODUTOS QUÍMICOS, 2019).

ii) exposição ao HCl: altamente corrosivo e irritante para a pele (lesões se restringem ao local de contato e a gravidade das lesões depende da quantidade e concentração do ácido), as mucosas e os olhos. A inalação provoca danos nas vias aéreas (irritação até a morte). A ingestão causa lesões ulcerativas no trato digestivo (CETESB, 2020b).

iii) exposição ao HF: varia com base na via de exposição (dérmica, oral, inalatória, sistêmica e ocular). Pode ocasionar queimaduras químicas, irritação orofaríngea ou gastrointestinal, arritmia cardíaca e hipotensão, irritação pulmonar e/ou irritação conjuntival e quemose (edema/inchaço da conjuntiva ocular) (GREENBERG e VEARRIER, 2022).

O método de digestão possui várias combinações alternativas adicionais de ácido e reagente, incluindo o HCl e peróxido de hidrogênio. O método prevê reagentes e materiais (provisões) para uma quantidade máxima de 1g de amostra (USEPA, 3052). As etapas do método de digestão são ilustradas na Figura 27.

Figura 27 – Etapas de aplicação do método de digestão conforme USEPA 3052



Fonte: Adaptado de USEPA, 1996.

2.3.4 Técnicas analíticas para determinação de elementos

Após o processo de digestão da amostra, os métodos de determinação de analítos são aplicados. Dentre as técnicas mais utilizadas, se destacam a ICP-MS, ICP-OES, FLAA e GFAA (PEREIRA *et al.,* 2010, SAVIO *et al.,* 2010, NAVARRO *et al.,* 2011) (Quadro 10).

As técnicas de análises de ICP-OES são amplamente utilizadas por apresentar fatores como uma boa sensibilidade, seletividade e possibilidade da realização de análises multi elementares de forma simultânea. A aplicação nessa técnica geralmente é dada em amostras líquidas, mas pode também ser empregada para amostras sólidas e gasosas (HARPER e OLIVEIRA, 2006).

No trabalho de Rebello *et al.,* (2020) PCIs de computadores pessoais e telefones celulares foram analisadas quanto ao seu conteúdo metálico. As amostras foram lixiviadas com água régia, e a solução foi analisada com ICP-OES. O trabalho de Otunniyi, Vermaak e Groot (2009) apresentou dados para análise ICP-OES de lixiviação de água régia de PCIs de telefones celulares.

A ICP-OES constitui-se como uma técnica multielementar de alta sensibilidade, precisão e rapidez, capaz de detectar elementos em concentrações da ordem de partes por bilhão (ppb). Tem se consolidado como ferramenta analítica de destaque na determinação de metais em resíduos sólidos urbanos, solos contaminados e REEEs, além de apresentar crescente aplicação em estudos de mineração urbana, em virtude da possibilidade de análise simultânea de diversos metais de interesse econômico e ambiental, tais como Cu, Au, Pt, Sn, Pb, Ni e Cd (SANTOS; LIMA; PEREIRA, 2020). Entre suas principais vantagens, destacam-se o baixo limite de detecção, a ampla faixa linear de calibração e a menor suscetibilidade a interferências espectrais quando comparada a técnicas espectroscópicas, como a absorção atômica com chama.

Entretanto, algumas limitações devem ser consideradas. A ICP-OES exige etapas preparatórias rigorosas, como a digestão ácida das amostras, que podem introduzir riscos de perdas de analitos voláteis, contaminações externas ou dissolução incompleta da matriz (KHARISOV; TORRES; KHARISOVA, 2021). Além disso, a presença de altos teores de sólidos dissolvidos ou de matrizes complexas pode comprometer a estabilidade do plasma, aumentando a probabilidade de interferências físicas e químicas. Dessa forma, embora seja amplamente reconhecida pela confiabilidade de seus resultados, a ICP-OES demanda protocolos analíticos bem estabelecidos para assegurar a reprodutibilidade e a comparabilidade dos dados em investigações aplicadas à caracterização de PCIs.

A ICP-MS é uma técnica que apresenta boa seletividade, boa sensibilidade e boa precisão, alcançando limites de detecção na grandeza de nanograma (ng/L). A técnica GFAA quando comparada com a ICP-MS apresenta menor custo, mas apresenta limitações de detecção (QUINÁGLIA, 2001). As PCIs do trabalho de Hall e Williams (2007) foram digeridas com ácido e analisadas com ICP-MS. Ressalta-se que não existe um padrão de procedimento para a determinação da composição química de PCIs (PRIYA e HAIT, 2017).

Quadro 10 – Métodos usuais para a caracterização de Placas de Circuito Impresso (PCIs)

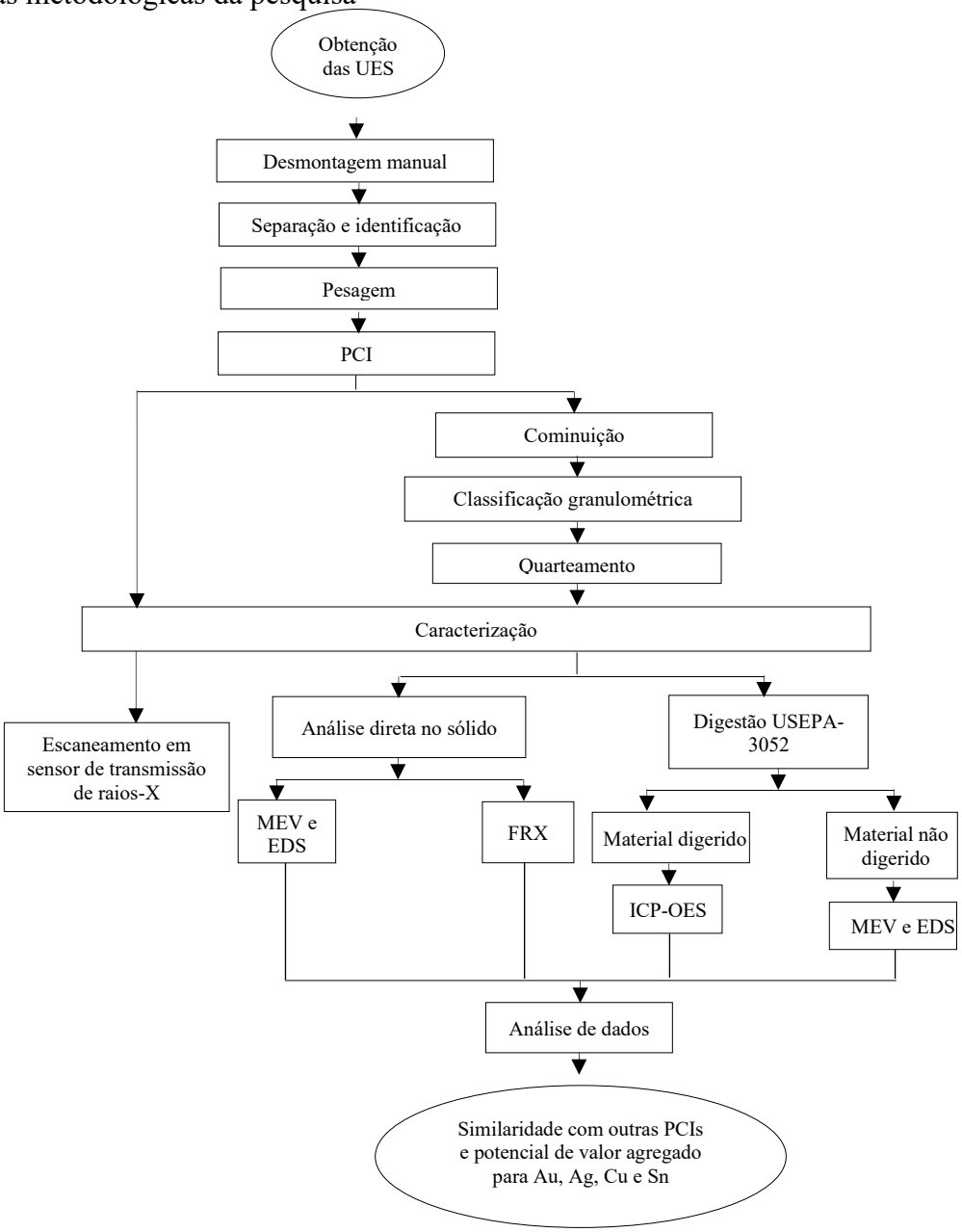
Métodos de preparação da amostra	Métodos analíticos	Vantagem	Desvantagem	Referência	Elementos de interesse
Técnicas secas					
Calcinação	FRX	- destruição de plásticos que podem interferir na análise	- não compatível com elementos voláteis (Hg, As, Pb, Sn, Zn)	Birloaga *et al.,* (2013)	Cu, Al, Fe, Sn, Ni, Zn, Pb, Au, Ag
Sem prepração	FRX	- 10-20% mais Cu comparado à caracterização úmida - Execução simples	- baixa precisão analítica - necessidade de calibração com partícula de tamanho e composição semelhantes, por não possuir materiais de referência (padrões) existentes	Ernst *et al.,* (2003) Wienoldet *al.,* (2011)	Ag, Br, Cr, Cu, Fe, Ni,Pb, Pd, Sb, Pb, Cd, Hg
				Morf *et al.,* (2007)	Al, Sb, Pb,Cd, Cr, Fe, Cu, Ni, Hg, Zn, Sn, Cl, P
				Sun *et al.,* (2015)	Cu, Sn, Fe, Al, Pb, Zn,Ni, Nd, Ag, SiO_2
Técnicas envolvendo líquidos					
Água régia	ICP-OES	- grandes quantidades - menos cominuição - execução simples -repetível,reprodutível	-digestão incompleta (40–50%resíduos) -não compatível com Ta, Sn -incertezas para Cu	Ernst *et al.,* (2003) Wienold *et al.,* (2011)	Ag, Au, Be, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Pd, Sb, Pb, Cd, Hg
				Otunniyi,Vermaak e Groot (2009)	44 elementos
Micro-ondas (MW) e água régia	ICP-OES	- maior dissolução de Cr e Sb	-digestão incompleta (10% de resíduos) - massa da amostra < 1 g	Wienold *et al.,* (2011)	Pb, Cd, Hg
Água régia seguida decalcinação e fusão $LiBO_2$	Espectrômetro de Massa (ICP-MS)	- digestão quase total (<10% de resíduos)	- maior tempo para digestão -maior complexidade de implementação	Holgersson *et al.,* (2018)	38 elementos
Calcinação seguida de lixiviação ácida e micro-ondas (água régia + HCl	Espectrômetro de Absorção Atômica (AAS)	- destruição dosplásticos,que podem interferirnas análise	- não compatível com elementos voláteis (Hg, As, Pb, Sn, Zn)	Birloaga *et al.,* (2013)	Cu, Al, Fe, Sn, Ni, Zn,Pb, Au, Ag
Fusão com peróxido de sódio seguido de lixiviação através de HCl	ICP-OES e ICP-MS	- digestão total	- maior complexidade de implementação	Otunniyi, Vermaak e Groot (2009)	44 elementos
Micro-ondas e HNO_3/ $HBF_4/H_2O_2/H_2O$	ICP-OES	- digestão quase total (2,5% de resíduos)	- massa da amostra <1 g -maior complexidade de implementação	Ernst *et al.,* (2003)	Ag, Au, Be, Cd, Cr,Cu, Ni, Pb, Pd, Sb
Micro-ondas e HNO_3/HCl/HF/H_2O_2	ICP-OES	- digestão quase total	- massa da amostra <1 g -maior complexidade de implementação	Xiang *et al.,* (2010)	Cu, Pb, Al, Sn, Zn, Fe,Ni, Mg, Sb, Ag, Au,Mn, Co, Pd

Fonte: Adaptação de Hubau *et al.,* (2019).

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada, combinando desmontagem, preparação e diversas técnicas analíticas como MEV-EDS, FRX e ICP-OES, permitiu caracterizar detalhadamente as PCIs. Isso possibilitou identificar as frações metálicas e avaliar o potencial de recuperação de metais valiosos, contribuindo para processos eficientes e sustentáveis de reciclagem eletrônica (Figura 28).

Figura 28 – Etapas metodológicas da pesquisa



Legenda: PCI: Placa de Circuito Impresso; UE: Urnas Eletrônicas; USEPA: Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos; MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura; EDS: Espectroscopia por Energia Dispersiva; FRX: Fluorescência de Raios-X; ICP-OES: Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado.

3.1 Obtenção das urnas eletrônicas

Como parte do escopo experimental deste trabalho, foram recebidas três unidades de UE2002, fornecidas pelo TSE. A cessão dos equipamentos foi realizada por meio de doação oficial, conforme estabelecido no Termo de Transferência Externa nº 07/2020, publicado no Diário Oficial da União (DOU) em 5 de maio de 2020.

As urnas foram destinadas ao Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM), vinculado ao Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com a finalidade exclusiva de apoio a atividades de pesquisa científica.

A obtenção desse material foi fundamental para a realização dos ensaios experimentais propostos, uma vez que permitiu o acesso direto a componentes reais em fim de vida, refletindo de maneira representativa os REEEs provenientes de equipamentos institucionais de grande escala.

3.2 Tratamento físico das Placas de Circuito Impresso

O tratamento físico das amostras teve início com a desmontagem manual de uma unidade de UE, realizada de forma sistemática e controlada, a fim de garantir a preservação dos componentes internos e evitar perdas de material. Essa etapa consistiu na remoção sequencial das partes externas (gabinete, tampa e painéis), seguida do desmonte dos módulos internos, incluindo PCIs, fontes de alimentação, conexões periféricas, interfaces de comunicação e demais elementos estruturais e eletrônicos.

Após a desmontagem, os componentes foram separados de acordo com sua natureza e composição predominante, distinguindo-se, principalmente, entre materiais metálicos, poliméricos, cerâmicos e PCIs, com ênfase especial sobre estas últimas, por serem o principal alvo das análises subsequentes.

As PCIs selecionadas foram submetidas ao processo de cominuição, realizado por meio de trituração mecânica, com o objetivo de reduzir o tamanho das partículas e facilitar o acesso às fases metálicas durante o tratamento químico posterior. A cominuição foi conduzida até a obtenção de um pó com granulometria variável, o qual foi posteriormente classificado por peneiramento em diferentes faixas granulométricas, conforme critérios técnicos definidos no planejamento experimental.

Em seguida, cada fração granulométrica foi submetida a procedimentos de quarteamento, visando garantir a homogeneidade e a representatividade das amostras utilizadas

nas análises químicas. Essa etapa foi fundamental para minimizar o erro amostral e assegurar que os dados obtidos reflitam adequadamente a composição média do material processado.

Esse conjunto de operações físicas — desmontagem, separação, cominuição, quarteamento e classificação — constituiu a etapa preparatória essencial para os ensaios de caracterização química e os tratamentos subsequentes, permitindo maior eficiência nos processos analíticos e maior precisão nos resultados obtidos.

3.2.1 Desmontagem da urna eletrônica e componente de interesse

No mês de outubro de 2021, foi realizada a abertura da unidade de armazenamento de uma urna eletrônica, com o objetivo de verificar e documentar a disposição de seus componentes internos (Figura 29). Essa atividade marcou o início das etapas práticas da pesquisa, cuja abordagem metodológica baseou-se na desmontagem técnica de uma urna eletrônica modelo 2002, visando à caracterização físico-química de seus principais constituintes.

A desmontagem foi conduzida nas dependências do Laboratório de Estudos Ambientais para Metalurgia (LEAMet), vinculado à UFRGS, em ambiente controlado e com o suporte de instrumentos adequados à manipulação de equipamentos eletroeletrônicos.

Durante essa etapa, todos os módulos constituintes da UE — incluindo o terminal do eleitor e o terminal do mesário — foram cuidadosamente identificados e etiquetados com códigos individuais para fins de rastreabilidade. Em seguida, os componentes foram submetidos à pesagem em balança eletrônica digital de precisão (marca Toledo do Brasil Indústria de Balanças Ltda, modelo 9094C/4), permitindo o registro dos dados de massa de cada unidade desmontada.

Foram extraídas quatro PCIs, as quais foram classificadas com os seguintes identificadores: PCIa, PCIb, PCIc e PCId. Dentre essas, a PCIc corresponde à placa localizada no terminal do mesário, enquanto as demais (PCIa, PCIb e PCId) pertencem ao terminal do eleitor, conforme ilustrado na Figura 30 a Figura 33. A individualização das placas permitiu o acompanhamento sistemático das análises posteriores, garantindo o controle da origem e das características de cada amostra no decorrer dos ensaios experimentais.

Figura 29 – Abertura do local de armazenamento da urna eletrônica e verificação de seus componentes



Figura 30 – a) visão frontal e b) traseira da PCIa

a) b)

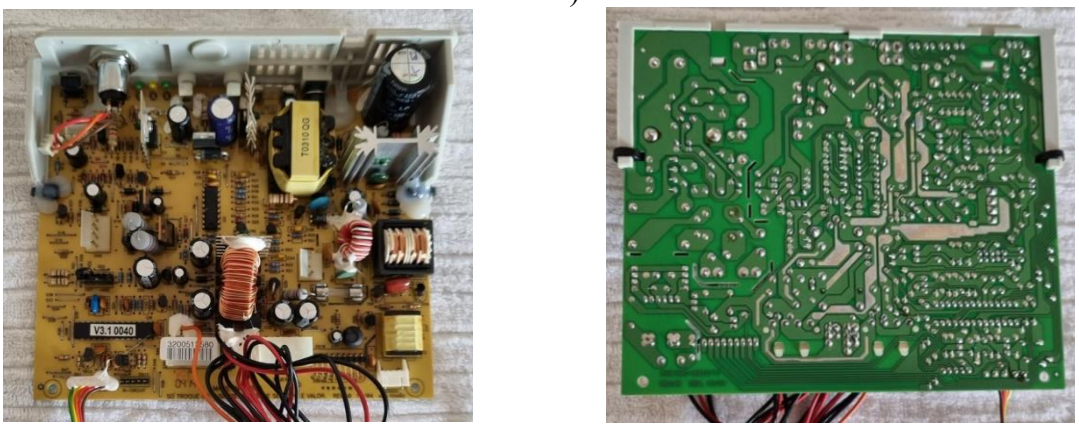


Figura 31 – a) visão frontal e b) traseira da PCIb

a) b)



Figura 32 – a) visão frontal e b) traseira da PCIc

a) b)

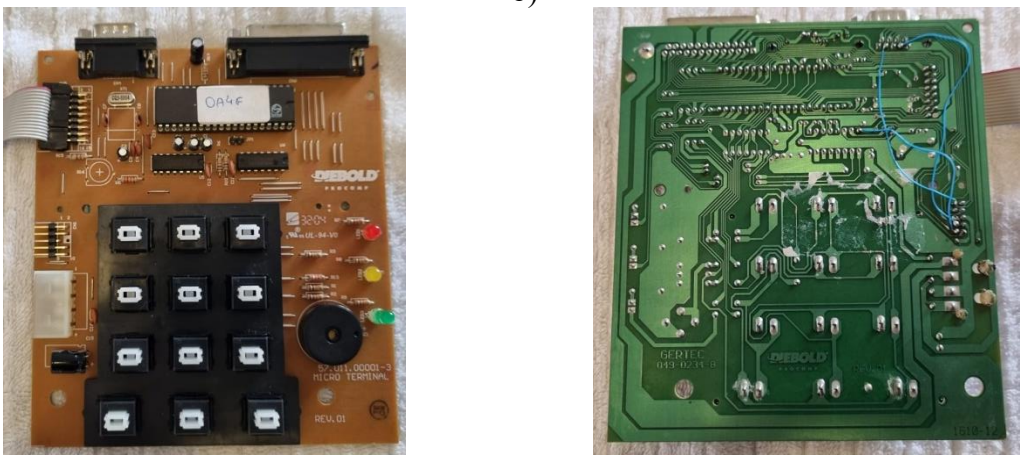


Figura 33 – a) visão frontal e b) traseira da PCId

a) b)



3.2.2 Cominuição das Placas de Circuito Impresso

A etapa de cominuição das placas ocorreu no mês de dezembro de 2021, nas dependências do LACOR, pertencente ao Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS.

Inicialmente, as PCIs previamente identificadas foram manualmente seccionadas em fragmentos de aproximadamente 4 cm × 4 cm (Figura 34), de modo a facilitar seu processamento nos equipamentos de moagem. A cominuição foi conduzida de forma individualizada para cada placa, com o objetivo de preservar a rastreabilidade e permitir posterior comparação entre os diferentes tipos de amostras.

O primeiro estágio de fragmentação foi executado em um moinho de facas da marca Rone Indústria e Comércio de Máquinas Ltda., modelo SRB 2305 (Figura 35), responsável pela pré-trituração do material (moagem grosseira: partículas < 9 mm). A redução inicial do tamanho visou facilitar a alimentação no equipamento seguinte e garantir um fluxo contínuo no processo.

Na sequência, o material pré-fragmentado foi processado em um segundo moinho de facas, da marca Retsch, modelo SM300 (Figura 36), no qual foi acoplada uma peneira com malha de 1 mm para controle da granulometria do produto final. A moagem foi conduzida até que a totalidade do material apresentasse dimensão inferior a 1 mm, conforme evidenciado na Figura 37, na Figura 38 e na Figura 39. Essa especificação granulométrica foi estabelecida para atender aos requisitos dos métodos analíticos subsequentes, especialmente aqueles associados à caracterização química.

Durante o processo de cominuição, observou-se que as PCIs apresentavam elevada rigidez estrutural e significativa heterogeneidade em sua composição, características que impactaram diretamente na eficiência da moagem. Em função dessas propriedades, o tempo

necessário para a completa cominuição de cada placa foi, em média, de duas horas. Esses fatores reforçam a complexidade do tratamento físico de resíduos eletroeletrônicos, sobretudo quando compostos por materiais de múltiplas naturezas físico-químicas e elevada resistência mecânica.

Figura 34 – Pequenos fragmentos da PCIb



Figura 35 – Moinho de Facas (Rone Indústria e Comércio de Máquinas LTDA, SRB 2305)



Figura 36 – Moinho de Facas (Retsch, SM300)



Figura 37 – Passante de 1mm do Moinho de Facas (Retsch, SM3000)

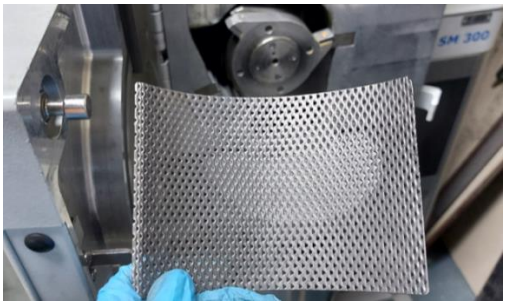


Figura 38 – Material após processo mecânico de cominuição no Moinho de Facas (Rone Indústria e Comércio de Máquinas LTDA, SRB 2305)



Figura 39 – Material após processo mecânico de cominuição no Moinho de Facas Retsch, SM300



3.2.3 Classificação granulométrica das Placas de Circuito Impresso

A etapa de classificação granulométrica das PCIs foi realizada em agosto de 2022, nas instalações do LAPROM, vinculado à Escola de Engenharia da UFRGS. Esta etapa objetivou a separação das partículas cominuídas em diferentes faixas de tamanho, proporcionando maior controle e precisão nos ensaios analíticos subsequentes.

Considerando a limitada massa disponível para cada amostra, optou-se pela execução do peneiramento de forma manual, procedimento amplamente utilizado em pesquisas laboratoriais quando há restrição de material, permitindo melhor controle e minimização de perdas. Para a separação granulométrica foram empregadas peneiras da marca Bertel Indústria Metalúrgica Ltda., com aberturas de 1,00 mm (16 *mesh*), 0,50 mm (32 *mesh*) e 0,25 mm (60 *mesh*), conforme ilustrado na Figura 40.

Figura 40 – Peneiras utilizadas para separação das frações granulométricas das placas de circuito impresso



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 mm < n < 0,50 mm ; F3: 0,50 mm < n < 1,00 mm; F4: >1,00 mm.

A agitação manual foi realizada durante aproximadamente 10 minutos para cada amostra, tempo suficiente para garantir a efetiva separação das partículas nas faixas granulométricas desejadas, conforme monitorado por inspeção visual da ausência de material residual sobre as peneiras. Essa escolha metodológica visa preservar a integridade das amostras, evitando perdas associadas a equipamentos automáticos de agitação, especialmente críticos em amostras de massa reduzida, conforme indicado na literatura sobre manuseio de amostras de pequena escala (ASTM D422-63, 2007; ABNT NBR 7181, 2019).

Após o peneiramento, as frações granulométricas foram individualmente pesadas em balança de precisão da marca Mark, modelo K12, para registrar a distribuição de massa em cada faixa de tamanho.

Para fins comparativos e avaliação da influência da granulometria, foi considerado também a amostra global para as caracterizações, mas a quantidade de massa gerada foi insuficiente para uma caracterização adequada. Como a análise em diferentes frações proporcionaria uma riqueza maior de detalhes sobre a distribuição dos metais ao longo de diferentes faixas de tamanho, optou-se por realizar as análises MEV, FRX e ICP-OES utilizando o material classificado.

As denominações atribuídas às amostras, juntamente com a correspondência entre as siglas e as faixas granulométricas, estão apresentadas no Quadro 11, facilitando o entendimento e a rastreabilidade dos dados ao longo dos processos experimentais.

Quadro 11 – Siglas e frações provindas da etapa de classificação granulométrica

Siglas	Frações (mm)
F1	< 0,25
F2	0,25 < n < 0,50
F3	0,50 < n < 1,00
F4	> 1,00

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

3.2.4 Homogeneização e amostragem representativa

No mês de março de 2022, nas instalações do LAPROM e do LEAMet, foi realizada a etapa de quarteamento das amostras provenientes das quatro PCIs, seguindo rigorosamente as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 10007:2004 – Amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2004d).

A adoção do procedimento de quarteamento teve como principal objetivo garantir a homogeneização das amostras, de modo que as subsequentes análises refletissem com maior fidelidade as características e propriedades da massa total do material em estudo. Essa metodologia é fundamental para a redução do erro amostral e para assegurar a representatividade dos subamostras, evitando vieses que possam comprometer a confiabilidade dos resultados analíticos, conforme destacado em Aquino e Aquino (2007), Resende (2014), Vilhena *et al.,* (2024) e Fontana *et al.,* (2024).

Durante a execução do quarteamento, cada amostra pré-homogeneizada (Figura 41) foi dividida em quatro partes iguais (Figura 42). Em seguida, duas partes opostas foram selecionadas para compor uma nova amostra, enquanto as outras duas partes foram descartadas (Figura 43). As partes selecionadas foram misturadas completamente, e o procedimento foi repetido sucessivamente até atingir o volume final desejado para análise (Figura 44).

Todas as amostras obtidas após o quarteamento foram devidamente identificadas, acondicionadas e armazenadas sob condições controladas, assegurando sua integridade para as etapas posteriores de caracterização química e física.

Figura 41 – Amostra pré-homogeneizada

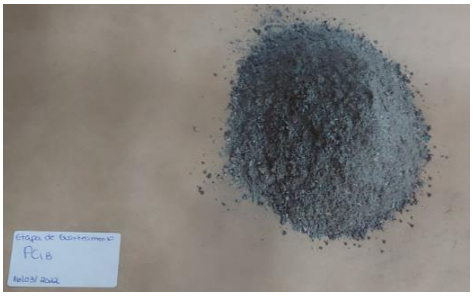


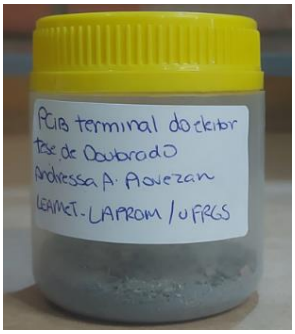
Figura 42 – Amostra dividida em quatro partes iguais



Figura 43 – Retirada de duas partes opostas para constituição de uma nova amostra



Figura 44 – Volume desejado da amostra, recipiente identificado



3.3 Tratamento químico: caracterização

Para a caracterização do material investigado, foram adotadas diferentes técnicas analíticas, aplicadas conforme a etapa de preparação das amostras. Inicialmente, foi realizado o escaneamento por sensor de transmissão de raios-X em placas *in natura*, ou seja, antes de qualquer processo de cominuição ou tratamento adicional. Essa etapa teve como objetivo identificar zonas com maior densidade, as quais indicam maior potencial de concentração de metais.

Em seguida, as amostras foram submetidas à etapa de metalização, necessária para a aplicação de MEV e de EDS. Optou-se pelo recobrimento com carbono, técnica que assegura a condutividade elétrica adequada para as análises em vácuo. A análise por MEV permitiu a obtenção de imagens de alta resolução da superfície das amostras cominuídas, utilizando o modo de retroespalhamento para melhor visualização dos contrastes entre os materiais.

Associada a essa técnica, a espectroscopia por dispersão de energia (EDS) foi empregada para identificar qualitativamente os elementos químicos presentes nas amostras.

Complementarmente, foi utilizada a técnica de FRX para análise qualitativa da composição química elementar do material cominuído.

Posteriormente, aplicou-se o método de digestão ácida descrito na norma USEPA 3052, o qual utilizou micro-ondas e ácidos fortes para solubilização dos metais presentes nas amostras. A análise quantitativa dos elementos foi então realizada por meio de ICP-OES, possibilitando a determinação precisa da concentração dos metais no material investigado.

3.3.1 Escaneamento em Sensor de Transmissão de Raios-X de Energia Dupla

O objetivo deste procedimento foi gerar imagens digitais a partir de escaneamentos das PCIs que permitissem mapear visualmente as áreas com maior concentração metálica, identificando regiões de interesse para futuras etapas de separação seletiva ou recuperação localizada.

Para tanto, foi utilizado um sistema de escaneamento com sensor de transmissão de raios-X de energia dupla, modelo Lab-Sorter MSX-400-VL-XR-3D, da fabricante COMEX, localizado no Laboratório de Processamento Mineral da UFRGS.

O equipamento opera com base na emissão de feixes de raios-X de duas energias distintas que atravessam o material, sendo parte da radiação atenuada de forma seletiva conforme a densidade e o número atômico dos elementos presentes. A radiação transmitida foi captada por detectores posicionados abaixo da esteira transportadora que conduz as amostras, que registra os perfis de atenuação ponto a ponto da amostra em movimento (COMEX, 2025).

Para os experimentos, as placas *in natura* foram posicionadas inteiras, uma a uma, sobre a esteira do equipamento. Durante a passagem pelo feixe, o sistema gerou imagens em tons de cinza, nas quais zonas de maior intensidade de atenuação indicavam a presença de elementos metálicos de maior densidade, como Cu, Sn e Au, tipicamente presentes nas trilhas condutoras, soldas e pinos de conexão das PCIs (COMEX, 2025).

A imagem primária em escala de cinza foi então convertida para uma escala de cores RGB (*red-green-blue*), procedimento este realizado no software de aquisição de dados do próprio equipamento e que permite uma melhor diferenciação das atenuações do feixe e, por consequência, registrar gradientes de densidade ao longo das placas, fornecendo um diagnóstico visual não destrutivo da distribuição de metais nas PCIs oriundas de urnas eletrônicas.

3.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)

As etapas de metalização das amostras e as análises subsequentes por MEV e EDS foram conduzidas no Centro de Microscopia e Microanálise BR-Sul (CMM), instalado na UFRGS. O trabalho experimental teve início no mês de novembro de 2023, com a preparação das amostras para análise, etapa que compreendeu a montagem dos *stubs* para fixação do material.

Para a montagem dos *stubs*, utilizou-se uma série de materiais e instrumentos específicos: pinos compatíveis com o sistema do microscópio, pinça de precisão para manuseio delicado das amostras, fita dupla face condutora de carbono para garantir a aderência e a condução elétrica, e palitos aplicadores para deposição controlada da amostra sobre a fita (conforme ilustrado na Figura 45 e Figura 46). Cada pino foi cuidadosamente rotulado com um código de identificação correspondente à amostra específica, assegurando o correto rastreamento durante as etapas posteriores.

Após a fixação do material nos *stubs*, procedeu-se à etapa de metalização, cujo objetivo foi promover um revestimento condutor de carbono sobre a superfície das amostras. Essa metalização é essencial para evitar o acúmulo de carga elétrica durante a análise em MEV, o que poderia prejudicar a qualidade das imagens e das análises elementares. Para esse procedimento, foi empregado o metalizador BAL-TEC, modelo SCD 050 9 (Figura 47), que permite o depósito uniforme e controlado do carbono sobre as amostras, garantindo a integridade da morfologia superficial.

Concluída a etapa de metalização, as amostras foram encaminhadas, em dezembro de 2023, para análise microscópica no equipamento de MEV da marca Zeiss, modelo EVO 10 (Figura 48). Este microscópio apresenta resolução de até 3 nm em condições ideais e opera em faixa de voltagem de 0,2 a 30 kV, o que possibilita a obtenção de imagens de alta resolução da topografia das amostras. A análise foi realizada utilizando a técnica de contraste atômico por retroespelhamento, que destaca regiões com diferentes densidades atômicas, permitindo a identificação visual de zonas com maior concentração de elementos metálicos.

O microscópio Zeiss EVO 10 está equipado com um sistema acoplado de EDS, modelo Oxford Instruments, que possibilita a análise qualitativa e semiquantitativa da composição química elementar das amostras por meio da detecção dos raios X característicos emitidos durante a interação dos elétrons do feixe com os átomos do material. O sistema EDS possui resolução energética típica na faixa de 125-135 eV para o pico de Fe-Kα, e sua área ativa de

detecção permite análise localizada em micrômetros, essencial para o estudo de microzonas nas placas de circuito impresso.

O sistema de EDS neste estudo apresenta uma resolução energética típica na faixa de 125 a 135 eV para a linha Fe-Kα, parâmetro que indica a capacidade do detector em distinguir picos espectrais de diferentes elementos com energias próximas. A linha Fe-Kα, é comumente utilizada como referência para a calibração e avaliação da performance do detector. Detectores com resolução inferior a 140 eV, como os baseados em tecnologia SDD (*Silicon Drift Detector*), são considerados altamente eficientes para análises multielementares, especialmente em materiais complexos e heterogêneos como os resíduos eletrônicos, onde a sobreposição de picos espectrais pode ocorrer com frequência (JEOL, 2012). Portanto, a resolução energética adequada garante maior confiabilidade na análise qualitativa e semiquantitativa dos elementos químicos por EDS.

Durante as análises, os parâmetros operacionais adotados incluíram uma voltagem de aceleração de 20 kV, corrente de feixe ajustada para evitar sobrecarga do detector, tempo de aquisição variável entre 60 e 120 segundos para garantir boa contagem estatística, e vácuo alto para evitar dispersão dos elétrons (LIAO, 2006). O monitoramento constante da estabilidade do feixe e da carga superficial permitiu a obtenção de imagens nítidas e espectros representativos da composição química das amostras.

A combinação da MEV com a EDS permitiu a correlação direta entre a morfologia e a composição elementar das amostras, facilitando a identificação das fases metálicas presentes, a distribuição dos elementos de interesse e a avaliação qualitativa da heterogeneidade da amostra. Essa abordagem integrada é fundamental para a caracterização detalhada dos resíduos eletrônicos estudados, possibilitando inferências sobre a viabilidade de recuperação e reciclagem dos metais presentes.

Figura 45 – Montagem de *stub* finalizada



Figura 46 – Finalização da montagem das amostras a serem encaminhadas para a metalização de carbono

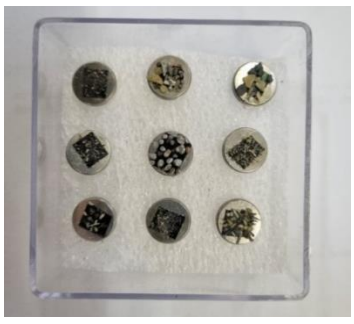


Figura 47 – Metalizador (BAL-TEC, SCD 050 9)



Figura 48 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), (Zeiss, EVO 10)



3.3.3 Fluorescência de Raios-X (FRX)

As análises de FRX foram conduzidas no mês de maio de 2024, nas instalações do LACOR, vinculado ao Departamento de Engenharia de Materiais da UFRGS. O objetivo desta etapa foi identificar, de forma qualitativa, os elementos presentes nas diferentes frações granulométricas provenientes das PCIs, após a etapa de cominuição e classificação.

As amostras foram analisadas em triplicata, a fim de garantir maior representatividade e reprodutibilidade dos resultados. A preparação para a análise envolveu a disposição adequada do material cominuído sobre superfície plana e uniforme, conforme demonstrado na Figura 49, minimizando interferências por irregularidades físicas durante a leitura do equipamento.

Figura 49 – Placa de circuito impresso (PCIc - F2), em triplicata



O equipamento empregado foi o analisador portátil por FRX do modelo Niton XL3t Goldd+, da fabricante Thermo Scientific (Figura 50), o qual opera por meio de excitação por tubo de raios X e detecção por espectrômetro de dispersão de energia. Este modelo é amplamente utilizado na análise de metais eletrônicos devido à sua portabilidade, rapidez na identificação e capacidade de detecção de diversos elementos, desde ligas leves até metais preciosos. Para esta aplicação, utilizou-se a configuração pré-programada denominada

“Electronic Metals”, indicada especificamente para análise de sucatas metálicas e materiais eletrônicos, por possuir parâmetros otimizados para essa classe de amostras.

Essa metodologia permitiu uma avaliação preliminar da composição elementar das diferentes granulometrias das PCIs, sendo útil como ferramenta complementar às análises subsequentes por técnicas mais precisas e quantitativas, como ICP-OES.

Figura 50 – Equipamento de Fluorescência de Raios-X Portátil (*Thermo Scientific* Niton XL3t Goldd+) acoplado na Estação de Trabalho e conectado a um computador



3.3.4 Digestão conforme método da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) 3052

Com base na revisão da literatura e nas exigências da composição das amostras, foi adotado o método USEPA 3052 para a digestão ácida, por ser amplamente reconhecido pela sua eficiência na decomposição total de materiais inorgânicos de alta resistência, como solos, sedimentos, cinzas, minérios e resíduos eletrônicos, especialmente aqueles compostos por fases contendo silicatos e óxidos metálicos complexos (EPA, 1996).

Embora o protocolo original tenha sido respeitado em sua totalidade, foi necessário realizar uma modificação em função da quantidade limitada de amostra disponível. A única alteração consistiu na redução da massa da amostra pela metade. Para manter a proporcionalidade do método, os volumes dos reagentes foram igualmente ajustados, e a diluição final foi realizada para 25 mL, em vez dos 50 mL preconizados originalmente.

A digestão foi conduzida com 0,25 g de amostra, previamente seca, triturada e homogeneizada. As amostras foram inseridas em vasos de digestão fabricados em politetrafluoretileno (PTFE), material resistente a altas pressões e compatível com reagentes agressivos. Em cada vaso, foram adicionados 5 mL de ácido nítrico concentrado (HNO_3 65% p.a., QUEMIS, lote 61054639) e 2 mL de ácido fluorídrico (HF 48%, MERCK, lote K52373334). Ambos os reagentes foram previamente purificados por destilação do tipo *sub-*

boiling (utilizando calor abaixo do ponto de ebulição para evaporar o líquido de forma lenta e controlada, evitando a contaminação e a decomposição térmica*)*, utilizando destilador SubCLEAN (modelo T480, número de série MA178-004), com o objetivo de minimizar a presença de contaminantes traços e assegurar a confiabilidade analítica, especialmente para análises por ICP-OES.

As digestões foram realizadas em sistema de micro-ondas Milestone, modelo MAXI-44 ET (EASYTEMP), número de série 23017015, utilizando vasos selados pressurizáveis. O protocolo de aquecimento seguiu os parâmetros operacionais estabelecidos pelo método USEPA 3052, conforme descrito a seguir:

- Aquecimento até 180 °C em 5,5 minutos;
- Manutenção da temperatura em 180 °C por 9,5 minutos;
- Pressão final aproximada de 800 psi (55 bar);
- Potência máxima aplicada de 1000 W por cavidade;
- Tempo total do programa: 15 minutos;
- Capacidade de processamento por batelada: até 12 vasos.

Durante o processo, o controle de temperatura foi realizado por meio de sensor de infravermelho e termopar interno (sistema EasyTEMP), o que possibilitou o monitoramento individual de cada vaso e garantiu segurança e homogeneidade durante a digestão. A utilização do HF foi fundamental para a decomposição eficaz de fases refratárias presentes nas PCIs, como sílica, alumina, carbonetos, óxidos metálicos e outros constituintes cerâmicos ou semicondutores. Por sua vez, o HNO_3 atuou como agente oxidante primário, promovendo a solubilização de compostos metálicos e resíduos orgânicos.

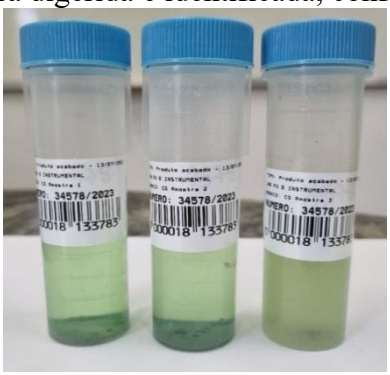
Após o ciclo de digestão, os vasos foram resfriados à temperatura ambiente e abertos em capela de exaustão. Os digestos foram então transferidos quantitativamente para tubos de polipropileno e diluídos com água ultrapura (Milli-Q) até o volume final de 25 mL. Essa etapa foi fundamental para garantir a estabilidade das amostras e as condições ideais de leitura nos equipamentos analíticos subsequentes.

A metodologia empregada permitiu a extração quantitativa dos elementos metálicos totais presentes na matriz sólida, assegurando os critérios de representatividade, exatidão e confiabilidade exigidos para análises subsequentes por ICP-OES. Essa técnica, inclusive, é recomendada pelo próprio método USEPA 3052 como abordagem padrão para a caracterização multielementar de materiais complexos.

Vale destacar que a etapa de digestão foi conduzida em laboratório terceirizado, identificado como UNIANÁLISES, vinculado à Universidade do Vale do Taquari

(UNIVATES), localizado no município de Lajeado, RS. A Figura 51 apresenta os recipientes contendo as amostras após a digestão, conforme recebidas para análise.

Figura 51 – Triplicata de amostra digerida e identificada, conforme USEPA-3052



3.3.4.1 Etapa de filtração das amostras digeridas

No mês de novembro de 2023, deu-se início à etapa de filtração dos volumes finais provenientes da digestão ácida das amostras, realizada no LEAMet. O volume de cada amostra digerida correspondia a 25 mL, e a filtração foi adotada como procedimento essencial para a remoção completa de quaisquer resíduos sólidos ou partículas suspensas, que poderiam comprometer a integridade e o funcionamento do equipamento espectrométrico utilizado nas análises subsequentes.

Para a filtração, foram empregados materiais e equipamentos específicos, selecionados para garantir a pureza e evitar contaminações: papel filtro qualitativo da marca Qualy, reconhecido pela uniformidade e capacidade de retenção de partículas finas; funil de vidro de alta resistência química; balão volumétrico de 250 mL, previamente calibrado e limpo; além de água destilada com alto grau de pureza para lavagem e diluição.

O processo de filtração seguiu uma sequência rigorosa para assegurar a máxima recuperação da amostra e a completa remoção de resíduos sólidos, conforme descrito a seguir e apresentado na Figura 52 e na Figura 53.

1. A amostra líquida digerida foi cuidadosamente vertida sobre o papel filtro posicionada no funil de vidro, de modo a evitar a formação de canais preferenciais e garantir a passagem uniforme do líquido através da matriz filtrante. A velocidade de filtração foi controlada para evitar o rompimento do filtro e perda de material;
2. Posteriormente, o recipiente original da digestão foi lavado com porções sucessivas de água destilada, a fim de transferir quaisquer resíduos sólidos aderidos às paredes

para o filtro, maximizando a recuperação dos sólidos e garantindo a representatividade da amostra;

3. A superfície externa do papel filtro e do funil foi lavada com água destilada para remover resíduos remanescentes da solução lixiviante, prevenindo contaminação cruzada;
4. O filtrado coletado foi transferido para um balão volumétrico de 250 mL, no qual o volume final foi cuidadosamente ajustado com água destilada ultrapura até a linha de aferição, assegurando precisão volumétrica fundamental para a quantificação analítica posterior;
5. O conteúdo do balão foi homogeneizado por inversões suaves para garantir a distribuição uniforme dos analitos na amostra;
6. Em seguida, a amostra foi transferida para frascos de armazenamento previamente limpos e identificados, acondicionados em triplicata para assegurar a confiabilidade dos resultados e permitir análises replicadas;
7. Os papéis filtros retidos com os resíduos sólidos foram submetidos à etapa de secagem em estufa modelo A3SED da marca DeLeo, mantida a uma temperatura controlada de 100 °C durante um período de 3 horas, com o objetivo de eliminar toda a umidade residual sem causar decomposição dos resíduos;
8. Após a secagem, os papéis filtros contendo os resíduos sólidos foram acondicionados em ambiente dessecador, e posteriormente pesados sua massa em balança analítica de alta precisão (SHIMADZU, modelo BL320H), registrando-se a massa exata dos resíduos remanescentes para avaliação quantitativa e posterior análise complementar.

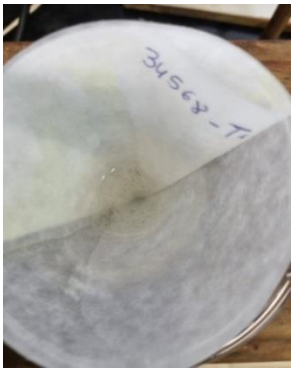
Devido à quantidade reduzida de material utilizado na digestão, a massa de resíduo sólido obtida após a filtração e secagem foi pequena, porém suficiente para garantir a representatividade e a qualidade analítica do procedimento.

Esta etapa foi fundamental para assegurar a pureza das amostras líquidas encaminhadas à análise instrumental, evitando a presença de sólidos que poderiam causar entupimentos, contaminações ou danos aos sistemas analíticos, além de garantir a confiabilidade e reprodutibilidade dos resultados experimentais.

Figura 52 – Materiais utilizados na etapa de filtração



Figura 53 – Etapa de filtração das amostras digeridas



3.3.4.2 Etapa de diluição das amostras digeridas e filtradas

A etapa de diluição das amostras digeridas e previamente filtradas foi realizada como procedimento preparatório essencial para a análise quantitativa por ICP-OES, realizada no LACOR, da UFRGS. Esta etapa foi conduzida conforme as especificações de calibração e sensibilidade do equipamento, visando garantir que as concentrações dos elementos presentes nas amostras estivessem dentro da faixa analítica ideal para o ICP-OES, evitando saturação do detector ou concentrações abaixo do limite de detecção.

O protocolo de diluição adotado consistiu nos seguintes passos detalhados:

1. Inicialmente, utilizando micropipetas calibradas com precisão, foram retirados volumes exatos de 0,05 mL da amostra líquida proveniente da digestão, garantindo alta acuracidade na medida do volume a ser diluído. Este volume foi transferido para balões volumétricos de 50 mL, que foram previamente limpos e calibrados, de modo a realizar uma diluição final de 100 vezes (1:100), considerada padrão para a maioria dos elementos analisados;
2. Em seguida, os balões volumétricos foram completados cuidadosamente até o menisco com água Milli-Q ultrapura, assegurando a ausência de contaminantes que pudessem interferir na análise espectrométrica. A água Milli-Q foi utilizada para evitar qualquer introdução de elementos que pudessem causar interferência ou aumentar os limites de detecção do ICP-OES;
3. Após o ajuste do volume, cada balão volumétrico foi homogeneizado por inversão suave e repetido, garantindo a distribuição uniforme dos elementos em solução e evitando gradientes de concentração dentro do volume final da amostra;

4. Para a análise instrumental, as amostras diluídas foram transferidas para tubos de ensaio específicos, compatíveis com o sistema ICP-OES, que passaram por um processo de ambientação, sendo pipetados e misturados três vezes para garantir a homogeneidade do conteúdo e a estabilidade química antes da introdução no equipamento;
5. Durante a calibração e testes preliminares, foram avaliadas diferentes diluições para a detecção de Au. Foram testadas diluições de 50 vezes em três diferentes comprimentos de onda específicos para Au. A diluição que apresentou detecção consistente e sinal ajustado com coeficiente de correlação próximo de 1 (indicando excelente linearidade e precisão) foi adotada para as análises finais;
6. Para os elementos Ag, Pd e Pt, cuja concentração nas amostras mostrou-se relativamente mais elevada, foi determinada uma diluição de 25 vezes como ideal para manter a concentração dentro da faixa linear do equipamento e evitar a saturação do detector;
7. Para todos os demais elementos analisados via ICP-OES, manteve-se a diluição padrão de 100 vezes, conforme as melhores práticas descritas na literatura e recomendações do fabricante do equipamento, garantindo a confiabilidade dos dados quantitativos obtidos.

Essa estratégia diferenciada de diluições para cada elemento foi fundamental para otimizar a sensibilidade e a precisão das análises multielementares, considerando as características específicas de concentração e comportamento espectral de cada metal presente nas amostras estudadas.

3.3.5 Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES)

Após a preparação e diluição das amostras digeridas e filtradas, foram realizadas as análises elementares utilizando o ICP-OES, modelo 5110 da Agilent Technologies, conforme ilustrado na Figura 54. As análises foram conduzidas no LACOR, pertencente à UFRGS.

A escolha do ICP-OES para esta etapa se deu pela sua capacidade de realizar análises multielementares simultâneas com elevada sensibilidade, ampla faixa dinâmica linear e robustez frente a matrizes complexas. Esta técnica é amplamente reconhecida em diversos campos científicos, tais como estudos ambientais, metalúrgicos, farmacêuticos e alimentares, para a quantificação precisa e acurada de elementos traço e majoritários em soluções aquosas (AGILENT TECHNOLOGIES, 2016).

O equipamento Agilent 5110 ICP-OES opera com um plasma de argônio gerado por acoplamento indutivo de radiofrequência em atmosfera controlada. A amostra líquida diluída é introduzida no sistema por meio de um nebulizador, que a transforma em um aerossol fino, transportado para o interior da tocha do plasma. O plasma apresenta temperaturas elevadas, variando aproximadamente entre 6.000 K e 10.000 K, suficientes para excitar os átomos e íons dos elementos presentes na amostra (AGILENT TECHNOLOGIES, 2016).

Durante o processo, os átomos excitados emitem radiação eletromagnética característica em comprimentos de onda específicos ao retornarem ao estado fundamental. A intensidade da radiação emitida é proporcional à concentração de cada elemento na amostra, permitindo a quantificação dos analitos com alta precisão (AGILENT TECHNOLOGIES, 2016).

Um diferencial tecnológico do Agilent 5110 é a arquitetura óptica que permite a detecção simultânea nos modos axial e radial, por meio da tecnologia patenteada Synchronous Vertical Dual View (SVDV). Esta abordagem inovadora possibilita a coleta eficiente dos sinais espectrais tanto no eixo longitudinal do plasma (axial), favorecendo a análise de elementos em baixas concentrações, quanto no eixo radial, que é mais adequado para amostras com elementos em maiores concentrações. Essa dualidade amplia significativamente a faixa dinâmica e a sensibilidade da análise, otimizando a qualidade dos dados obtidos (AGILENT TECHNOLOGIES, 2016).

A separação espectral da radiação emitida é realizada por um sistema de monocromadores de alta resolução, e a detecção dos sinais é feita por uma matriz de sensores CCD (Charge-Coupled Device), que permite a aquisição simultânea e rápida dos espectros em múltiplos comprimentos de onda, garantindo uma análise eficiente e minimizando interferências espectrais (AGILENT TECHNOLOGIES, 2016).

O controle operacional do equipamento foi realizado via software ICP Expert™, que integra funcionalidades essenciais para a calibração dos padrões analíticos, verificação contínua da qualidade das análises, correção automática de interferências espectrais e avaliação em tempo real do desempenho do sistema. Para garantir a confiabilidade dos resultados, foram utilizados padrões certificados para construção das curvas de calibração e inseridos controles de qualidade em intervalos regulares ao longo da análise das amostras, conforme as recomendações do fabricante e normas vigentes.

Os resultados das análises foram obtidos em triplicata para cada amostra, permitindo o cálculo das médias e dos desvios padrões, o que assegura a robustez estatística e a confiabilidade dos dados reportados neste estudo.

Figura 54 – Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) (*Agilent Technologies*, 5110)



3.4 Análises dos dados provindos da caracterização das Placas de Circuito Impresso (PCIs) das Urnas Eletrônicas (UEs)

Com os dados obtidos na revisão de literatura e nos resultados através da caracterização, no capítulo de resultados, será apresentada a percepção sobre as quatro placas provindas da urna eletrônica, as perdas de material durante a realização das etapas de cominuição e de classificação granulométrica, as imagens obtidas pelo Escaneamento em sensor de transmissão de raios-X e pelo MEV. Os resultados qualitativos provindos das técnicas de EDS e FRX e a análise quantitativa provinda da técnica de ICP-OES.

Além dos citados, os resultados quantitativos da caracterização, serão comparados quanto à similaridade com as PCIs de outros EEEs e com a mineração primária. Por fim, com base nas concentrações quantitativas dos metais preciosos e estratégicos extraídos das PCIs, será realizada uma estimativa do potencial de valoração econômica para os metais: Au, Ag, Cu e Sn, presentes em cada PCI e de uma urna. Ainda, o potencial econômico foi estimado para o total de urnas produzidas, para as urnas descartadas, para as urnas em processo de descarte, para as urnas descontinuadas e para as urnas em uso (dados de TSE, 2024d).

O cálculo de potencial de valoração utilizou o preço médio dos metais no ano de 2025 para Au e Ag de acordo com *Bullion Rates* (2025a; 2025b) e para Cu e Sn de acordo com *London Metal Exchange* (2025). A avaliação econômica fornecerá uma perspectiva sobre o potencial valor agregado dos materiais presentes nas urnas eletrônicas, contribuindo para a discussão sobre viabilidade técnica e econômica da reciclagem destes dispositivos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão demonstrados os resultados obtidos através da percepção sobre as PCIs estudadas, as perdas de materiais durante as etapas de tratamento físico, bem como as etapas de tratamento químico prosseguidas pelo Escaneamento em Sensor de Transmissão de Raios-X de Energia Dupla, MEV/EDS, FRX e ICP-OES. Além do atendimento dos objetivos específicos, dados pela comparação à similaridade das PCIs, com as placas de outros EEEs e da mineração primária e a avaliação econômica preliminar do valor total associado a recuperação dos metais Au, Ag, Cu e Sn.

4.1 Percepção sobre as Placas de Circuito Impresso da Urna Eletrônica

Com a etapa de desmontagem da UE cada componente foi identificado e pesado. Alguns exemplos da pesagem dos componentes podem ser visualizados na Figura 55 a Figura 62. A massa total da urna foi contabilizada em 9,340 Kg, valor próximo do esperado, de acordo com o TSE (2012). Na Tabela 4, foi apresentado um comparativo entre os modelos.

Pode-se observar que a única categoria que aumentou foi a bateria, com acréscimo de +0,228 kg (+9,49%), sugerindo o uso de baterias maiores ou mais pesadas na urna de 2002. Houve uma redução significativa na massa de placas pesadas (–0,261 kg; –40,22%), o que pode indicar um redesenho da PCI, miniaturização de circuitos, menor densidade de componentes, ou troca de tecnologia.

Também se destacam reduções em plástico (–12,28%) e fio misto (–4,56%), o que pode indicar otimização no uso de materiais ou mudanças na estrutura física da urna. A massa total da urna caiu 450 g (–4,60%), o que pode ter impacto em transporte, logística e custo de produção.

Tabela 4 – Comparação entre as massas das Urnas Modelo 1996 e 2002

Componente	UE96 (kg) (TSE, 1996)	UE2002 (kg) (TSE, 2002)	Diferença Absoluta (kg)	Diferença Percentual (%)
Bateria	2,403	2,631	+0,228	+9,49%
Ferro	1,036	1,010	–0,026	–2,51%
Fio Misto	0,680	0,649	–0,031	–4,56%
Papelão/Papel	1,900	1,843	–0,057	–3,00%
Placas marrons (PCIa e c)	0,587	0,583	–0,004	–0,68%
Placas Pesadas (PCIb e d)	0,649	0,388	–0,261	–40,22%
Plástico	2,370	2,079	–0,291	–12,28%
Latão	0,020	0,019	–0,001	–5,00%
Resíduo	0,145	0,138	–0,007	–4,83%
Total	9,790	9,340	–0,450	–4,60%

As dimensões (altura e largura) das PCIs foram apresentadas nas legendas entre a Figura 59 e Figura 62. Observou-se que a PCIa e a PCIb apresentaram um maior número de componentes integrados à placa, enquanto a PCIb exibiu também maiores dimensões em comprimento e largura.

Neste trabalho, as PCIs a e c foram consideradas, visualmente, como placas marrons (leves), caracterizadas pela menor concentração de metais valiosos e maior proporção de substrato polimérico. Por sua vez, as PCIs b e d foram classificadas como placas pesadas, devido à maior densidade de componentes metálicos e à presença significativa de circuitos integrados e conectores de alta complexidade, especificações condizentes com o Quadro 6 desta pesquisa.

Figura 55 – Cabos (Código 25)



Figura 56 – Papel de impressão (Código 10)



Figura 57 – Bateria (Código 08)



Figura 58 – Carcaça (Código 22)



Figura 59 – PCIa (Código 24). Dimensões: 14,70 x 13,00 cm



Figura 60 – PCIb (Código 12). Dimensões: 20,50 x 27,20 cm



Figura 61 – PCIc (Código 04). Dimensões: 14,70 x 17,60 cm



Figura 62 – PCId (Código 23). Dimensões: 7,50 x 12,80 cm



4.2 Perdas de material nas etapas de cominuição e de classificação granulométrica das placas de circuito impresso da urna eletrônica

A Tabela 5 apresenta as quantidades e as perdas resultantes da etapa de cominuição e da classificação granulométrica para cada placa. As causas da perda na etapa de cominuição podem ter ocorrido pela fragmentação de partículas muito finas, que podem ter escapado pelo sistema de exaustão ou ficarem presas em cantos ou superfícies do equipamento.

Na etapa de classificação granulométrica, a perda pode se dar através da movimentação manual excessiva, uso de pincéis ou vibração inadequada podendo promover o arraste de finos (poeira) para fora do conjunto de peneiras.

A etapa de cominuição e classificação granulométrica das PCIs evidenciou padrões consistentes de perda de massa entre as diferentes placas analisadas. As perdas na cominuição foram de 12,09% (55,90 g) para a PCIa, 16,29% (52,80 g) para a PCIb e 9,01% (10,90 g) para a PCIc, refletindo a liberação de partículas finas e poeiras metálicas durante o processo. PCId apresentou a maior perda relativa, 17,30% (10,90 g), indicando maior fragmentação dos materiais constituintes. No estágio de classificação granulométrica, as perdas foram baixas, variando de 0,00% a 14,98%, sendo este último valor observado na PCIc (16,50 g), enquanto a PCIa apresentou perda de 5,44% (22,10 g), a PCIb de 9,55% (26,00 g) e a PCId de 14,97% (7,80 g).

A distribuição das massas por faixa granulométrica reforçou a predominância de materiais retidos em F3 e F4 nas placas PCIa, PCIb e PCIc, enquanto a PCId mostrou maior proporção de material nas frações finas (F1 e F2), indicando maior fragilidade estrutural. Esses resultados confirmam o fechamento integral do balanço de massa, garantindo a representatividade das frações para a etapa subsequente de caracterização química.

Tabela 5 – Quantidades e perdas na etapa de cominuição e de classificação granulométrica das Placas de Circuito Impresso das Urnas Eletrônicas

Nomenclatura	Massa inicial (g)	Cominuição		Classificação granulométrica		
		Massa final (g)	Perda (%)	Frações (g)	Total (g)	Perda (%)
PCIa	462,00	406,10	12,09	F1: 108,40 F2: 64,80 F3: 94,60 F4: 116,20	**384,00**	5,44
PCIb	325,00	272,20	16,29	F1: 66,70 F2: 46,90 F3: 48,00 F4: 84,60	**246,20**	9,55
PCIc	121,00	110,10	9,01	F1: 13,20 F2: 12,70 F3: 16,70 F4: 51,00	**93,60**	14,98
PCId	63,00	52,10	17,30	F1: 11,20 F2: 9,70 F3: 9,60 F4: 13,80	**44,3**	14,97

Legenda: PCIa, PCIb e PCId: terminal do eleitor. PCIc: terminal do mesário; F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

4.3 Caracterização das Placas de Circuito Impresso da Urna Eletrônica

A seguir serão demonstrados os resultados obtidos pelo Escaneamento em Sensor de Transmissão, MEV/EDS, FRX e ICP-OES.

4.3.1 Escaneamento em Sensor de Transmissão de Raios-X de Energia Dupla

As imagens das placas, obtidas em modo RGB pelo sistema de Escaneamento por Transmissão de Raios-X, permitiram visualizar a distribuição dos materiais constituintes das PCIs conforme sua densidade e número atômico.

Na escala utilizada pelo equipamento (Figura 63), materiais de alta densidade e/ou alto Z aparecem em tons de amarelo/laranja/vermelho, enquanto materiais de média a baixa densidade surgem em tons de rosa/roxo/azul e as cores preta e verde representam saturação do detector (*OverHiDens*), indicando materiais extremamente densos. Essa representação possibilitou uma análise não destrutiva da estrutura interna, evidenciando a organização dos componentes, a distribuição física dos metais e a integridade do substrato.

Conforme descrito pela Comex (2025), a atenuação dos raios-X depende principalmente de: **i)** densidade: metais e cerâmicas. Devido à maior densidade, apresentam forte atenuação e aparecem como tons de alta densidade; e **ii**) número atômico (Z): elementos com Z elevado, como Au (79), Ag (47), Pb (82) e Sn (50), intensificam a absorção e também

aparecem em cores de alta densidade na escala. Assim, nas imagens das PCIs, regiões em amarelo/laranja/vermelho podem corresponder tanto a materiais de elevada densidade quanto a elementos de alto Z, ou ainda à combinação de ambos.

O Cu destaca-se sobretudo por sua alta densidade, que produz significativa atenuação do feixe e o faz aparecer em cores quentes, ainda que seu Z (29) seja moderado. Dessa forma, o contraste observado para Cu decorre majoritariamente de suas propriedades físico-densitárias e da espessura das trilhas metálicas (VECCHINI *et al*., 2019; COMEX, 2025).

Por outro lado, os materiais de média e baixa densidade, como o substrato (resina epóxi + fibra de vidro) e polímeros, aparecem em tons de rosa/roxo/azul, o que permite distinguir claramente regiões não metálicas e visualizar a arquitetura interna da placa (MAURÍCIO; ALMEIDA; SOUZA, 2022).

A técnica também favoreceu a identificação de componentes encapsulados, como microchips, capacitores multicamadas e módulos cerâmicos que, devido à sua estrutura interna densa, surgem em cores de alta densidade, mesmo quando recobertos por encapsulantes orgânicos. Isso auxilia na avaliação da viabilidade de desmontagem e do potencial de liberação metalúrgica (ILYAS *et al*., 2021).

Outro aspecto relevante observado foi a capacidade das imagens em evidenciar falhas internas, como trincas em trilhas condutoras, porosidades de solda, delaminações e rupturas de cerâmicas, as quais impactam processos de reforma, reciclagem e recuperação de metais (VECCHINI *et al*., 2019).

A escala da Figura 63 pode ser interpretada da seguinte forma:

Verde/Preto: densidade extremamente alta (saturada), indicando materiais extremamente densos (blindagens, massas elevadas de solda ou conectores robustos).

Amarelo/Laranja/Vermelho: alta densidade (soldas SnPb/Sn-Ag-Cu (solda sem Pb), Cu espesso e componentes metálicos);

Rosa/Roxo/Azul: moderada a baixa densidade (resina epóxi e fibra de vidro);

A análise individual das quatro placas mostra que: a PCIa (Figura 63i) como a placa mais complexa e densa, com numerosas regiões em tons de alta densidade indicando grande quantidade de soldas, capacitores cerâmicos, dissipadores e módulos de alta densidade. As trilhas e pads de Cu também se destacam. Essa placa apresenta alto potencial de recuperação de metais, especialmente Cu, Sn, Pb e elementos nobres.

A PCIb (Figura 63ii) apresenta uma estrutura mais homogênea, com densidade moderada. O módulo central aparece em verde-amarelo, sugerindo encapsulamento híbrido.

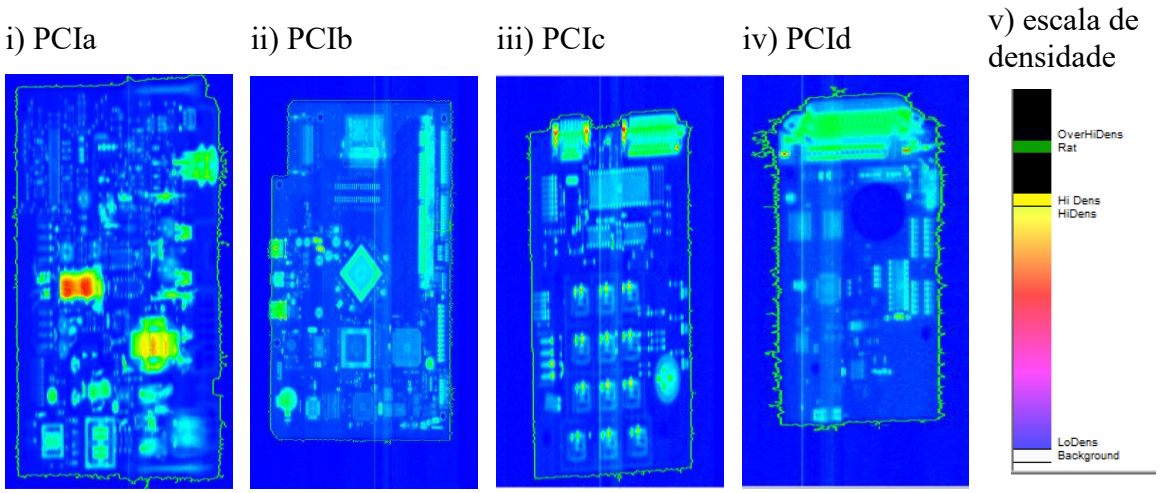
Há menor quantidade de áreas intensamente quentes, indicando menor massa metálica total em relação à PCIa.

A PCIc (Figura 63iii), apresenta um tipo de placa de densidade intermediária a alta, contendo agrupamentos de componentes densos, sobretudo conectores superiores e capacitores inferiores. As trilhas de Cu são visualmente marcadas. Possui boa concentração metálica, inferior à PCIa, porém superior à PCIb.

A PCId (Figura 63iv) apresenta predomínio de tons frios, indicando baixa densidade geral. Apenas conectores superiores e um grande componente central aparecem como regiões quentes. É a placa de menor potencial metalífero, exceto pelos conectores e eventuais blindagens.

Com base na resposta densitária e na distribuição dos materiais, a PCIa e a PCIc apresentam maior potencial para recuperação de metais, devido a escala de cores identificadas nas imagens. A PCIb apresenta conteúdo metálico moderado e a PCId possui menor densidade média, embora conectores e blindagens constituam pontos de interesse. Assim, o escaneamento mostrou-se eficaz para identificar e separar frações ricas em metais, sendo uma etapa relevante antes da digestão ácida e análise por ICP-OES.

Figura 63 – Imagens RGB: i) PCIa, ii) PCIb, iii) PCIc; iv) PCId e v) escala de densidade



4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)

Com o material cominuído, aplicou-se a técnica de MEV, a fim de identificar a estrutura física das PCIs. Após as capturas realizadas pelo MEV, as imagens foram submetidas à técnica química de EDS. Dessa forma, foi possível verificar os elementos e as concentrações de cada

amostra das PCIs. No Apêndice A, além das imagens provindas do MEV, podem ser observados os gráficos e as tabelas geradas a partir dos pontos inseridos nas imagens.

As imagens obtidas em modo de elétrons retroespalhados permitiram a observação de variações de contraste diretamente relacionadas às diferenças no número atômico. Verificou-se que as regiões mais claras indicaram a presença de elementos com maior número atômico, como o Sn, a Ag e o Au e intermediário, como o Cu (metais de interesse da pesquisa), enquanto áreas mais escuras ficaram associadas a materiais de menor número atômico, como materiais poliméricos e cerâmicos: C, O e Si.

Com base nessa diferenciação composicional, a escolha dos pontos para análise pontual por EDS foi realizada de maneira a cobrir a maior heterogeneidade possível das amostras. Foram selecionados pontos em regiões de alto brilho, indicando a presença de metais com Z alto ou ligas metálicas, como trilhas condutoras, ilhas de solda e partículas metálicas dispersas, bem como em áreas de menor contraste, representativas dos substratos não metálicos.

Esse procedimento possibilitou a identificação precisa das regiões de interesse para análise química, garantindo a representatividade dos dados obtidos e evidenciando a distribuição localizada dos elementos de maior relevância para a recuperação de metais em processos de reciclagem.

Para o equipamento Zeiss EVO 10, parâmetros operacionais típicos incluem potencias de aceleração entre 15 e 20 kV, correntes do feixe em torno de 1 a 5 nA, e tempos de aquisição entre 60 e 180 segundos, adaptados conforme a complexidade da análise e a sensibilidade desejada (ZEISS, 2020).

Segundo Goldstein (2017), tempos maiores proporcionam melhor relação sinal-ruído, permitindo a detecção de elementos em baixas concentrações, porém podem aumentar o risco de danos ou aquecimento local da amostra.

A corrente do feixe de elétrons foi medida em nanoamperes (nA) entre 0,5 a 10 nA, corresponde à quantidade de elétrons incidentes na amostra por segundo. Correntes elevadas aumentam a intensidade do sinal e, consequentemente, a sensibilidade analítica, mas podem causar danos à amostra, especialmente em materiais frágeis ou não condutores, devido ao efeito de carga (ZEISS, 2020).

A profundidade de interação dos elétrons primários depende diretamente da voltagem do feixe (potencial de aceleração) e da composição da amostra. Para energias típicas entre 15 e 20 kV, essa profundidade varia aproximadamente entre 1 e 3 micrômetros. A profundidade de interação determina o volume da amostra efetivamente analisado, sendo crucial para a interpretação espacial e quantitativa dos dados obtidos (GOLDSTEIN, 2017).

A seleção dos picos para Au, Ag, Cu e Sn baseou-se nas suas linhas características mais adequadas à faixa de operação do MEV-EDS. Para Cu utilizou-se a linha Kα (8,04 keV), facilmente excitada em 15–20 kV. Ag e Sn possuem linhas Kα em 22,16 keV e 25,27 keV, respectivamente; embora estejam próximas do limite de excitação nessa voltagem, são as linhas principais de identificação desses elementos. Para Au, cuja linha K está acima da capacidade do equipamento, emprega-se a linha Lα (~9,71 keV). Essa escolha considera a resolução do detector, evitando sobreposição de picos e garantindo maior precisão na identificação elementar.

A apresentação dos resultados da composição elementar foi dada por % em peso, indicando quanto cada elemento contribuiu para o peso total da amostra analisada e por % em proporção atômica, que indica a fração em número de átomos de cada elemento em relação ao total de átomos presentes. Os valores de magnificação (ampliação da imagem) correspondentes de cada escala são 30 μm (4000x), 80 μm (1750x), 90 μm (1500x) e 100 μm (1250x).

4.3.2.1 Ouro

Nas placas a, b e c, foi possível identificar o elemento Au, na magnificação de 4.000 vezes (Figura 64 a Figura 75). A alta concentração de Au muitas vezes ficou associada a elementos como Si, Ca, Br, Fe, W, C e O, indicando que o Au ficou localizado em terminais metálicos ou pontos de contato seletivos, onde é aplicado como revestimento eletroquímico sobre materiais cerâmicos ou polímeros dielétricos (CHI *et al*., 2011; ZHOU *et al*., 2017).

Também, a composição observada ficou compatível com laminados epóxi bromados amplamente usados em PCIs, cuja matriz polimérica incorpora retardantes de chama halogenados, como é o caso do Br (CHI *et al*., 2011).

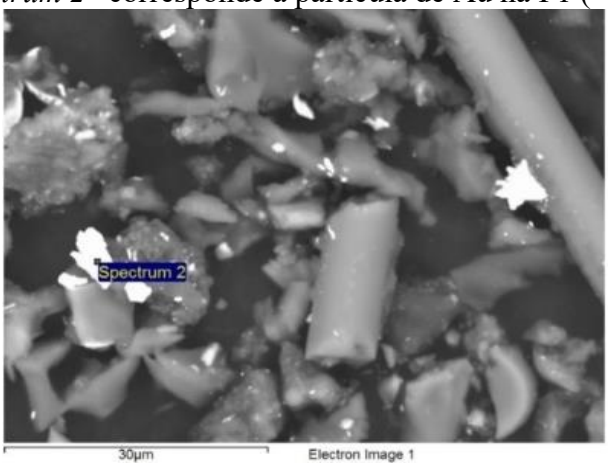
A pureza das partículas e sua localização morfológica podem sugerir que se trata de uma aplicação seletiva de Au. Para Chen *et al*., (2020) essa aplicação seletiva é utilizada (provavelmente) como revestimento metálico em terminais, pinos de contato ou pontos de solda de alta confiabilidade, onde se requer alta condutividade elétrica, resistência à corrosão e estabilidade térmica.

A utilização de Au em quantidades pontuais, mas altamente puras, é tipicamente compatível com componentes de alto desempenho de equipamentos eletrônicos sensíveis, como é o caso das urnas eletrônicas (CHEN *et al*., 2020).

A análise pontual realizada sobre a PCIa (*Espectrum 2*) na F1 (> 0,25 mm) revelou na Figura 64 uma partícula de composição majoritariamente metálica, com destaque para Au**,**

presente em 54,62% em peso e 12,93% em proporção atômica. Essa partícula apareceu em região de alto brilho na imagem BSE, indicando número atômico elevado.

Figura 64 – Imagem de retroespelhamento da PCIa obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 2*" corresponde à partícula de Au na F1 (> 0,25 mm)

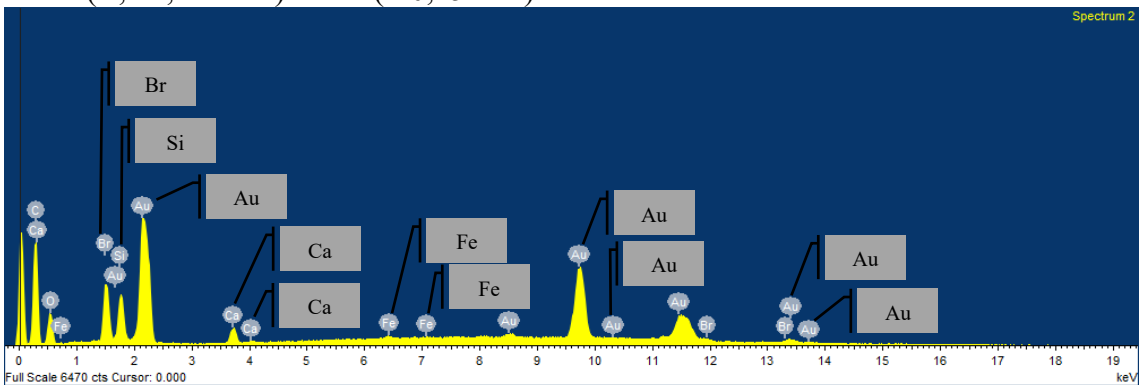


Na Figura 65 pode se observar a presença de O (22,52%) e Br (13,00%). Essa situação sugere que o Au esteja parcialmente depositado sobre um substrato polimérico halogenado, possivelmente proveniente de um laminado epóxi com retardante de chama, amplamente utilizados em PCIs (WANG *et al*., 2005; KIM, CHOI e KIM, 2011).

A maioria dos laminados epóxi, comumente empregados em PCIs, contém retardantes bromados que deixam resíduos detectáveis de Br e O nas análises por EDS (SCHLUMMER *et al*., 2007).

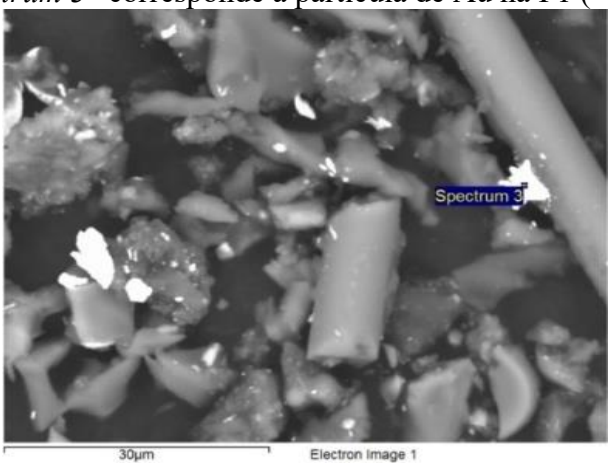
A detecção de Fe, Si e Ca indica resquícios de substrato inorgânico, tais como partículas minerais oriundas de cargas cerâmicas, vidros ou sílicas usadas como reforço mecânico (KRIKSUNOV, 2008; SONG e LI, 2014).

Figura 65 – Mapeamento químico obtido por EDS do "*Espectrum 2*" corresponde à partícula de Au (54,62%) com presença de O (22,52%) e Br (13%) e demais elementos em proporção menores (C, Fe, Si e Ca) na F1 (> 0,25 mm)



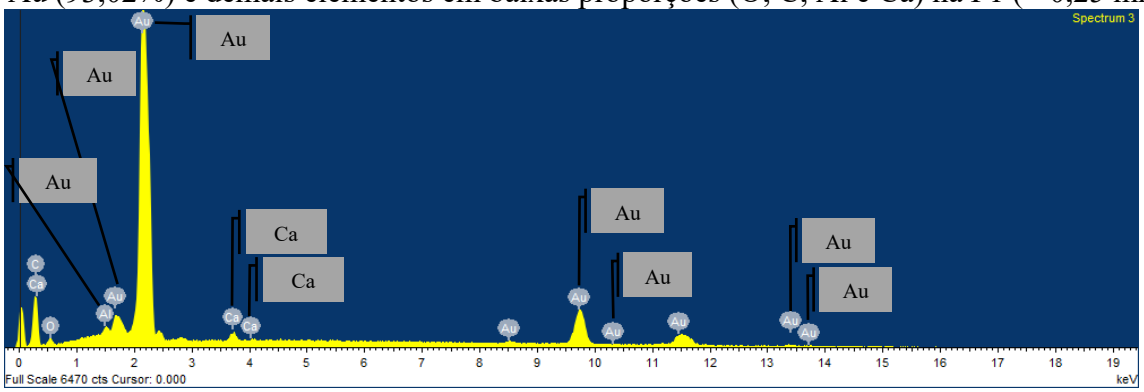
Analisando a Figura 66 percebe-se que a concentração de Au atingiu 93,02% em peso, com 56,59% atômico, caracterizando uma partícula de Au quase puro. A morfologia esférica e o intenso brilho no BSE confirmaram a presença de um metal pesado e denso. Para Balde *et al*., (2016), essa alta concentração é devido a sua excelente condutividade elétrica e resistência à oxidação.

Figura 66 – Imagem de retroespelhamento da PCIa obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 3*" corresponde à partícula de Au na F1 (> 0,25 mm)



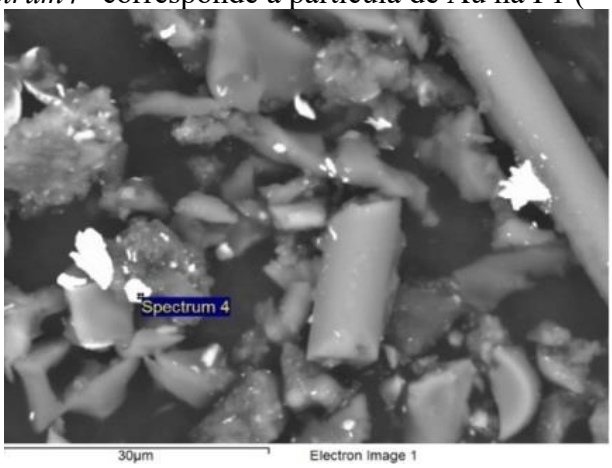
Os outros elementos detectados (O, Al, Ca) apareceram em quantidades traço, o que pode indicar resíduos do substrato inorgânico, provenientes de cargas cerâmicas, vidros ou fibras do laminado epóxi (KRIKSUNOV, 2008; VERMEŞAN, TIUC e PURCAR, 2020) (Figura 67).

Figura 67 – Mapeamento químico obtido por EDS do "*Espectrum 3*" corresponde à partícula de Au (93,02%) e demais elementos em baixas proporções (O, C, Al e Ca) na F1 (> 0,25 mm)



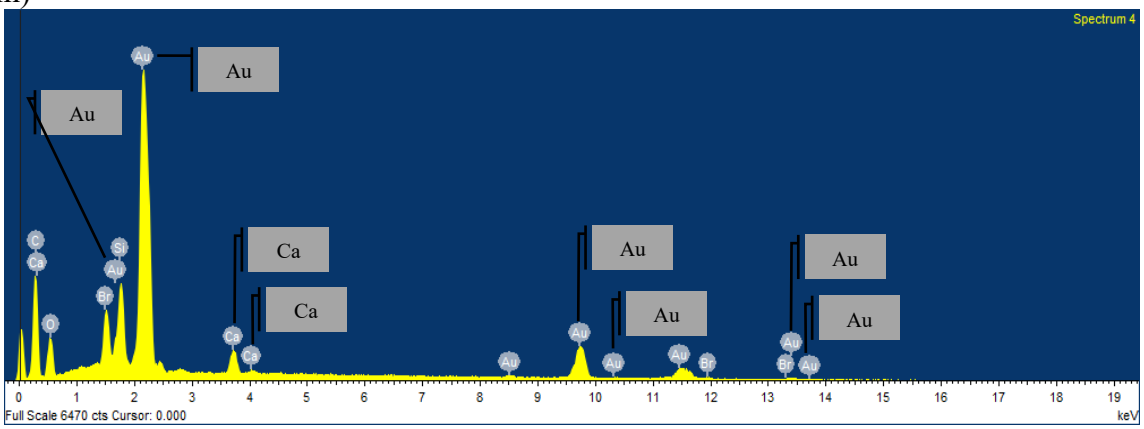
A Figura 68 apresenta a análise morfológica e composicional de uma partícula localizada na PCIa, identificada no ponto "*Espectrum 4*", onde o Au foi detectado em 68,27% em peso e 19,83% em proporção atômica.

Figura 68 – Imagem de retroespelhamento da PCIa obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum4*" corresponde à partícula de Au na F1 (> 0,25 mm)



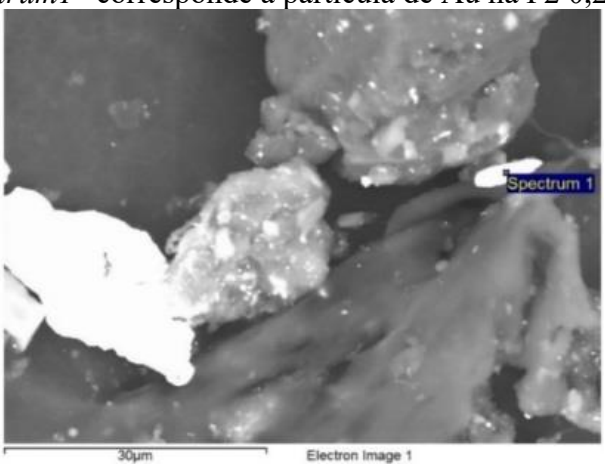
Além do Au, foram identificados O (17,18%), Si (4,69%), Ca (2,96%) e Br (6,89%) (Figura 69). A composição observada indica uma partícula metálica de Au integrada a uma matriz polimérica ou cerâmica, ressaltando a compatibilização com aplicações seletivas (CHEN *et al*., 2020; GUO, GUO e XU, 2009).

Figura 69 – Mapeamento químico obtido por EDS do "*Espectrum 4*" corresponde à partícula de Au (68,27%) e demais elementos em baixas proporções (O, C, Ca, Si e Br) na F1 (> 0,25 mm)



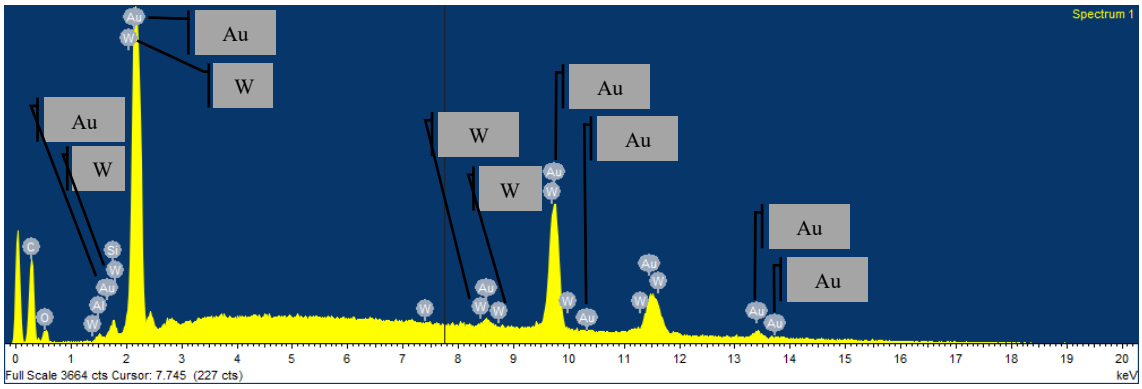
A PCIb revelou a presença de Au (89,21%) em peso, associada de W, O, Si **e** Al, na F2 0,25 < n < 0,5 mm. Para Yamane *et al*., (2011b) e Santos (2021) essa situação associa-se com partículas metálicas aderidas a materiais cerâmicos ou dielétricos, como alumina ou sílica, frequentemente empregados em módulos microeletrônicos (Figura 70).

Figura 70 – Imagem de retroespelhamento da PCIb, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum1*" corresponde à partícula de Au na F2 0,25 < n < 0,5 mm



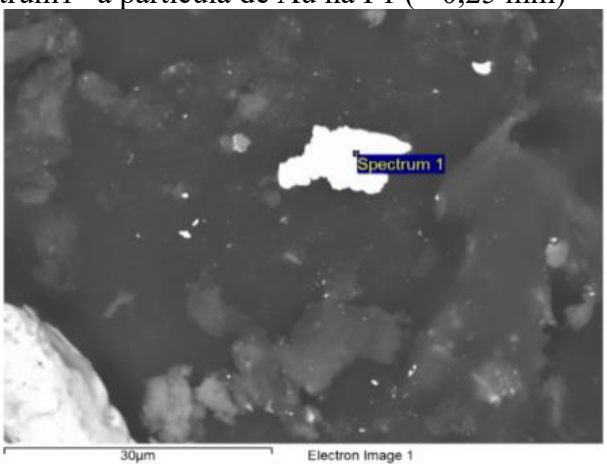
Já a presença de W reforça a hipótese de um contato metálico de alta resistência térmica ou revestimento funcional (Figura 71), pois este elemento é utilizado em componentes que precisem de estabilidade em altas temperaturas, como terminais de potência, camadas de barreira de difusão ou revestimentos funcionais, além de serem utilizados como encapsulantes ou camadas isolantes em dispositivos eletrônicos de alto desempenho (KIM, CHOI e KIM, 2011).

Figura 71 – Mapeamento químico obtido por EDS do "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Au (89,21%) e demais elementos em baixas proporções (C, O, W, Si e Al) na F2 0,25 < n < 0,5 mm



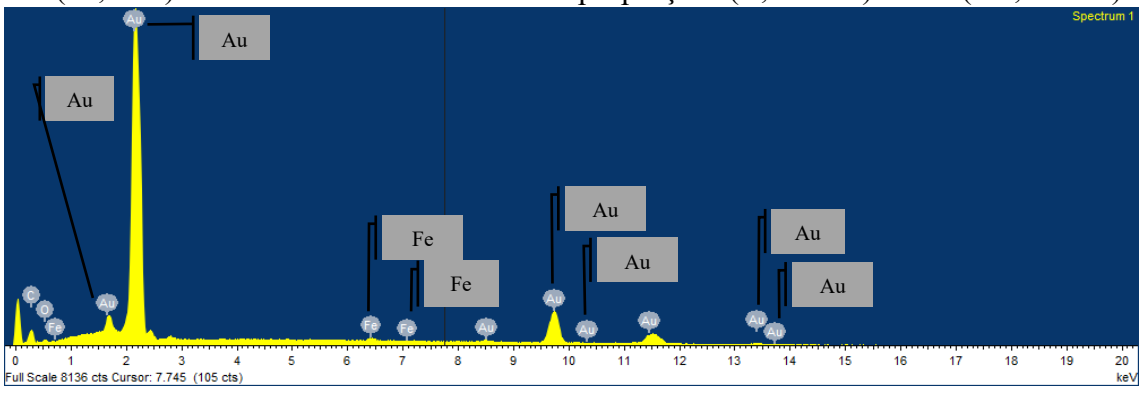
A análise pontual realizada na PCIc (*Espectrum 1*), Figura 72, apresentou 97,13% de Au em peso e 78,10% em proporção atômica. Também foi identificou O (1,95%) e Fe (0,92%), ambos em proporções residuais.

Figura 72 – Imagem de retroespelhamento da PCIc, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto “Espectrum1” à partícula de Au na F1 (> 0,25 mm)



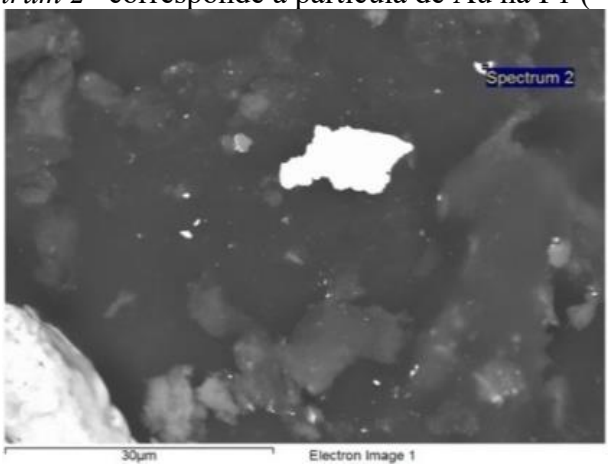
O Fe pode indicar vestígios de interface com outras ligas ou trilhas metálicas próximas (Figura 73), compatível com processos de soldagem, difusão ou contaminação durante a etapa de cominuição ou de preparo da amostra.

Figura 73 – Mapeamento químico obtido por EDS do “*Espectrum 1*” corresponde à partícula de Au (97,13%) e demais elementos em baixas proporções (C, O e Fe) na F1 (> 0,25 mm)



A Figura 74 confirma que o Au nesta amostra se encontrou integrado a uma estrutura funcional complexa, com uma composição obtida por EDS de Au em 56,51% em peso e 10,87% em proporção atômica, acompanhado de O (32,17%), Al (4,33%), Si (1,46%), Ca (2,30%), P (0,50%), Cl (1,04%) e Fe (1,69%).

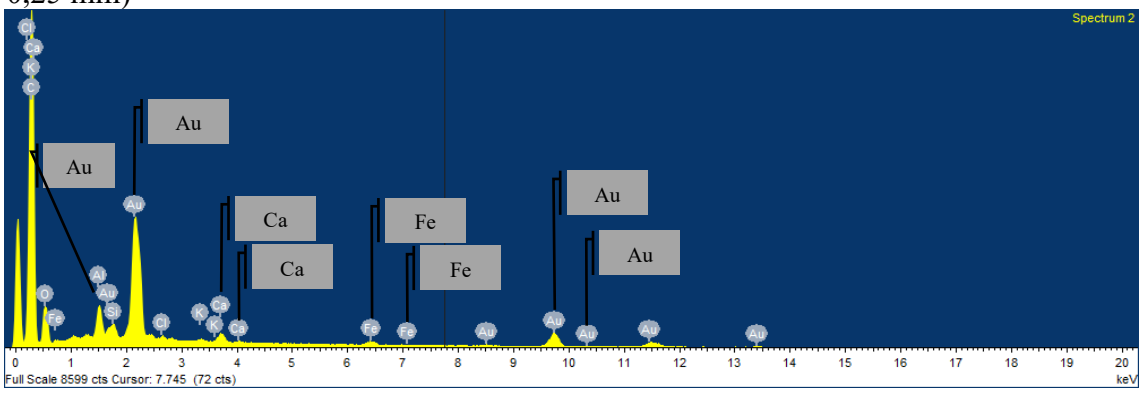
Figura 74 – Imagem de retroespelhamento da PCIc, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 2*" corresponde à partícula de Au na F1 (> 0,25 mm)



A elevada proporção de O, associada com Al, Si e Ca, pode sugerir a presença de uma matriz cerâmica ou dielétrica, possivelmente composta por aluminossilicatos ou outros materiais inorgânicos amplamente utilizados como cargas, isolantes ou encapsulantes em módulos eletrônicos (KRIKSUNOV, 2008; VERMESAN, TIUC e PURCAR, 2020).

A detecção de Cl pode estar relacionada aos resíduos de processos industriais, como fluxo de soldagem, ou à presença de compostos halogenados nos materiais poliméricos utilizados como base estrutural (Figura 75) (KRIKSUNOV *et al*., 2008; VERMEŞAN, TIUC e PURCAR, 2020).

Figura 75 – Mapeamento químico obtido por EDS do "*Espectrum 2*" corresponde à partícula de Au (56,51%) e demais elementos em baixas proporções (Cl, Ca, K, C, O, Fe, Al e Si) na F1 (> 0,25 mm)

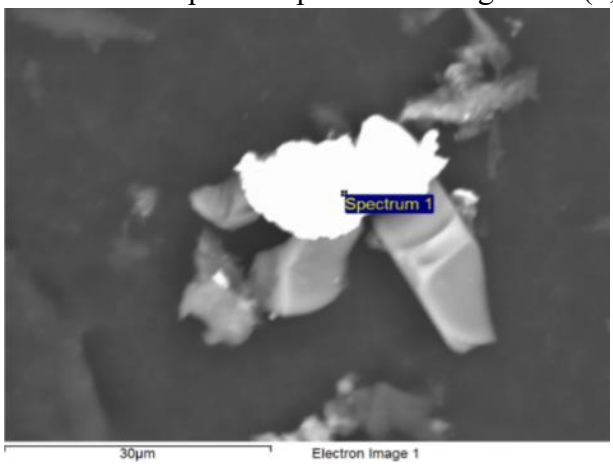


4.3.2.2 Prata

Em todas as placas foi possível identificar o elemento Ag, porém apenas na magnificação de 4000 vezes (Figura 76 a Figura 83). Devido ao retroespelhamento aplicado, o

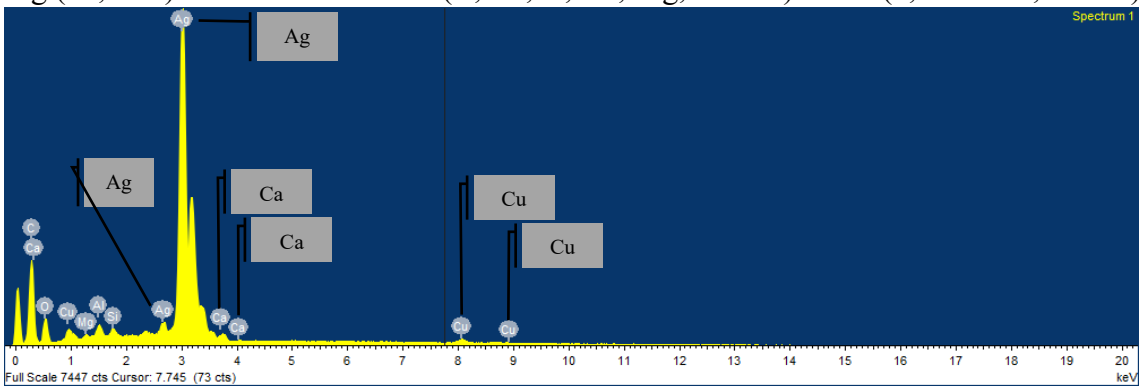
metal Ag, ficou mais evidente (Figura 76). A composição revelou 71,81% de Ag, com presença de Cu (1,79%), O (23,72%) e traços de Mg, Al, Si e Ca.

Figura 76 – Imagem de retroespelhamento da PCIa, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Ag na F3 (0,5 < n < 1,00 mm)



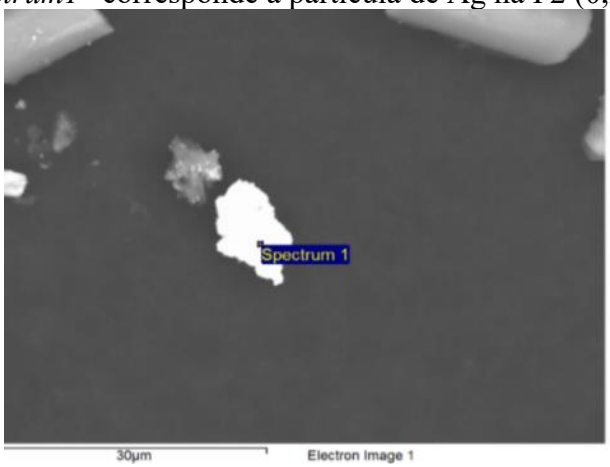
A combinação Ag e Cu (Figura 77) podem indicar uma liga condutora ou traços de solda tipo Ag-Cu. A elevada presença de oxigênio aponta possível oxidação ou substrato rico em grupos funcionais oxigenados (CHEN *et al*., 2020).

Figura 77 – Mapeamento químico obtido por EDS do "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Ag (71,81%) e demais elementos (C, Ca, O, Cu, Mg, Al e Si) na F3 (0,5 < n < 1,00 mm)



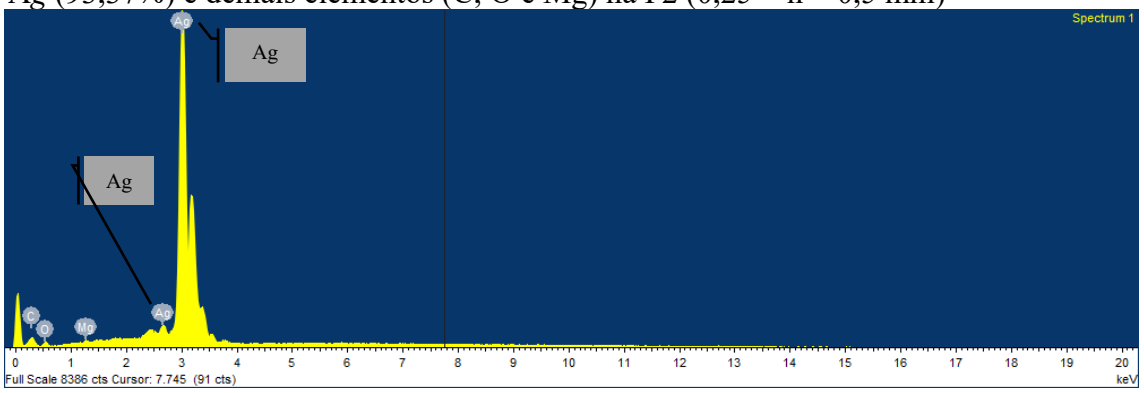
Na Figura 78, a Ag está presente em 93,37% em peso, concentração metálica altamente pura.

Figura 78 – Imagem de retroespelhamento da PCIb, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum1*" corresponde à partícula de Ag na F2 (0,25 < n < 0,5 mm)



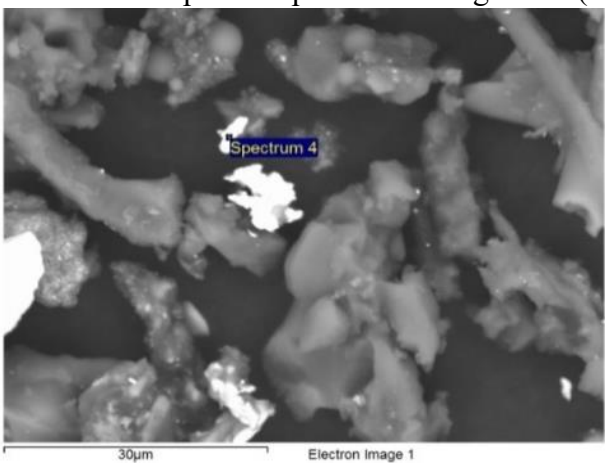
Associada ao metal, o mapeamento apontou o elemento O (6,16%) e o Mg (0,47%) (Figura 79), os quais podem estar relacionados ao ambiente da análise ou à superfície da partícula. Essa concentração reforça o uso de Ag em trilhas de alta condutividade ou revestimentos metálicos finos (CHEN *et al*., 2020).

Figura 79 – Mapeamento químico obtido por EDS do "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Ag (93,37%) e demais elementos (C, O e Mg) na F2 (0,25 < n < 0,5 mm)



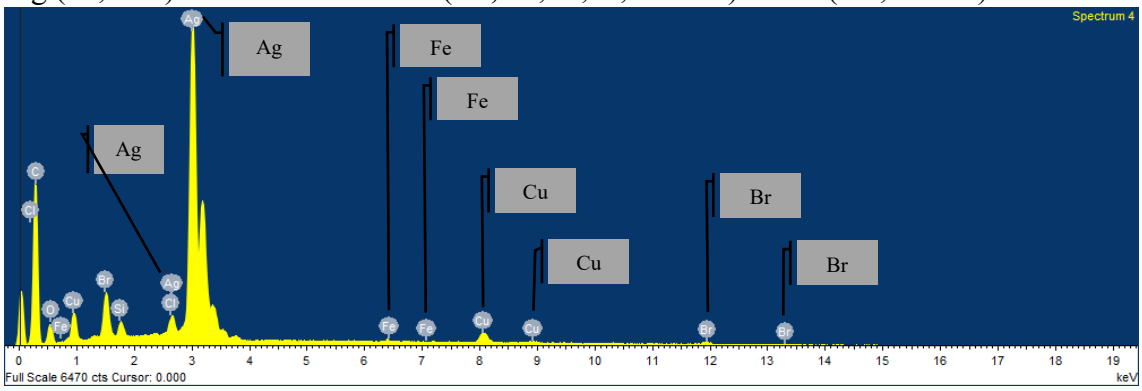
A Figura 80 apresentou 67,50% de Ag, com presença de Cu (4,53%)**,** Br (7,76%), e traços de Si, Fe e Cl.

Figura 80 – Imagem de retroespelhamento da PCIa, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 4*" corresponde à partícula de Ag na F1 (> 0,25 mm)



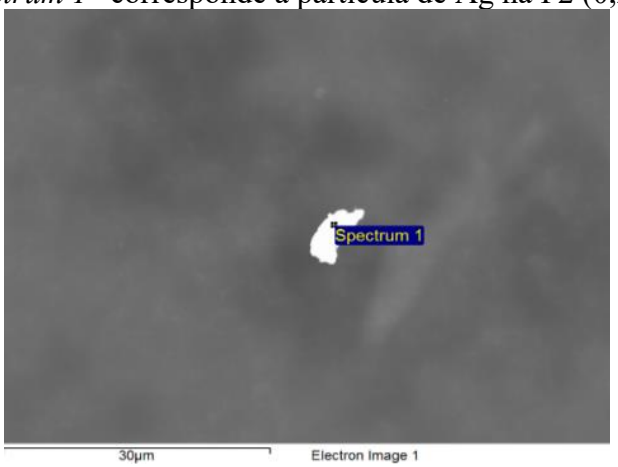
A associação de Ag com Br e Cu (Figura 81) sugere a presença de uma fase metálica próxima a substrato halogenado, ou proveniente de componentes SMD com encapsulamento modificado (CHEN *et al*., 2020).

Figura 81 – Mapeamento químico obtido por EDS do "*Espectrum 4*" corresponde à partícula de Ag (67,50%) e demais elementos (Cu**,** Br, Si, O, Fe e Cl) na F1 (> 0,25 mm)



A Figura 82 apresentou uma concentração expressiva de Ag, atingindo 76,80%, indicando uma camada metálica rica nesse elemento. Esse resultado reforça o uso da Ag em aplicações que demandam elevada condutividade elétrica, resistência à corrosão e estabilidade térmica, características fundamentais para o desempenho confiável das placas.

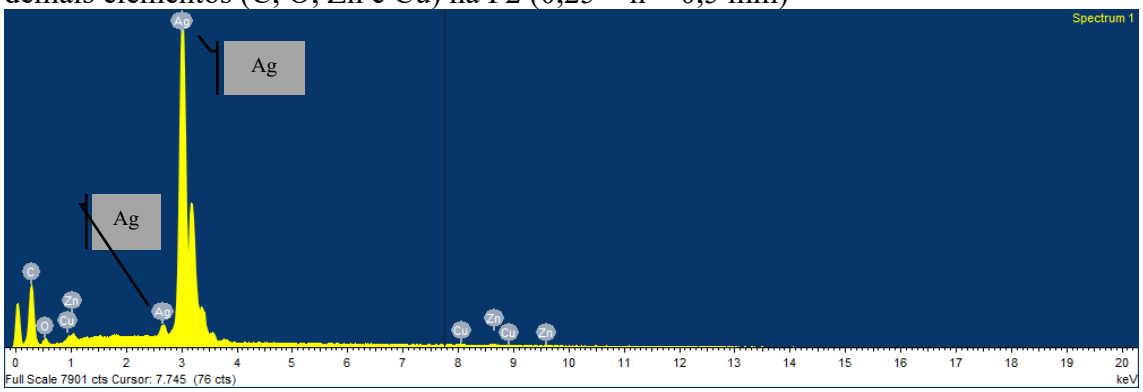
Figura 82 – Imagem de retroespelhamento da PCId, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Ag na F2 (0,25 < n < 0,5 mm)



Na Figura 83 a presença de C (14,76%) e O (6,80%) sugeriram que a Ag esteja aplicada sobre substrato orgânico, provavelmente uma matriz polimérica típica de placas, ou também essa combinação pode provir de oxidação superficial parcial, comum em revestimentos metálicos finos (LI *et al*., 2007; CHEN *et al*., 2020).

Já Zn e Cu, podem indicar a proximidade com trilhas metálicas condutoras ou a presença de interfaces de solda compostas por ligas ternárias Ag-Cu-Zn, que conferem propriedades mecânicas adequadas e boa condutividade elétrica, essenciais para a integridade elétrica e mecânica da PCI (LI et *al*., 2007; ZHANG *et al*., 2019).

Figura 83 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Ag (76,80%) e demais elementos (C, O, Zn e Cu) na F2 (0,25 < n < 0,5 mm)



4.3.2.3 Cobre

Foi possível detectar o elemento Cu em magnificações menores, a partir de 1500 vezes. Na Figura 84, o ponto inserido, detectou 83,24%, para a PCIa. 75,02% na PCIb (Figura 86) e

98,17% na PCIc (Figura 88). Para a PCId, 95,04% (Figura 90) e 95,91 e (Figura 92). A dimensão das partículas de cobre, pelo observado nas imagens, variou de tamanho.

As análises apontaram Cu como metal predominante, com teores variando de 75,02% a 98,17% em peso. Em diversas partículas, foram observados traços de Sn, Pb, Ta, Fe, Si, indicando que o cobre aparece em diversas formas: como trilhas metálicas puras, ligas de solda ou estruturas intermetálicas. Em algumas regiões, o Cu estava praticamente isolado (Figura 88), reforçando sua dominância como condutor nas placas (Figura 85, Figura 87, Figura 89, Figura 91 e Figura 93 (LI *et al.,* 2007; KIM, CHOI e KIM, 2011).

Figura 84 – Imagem de retroespelhamento da PCIa obtida por MEV com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Cu na F4 (> 1,00 mm)

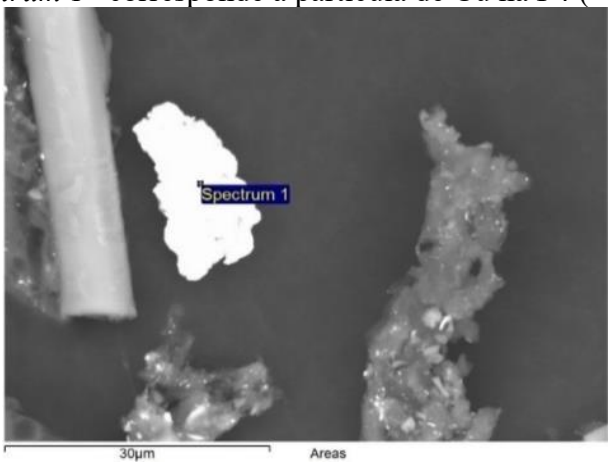


Figura 85 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Cu (83,24%) e demais elementos (C, O, As, Ta, Al, Pb e Sn) na F4 (> 1,00 mm)

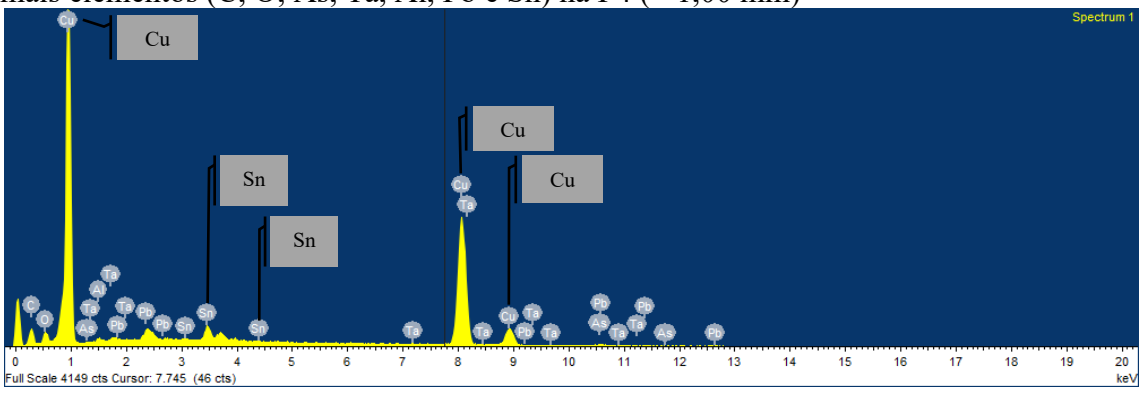


Figura 86 – Imagem de retroespelhamento da PCIb obtida por MEV com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 2*" corresponde à partícula de Cu na F4 (> 1,00 mm)

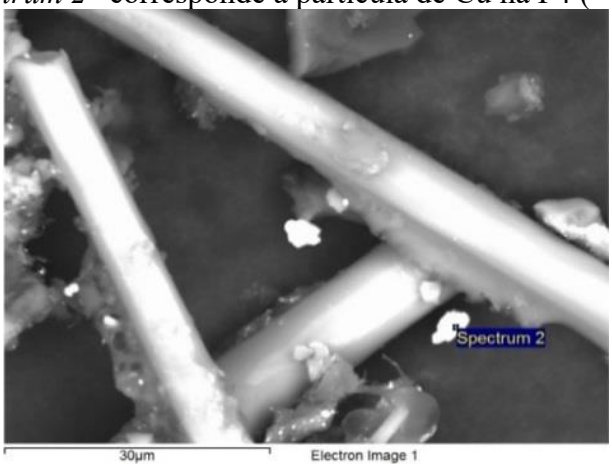


Figura 87 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Cu (75,02%) e demais elementos (C, O, Ta, Al e Si) na F4 (> 1,00 mm)

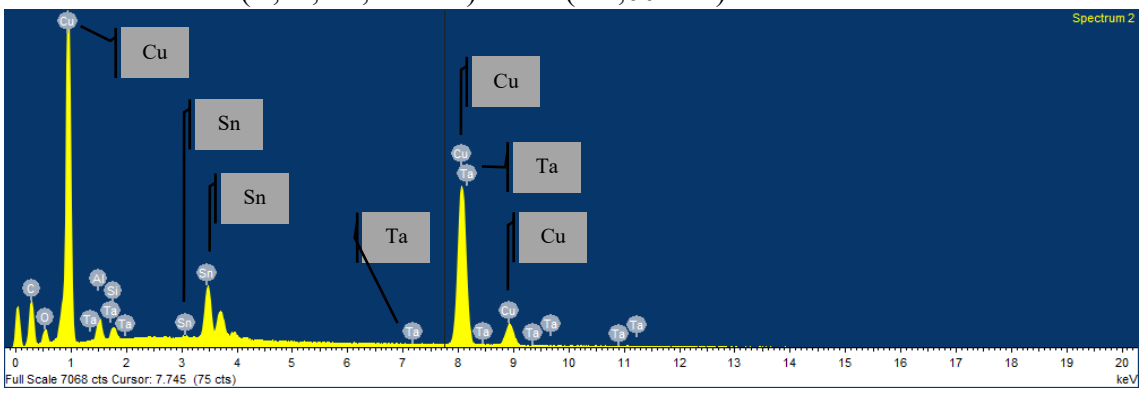


Figura 88 – Imagem de retroespelhamento da PCIc, obtida por MEV com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 2*" corresponde à partícula de Cu na F3 (0,5 < n < 1,00 mm)

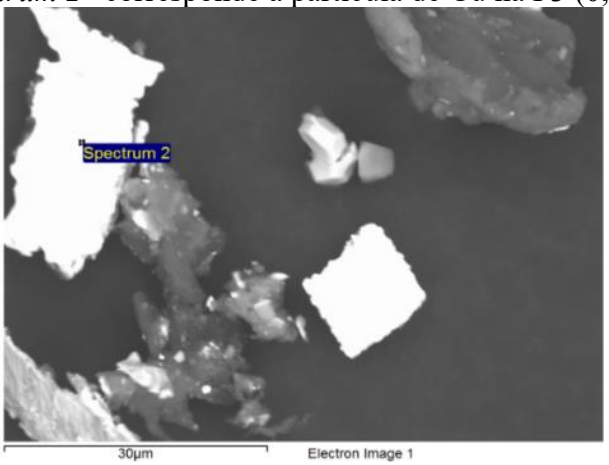


Figura 89 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Cu (91,60%) e demais elementos (C, O, Fe, Ta e Si) na F3 (0,5 < n < 1,00 mm)

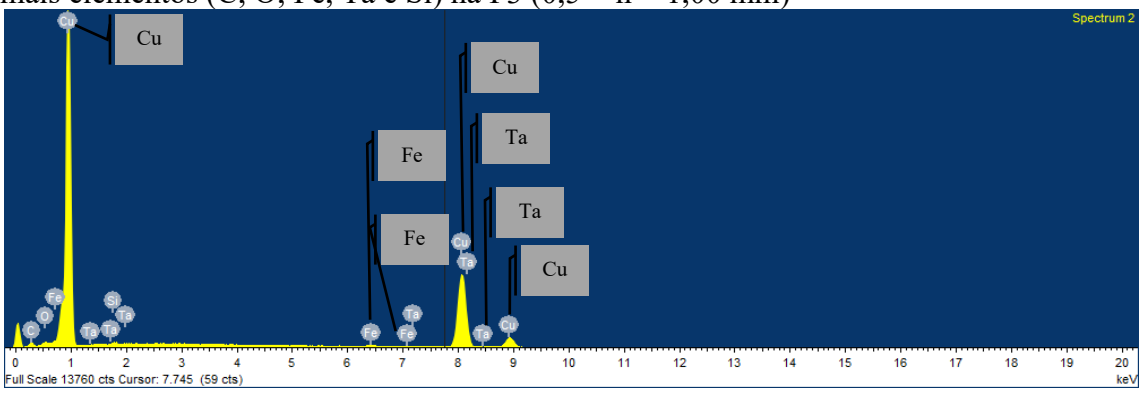


Figura 90 – Imagem de retroespelhamento da PCId, obtida por MEV com magnificação de 1500x. O ponto "*Espectrum 8*" corresponde à partícula de Cu na F3 (0,5 < n < 1,00 mm)

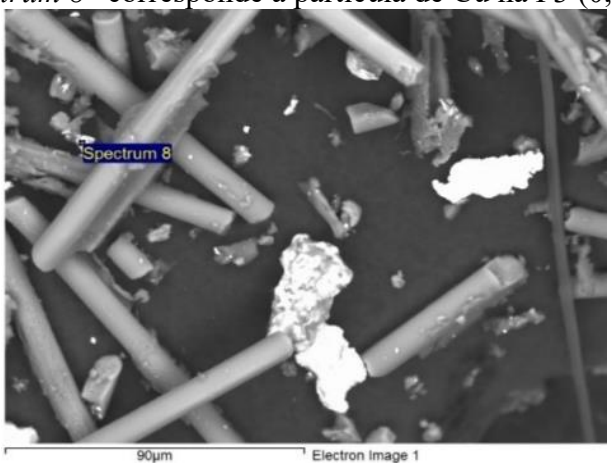


Figura 91 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Cu (95,04%) e demais elementos (C, O, Ca, Ta, Br, Si, Fe e Au) na F3 (0,5 < n < 1,00 mm)

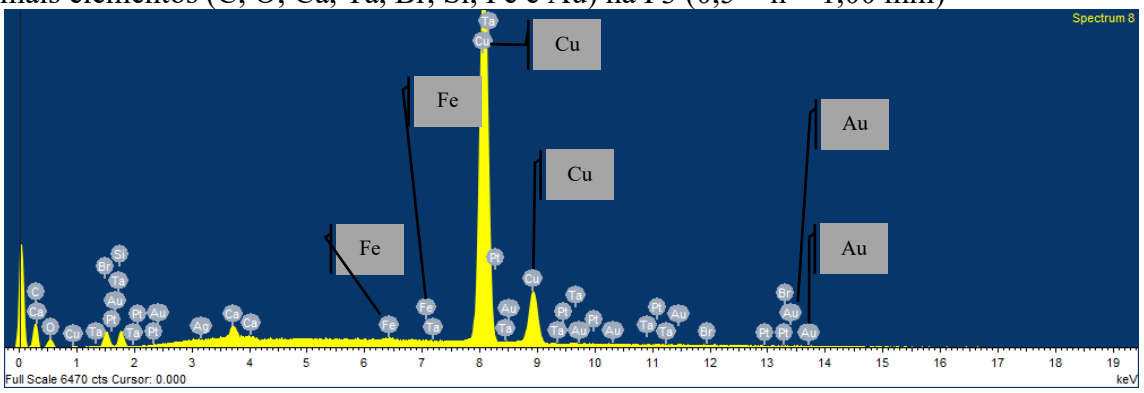


Figura 92 – Imagem de retroespelhamento da PCId obtida por MEV com magnificação de 1250x. O ponto "*Espectrum 5*" corresponde à partícula de Cu na F4 (> 1,00 mm)

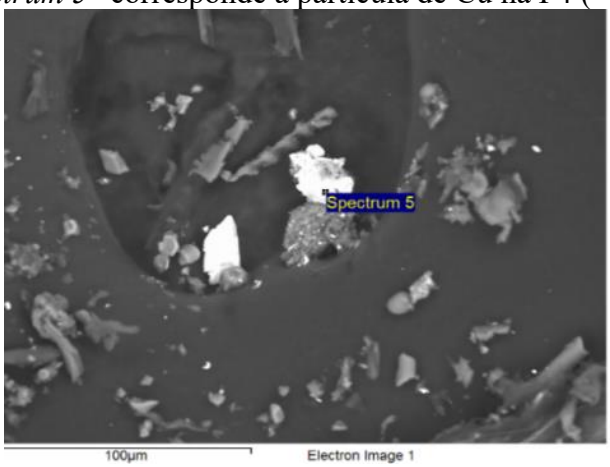
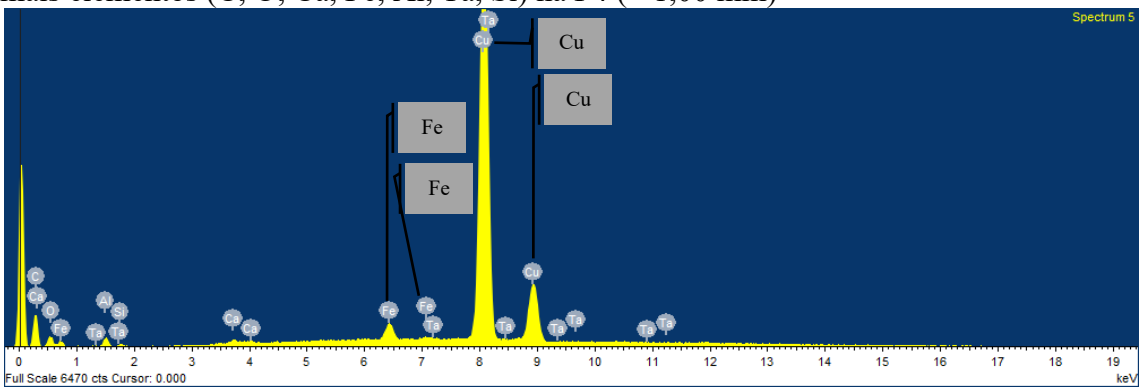


Figura 93 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Cu (95,91%) e demais elementos (C, O, Ca, Fe, Al, Ta, Si) na F4 (> 1,00 mm)



4.3.2.4 Estanho

Através da análise qualitativa de EDS, foi observado que o Sn foi encontrado juntamente com o Pb. Essa proporção é amplamente reconhecida como padrão devido às suas propriedades mecânicas e de fusão adequadas para conexões eletrônicas (CHANG; WU, 2015). Refere-se à presença de regiões de soldagem nas placas, nas quais essas ligas são aplicadas para fixação de componentes sobre trilhas metálicas (CUI; ZHANG, 2008; YAMANE *et al*., 2011b).

Segundo Chang e Wu (2015), a liga é caracterizada por um ponto de fusão relativamente baixo (~183 °C) e boa resistência mecânica, sendo uma das composições mais estáveis e utilizadas em aplicações industriais.

Kumar *et al*., (2021) ressaltam que, apesar da redução do uso de ligas com Pb por questões ambientais, a proporção 60/40 (%) ainda é referenciada como *benchmark* para estudos comparativos em processos de reciclagem e recuperação de metais.

As análises de EDS comprovaram esta ligação, através de sua proporção. A magnificação para detecção foi a partir de 1750 vezes no MEV (Figura 94). As detecções qualitativas no EDS, para a PCIa, foi de 57:39% (Figura 95), 47:18% (Figura 97) e 21:55% (Figura 99), na PCIb, 52:42%, (Figura 101) e 59:35% (Figura 103), na PCIc. 70:17% (Figura 105) e 20:72% (Figura 107), na PCId.

As análises revelaram presença recorrente de ligas Sn-Pb, com proporções variadas. Sn variou de 21,46% a 59,18%, enquanto Pb oscilou entre 16,70% e 55,07% (Figura 95, Figura 97, Figura 99, Figura 101, Figura 103, Figura 105 e Figura 107).

Figura 94 – Imagem de retroespelhamento da PCIa obtida por MEV com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Sn e Pb na F1 (> 0,25 mm)

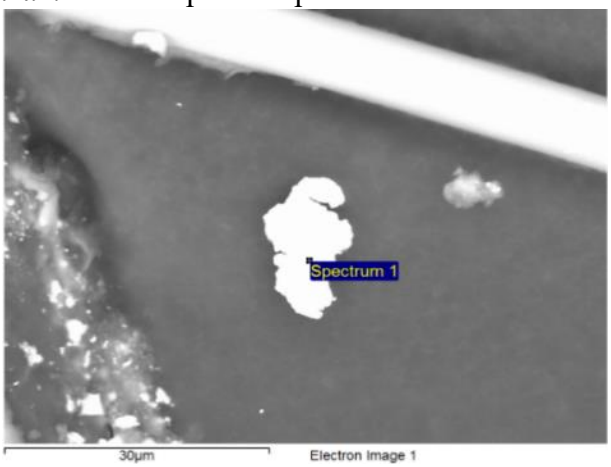


Figura 95 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Sn (57,16%) e Pb (38,77) na F1 (> 0,25 mm)

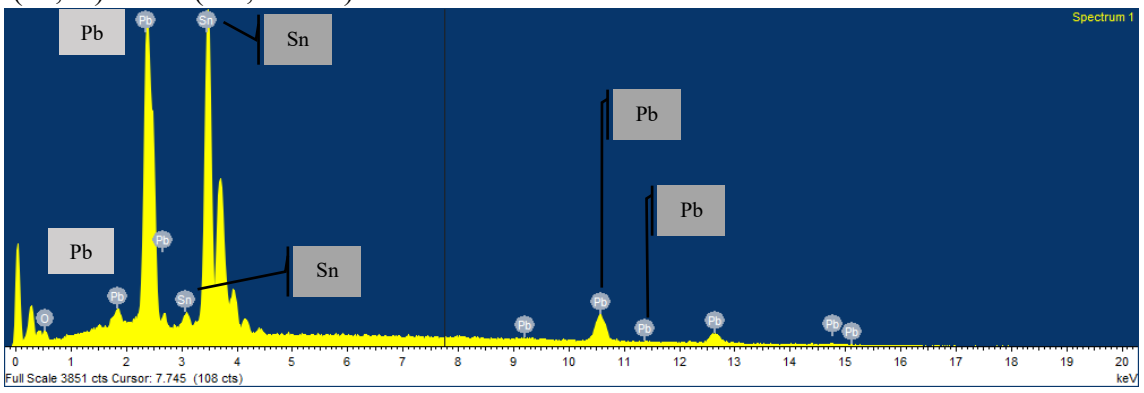


Figura 96 – Imagem de retroespelhamento da PCIb obtida por MEV com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Sn e Pb na F2 (0,25 < n < 0,5 mm)

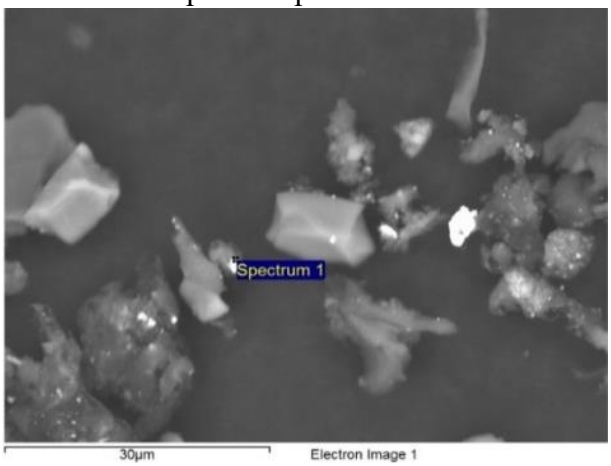


Figura 97 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Sn (46,91%), Pb (18,21) e demais elementos (C, O, Cu, Al e Si) na F2 (0,25 < n < 0,5 mm)

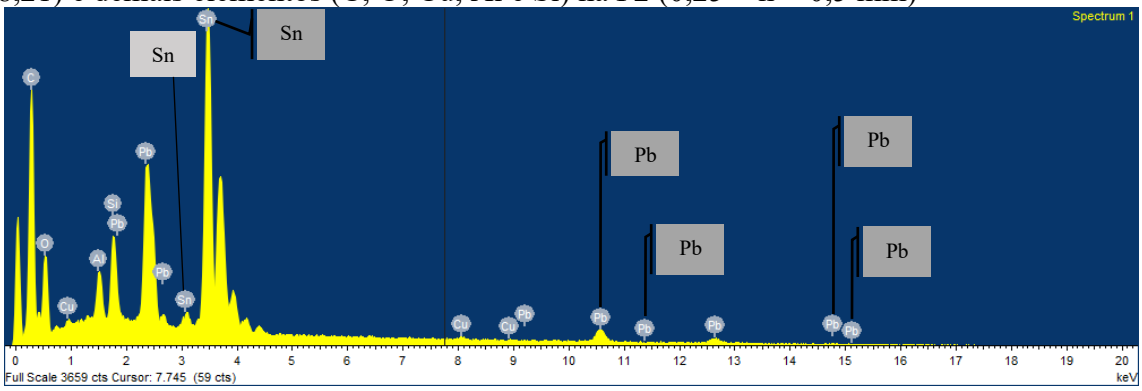


Figura 98 – Imagem de retroespelhamento da PCIb obtida por MEV com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 2*" corresponde à partícula de Sn e Pb na F2 (0,25 < n < 0,5 mm)

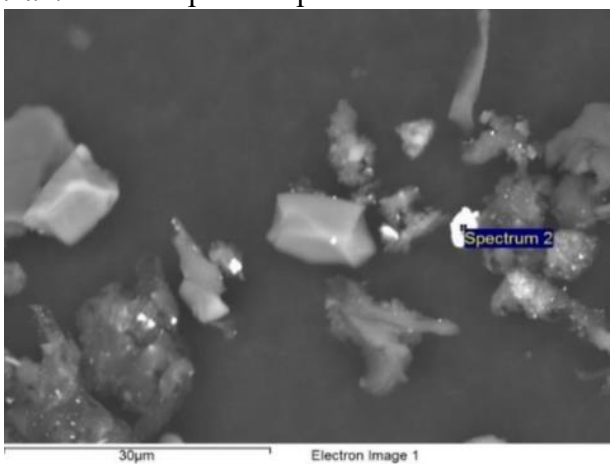


Figura 99 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Sn (21,46%), Pb (55,07%) e demais elementos (C, O, Cu, Fe, Al e Si) na F2 (0,25 < n < 0,5 mm)

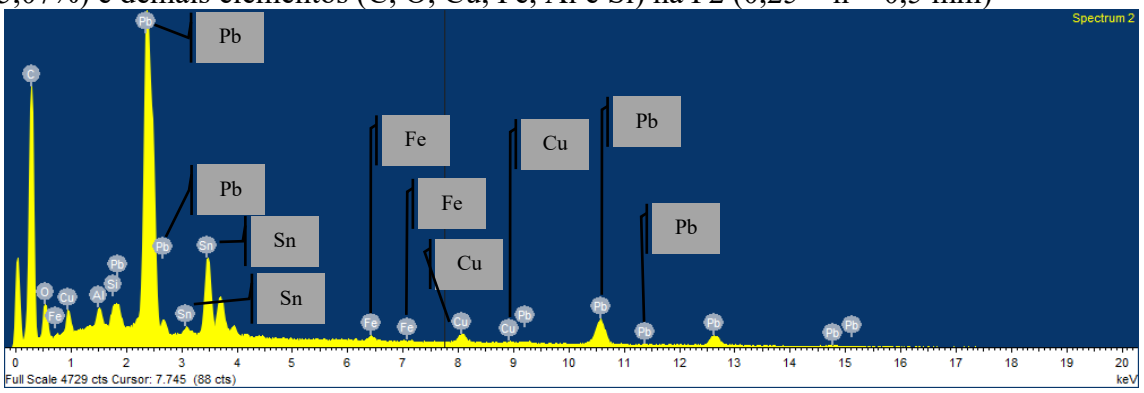


Figura 100 – Imagem de retroespelhamento da PCIc, obtida por MEV, com magnificação de 1750x. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Sn e Pb na F3 (0,5 < n < 1,00 mm)



Figura 101 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Sn (51,87%) e Pb (42,35%) na F3 (0,5 < n < 1,00 mm)

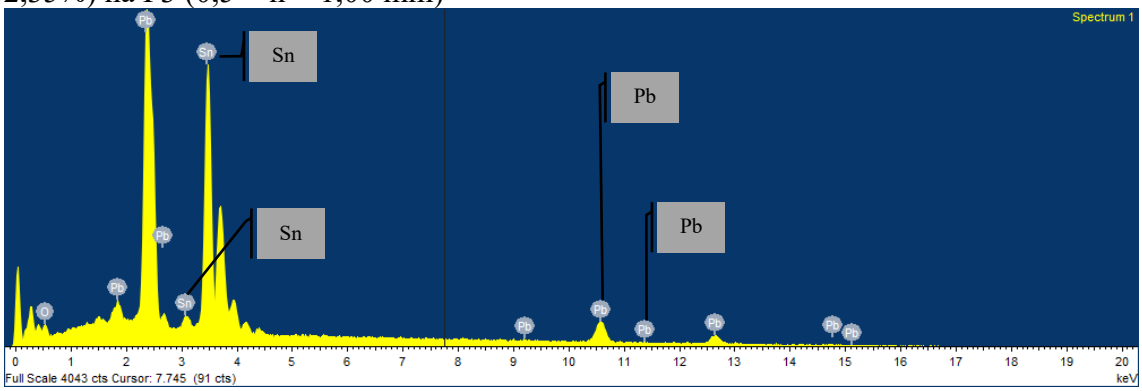


Figura 102 – Imagem de retroespelhamento da PCIc, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Sn e Pb na F3 (0,5 < n < 1,00 mm)

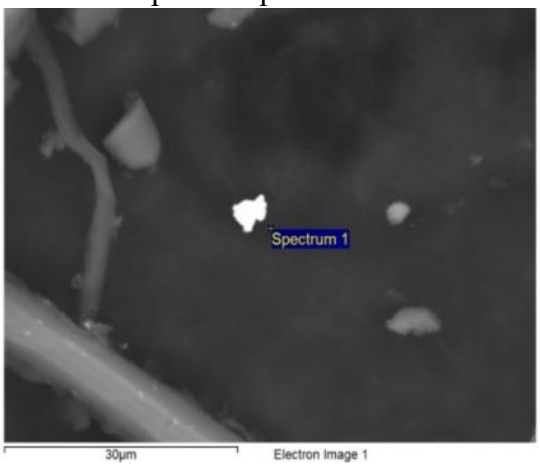


Figura 103 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Sn (59,18%) e Pb (34,84%) na F3 (0,5 < n < 1,00 mm)

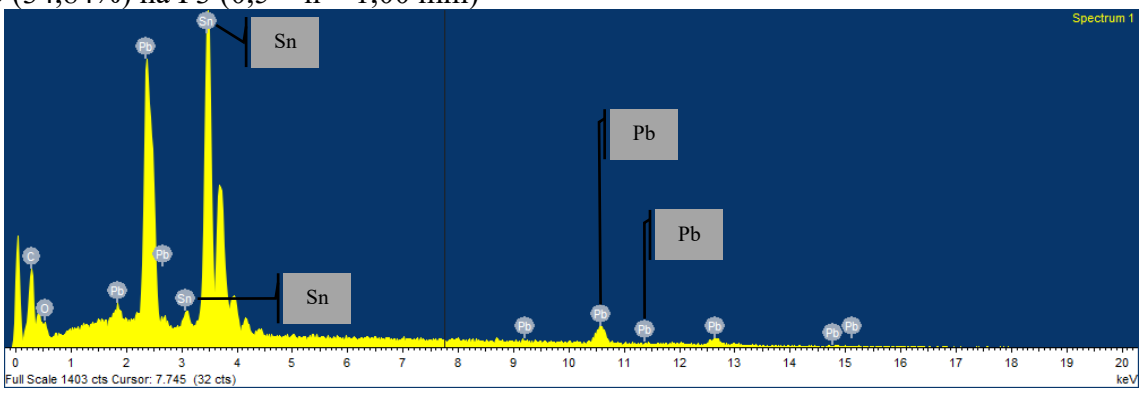


Figura 104 – Imagem de retroespelhamento da PCId, obtida por MEV, com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 3*" corresponde à partícula de Sn e Pb na F3 (0,5 < n < 1,00 mm)

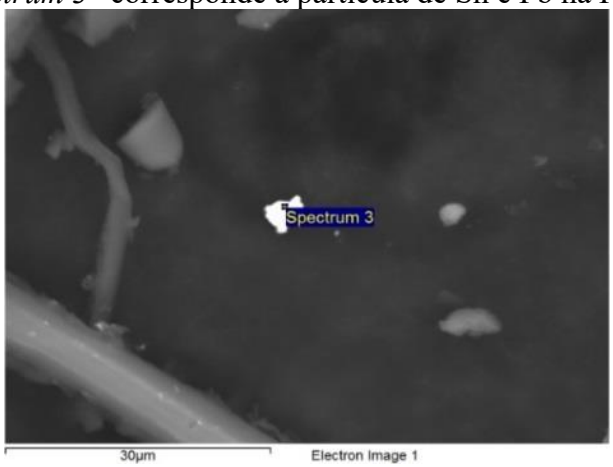


Figura 105 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Sn (69,50%), Pb (16,70%) e demais elementos (C, O, Cu, Al e Si) na F3 (0,5 < n < 1,00 mm)

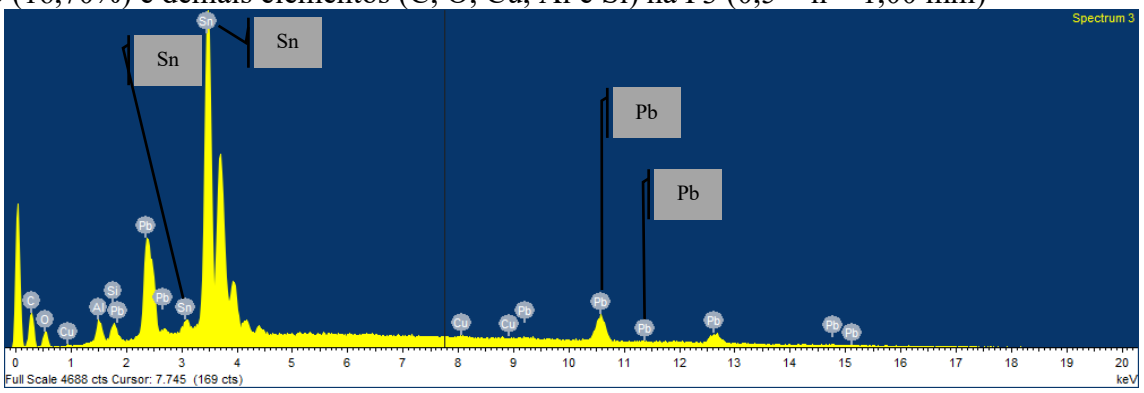


Figura 106 – Imagem de retroespelhamento da PCId obtida por MEV com magnificação de 4000x. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Sn na F4 (>1,00 mm)

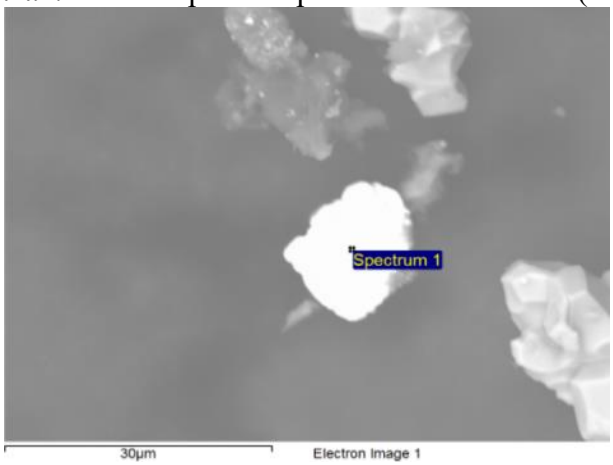
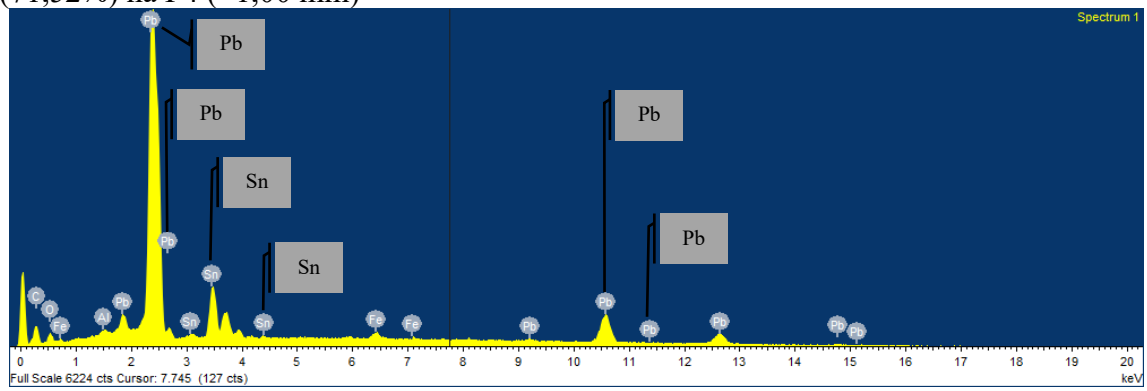


Figura 107 – Mapeamento químico obtido por EDS corresponde à partícula de Sn (19,84%) e Pb (71,52%) na F4 (>1,00 mm)



4.4 Fluorescência de Raios-X (FRX)

O uso combinado de MEV-EDS e FRX visou maximizar a confiabilidade e representatividade analítica dos resultados. Na pesquisa, o uso do MEV-EDS, em modo de retroespelhamento, possibilitou a visualização pontual das partículas de interesse. Já na técnica

de FRX, que também é um método não destrutivo, teve como objetivo principal fornecer a composição elementar média da superfície analisada nas diferentes frações das PCIs.

Desta forma, o FRX realizou uma análise global e superficial de cada amostra, não distinguindo a morfologia ou a localização pontual dos elementos na microestrutura do material, como foi no MEV-EDS.

Da Tabela 6 a Tabela 9 foram apresentadas as médias e os desvios padrão (calculados a partir das triplicatas de cada amostra) dos teores detectados, para os elementos de interesse e, no Apêndice B, pode-se observar a média e o desvio padrão de todos os elementos detectados através da técnica (Al, Ba, Sb, Sn, In, Cd, Pd, Ag, Mo, Nb, Zr, Bi, Pb, Hg, Br, Se, Au, W, Pt, Zn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, Vanádio (V) e Ti).

Com a análise qualitativa foi possível detectar a presença dos metais de Cu e de Sn, em todas as frações de todas as placas. O metal Ag, foi detectado na PCIb nas frações 1, 2 e 3, na PCIc na Fração 1 e na PCId, em todas as frações. O metal Au, foi detectado na PCIa, nas frações 1 e 2.

O termo LOD presente no Quadros de resultados indica que o instrumento não conseguiu detectar o teor de tais elementos por serem muito baixos (GOLDSTEIN, 2017). Os dados foram avaliados por fração granulométrica, evidenciando a distribuição desses elementos em função do tamanho das partículas obtidas após moagem. A abordagem adotada condiz com estudos que apontam a heterogeneidade composicional de PCIs e a necessidade de separação física prévia para melhor aproveitamento dos metais presentes (CUI; ZHANG, 2008; YAMANE *et al*., 2011b).

4.4.1 Placa de circuito impresso (PCIa)

A PCIa apresentou valores elevados de Cu com pico na F3 (60,19% ou 601.900 g/t), reforçando o papel do metal como principal elemento metálico estrutural nas trilhas condutoras das PCIs (KAHHAT *et al*., 2008; GERBASE; OLIVEIRA, 2012).

O Sn apresentou tendência decrescente com o aumento da granulometria, concentrando-se nas frações finas (até 3,22% ou 32.200 g/t), em consonância com a localização típica das ligas de solda em fragmentos menores (YAMANE *et al*., 2011b).

A presença de Au foi detectada na F1 e F2 (0,20% e 0,75%), respectivamente 2.000 g/t e 75.500 g/t), e esteve abaixo do limite de quantificação nas demais. Isso sugere que o Au pode estar presente em revestimentos metálicos seletivos, como pinos de conexão ou trilhas internas

de terminais, sendo liberado preferencialmente nas partículas finas após moagem (ZHOU *et al*., 2017). A Ag, por sua vez, não foi detectada em nenhuma das frações (Tabela 6).

Tabela 6 – Resultados provindos da técnica de Fluorescência de Raio-X para os elementos de interesse na Placa de Circuito Impresso (PCIa)

Elemento	PCIa							
	Fração granulométrica (mm)							
	F1	DP	F2	DP	F3	DP	F4	DP
	Média (%)							
Sn	3,22	0,23	2,47	0,17	2,19	0,14	1,30	0,96
Ag	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Au	0,20	0,04	0,75	0,19	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cu	19,52	1,86	35,17	1,87	60,19	11,34	49,65	8,69
SOMA	**99,96**	**-**	**100,01**	**-**	**99,61**	**-**	**99,81**	**-**

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação.

Resume-se que o Cu representou a maior fração, após o Sn, o Au foi detectado em traço e a Ag não foi detectada. Em relação à granulometria, o Cu atingiu o pico na F3 (0,50 < n < 1,00 mm), com mais de 60%, Sn diminuiu com o aumento do tamanho das partículas e o Au apareceu nas frações mais finas (Figura 108).

O Cu domina completamente as concentrações, com picos altíssimos, especialmente na fração F3, que chega a mais de 600 mil g/t. Isso indica que boa parte está concentrada em partículas de tamanho intermediário, o que costuma refletir a presença de trilhas metálicas e fios finos de cobre mais expostos após a moagem. Nas PCIs, o Cu aparece em quantidade elevada e em forma metálica contínua (folhas, trilhas) que se fragmenta em partículas relativamente grandes e médias. Isso pode ser explicado o porquê de o Cu dominar a F2 (0,25 < n < 0,5 mm) F4 (>1,00 mm), com pico em F3 (0,5 < n < 1,00 mm).

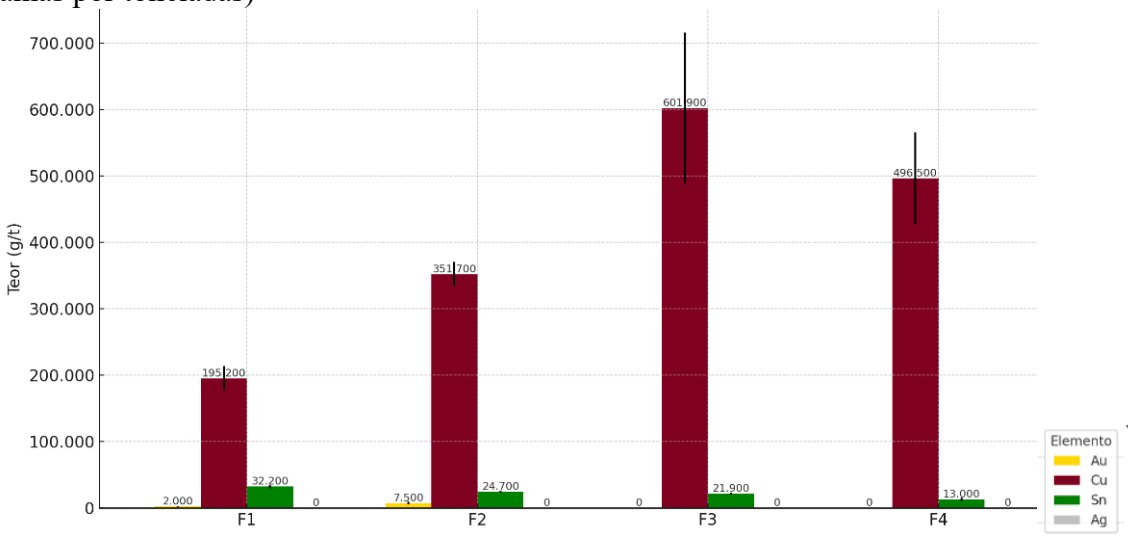
O Sn teve uma distribuição mais uniforme, variando entre 13 mil e 32 mil g/t, com ligeira redução nas frações mais grossas (F3: 0,5 < n < 1,00 mm e F4: > 1,00 mm). Isso pode estar ligado à presença do Sn principalmente em soldas e contatos, que se fragmentam de forma menos seletiva durante a cominuição, podendo gerar uma distribuição mais uniforme entre frações e teores moderados (pode estar ligado à presença do Sn principalmente em soldas e contatos, que se fragmentam de forma menos seletiva durante a cominuição, gerando distribuição mais uniforme entre frações e teores moderados (GOOSEY e KELLNER, 2002; CUI e ZHANG, 2008).

O Au foi detectado nas frações F1 e F2, em teores mais baixos (entre 2.000 e 7.500 g/t). Essa concentração indica que o Au tende a se associar a componentes específicos, geralmente

nas trilhas mais finas e nos terminais metálicos e pode ser perdido parcialmente nas etapas de moagem e separação.

Em termos de mineração secundária, o comportamento granulométrico na PCIa mostrou que a F3 foi a fração mais estratégica pra recuperação de Cu enquanto F1 e F2 pareceram mais promissoras pra metais nobres como o Au. Por ser depositado em superfícies finas, muitas vezes fica em partículas muito pequenas e por isso aparece majoritariamente nas frações mais finas (F1, F2). A detecção < LOD em certas frações indica níveis abaixo do limite da FRX.

Figura 108 – Teor médio por fração granulométrica da Placa de Circuito Impresso (PCIa) (gramas por toneladas)



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

4.4.2 Placa de circuito impresso (PCIb)

A PCIb destacou-se pelo maior teor médio de Cu entre todas as placas, com valores superiores a 60% (600.000 g/t) nas F3 (0,5 < n < 1,00 mm), evidenciando uma alta densidade de trilhas e conectores metálicos nesta placa. Estudos prévios indicaram que o Cu pode corresponder a até 30% da massa total de PCIs, sendo o principal alvo da recuperação metalúrgica (TAN e LI, 2008).

O Sn variou entre 0,48% (4.800 g/t) (F4: > 1,00 mm) e 5,37% (53.700 g/t) na F1 (> 0,25 mm), indicando a presença significativa de ligas de solda do tipo Sn-Pb ou Sn-Ag nas regiões mais fragmentadas. A Ag foi detectada nas frações mais finas (F1 e F2) sendo compatível com o uso de Ag como componente de ligas de solda de melhor desempenho térmico e elétrico (ZENG; LI e CHAN, 2019). A F2 e a F3 tiveram os desvios padrões altos,

devido a triplicata das amostras, uma ter dado menor que o limite de detecção e as outras duas amostras terem dado resultados divergentes, um de maior presença do elemento e outra em menor detecção. O Au não foi detectado, possivelmente devido à sua presença em teores residuais ou encapsulado em componentes eletrônicos intactos (Tabela 7).

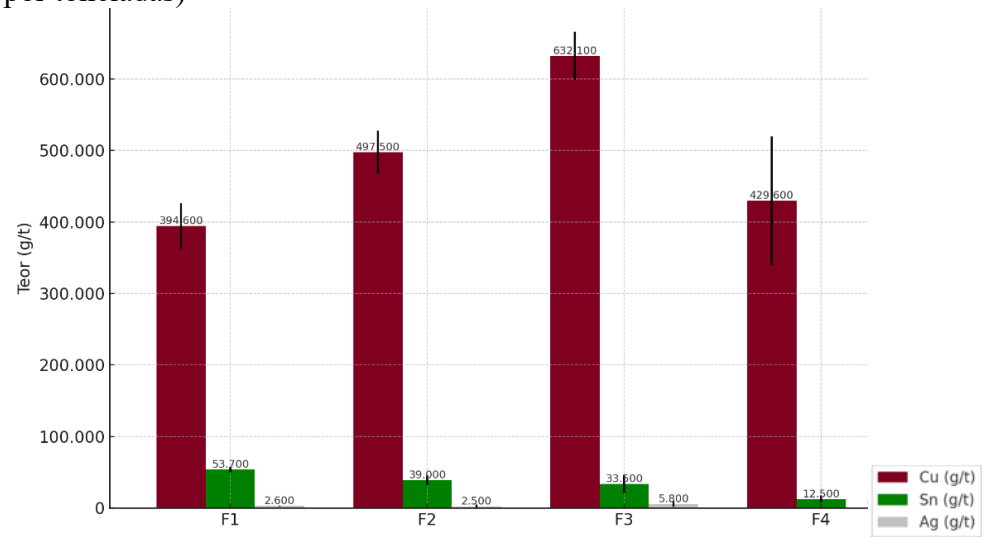
Tabela 7 – Resultados provindos da técnica de Fluorescência de Raio-X para os elementos de interesse na Placa de Circuito Impresso (PCIb)

Elemento	PCIb							
	Fração granulométrica (mm)							
	F1	DP	F2	DP	F3	DP	F4	DP
	Média (%)							
Sn	5,37	0,43	3,90	0,70	3,35	1,25	0,48	0,23
Ag	0,26	0,05	0,25	0,22	0,58	0,40	< LOD	< LOD
Au	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cu	39,46	3,22	49,75	3,02	63,21	3,38	42,96	9,03
SOMA	**100,00**		**99,99**		**99,92**		**100,46**	

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação.

Resume-se que: o Cu teve elevado teor, o Sn em menor proporção, a Ag apareceu em pequena quantidade e o Au foi ausente. Relacionado às frações granulométricas: o Cu também atinge máximo na F3 (>60%), o Sn decresceu suavemente, a Ag apareceu apenas nas frações finas (até 0,25 mm e 0,50 mm) (Figura 109).

Figura 109 – Teor médio por fração granulométrica da Placa de Circuito Impresso (PCIb) (gramas por toneladas)



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

4.4.3 Placa de circuito impresso (PCIc)

Na PCIc, o teor de Cu variou entre as frações, o que pode refletir diferenças no grau de metalização entre as camadas internas e externas da placa. O Cu atingiu 46,12% na F2. O Sn apresentou valor expressivo de 13,57% (F1) ou 135.700 g/t na fração mais fina, o que corrobora a tendência de acúmulo de soldas em partículas menores. Essa elevada concentração pode estar associada à presença de múltiplos pontos de soldagem próximos a terminais ou componentes SMD (montagem superficial) (CUI; ZHANG, 2008).

A Ag foi detectada apenas na fração 1 (0,30% ou 3.000 g/t), e o Au esteve ausente em todas as frações (> LOD). A baixa detecção de metais nobres pode refletir seu uso restrito a componentes encapsulados ou camadas internas, cuja exposição é limitada nas frações geradas por moagem (HALL e WILLIAMS, 2007) (Tabela 8**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

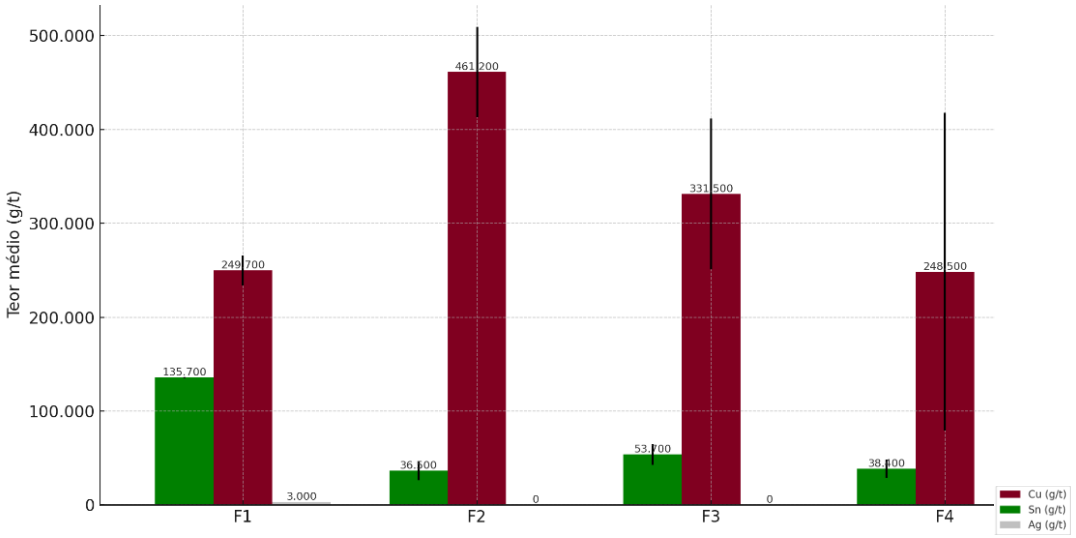
Tabela 8 – Resultados provindos da técnica de Fluorescência de Raio-X para os elementos de interesse na Placa de Circuito Impresso (PCIc)

Elemento	**PCIc**							
	Fração granulométrica (mm)							
	F1	**DP**	**F2**	**DP**	**F3**	**DP**	**F4**	**DP**
	Média (%)							
Sn	13,57	0,08	3,65	1,00	5,37	1,09	3,84	0,98
Ag	0,30	0,00	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Au	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cu	24,97	1,62	46,12	4,80	33,15	8,04	24,85	16,91
SOMA	**99,94**		**100,87**		**99,97**		**100,03**	

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação.

Resume-se que: o Cu predominou em relação aos outros metais, mas com menor proporção que nas demais placas já analisadas, o Sn esteve mais presente, enquanto Ag e Au ficaram ausentes ou muito abaixo da quantificação (Figura 110).

Figura 110 – Teor médio por fração granulométrica da Placa de Circuito Impresso (PCIc) (gramas por toneladas)



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

4.4.4 Placa de circuito impresso (PCId)

A PCId apresentou o maior teor médio de Sn entre todas as placas, com concentração de 16,73% na F1 (> 0,25 mm). Os teores de Cu oscilaram entre 17,25% (F1) e 41,41% (F3). Diferentemente das demais placas, a PCId apresentou presença consistente de Ag em todas as frações analisadas (0,11% a 0,31%), indicando uma utilização mais difundida de ligas Sn-Ag nesta PCI, como forma de substituição parcial ou total do Pb. Essa tendência foi relatada na literatura como uma estratégia para adequação a regulamentações ambientais, que restringe o uso de Pb em eletrônicos (TAN e LI, 2008; ZENG, LI e CHAN, 2019) (Tabela 9).

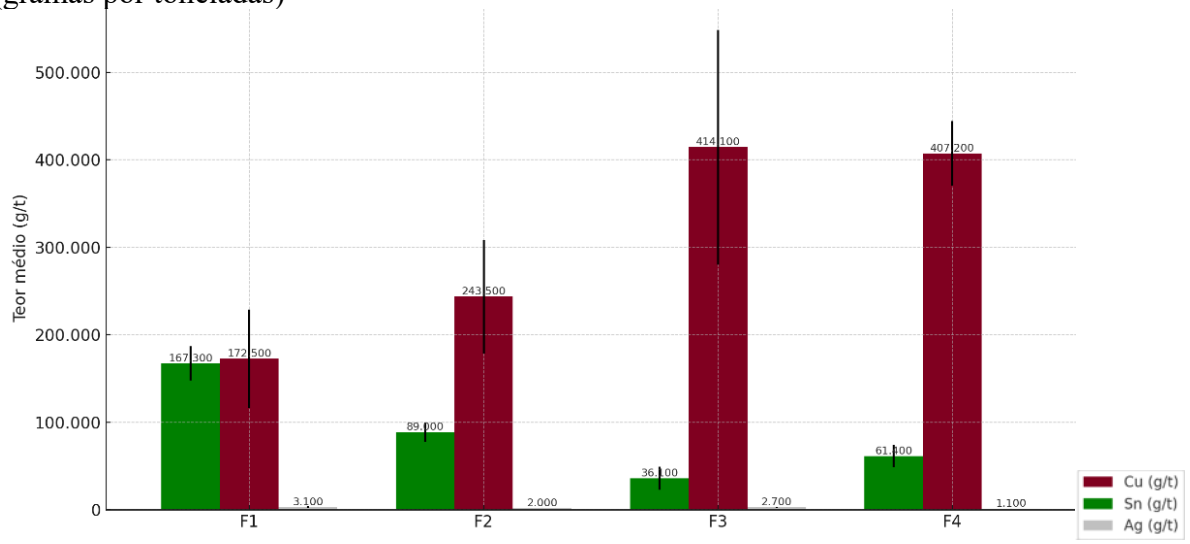
Tabela 9 – Resultados provindos da técnica de Fluorescência de Raio-X para os elementos de interesse na Placa de Circuito Impresso (PCId)

Elemento	**PCId**							
	Fração granulométrica (mm)							
	F1	**DP**	**F2**	**DP**	**F3**	**DP**	**F4**	**DP**
	Média (%)							
Sn	16,73	1,97	8,90	1,10	3,61	1,31	6,14	1,26
Ag	0,31	0,11	0,20	0,01	0,27	0,05	0,11	0,04
Au	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cu	17,25	5,61	24,35	6,48	41,41	13,39	40,72	3,67
SOMA	**98,20**		**100,23**		**100,80**		**99,93**	

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação.

Resume-se que: Cu teve a menor proporção entre as placas, alta proporção de Sn, presença estável de Ag em todas as frações e Au ausente. Quanto às frações granulométricas: menor teor de Cu entre as placas, mas maior teor de Sn em todas as frações, especialmente <0,25 mm. (Figura 111).

Figura 111 – Teor médio por fração granulométrica da Placa de Circuito Impresso (PCId) (gramas por toneladas)



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

4.5 Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente

A relação entre MEV-EDS, FRX e ICP-OES baseou-se na complementaridade analítica, uma vez que cada técnica forneceu um tipo distinto de informação sobre as PCIs. Em conjunto, permitiram uma caracterização abrangente do material, não competindo entre si, mas atuando de forma complementar: MEV-EDS e FRX foram adequados para análises rápidas, qualitativas e comparativas em amostras sólidas, enquanto o ICP-OES foi essencial para a quantificação precisa, necessária para o cálculo dos teores em massa e para a estimativa do valor econômico.

Mesmo com diferenças pontuais, ambas as técnicas (MEV/EDS e FRX) apontaram tendências coerentes: Cu concentrado em frações médias–grossas (F2–F3–F4) e Sn com maior presença em frações finas (F1). As duas técnicas se confirmam mutuamente nas tendências granulométricas (Cu e Sn).

A seguir, também foram apresentados os teores calculados em massa (g), com base nas concentrações percentuais obtidas experimentalmente por ICP-OES e nas massas de cada

fração granulométrica. A análise foi organizada por placa, visando destacar a distribuição dos metais entre as frações e avaliar o potencial de recuperação dos elementos.

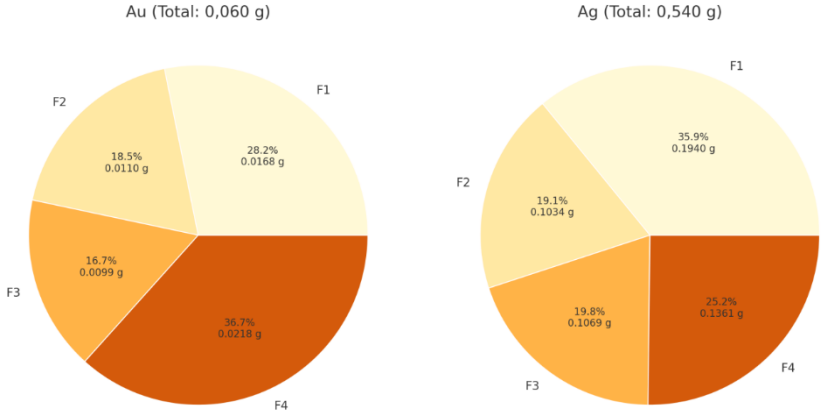
4.5.1 Placa de circuito impresso (PCIa)

A distribuição de Au e Ag entre as frações granulométricas revelou comportamentos distintos, porém coerentes com a natureza física desses metais nas PCIs. O Au apresenta maior concentração relativa na F4 (36,7%), seguida por F1 (28,2%), indicando que parte significativa do Au permanece associada a componentes ou fragmentos metálicos de maior massa e menor fragmentação, enquanto outra parcela está presente nas partículas mais finas. As frações intermediárias F2 (18,5%) e F3 (16,7%) apresentam menores contribuições, sugerindo menor presença de partículas auríferas em tamanhos médios (Figura 112).

Já a Ag mostra predominância na fração F1 (35,9%), evidenciando maior tendência à fragmentação e dispersão em partículas finas. As frações F2 (19,1%) e F3 (19,8%) apresentam valores próximos, mantendo participação moderada, enquanto F4 concentra 25,2%, indicando que parte do Ag também permanece em fragmentos maiores ou peças metálicas (Figura 112).

Em conjunto, esses resultados sugerem que Au preserva maior integridade estrutural durante o processo de cominuição, acumulando-se preferencialmente em frações mais grosseiras, enquanto Ag tende a se distribuir de forma mais uniforme, com leve predominância nas frações finas. A distribuição percentual dos metais: Au e Ag entre as frações granulométricas (F1-F4) da PCIa, pode ser observada na Figura 112.

Figura 112 – Distribuição percentual dos metais: ouro (Au) e prata (Ag) entre as frações granulométricas da Placa de Circuito Impresso (PCIa)



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm e F4: > 1,00 mm.

A análise por ICP-OES evidenciou que o Au esteve presente em todas as frações granulométricas da PCIa, apresentando teores relativamente constantes entre as frações classificadas (F1–F4), variando de 0,0105% a 0,0188%. A maior concentração foi observada em F4 (>1,00 mm), enquanto a menor ocorreu em F3 (0,50 < n < 1,00 mm). Os teores percentuais obtidos são baixos, mas não desprezíveis do ponto de vista econômico, considerando o elevado valor do metal e o potencial de recuperação em escala industrial (Tabela 10 e Figura 112).

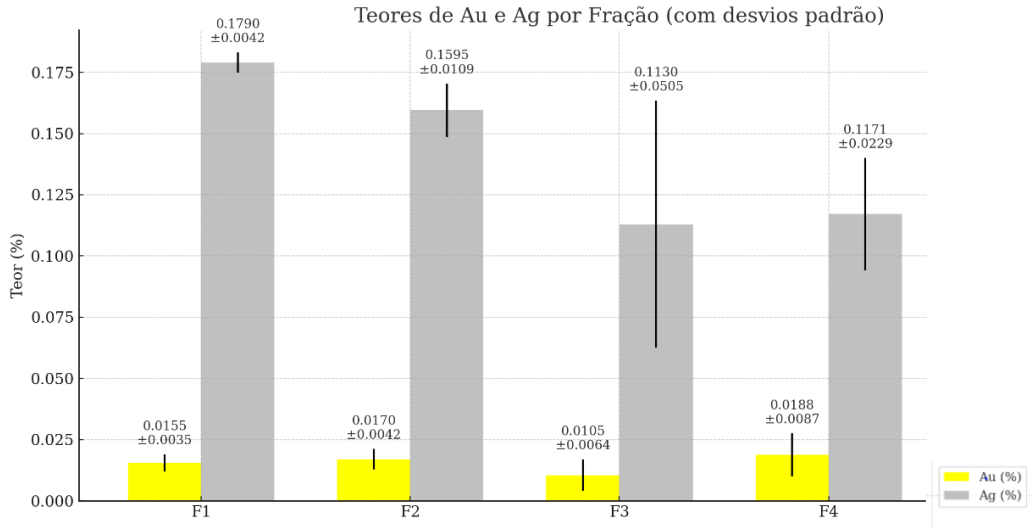
Tabela 10 – Teores de ouro (Au) e prata (Ag) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIa)

Fração	Massa (g)	Au (%)	DP (%)	Au (g)	Ag (%)	DP (%)	Ag (g)
F1	108,40	0,0155	0,0035	0,016802	0,1790	0,0042	0,194036
F2	64,80	0,0170	0,0042	0,011016	0,1595	0,0109	0,103356
F3	94,60	0,0105	0,0064	0,009933	0,1130	0,0505	0,106898
F4	116,20	0,0188	0,0087	0,021846	0,1171	0,0229	0,136070
Total (F1–F4)	**384,00**	—	—	**0,059597**	—	—	**0,540360**

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação.

A Ag, por sua vez, apresentou distribuição mais concentrada nas frações finas da PCIa. As frações F1 (<0,25 mm) e F2 (0,25 < n < 0,50 mm) registraram os maiores teores, 0,1790% e 0,1595%, respectivamente, comportamento compatível com a associação da Ag a partículas menores, possivelmente relacionadas a soldas finas, contatos superficiais ou revestimentos metálicos de baixa espessura, conforme reportado por Ilyas *et al*., (2021) (Figura 113).

Figura 113 – Teores médios de ouro (Au) e prata (Ag) em (%) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIa)

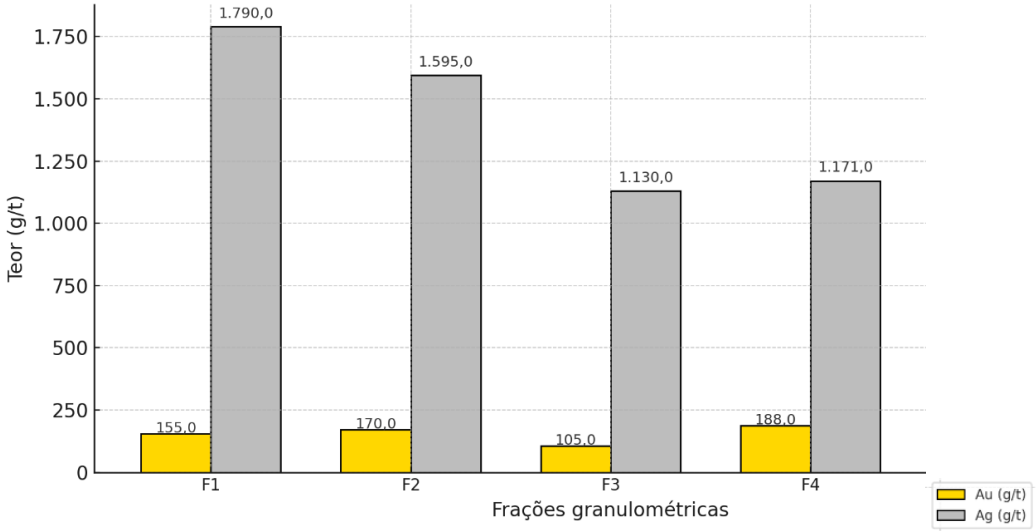


Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

Os teores em g/t foram calculados a partir das massas absolutas de Au e Ag em cada fração (colunas “Au (g)” e “Ag (g)”) divididas pela massa da própria fração, conforme o Quadro 21, multiplicando-se o resultado por 10^6. Assim, por exemplo, na F1, 0,016802 g de Au em 108,40 g de material resultam em 155,0 g/t. Esses valores representam concentrações específicas por fração, expressas em gramas de metal por tonelada daquela fração, e não teores projetados para a placa inteira. Esse procedimento permite identificar quais granulometrias apresentam maior enriquecimento metálico e quais frações seriam mais favoráveis a etapas de beneficiamento.

Os valores obtidos em g/t coincidem proporcionalmente com os teores em porcentagem do Quadro 21 porque ambos derivam da mesma razão entre massa de metal e massa da fração. A diferença está apenas na unidade: % corresponde a uma base de 100 g, enquanto g/t utiliza 1.000.000 g. Assim, g/t é numericamente equivalente ao teor em % multiplicado por 10.000, representando exatamente a mesma concentração expressa em outra escala (Figura 114).

Figura 114 – Teores de ouro (Au) e prata (Ag) em g/t por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIa)

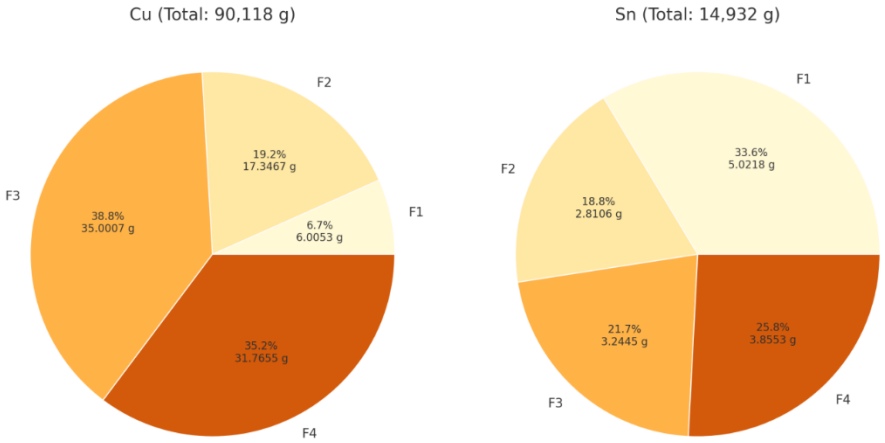


Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

Em relação ao Cu, as frações F3 e F4, apresentaram teores igualmente elevados na distribuição granulométrica (38,8% e 35,2%, respectivamente), refletindo a fragmentação seletiva desses elementos estruturais da PCI. Em contrapartida, a F1, composta por partículas finas, apresentou menor massa (6,7%), o que é coerente com o fato de que o Cu, por não apresentar fragilidade, não se desprende como pó durante a cominuição.

O comportamento da fração granulométrica em relação ao Sn, foi de maior massa na F1 (33,6%), seguido pela F4 (25,8%). A distribuição percentual de Cu e Sn pode ser observada na Figura 115.

Figura 115 – Distribuição percentual dos metais: cobre (Cu) e estanho (Sn) entre as frações granulométricas da Placa de Circuito Impresso (PCIa)



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

O Cu apresentou variações significativas entre as faixas granulométricas, com enriquecimento evidente nas frações intermediárias, o Sn mostrou distribuição mais homogênea, com leve tendência ao enriquecimento em frações finas (Tabela 11).

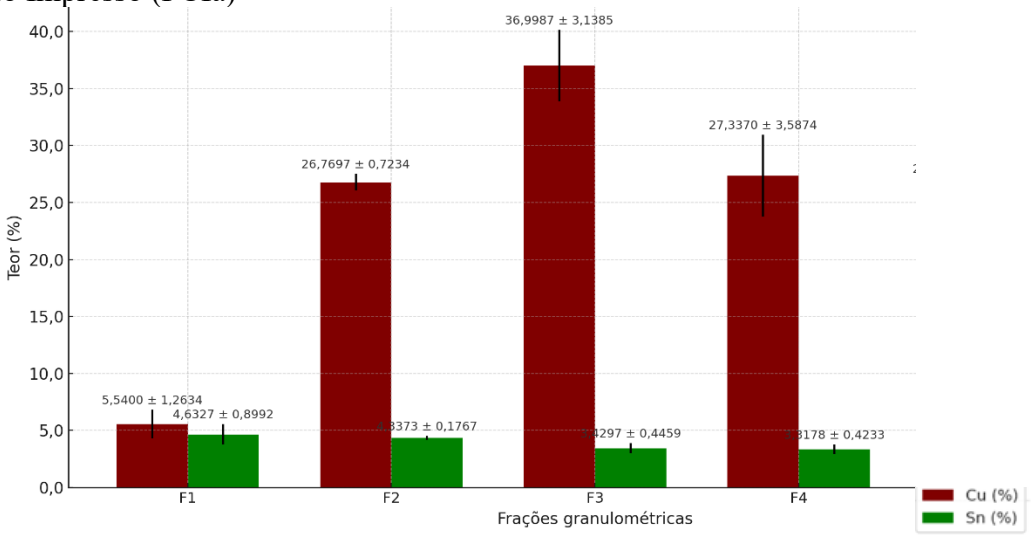
Tabela 11 – Teores de cobre (Cu) e estanho (Sn) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIa)

Fração	Massa (g)	Cu (%)	DP (%)	Cu (g)	Cu (kg/t)	DP (kg/t)	Sn (%)	DP (%)	Sn (g)	Sn (kg/t)	DP (kg/t)
F1	108,40	5,5400	1,2634	6,0053	55,400	0,6999	4,6327	0,8992	5,021847	46,31	0,416
F2	64,80	26,7697	0,7234	17,3467	267,697	1,936	4,3373	0,1767	2,810570	43,39	1,936
F3	94,60	36,9987	3,1385	35,0007	369,987	11,612	3,4297	0,4459	3,244496	34,32	11,612
F4	116,20	27,3370	3,5874	31,7655	273,370	9,806	3,3178	0,4233	3,855284	60,86	9,806
Total (F1–F4)	**384,00**			**90,1184**					**14,932197**		

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm. DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação.

Nas frações classificadas, o Cu apresentou teores entre 5,5400% (F1) e 36,9987% (F3), atingindo seu pico na Fração 3 (Quadro 23 e Figura 116). Essa distribuição está associada à resistência mecânica das trilhas de cobre e de condutores integrados à placa, que, por sua morfologia alongada e maleável, tendem a se fragmentar em partículas de tamanho intermediário em vez de se pulverizarem (VECCHINI *et al*., 2019). O Sn apresentou os teores de forma mais homogênea, dada ênfase a F1 (4,6327%).

Figura 116 – Teores médios de cobre (Cu) e estanho (Sn) em (%) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIa)

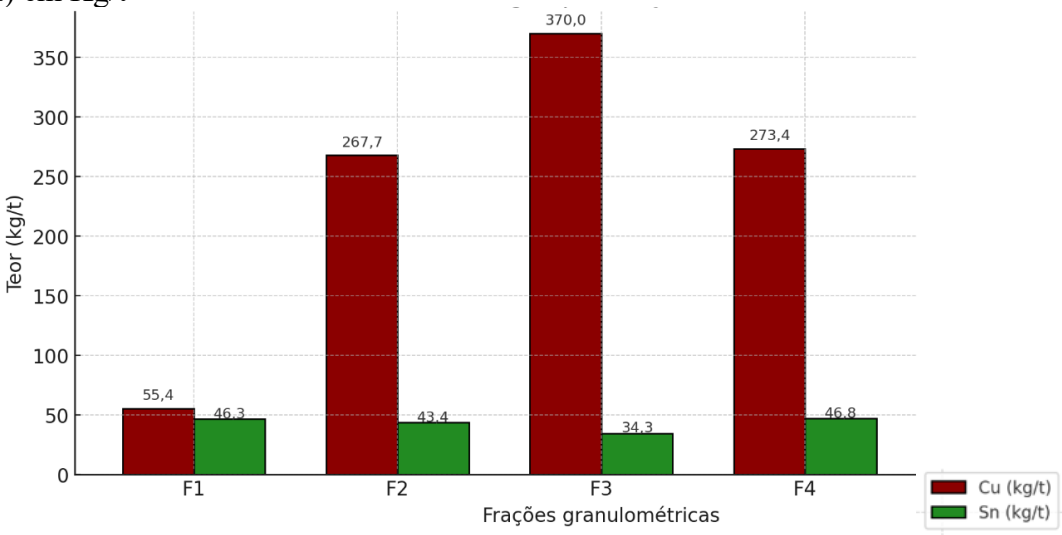


Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

Os teores de Cu e Sn em kg/t para cada fração granulométrica foram obtidos diretamente a partir dos dados absolutos de massa de metal presentes no Quadro 22, conforme o conceito de teor por tonelada. Esses valores expressam a concentração real de metais por tonelada de cada fração, permitindo avaliar o comportamento granulométrico dos elementos na PCIa.

Os resultados mostram que o Cu apresenta claro enriquecimento nas frações intermediárias a grosseiras (F2–F4), com pico na F3 (≈370 kg/t). O Sn, por outro lado, distribui-se de forma mais homogênea entre as frações, com leve aumento na F1, refletindo sua origem em soldas, que geram tanto partículas finas quanto fragmentos mais densos após a cominuição (Figura 117).

Figura 117 – Teores de cobre (Cu) e estanho (Sn) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIa) em Kg/t



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

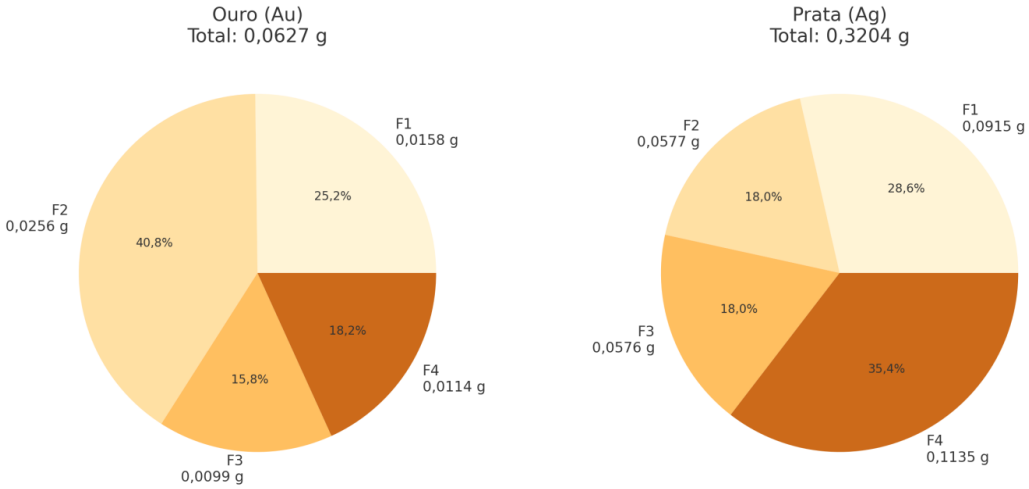
4.5.2 Placa de circuito impresso (PCIb)

A maior concentração de Au observada nas frações F1 e F2 está de acordo com estudos que demonstram que o Au se encontra predominantemente associado a terminações, contatos e pontos de solda de pequeno porte, que se fragmentam mais facilmente durante a cominuição.

Segundo Veit (2005), o Au tende a se concentrar nas partículas finas após moagem devido à sua forte associação com componentes de elevado contraste densitário e elevada fragilidade mecânica, como microconectores, trilhas e pads metálicos. De maneira semelhante, Kasper *et al.,* (2011) e Silvas *et al.,* (2015), demonstram que as frações finas de PCIs (<0,5 mm) exibem maior teor de metais nobres porque a cominuição rompe com mais eficiência elementos delicados e interfaces metal-polímero.

A distribuição geral da Ag mostra que o metal não se concentra exclusivamente em partículas finas ou grossas, mas apresenta um perfil bimodal, com maior presença nas frações F1 e F4. Essa característica sugere heterogeneidade na forma de incorporação da Ag nas PCIs, refletindo seu uso tanto em elementos superficiais finos quanto em componentes metálicos estruturais maiores. As frações intermediárias contribuem de forma uniforme, reforçando que a prata está amplamente distribuída na matriz das placas, o que pode favorecer processos de recuperação econômica após a classificação granulométrica (MORF *et al.,* 2007; WIENOLD *et al.,* (2011). A Figura 118 apresenta a distribuição % desses metais.

Figura 118 – Distribuição percentual dos metais: ouro (Au), prata (Ag) entre as frações granulométricas da Placa de Circuito Impresso (PCIb)



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

A Tabela 12 apresenta a distribuição granulométrica dos metais (Au, Ag, Cu e Sn) nas frações F1 (<0,25 mm), F2 (0,25–0,5 mm), F3 (0,5–1 mm) e F4 (>1 mm) e permite compreender de que modo a cominuição promoveu a liberação dos constituintes metálicos.

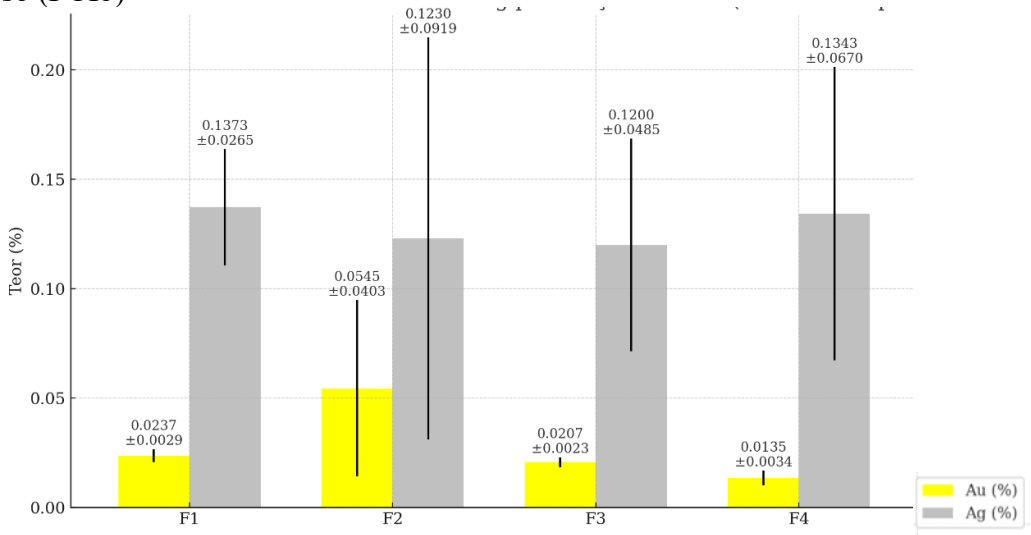
Tabela 12 – Teores de ouro (Au) e prata (Ag) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIb)

Fração	Massa da fração (g)	Au (%)	DP (%)	Au (g)	Ag (%)	DP (%)	Ag (g)
F1	66,70	0,0237	0,0029	0,01581	0,1373	0,0265	0,09152
F2	46,90	0,0545	0,0403	0,02557	0,1230	0,0919	0,05769
F3	48,00	0,0207	0,0023	0,00994	0,1200	0,0485	0,05760
F4	84,60	0,0135	0,0034	0,01142	0,1343	0,0670	0,11354
Total (F1–F4)	**246,20**	-	-	0,06274	-	-	0,32035

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

Os resultados obtidos evidenciaram padrões consistentes com a literatura, especialmente no que se refere à concentração de metais preciosos nas frações mais finas e à retenção de metais estruturais nas frações mais grosseiras. A Figura 119 apresenta os teores de Au e Ag e seus desvios em %.

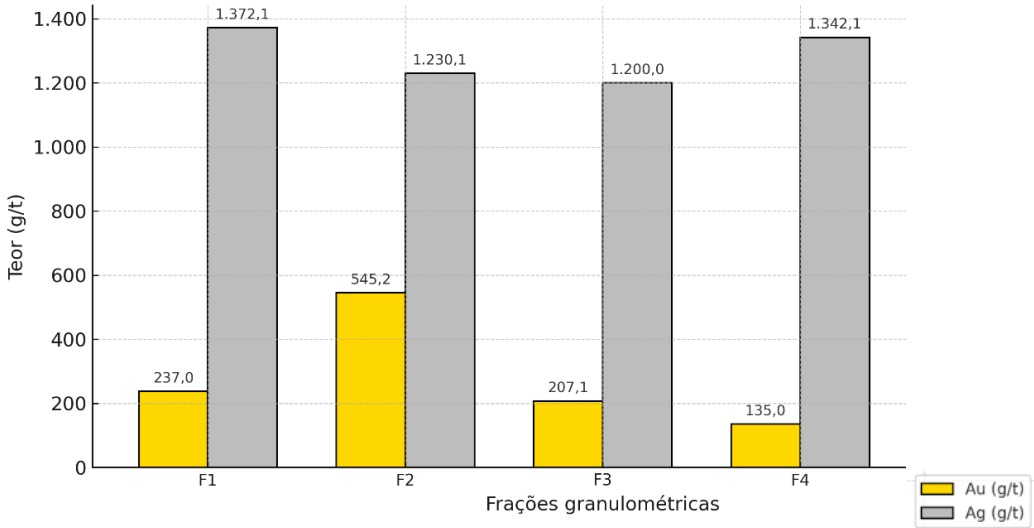
Figura 119 – Teores médios de ouro (Au) e prata (Ag) em (%) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIb)



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação.

A Figura 120 fornece a concentração de metal por tonelada da própria fração, o que permite identificar qual granulometria está mais enriquecida. No caso da PCIb, observa-se que o Au apresenta pico na F2 (≈545 g/t), indicando presença de partículas auríferas tanto em fragmentos grosseiras quanto em material fino. Já a Ag apresenta teores elevados em todas as frações (≈1.200–1.373 g/t), com leve predomínio em F1 e F4, sugerindo ampla dispersão da Ag entre poeiras e fragmentos. Esses resultados orientam decisões de beneficiamento seletivo — por exemplo, focalizar F2 para recuperação de Au e considerar métodos que capturem partículas finas para otimizar a recuperação de Ag.

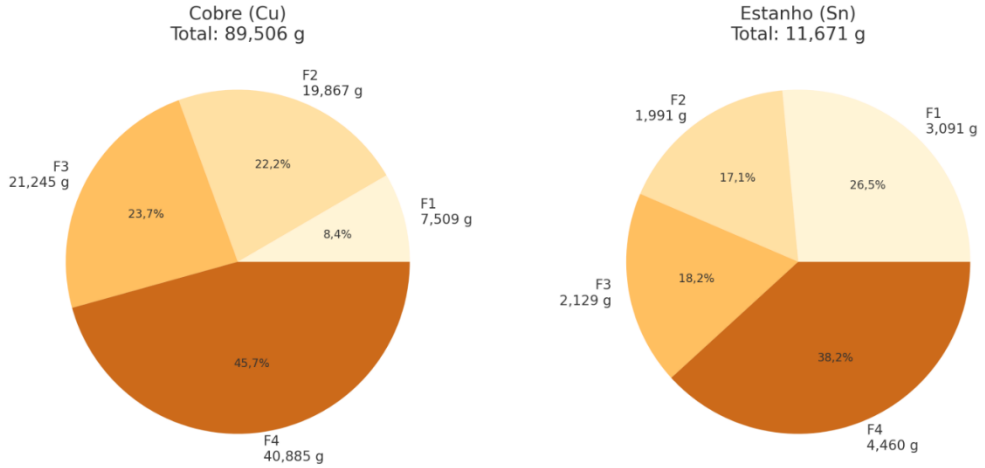
Figura 120 – Teores de ouro (Au) e prata (Ag) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIb) em g/t



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

Em relação aos teores médios de Cu e Sn, a Figura 121 apresenta a distribuição percentual das massas absolutas de Cu e Sn entre as frações granulométricas da PCIb, evidenciando quais frações concentram maior quantidade real de cada metal. Observa-se que o Cu se encontra majoritariamente na F4, enquanto o Sn apresenta maior concentração relativa nas frações F1 e F4.

Figura 121 – Distribuição percentual dos metais: ouro (Au), prata (Ag), cobre (Cu) e estanho (Sn) entre as frações granulométricas da Placa de Circuito Impresso (PCIb)



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação.

Na Tabela 13, observa-se que o Cu foi o metal predominante em todas as frações da PCIb, com maiores concentrações na F3 (44,2597%) e F4 (48,3275%), onde ocorre maior liberação de partículas metálicas das trilhas condutoras.

O Sn apresentou teores menores e distribuição mais homogênea, variando de 5,2721% (F4) a 4,2443% (F2), o que indica associação às ligas de solda presentes de forma mais uniforme nas diferentes faixas granulométricas (Tabela 13). Esse comportamento conjunto reflete a composição típica de placas eletrônicas, nas quais o Cu domina as trilhas condutoras e o Sn compõe as ligas de solda (CUI e ZHANG, 2008; OGUNNIYI; VERMA; STEYN, 2009).

Tabela 13 – Teores de cobre (Cu) e estanho (Sn) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIb)

Fração	Massa da fração (g)	Cu (%)	DP (%)	Cu (g)	Cu (kg/t)	DP (kg/t)	Sn (%)	DP (%)	Sn (g)	Sn (kg/t)	DP (kg/t)
F1	66,70	11,2585	0,0148	7,509	112,585	0,148	4,6340	0,1372	3,091	46,340	1,372
F2	46,90	42,3613	2,0130	19,867	423,613	20,130	4,2443	0,6393	1,991	42,443	6,393
F3	48,00	44,2597	6,1207	21,245	442,597	61,207	4,4350	0,2829	2,129	44,350	2,829

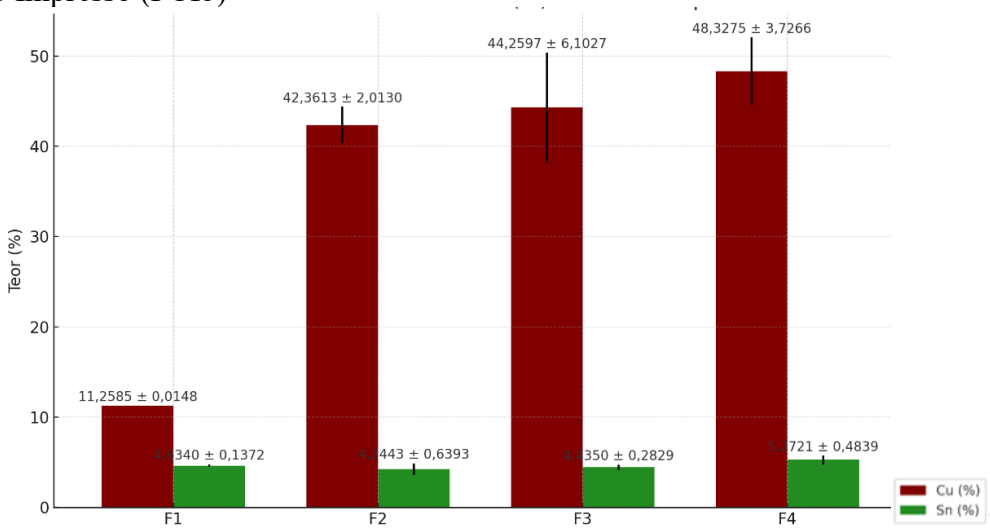
Tabela 13 – Teores de cobre (Cu) e estanho (Sn) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIb)

F4	84,60	48,3275	3,7266	40,885	483,275	37,266	5,2721	0,4839	4,460	52,721	4,839
Total (F1–F4)	**246,20**	-	-	**89,506**	-	-	-	-	**11,671**	-	-

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação.

A Figura 122 mostra que o Cu apresenta forte enriquecimento nas frações mais grossas, atingindo seu maior teor em F4 (48,33%), o que reflete a baixa fragmentabilidade das trilhas de Cu e sua tendência a permanecer agregadas a fragmentos maiores após a moagem. Já o Sn apresenta distribuição mais homogênea entre as frações (4,2%–5,3%), com leve concentração em F4, indicando a presença simultânea de soldas pulverizadas (frações finas) e pontos de solda preservados (frações grossas). Os desvios-padrão reforçam a heterogeneidade típica de PCIs, mas não alteram a tendência geral: frações F3 e F4 concentram a maior parte do Cu, enquanto o Sn mantém comportamento mais uniforme entre as granulometrias. A apresenta os teores médios desses metais.

Figura 122 – Teores médios de cobre (Cu) e estanho (Sn) em (%) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIb)



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

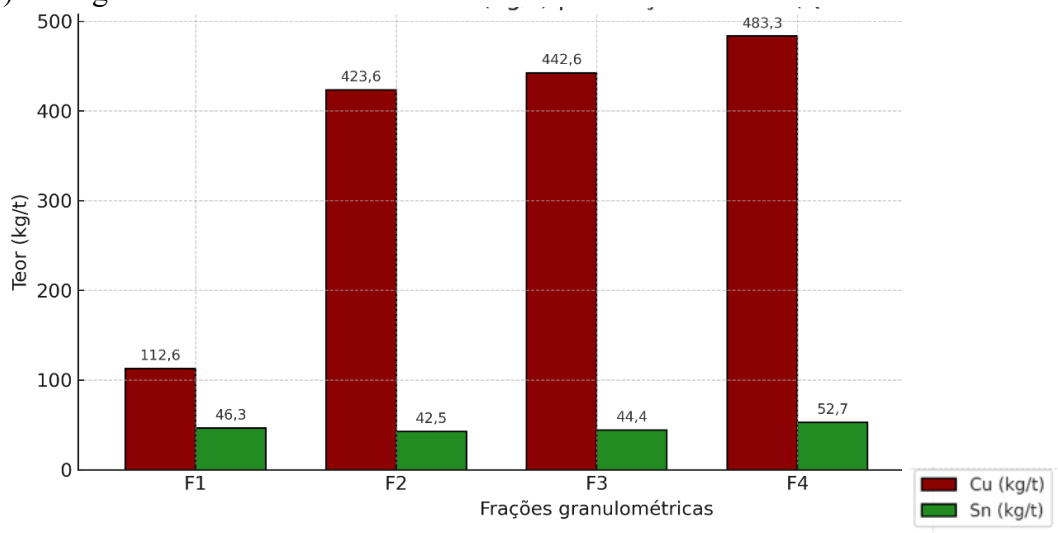
Por outro lado, o comportamento de Cu e Sn difere substancialmente dos metais preciosos. O Cu apresentou maiores teores absolutos nas frações intermediárias e grossas (F3–F4), fenômeno compatível com a natureza estrutural desse metal nas PCIs. Veit (2005) e Silvas *et al.,* (2015) descrevem que o Cu é majoritariamente encontrado em trilhas, planos de circuito e camadas internas do laminado, elementos que formam o esqueleto condutor da placa e que não se pulverizam com facilidade durante a moagem, produzindo partículas maiores e mais

resistentes. Raele, De Pretto e Zezell (2017) reforçam que a presença da máscara de solda e da resina epóxi dificulta a liberação de trilhas de Cu, justificando a permanência desse metal em frações de maior granulometria (Figura 123).

O Sn, frequentemente associado ao Cu nas soldas, exibiu comportamento semelhante ao Cu, com concentração mais elevada na fração mais grosseira (coerente com vários estudos que mostram que o Sn, fortemente associado às ligas de solda (Sn-Pb, Sn-Cu, Sn-Ag), tende a permanecer aglomerado em partículas mais robustas durante a cominuição (Tang *et al.,* 2021). Além disso, sua liberação depende não apenas do processo mecânico, mas também de características físico-químicas como dureza relativa da liga e adesão ao substrato, conforme descrito por Huang *et al*., (2009) e verificado experimentalmente por Silvas *et al*., (2015) (Figura 123).

Os resultados obtidos também se alinham com a análise físico-química apresentada por Santana *et al*., (2013), que observou aumento significativo de Cu e Sn em frações superiores a 1 mm em PCIs de celulares, enquanto metais preciosos se concentraram nas frações inferiores a 0,5 mm. Essa mesma tendência é reforçada por estudos de moagem e classificação como os de Zhou *et al.,* (2010), Wan *et al*., (2021) e Ogunniyi *et al*., (2009), incluídos no conjunto de documentos analisados. Esses resultados orientam estratégias de beneficiamento seletivo: priorizar frações onde o Cu está mais concentrado e empregar técnicas que capturem partículas de estanho dispersas.

Figura 123 – Teores de cobre (Cu) e estanho (Sn) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIb) em Kg/t

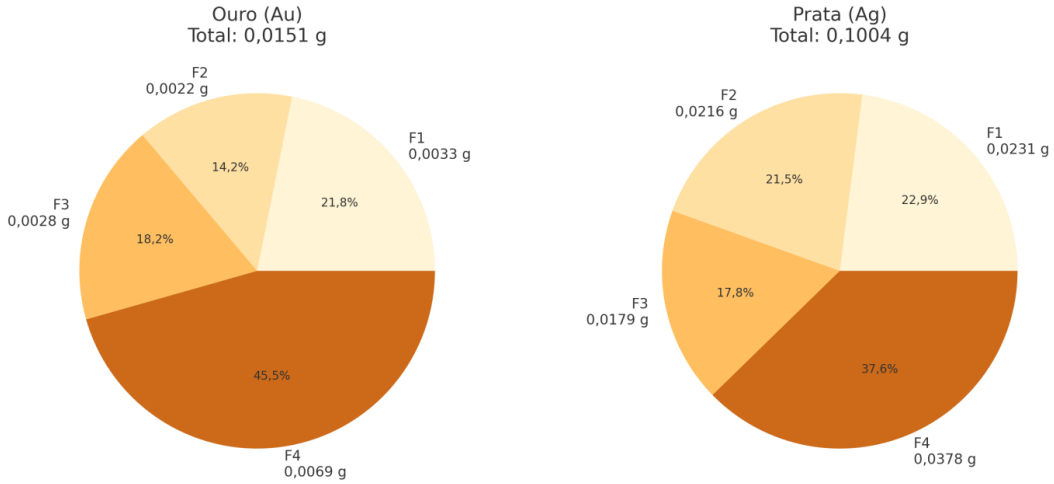


Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

4.5.3 Placa de circuito impresso (PCIc)

A Figura 124 mostra que, na PCIc, tanto o Au quanto a Ag concentra-se principalmente na fração mais grosseira (F4), indicando que os poucos componentes metálicos presentes nessa placa permaneceram em fragmentos maiores após a cominuição. As frações finas (F1–F3) apresentam menores participações, porém distribuídas de forma mais uniforme, especialmente para a Ag, que tende a se dispersar mais devido à sua presença em soldas e revestimentos.

Figura 124 – Distribuição percentual dos metais: ouro (Au), prata (Ag) entre as frações granulométricas da Placa de Circuito Impresso (PCIc)



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

A distribuição dos teores de Au e Ag na PCIc evidencia um comportamento característico de PCIs com baixa presença de componentes nobres de grande porte. Os teores de Au mantiveram-se baixos em todas as frações (0,0135–0,0250%), com leve concentração nas partículas mais finas (F1 e F2).

A PCIc é uma placa estruturalmente mais simples e com menor densidade de componentes metálicos quando comparada a PCIa e PCIb. Diferente destas ela possui poucos conectores, trilhas espessas e pontos de solda, elementos onde Au e Ag normalmente se concentram. Assim, sua composição menos complexa resulta naturalmente em menores teores de metais nobres, em concordância com o que é descrito na literatura para placas periféricas de menor funcionalidade (Tabela 14).

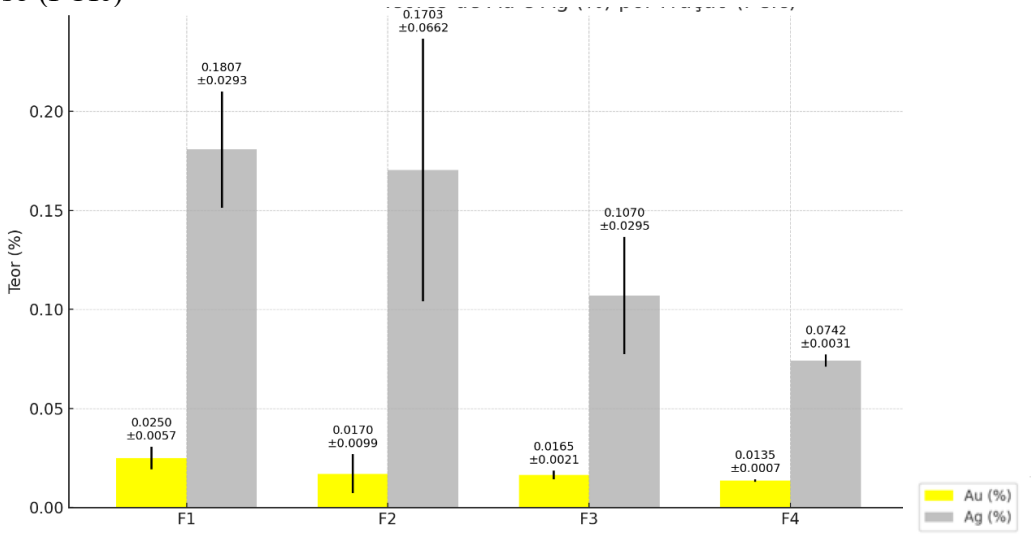
Tabela 14 – Teores em massa de ouro (Au), prata (Ag) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIc)

Fração	Massa da fração (g)	Au (%)	DP (%)	Au (g)	Ag (%)	DP (%)	Ag (g)
F1	13,20	0,0250	0,0057	0,00330	0,1807	0,0293	0,02306
F2	12,70	0,0170	0,0099	0,002159	0,1703	0,0662	0,02162
F3	16,70	0,0165	0,0021	0,002756	0,1070	0,0295	0,01787
F4	51,00	0,0135	0,0007	0,006885	0,0742	0,0031	0,03784
Total (F1–F4)	93,60	—		0,01510	—		0,10039

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação.

Para a Ag, observou-se um padrão ainda mais marcado, com redução gradual dos teores das frações finas para as grossas (0,1807% em F1 para 0,0742% em F4), compatível com a fragmentação de soldas e revestimentos superficiais, conforme descrito por Ilyas *et al.,* (2021). Em conjunto, esses resultados demonstram que a PCIc concentra Au e Ag predominantemente nas frações finas, reforçando a importância de estratégias de recuperação direcionadas a essas granulometrias, onde se encontra a maior parcela dos metais nobres em termos de acessibilidade e eficiência metalúrgica (Figura 125).

Figura 125 – Teores médios de ouro (Au) e prata (Ag) em (%) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIc)

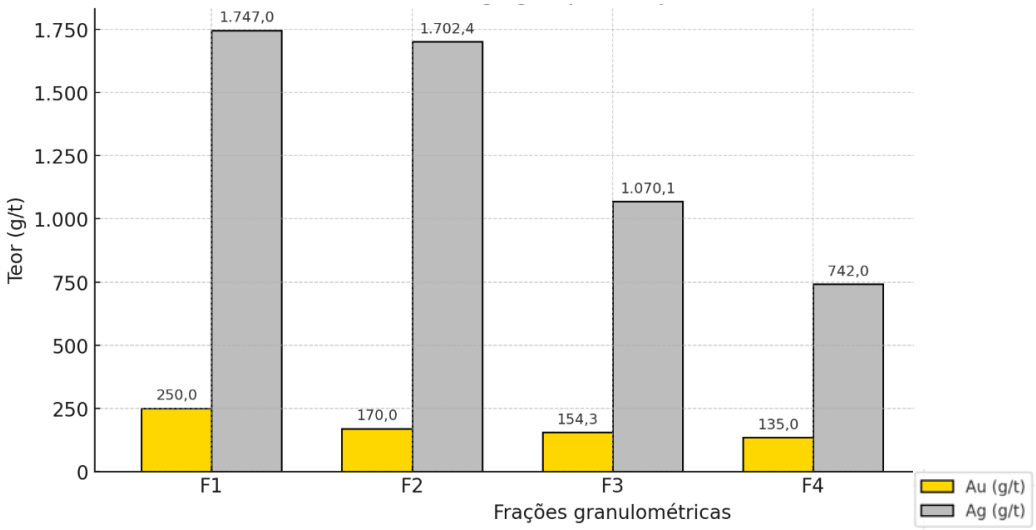


Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação.

Na PCIc, o Au apresenta teores moderados (≈135–250 g/t), concentrando-se principalmente nas frações finas (F1), indicando presença de partículas muito pequenas ou fragmentos metálicos liberados na cominuição. A Ag, por sua vez, mostra teores muito mais elevados (≈742–1.807 g/t), especialmente em F1 e F2, o que sugere forte associação com

componentes que se fragmentam em tamanhos reduzidos, como contatos e revestimentos metálicos (Figura 126).

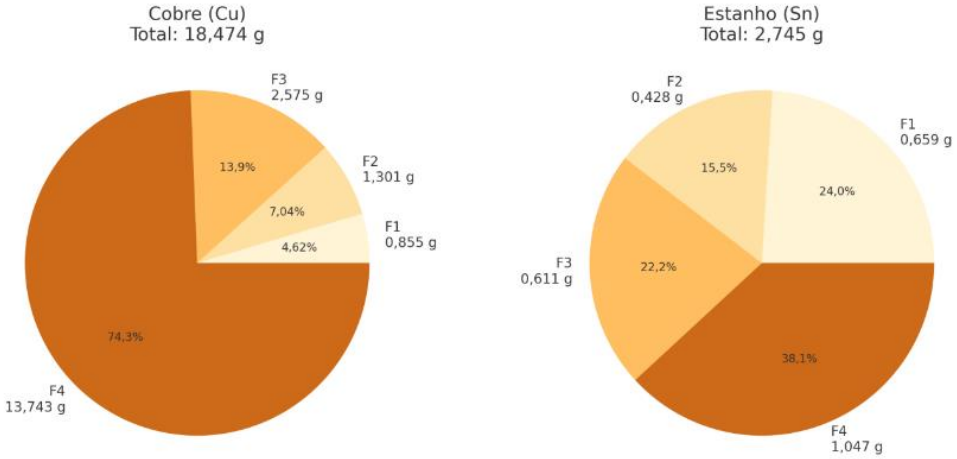
Figura 126 – Teores de ouro (Au) e prata (Ag) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIc) em g/t



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

A distribuição de Cu e Sn na PCIc mostra clara concentração dos dois metais na fração grossa F4, que retém 74,3% do Cu e 38,1% do Sn, indicando forte associação a componentes metálicos maiores e pouco fragmentáveis, como conectores, trilhas espessas e regiões com solda aderida. As frações finas a intermediárias (F1–F3) contribuem com parcelas menores e mais distribuídas, sobretudo no caso do Sn, que aparece de forma mais pulverizada devido ao desprendimento parcial de soldas durante a cominuição. Em conjunto, os resultados evidenciam que a fração F4 é a mais relevante para recuperação de Cu e Sn, devendo ser priorizada em etapas de pré-concentração e valorização (Figura 127).

Figura 127 – Distribuição percentual dos metais: cobre (Cu) e estanho (Sn) entre as frações granulométricas da Placa de Circuito Impresso (PCIc)



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação.

Os teores de Cu e Sn na PCIc apresentam um comportamento característico de placas com baixa complexidade eletrônica, porém com distribuição granulométrica bem definida. O Cu mostra teores crescentes das frações finas para as intermediárias, atingindo seus teores máximos na F3 e F4, de 15,4225% e 26,9299%, respectivamente (Tabela 15).

O Sn apresenta teores mais baixos e relativamente uniformes, variando entre 2,053% (F4) e 4,9960% (F1), com leve predominância nas frações F1 (4,9960%) e F3 (3,6580%), o que é compatível com a fragmentação de pontos de solda e ligas Sn-Ag-Cu, que se dispersam mais facilmente em tamanhos menores. No conjunto, os resultados indicam que o Cu está mais associado a partes estruturais da placa, enquanto o Sn se distribui de modo mais homogêneo (Tabela 15).

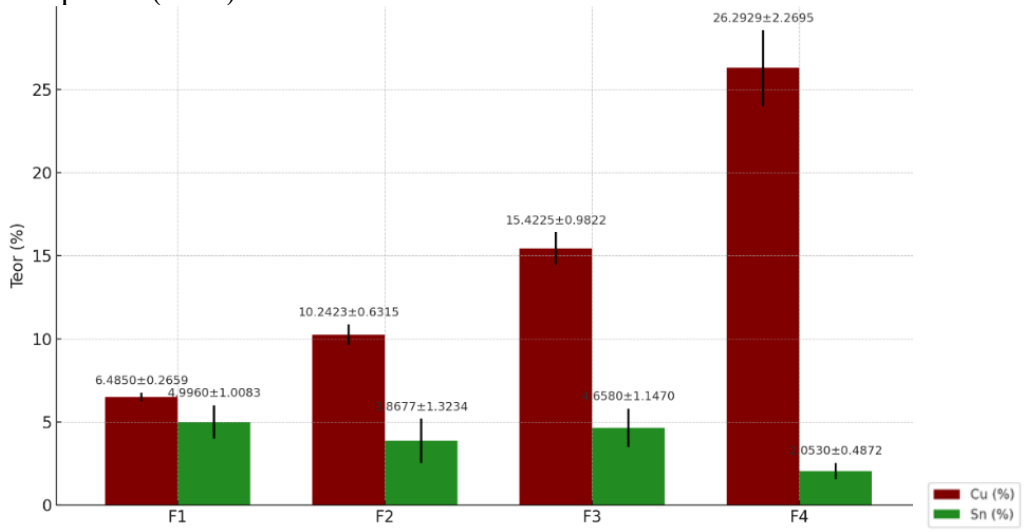
Tabela 15 – Teores em massa de cobre (Cu) e estanho (Sn) por fração da Placa de Circuito Impresso (PCIc)

Fração	Massa da fração (g)	Cu (%)	DP (%)	Cu (g)	Cu (kg/t)	DP (kg/t)	Sn (%)	DP (%)	Sn (g)	Sn (kg/t)	DP (kg/t)
F1	13,20	6,4850	0,2659	0,8550	64,773	2,659	4,9960	1,0083	0,6595	49,963	10,083
F2	12,70	10,2423	0,6315	1,3010	102,441	6,315	3,3677	1,3234	0,4277	33,675	13,234
F3	16,70	15,4225	0,9822	2,5746	154,189	9,822	3,6580	1,1447	0,6109	36,564	11,447
F4	51,00	26,9299	2,2695	13,7433	269,476	22,695	2,053	0,4872	1,0470	20,529	4,872
Total (F1–F4)	**93,60**	—		**18,4739**			—		**2,7451**		

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação.

Os resultados de Cu e Sn na PCId mostram uma tendência clara de enriquecimento dos metais nas frações mais grosseiras, particularmente em F4, que apresentou os maiores teores tanto de Cu (26,2929%) quanto de Sn (4,9960%) (Figura 128).

Figura 128 – Teores médios de cobre (Cu) e estanho (Sn) em (%) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIc)



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

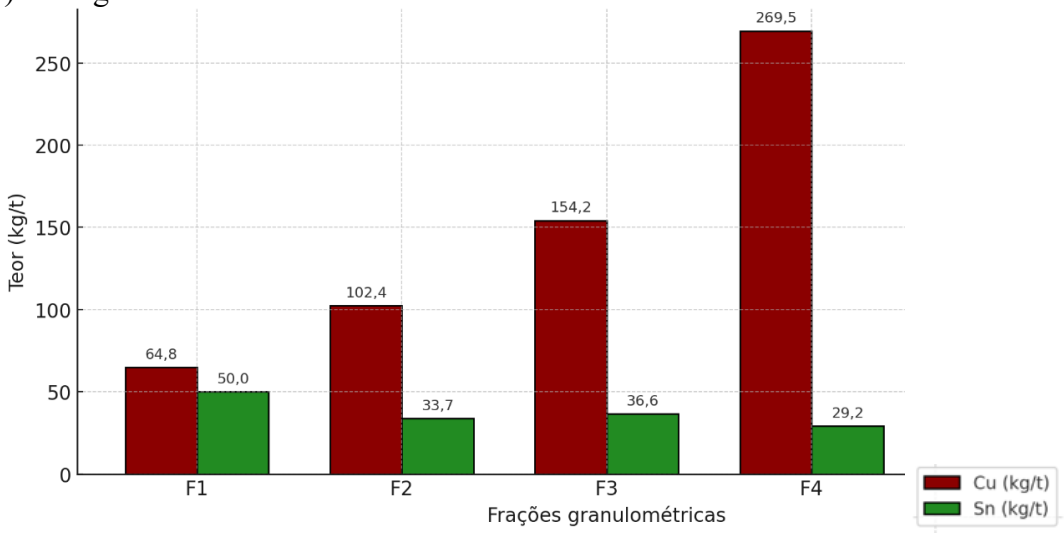
A distribuição da massa absoluta de Cu e Sn na PCIc revela um padrão fortemente concentrado na fração F4 (>1,0 mm), indicando que os metais permanecem majoritariamente associados a fragmentos de maior dimensão após a cominuição. O Cu apresenta sua maior massa em F4 (13,743 g, correspondendo à maior parcela do total de 18,4739 g), enquanto as frações F1–F3 exibem valores bem menores (entre 0,855 e 2,576 g). Esse comportamento confirma que o Cu está estruturalmente integrado a trilhas metálicas espessas, conectores e partes rígidas da placa, que não fragmentam facilmente — padrão amplamente documentado na literatura sobre PCIs (VEIT *et al*., 2006; GUO *et al*., 2011).

O Sn também apresenta predominância em F4 (1,047 g, de um total de 2,7451 g), embora com distribuição um pouco mais equilibrada entre as frações F1 a F3, o que é compatível com a natureza das soldas Sn-Pb/Sn-Ag-Cu, que tendem a se desprender parcialmente e formar partículas menores durante a moagem. Ainda assim, a maior retenção em F4 sugere que porções significativas de solda permanecem aderidas a componentes maiores.

Na PCIc, observa-se um aumento progressivo do teor de Cu das frações finas para as mais grosseiras, culminando na F4, onde o Cu atinge ≈269,5 kg/t, confirmando que este metal permanece majoritariamente associado a trilhas e condutores estruturais que se fragmentam em

tamanhos maiores durante a cominuição. Já o Sn apresenta valores mais baixos (≈20–50 kg/t) (Figura 129).

Figura 129 – Teores de cobre (Cu) e estanho (Sn) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCIc) em Kg/t

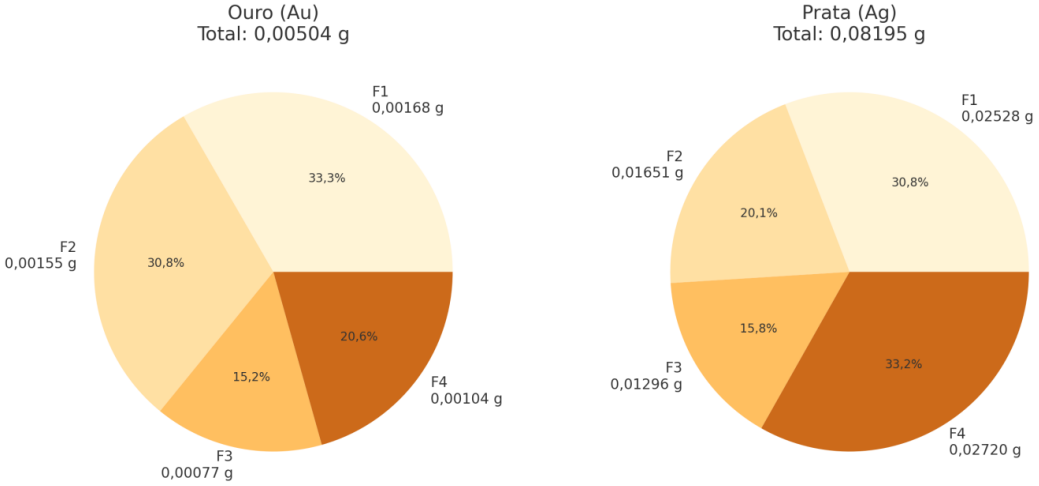


Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

4.5.4 Placa de circuito impresso (PCId)

A Figura 130 mostra que, na PCId, o Au apresenta distribuição concentrada nas frações mais finas (F1 e F2, somando mais de 60%), indicando que o metal ocorre principalmente em partículas pequenas e fragmentos de revestimento. Já a Ag apresenta distribuição mais equilibrada, com destaque para F1 (30,8%) e F4 (33,2%), o que indica presença tanto em partículas finas quanto em componentes maiores preservados após a moagem. Em síntese, o Au aparece mais pulverizado, enquanto a Ag mostra dupla origem estrutural e maior massa total.

Figura 130 – Distribuição percentual dos metais: ouro (Au) e prata (Ag) entre as frações granulométricas da Placa de Circuito Impresso (PCId)



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

Os teores de Au na PCId apresentam distribuição relativamente uniforme entre as frações classificadas (F1 e F2), de 0,0150% e 0,0160%. F3 e F4 apresentam teores menores, mas próximos entre si. A Ag além do maior teor ser detectado na F1 (0,2257%), a F4 aponta enriquecimento desse metal (Tabela *16*).

Tabela 16 – Teores em massa de ouro (Au) e prata (Ag) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCId)

Fração	Massa da fração (g)	Au (%)	DP (%)	Au (g)	Ag (%)	DP (%)	Ag (g)
F1	11,20	0,0150	0,0042	0,00168	0,2257	0,0791	0,02528
F2	9,70	0,0160	0,0014	0,00155	0,1703	0,0126	0,01651
F3	9,60	0,0080	0,0014	0,000768	0,1530	0,0365	0,01296
F4	13,50	0,0077	0,0012	0,001040	0,2013	0,0957	0,02720
Total (F1–F4)	44,00	-	-	0,005038	-	-	0,08195

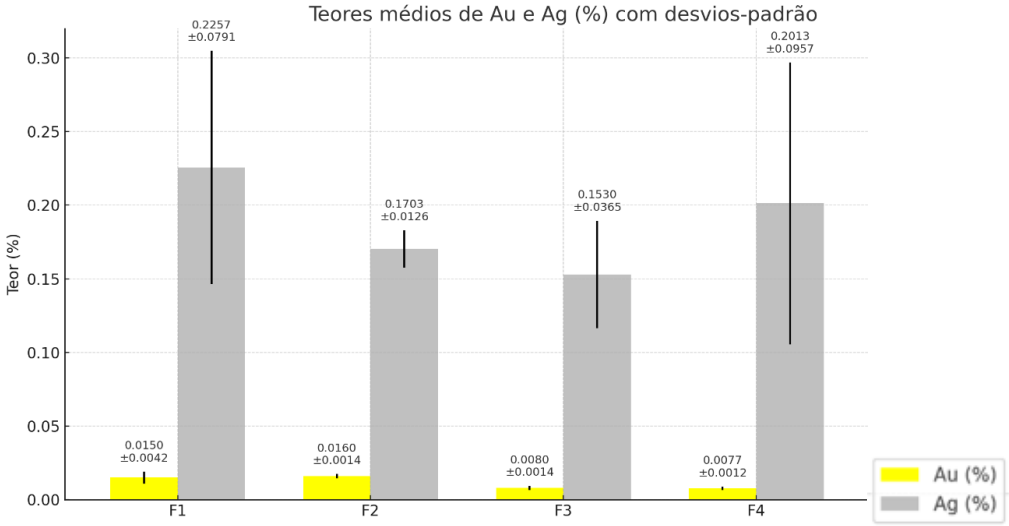
Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação.

A Figura 131 apresenta os teores médios de Au e Ag na PCId, acompanhados de seus respectivos desvios-padrão, e evidencia padrões distintos de distribuição desses metais entre as frações granulométricas. Para o Au, os valores permanecem baixos em todas as frações, variando entre 0,0077% e 0,0160 %. Os desvios-padrão reduzidos indicam boa reprodutibilidade das medidas.

A Ag apresenta teores significativamente superiores aos do Au e uma distribuição mais marcada entre as frações. Os maiores valores surgem em F1 (0,2257%) e F4 (0,2013%), indicando que parte expressiva da Ag está associada tanto às partículas finas (provenientes da fragmentação de soldas e revestimentos) quanto a fragmentos maiores que preservam pontos

de contato metálicos. Os desvios-padrão mais elevados em F1 e F4 sugerem maior heterogeneidade dessas frações, coerente com a natureza variável dos componentes que contêm Ag.

Figura 131 – Teores médios de ouro (Au) e prata (Ag) em (%) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCId)

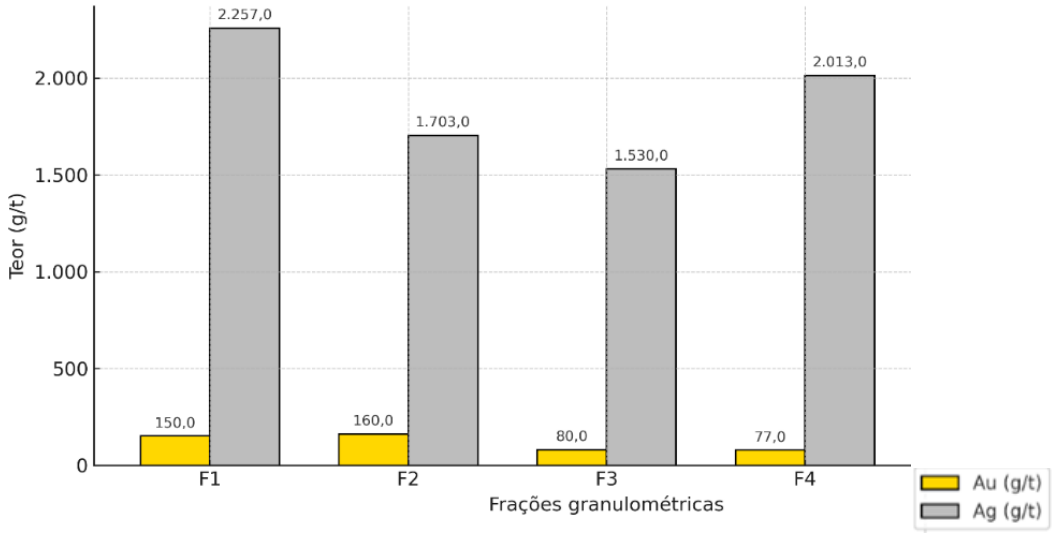


Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 > n < 0,50 mm; F3: 0,50 > n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação.

A massa absoluta evidencia que, na PCId, a Ag apresenta teores significativamente superiores aos do Au em todas as frações granulométricas, refletindo a maior presença estrutural da Ag nos componentes metálicos desta placa. A F4 concentra a maior massa de Ag (0,02720 g), seguida de F1 (0,027528 g), revelando que a Ag está tanto presente em partículas grosseiras e finas. No conjunto, a PCId demonstra baixa disponibilidade de Au, mas um aporte relativamente mais expressivo de Ag, embora ainda modesto quando comparado às PCIs a e b.

O comportamento granulométrico da PCId evidencia enriquecimento de Au nas frações <0,50 mm (F1–F2) e a Ag apresenta teores substancialmente superiores (1.530–2.257 g/t), com picos em F1 e F4, compatíveis com a fragmentação de revestimentos e contatos metálicos de alta pureza. A depressão em F3 indica menor contribuição de componentes metálicos nessa granulometria. De forma geral, a PCId concentra Au principalmente nas frações finas e Ag na F1 reforçando a necessidade de processos de recuperação focados nessas classes granulométricas (Figura 132).

Figura 132 – Teores de ouro (Au) e prata (Ag) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCId) em g/t



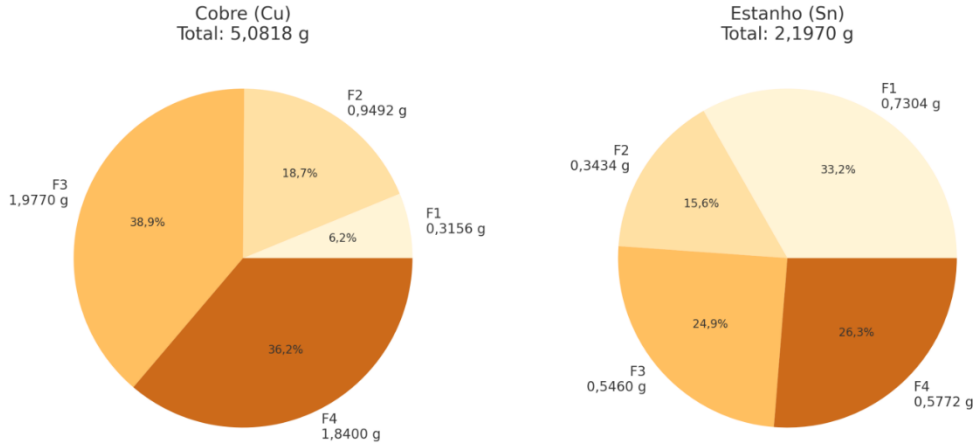
Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

A distribuição de Cu e Sn na PCId evidencia padrões distintos de concentração entre as frações granulométricas. Para o Cu, observa-se que a maior parcela da massa absoluta está nas frações F3 (38,9%) e F4 (36,2%), indicando que os condutores e trilhas metálicas, principais portadores de Cu, encontram-se mais preservados nas granulometrias intermediárias e grossas. As frações mais finas (F1 e F2) contribuem com proporções bem menores, o que sugere que a moagem tende a fragmentar menos os componentes ricos em Cu (Figura 133).

Para o Sn, a distribuição é mais equilibrada, mas ainda com claro predomínio de F1 (33,2%), seguida por F4 (26,3%). Esse padrão é coerente com a natureza das ligas de solda, nas quais o Sn é o principal constituinte: durante o processo de cominuição, o material de solda tende a se fragmentar mais facilmente, concentrando-se nas frações finas (F1) e intermediárias (F3). A fração grossa (F4) também mantém parcela significativa, possivelmente devido à permanência de pontos de solda ainda pouco degradados.

Em conjunto, a distribuição sugere que o Cu se concentra preferencialmente em frações mais grossas e intermediárias, enquanto o Sn apresenta maior presença nas frações finas, refletindo a morfologia e o comportamento mecânico distintos dos materiais de origem de cada metal na PCI (Figura 133).

Figura 133 – Distribuição percentual dos metais: cobre (Cu) e estanho (Sn) entre as frações granulométricas da Placa de Circuito Impresso (PCId)



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm.

A distribuição dos teores de Cu e Sn na PCId revela padrões granulométricos distintos e coerentes com o comportamento desses metais em PCIs. O Cu apresentou seus maiores teores na fração F3 (20,59%) e F4 (13,64%), indicando forte associação a trilhas, ilhas condutoras e elementos metálicos estruturais que tendem a permanecer em fragmentos de tamanho médio a grosso após a cominuição. Esses valores expressivos reforçam a evidência de que grande parte do Cu se concentra em componentes robustos (CHANCEREL *et al*., 2013; KAYA, 2016).

Já o Sn apresentou teores distribuídos de forma mais homogênea entre as frações, variando de 3,54% (F2) a 6,51% (F1). A concentração mais elevada na F1 indica que o Sn, frequentemente presente em soldas (liga Sn-Pb ou Sn-Ag-Cu), tende a se liberar como partículas finas durante o processo de moagem, comportamento compatível com sua maior fragilidade mecânica quando comparado às trilhas de Cu. Frações intermediárias (F3 e F4) também apresentaram quantidades significativas de Sn, refletindo a coexistência de partículas de solda aderidas a componentes maiores (Tabela 17).

Tabela 17 – Teores em massa de cobre (Cu) e estanho (Sn) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCId)

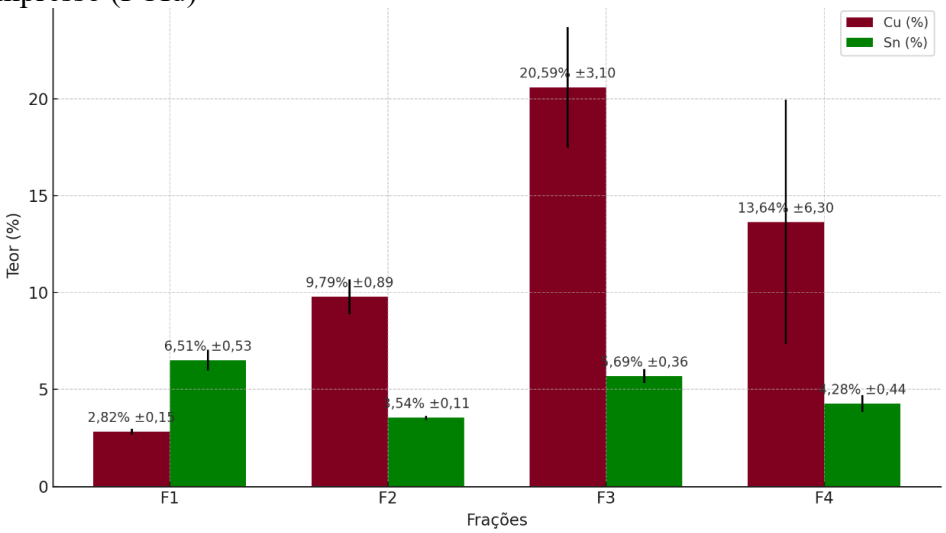
Fração	Massa da fração (g)	Cu (%)	DP (%)	Cu (g)	Cu (kg/t)	DP (kg/t)	Sn (%)	DP (%)	Sn (g)	Sn (kg/t)	DP (kg/t)
F1	11,20	2,8180	0,1471	0,3156	28,180	1,471	6,5123	0,5328	0,7304	65,123	5,328
F2	9,70	9,7855	0,8945	0,9492	97,855	8,945	3,5400	0,1146	0,3434	35,400	1,146
F3	9,60	20,5915	3,0992	1,977	205,915	30,992	5,6877	0,3611	0,5460	56,877	3,611
F4	13,50	13,6398	6,2951	1,840	136,398	62,951	4,2754	0,4351	0,5772	42,754	4,351
Total (F1–F4)	44,00	-	-	5,0818	-	-	-	-	2,1970	-	-

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação.

De modo geral, enquanto o Cu se concentra majoritariamente em frações médias/grossas devido à sua associação estrutural com elementos robustos da PCI, o Sn distribui-se entre frações finas e intermediárias, refletindo a fragmentação das soldas durante o processo mecânico. Essa tendência reforça o comportamento característico desses metais em processos de pré-tratamento para reciclagem de REEE e é consistente com a literatura sobre cominuição e separação granulométrica em PCIs.

A Figura 134 mostra que, na PCId, o Cu aumenta de teor até a fração intermediária (F3), onde atinge seu máximo, indicando maior concentração de trilhas e condutores nessa granulometria. Já o Sn apresenta picos em F1 e F3, refletindo a distribuição de soldas finamente fragmentadas.

Figura 134 – Teores médios de cobre (Cu) e estanho (Sn) em (%) por fração na Placa de Circuito Impresso (PCId)



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm e F4: > 1,00 mm.

4.5.5 Comparativo entre as quatro Placas de Circuito Impresso analisadas pela Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES)

A comparação entre as PCIs a, b, c e d evidenciou diferenças significativas no conteúdo metálico, tanto em termos de teor quanto de massa absoluta. PCIa e PCIb apresentaram os maiores potenciais metalíferos, destacando-se especialmente pelos teores mais elevados de Au, Ag e Cu, refletindo maior complexidade eletrônica e presença de componentes de maior valor agregado. Em contraste, PCIc e PCId exibiram concentrações muito inferiores de Au e Ag, embora ainda mantenham quantidades relevantes de Cu e Sn, compatíveis com seu padrão construtivo mais simples.

A distribuição granulométrica mostrou um comportamento consistente entre todas as placas: as frações mais finas (F1–F2) concentraram maiores teores de metais preciosos, enquanto as frações mais grosseiras (F3–F4) concentraram a maior parte da massa absoluta de Cu e Sn. Dessa forma, o fracionamento granulométrico otimiza a recuperação seletiva de diferentes metais.

Em síntese, os resultados demonstram que PCIa e PCIb são as placas de maior relevância econômica, especialmente para recuperação de Au e Cu, enquanto PCIc e PCId apresentam menor valor intrínseco, mas ainda contribuem significativamente para o inventário total de Cu e Sn. As tendências observadas estão alinhadas com a literatura sobre mineração urbana, reforçando o potencial dessas PCIs como fontes importantes de metais estratégicos.

4.5.6 Discussão acerca dos resultados provindos da Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) para as Placas de Circuito Impresso (PCIa, PCIb, PCIc e PCId)

A análise da distribuição granulométrica dos metais Au, Ag, Cu e Sn nas quatro PCIs de UEs (A, B, C e D) permitiu caracterizar, em profundidade, o comportamento fragmentacional dos metais durante a cominuição. Os resultados obtidos confirmam, em grande medida, as tendências descritas na literatura científica internacional, ao mesmo tempo em que revelam especificidades morfológicas e composicionais próprias das PCIs de UEs, ainda pouco exploradas em trabalhos acadêmicos.

De modo geral, observou-se que os metais nobres (Au e Ag) apresentaram diferentes padrões de enriquecimento conforme sua associação morfológica: quando ligados a microcontatos, trilhas finas ou soldas superficiais, concentram-se em frações finas (F1–F2), enquanto a presença em conectores robustos, pinos banhados ou terminais de grande porte leva ao enriquecimento nas frações grossas (F4). Por outro lado, os metais estruturais (Cu e Sn) comportaram-se de forma mais previsível, sendo majoritariamente detectados nas frações intermediárias e grossas (F3–F4), o que reflete sua natureza mecânica resistente e sua forte ligação a trilhas condutoras e ligas de solda.

Esses padrões foram comparados sistematicamente com o que é reportado por autores como Veit (2005), Silvas *et al.*, (2015), Kasper *et al*., (2011), Morf *et al*., (2007), Wienold *et al.,* (2011), Zhou *et al.,* (2010), Wan *et al.*, (2021), Ogunniyi *et al.,* (2009), Santana *et al.,* (2013), Raele, De Pretto e Zezell (2017), Huang *et al.,* (2009), Kim, Choi e Kim (2011), Tang *et al.*, (2021) e Verma *et al*., (2016).

4.5.6.1 Comportamento do Ouro (Au)

O Au, apesar de presente em concentrações relativamente baixas em todas as placas, foi detectado em todas as frações granulométricas com variações de teor entre elas. Os valores ficaram na faixa de 0,0077% (PCId – F4) a 0,0545% (PCIb-F2) (Tabela 18).

Tabela 18 – Teores de ouro (Au) em porcentagem para cada Placa de Circuito Impresso e suas respectivas faixas granulométricas

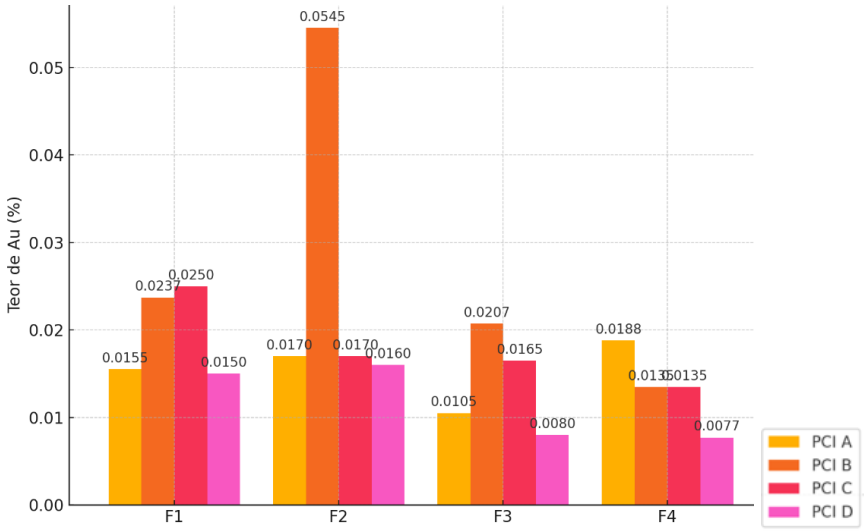
PCI	Teor	Fração granulométrica (mm)			
		F1	F2	F3	F4
		< 0,25	0,25 < n < 0,50	0,50 < n < 1,00	> 1,00
a	%	0,0155	0,0170	0,0105	0,0188
b		0,0237	**0,0545**	0,0207	0,0135
c		0,0250	0,0170	0,0165	0,0135
d		0,0150	0,0160	0,0080	**0,0077**

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação; PCI: Placa de Circuito Impresso.

Mesmo sendo considerado baixo em termos absolutos, representa altíssimo valor agregado, uma vez que 1 tonelada de material contendo 0,0545% de Au corresponde a 545 g de Au (quantidade superior ao teor de muitas jazidas primárias exploradas comercialmente) (NUSS e ECKELMAN, 2014). Ainda, foi elaborada a Figura 135, a qual apresenta a distribuição de Au por faixa granulométrica nas quatro PCIs.

A Figura 135 mostra que a distribuição de Au entre as frações granulométricas varia conforme o tipo de placa. A PCIb apresenta o maior teor absoluto (0,0545%) na fração F2, indicando enriquecimento significativo nessa granulometria intermediária. As PCIs c e d apresentam a F1 e a F2 com as maiores concentrações e a PCIa (F4 e F2). Esses resultados evidenciam que a moagem fragmenta diferentemente cada placa, concentrando Au em granulometrias distintas, o que reforça a importância do peneiramento como etapa de pré-concentração.

Figura 135 – Distribuição de ouro (Au) por faixa granulométrica nas quatro Placas de Circuito Impresso



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação; PCI: Placa de Circuito Impresso.

A comparação entre a literatura e os resultados obtidos para Au nas quatro PCIs mostra que não há um padrão único de distribuição granulométrica. As PCIb e PCIc apresentaram maior concentração de Au em frações finas, alinhando-se às tendências descritas por Veit (2005), Kasper *et al,* (2011) e Silvas *et al.*, (2015). Já a PCIa confirmou o comportamento descrito por Zhou *et al.*, (2010) e Wan *et al.,* (2021), com enriquecimento em frações grossas devido à presença de conectores. A PCId mostrou tendência intermediária, com pico em F2. Dessa forma, observa-se que cada placa responde de forma distinta ao processo de moagem, refletindo diferenças estruturais e confirmando apenas parcialmente as tendências relatadas na literatura (Quadro 12).

Quadro 12 – Comparação entre autores e os resultados das Placas de Circuito Impresso para ouro (Au) (Continuação...)

Autor/Literatura	**Tendência descrita pela literatura**	**PCIa**	**PCIb**	**PCIc**	**PCId**
Veit (2005)	Au concentra-se em frações finas (<0,5 mm) devido à fragilidade dos pads e contatos	Na classificação granulométrica: Não confirma (pico em F4).	Confirma (F2)	Confirma (F1)	Na classificação granulométrica: confirma (pico em F2).
Kasper *et al.,* (2011) e Silvas *et al.*, (2015)	Partículas finas enriquecem Au após moagem				
Morf *et al.,* (2007)	Au acompanha Ag, ambos concentrados em frações finas				

Quadro 12 – Comparação entre autores e os resultados das Placas de Circuito Impresso para ouro (Au) (Conclusão)

Zhou *et al.,* (2010)	Quando Au está em conectores, concentra-se na fração grossa	Confirma (F4)	Não confirma (pico em F2)	Não confirma (pico em F1)	Não confirma (pico em F2)
Wan *et al*., (2021)	Conectores banhados mantêm Au em >1 mm				

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; PCI: Placa de Circuito Impresso.

4.5.6.2 Comportamento da Prata (Ag)

Os teores de Ag na PCIa variaram de 0,0742% (PCIc-F4) a 0,2257% (PCId-F1) (Tabela 19).

Tabela 19 – Teores de prata (Ag) em porcentagem para cada placa de circuito impresso e suas respectivas faixas granulométricas

PCI	Teor	Fração granulométrica (mm)			
		F1	**F2**	**F3**	**F4**
		< 0,25	**0,25 < n < 0,50**	**0,50 < n < 1,00**	**> 1,00**
a	%	0,1790	0,1595	0,1130	0,1171
b		0,1373	0,1230	0,1200	0,1343
c		0,1807	0,1703	0,1070	**0,0742**
d		**0,2257**	0,1703	0,1530	0,2013

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação; PCI: Placa de Circuito Impresso.

De maneira geral, observa-se que as maiores concentrações de Ag tendem a ocorrer nas frações mais fina (F1), indicando que a fragmentação libera parte significativa das metalizações que contêm Ag.

A PCId apresenta os maiores valores entre todas as placas nas frações classificadas, com destaque para a F1 (0,2257%) e para a F4 (0,2013%), indicando a presença de componentes com elevada metalização contendo prata tanto em partículas finas quanto em fragmentos mais grossos.

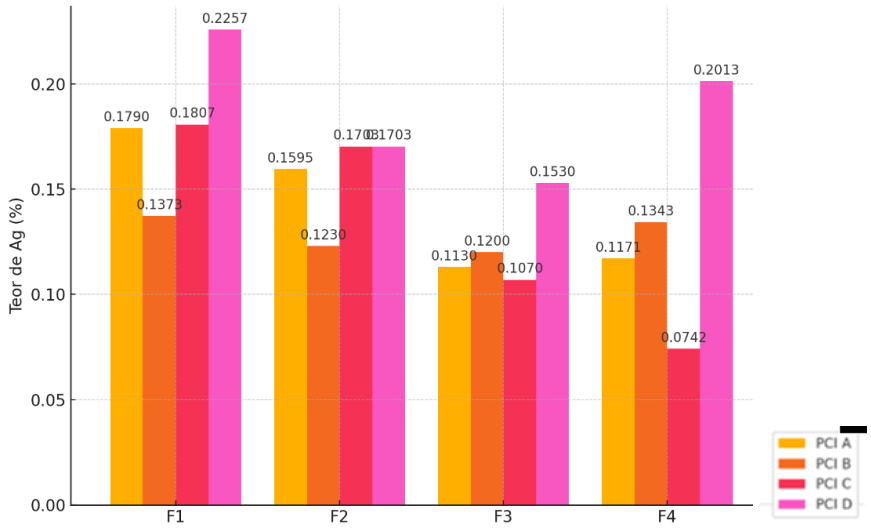
A PCIc exibe teores elevados nas frações F1 (0,1807%) e F2 (0,1703%), com redução progressiva em F3 e F4, o que sugere que a Ag se concentra preferencialmente em regiões de fácil fragmentação.

A PCIa apresenta comportamento semelhante, com os maiores valores em F1 (0,1790%) e F2 (0,1595%), e redução nas demais frações, refletindo liberação eficiente da Ag pela moagem.

Por outro lado, a PCIb mostra distribuição mais homogênea, com teores entre 0,1200% e 0,1373%, indicando menor variabilidade entre as faixas granulométricas e ausência de enriquecimentos marcantes em frações específicas.

De forma integrada, a Figura 136 evidencia que a Ag se concentra majoritariamente na fração mais fina (F1). Esse padrão reforça que a Ag é mais facilmente liberada durante a cominuição, estando associada principalmente às metalizações superficiais e trilhas finas das PCIs.

Figura 136 – Distribuição de prata (Ag) por faixa granulométrica nas Placas de Circuito Impresso



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação; PCI: Placa de Circuito Impresso.

A Ag apresentou variações importantes: em todas as placas concentrando-se em F1–F2, com exceção de F4 da PCId, o que pode indicar ligação a terminais metálicos grossos, em acordo com Zhou *et al*., (2010).

A análise comparativa entre a literatura e os resultados obtidos para Ag nas quatro PCIs demonstra que, de modo geral, a tendência descrita pelos autores é amplamente confirmada pelas amostras estudadas. Moff *et al*., (2007) e Wienold *et al.,* (2011) apontam que a Ag tende a acompanhar o comportamento do Au e que se dispersa em superfícies metálicas, sendo liberada principalmente em frações finas — tendência confirmada pelas quatro placas (PCIa, PCIb, PCIc e PCId), que apresentaram picos ou contribuições relevantes em F1 ou F2.

Zhou *et al.,* (2010) destacam que a prata pode permanecer em frações mais grossas (F4) quando ligada a conectores metálicos; essa tendência não foi confirmada para PCIa e PCIc, mas foi parcialmente observada em PCIb e PCId, que apresentaram o segundo maior teor de Ag em F4, indicando uma contribuição estrutural de conectores nessas placas. Já Sant'Ana *et*

al., (2013), ao relatarem maior teor de Ag em frações <0,5 mm em PCIs de celulares, descrevem um comportamento que corresponde ao observado nas PCIa, PCIc e PCId, mas não em PCIb, que apresentou maior concentração em F2 seguido de F4.

No conjunto, os resultados indicam que a Ag apresenta comportamento híbrido: majoritariamente concentrada em frações finas, mas com presença relevante em frações grossas quando associada a componentes metálicos específicos, confirmando parcialmente as diferentes tendências propostas pela literatura. (Quadro 13).

Quadro 13 – Comparação entre autores e as Placas de Circuito Impresso para prata (Ag)

Autor/Literatura	Tendência da literatura	PCIa	PCIb	PCIc	PCId
Morf *et al.,* (2007)	Ag tende a acompanhar Au, concentrando-se em partículas finas	Confirma	Confirma	Confirma	Confirma
Wienold *et al.,* (2011)	Ag dispersa em superfícies, liberando-se em frações finas				
Zhou *et al.*, (2010)	Ag permanece em F4 quando ligada a conectores	Não Confirma	Parcial (segundo maior pico na F4)	Não Confirma	Parcial (segundo maior pico na F4)
Sant'Ana *et al*., (2013)	Ag elevada em frações < 0,5 mm em PCIs de celular				

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação; PCI: Placa de Circuito Impresso.

4.5.6.3 Comportamento do Cobre (Cu)

O comportamento do Cu nas quatro PCIs apresenta um padrão marcante de enriquecimento nas frações intermediárias e grossas classificadas (F2, F3 e F4), especialmente nas PCIs a e b. As maiores concentrações foram observadas na PCIb, que atingiu valores superiores a 40% em F2, F3 e F4, sugerindo forte presença de Cu em trilhas condutoras e regiões metalizadas que se fragmentam principalmente nesses intervalos granulométricos (Tabela 20).

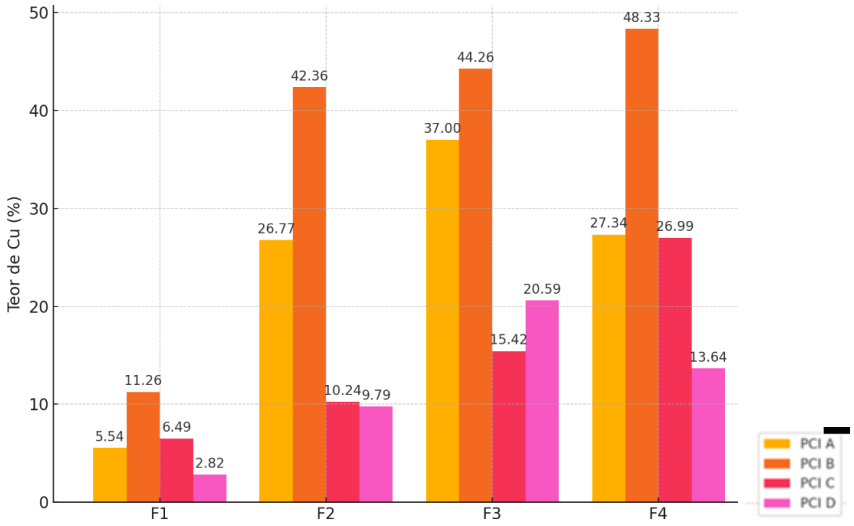
Tabela 20 – Teores de cobre (Cu) em porcentagem para cada placa de circuito impresso e suas respectivas faixas granulométricas

PCI	Teor	Fração granulométrica (mm)			
		F1	F2	F3	F4
		< 0,25	0,25 < n < 0,50	0,50 < n < 1,00	> 1,00
a	%	5,5400	26,7697	36,9987	27,3370
b		11,2585	42,3613	44,2597	48,3275
c		6,4850	10,2423	15,4225	26,9299
d		2,8180	9,7855	20,5915	13,6398

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação; PCI: Placa de Circuito Impresso.

A PCIa acompanha essa tendência, com crescente teor de Cu da F1 para F3 e leve redução em F4, indicando que sua estrutura metálica se libera de forma eficiente na F3. A PCIc apresenta valores mais moderados, mas também com enriquecimento em F3 e F4, reforçando que o Cu está associado a fragmentos médios e grosseiros. Já a PCId mostra teores menores e mais distribuídos, com leve máximo na F3 (Figura 137).

Figura 137 – Distribuição de cobre (Cu) por faixa granulométrica nas Placas de Circuito Impresso



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação; PCI: Placa de Circuito Impresso.

O Cu demonstrou o padrão mais robusto, apresentando: concentração majoritária em F3–F4 em todas as placas, reforçando sua natureza estrutural e sua resistência mecânica durante a cominuição. Esse comportamento é amplamente citado por Veit (2005), Silvas *et al.* (2015), Raele, De Pretto e Zezell (2017) e Ogunniyi *et al.,* (2009) (Quadro 14).

Quadro 14 – Comparação entre autores e as Placas de Circuito Impresso para cobre (Cu)

Autor/Literatura	Descrição segundo a literatura	PCIa	PCIb	PCIc	PCId
Veit (2005)	Cu permanece nas frações grossas, pois trilhas e planos resistem à cominuição.	Confirma	Confirma	Confirma	Confirma
Silvas *et al*., (2015)	Trilhas internas não se pulverizam, enriquecendo F3–F4.				
Raele, De Pretto e Zezell (2017)	Máscara de solda dificulta liberação de trilhas → Cu em F4.				
Ogunniyi *et al.,* (2009)	Cu é o metal majoritário em todas as frações; maior em grossas.				
Sant' Ana *et al.,* (2013)	Maior Cu em frações >1 mm.	Parcial (pico em F3)			Parcial (pico em F3)

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação; PCI: Placa de Circuito Impresso.

4.5.6.4 Comportamento do Estanho (Sn)

A distribuição dos teores de Sn nas quatro PCIs revela um comportamento relativamente variável entre as frações granulométricas classificadas (F1–F4) (Tabela 21). A distribuição dos teores de Sn nas quatro PCIs indica predominância em frações finas e intermediárias (F1–F3), sugerindo que o Sn presente em soldas e recobrimentos metálicos tende a se fragmentar facilmente durante a moagem.

As PCIs A e C exibem valores relativamente uniformes entre F1 e F3, com queda acentuada em F4, indicando baixa retenção de Sn em partículas grossas. A PCId, contudo, apresenta comportamento distinto, com teores elevados tanto em F1 quanto em F3 e F4, revelando que parte do estanho permanece associada a componentes metálicos mais robustos. A PCIb tem seu maior teor em F4. Assim, o Sn demonstra um padrão predominantemente fino, mas com contribuição relevante em frações grossas em placas estruturalmente mais complexas

Tabela 21 – Teores de estanho (Sn) em porcentagem para cada placa de circuito impresso e suas respectivas faixas granulométricas

PCI	Teor	Fração granulométrica (mm)			
		F1	F2	F3	F4
		< 0,25	0,25 < n < 0,50	0,50 < n < 1,00	> 1,00
a	%	4,6327	4,3373	3,4297	3,3178
b		4,6340	4,2443	4,4350	5,2721
c		4,9960	3,3677	3,6580	2,053
d		6,5123	3,5400	5,6877	4,2754

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação; PCI: Placa de Circuito Impresso.

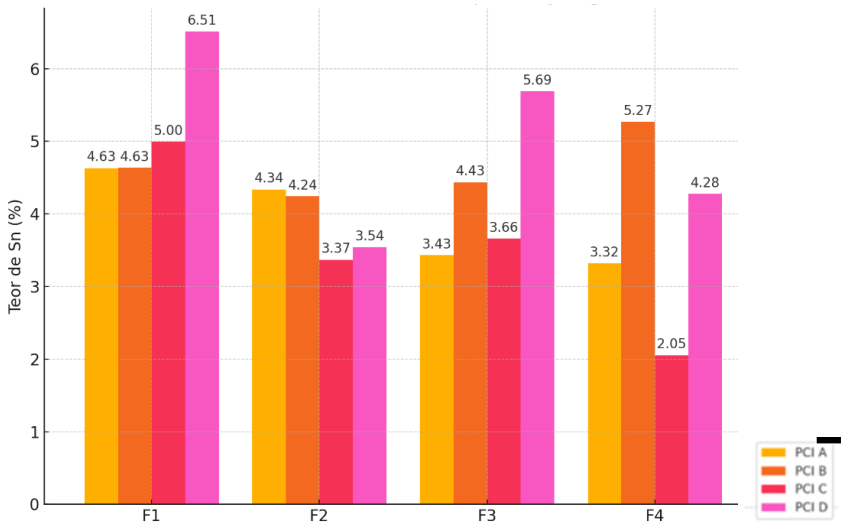
Em geral, os maiores valores são observados nas frações mais finas (F1) e também nas frações intermediárias (F3), especialmente para as PCIs c e d, indicando que o Sn se fragmenta de forma significativa durante a cominuição.

A PCId apresenta os maiores teores entre todas as placas, com destaque para F1 (6,51%) e F3 (5,68%), sugerindo forte presença de soldas e componentes ricos em Sn que se desagregam em partículas de diferentes tamanhos.

A PCIb apresenta teores equilibrados nas frações classificadas, com incremento em F4 (5,27%), o que pode indicar que parte das ligas de solda e trilhas metalizadas dessa placa se concentra em fragmentos mais grossos. Já a PCIa demonstra distribuição mais homogênea, com teores entre 3,3178% (F4) e 4,6327% (F1), indicando menor variabilidade entre componentes e regiões metalizadas.

De forma integrada, os resultados mostram que o Sn tende a distribuir-se entre frações finas e intermediárias, refletindo sua associação com ligas de solda e pontos de conexão que se fragmentam de forma eficiente (Figura 138).

Figura 138 – Distribuição de estanho (Sn) por faixa granulométrica nas Placas de Circuito Impresso



Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação; PCI: Placa de Circuito Impresso.

A avaliação comparativa entre a literatura e os resultados obtidos para o Sn revela comportamentos distintos entre as PCIs, refletindo diferenças estruturais e de composição. A tendência de concentração do Sn em frações finas, descrita por Huang *et al.,* (2009), foi confirmada para as PCIs A, C e D, enquanto a PCIB destoou, com pico em F4.

Em contraste, a hipótese de Silvas *et al.,* (2015), que relaciona o Sn às soldas e ao enriquecimento em F3–F4, foi confirmada apenas para a PCIB e parcialmente para a PCID. A proposição de Tang *et al.,* (2021), apontando aglomeração do Sn em frações grossas, mostrou-se compatível apenas com a PCIB, com comportamento parcial na PCID.

Já a tendência descrita por Kim, Choi e Kim (2011), que relaciona a pulverização de ligas finas ao enriquecimento em F1, foi observada nas PCIs A, C e D, com confirmação parcial na PCIB. Em conjunto, os dados demonstram que o Sn apresenta um padrão bimodal, concentrando-se ora em frações finas, ora em frações grossas, dependendo da robustez dos pontos de solda e da resistência mecânica dos componentes associados (Quadro 15).

Quadro 15 – Comparação entre autores e as Placas de Circuito Impresso para estanho (Sn)

Autor/Literatura	Tendência documentada	PCIa	PCIb	PCIc	PCId
Huang *et al.,* (2009)	Sn liberado conforme fragilidade da liga; presença nas frações finas	Confirma	Não confirma (pico em F4)	Confirma	Confirma
Silvas *et al.,* (2015)	Sn acompanha Cu em soldas: concentração em F3–F4.	Não confirma	Confirma	Não confirma	Parcial (segundo maior pico F3)
Tang *et al.,* (2021)	Sn tende a permanecer aglomerado: frações grossas		Confirma		Parcial
Kim, Choi e Kim (2011)	Ligas finas podem se pulverizar: Sn em F1	Confirma	Parcial (Segundo pico em F1)	confirma	confirma

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação; PCI: Placa de Circuito Impresso.

Os quadros comparativos permitem visualizar com clareza que as quatro PCIs possuem comportamentos distintos, mas todas se encaixam dentro das explicações estruturais descritas pelos principais autores da área. Assim, o conjunto de dados obtidos neste trabalho: corrobora fortemente a literatura, amplia o entendimento científico sobre PCIs de UEs, oferece uma base sólida para a proposição de rotas tecnológica de reciclagem/metais específicas para esse tipo de resíduo.

4.6 Comparativo de concentrações dos metais de interesse com Placas de Circuito Impresso de outros Equipamentos Eletroeletrônicos

Através dos resultados obtidos, os elementos Ag, Cu, Zn e Sn, ficaram dentro da faixa de detecção mínima e máxima. Au, Al, Fe, Mg, Mn e Pb, tiveram teores superiores aos encontrados na revisão de literatura. Não foi possível comparar os teores de As, pois não foram citados na literatura consultada. Ni, Cr, Pt e Co não foram detectados.

4.6.1 Discussão: Metais de interesse (Au, Ag, Cu e Sn) das Placas de Circuito Impresso das urnas Eletrônicas

A caracterização química das PCIs de UEs revelou um conjunto de metais valiosos e cuja distribuição confirma tanto o potencial metalúrgico quanto a necessidade de rotas ambientalmente controladas para seu processamento.

Os elementos Au, Ag, Cu e Sn mostraram-se presentes em teores expressivos, com variações entre frações granulométricas e entre os quatro modelos de PCIs estudados, comportamento compatível com resultados amplamente reportados em PCIs de computadores,

celulares e tablets (SANT'ANA *et al.,* 2013; JESUS, 2015; CALDAS *et al.,* 2017; GOMES, 2021; PIOVEZAN, 2023) (Quadro 4).

Nos resultados obtidos nesta pesquisa, o Au apresentou teores entre 0,0077% (PCId-F4) e 0,0545% (PCIb-F2). A PCIa nas frações com classificação granulométrica (F1-F4) apresentou teores de 0,0188% de Au (F4), 0,017% (F2), 0,0155% (F1) e 0,0105% (F3). A PCIb apresentou o maior teor entre todas as placas com classificação granulométrica na F2 (0,0545%), F1 (0,0237%), F3 (0,0207%) e F4 (0,0135%).

A PCIc apresentou o maior teor de Au na F1 (0,0250%), seguido pela F2 (0,0170%), F3 (0,0165%) e F4 (0,0135%). A PCId apresentou o maior teor de Au na F1 (0,02050%), após pela F2 (0,0160%), F1 (0,0150%), F3 (0,0080%) e F4 (0,0077%).

Da literatura pesquisada, a concentração de 0,002% de Au foi detectada no trabalho de Caldas *et al*., (2017) em PCIs de celulares. Ainda a concentração de 0,009 % de Au foi detectada em PCIs de computador na pesquisa de Bezana, 2019.

Concentrações de 0,01%, 0,02% e 0,06% foram detectadas na pesquisa de Caldas *et al*., (2019), em PCIs de computadores. Em PCIs diversas, na pesquisa de Gomes (2012), o teor foi de 0,02%. Sant'Ana *et al*., (2013) reportaram 0,04% e 0,06% em PCIs de celulares em granulometria menor que 1 mm. A concentração de 0,04% também foi detectada em PCIs de computadores na pesquisa de Magalhães (2023). No trabalho de Piovezan (2023), para PCIs de tablets, as concentrações foram de 0,02%, 0,03 e 0,04% (em frações maiores e menores que 0,5 mm), para diferentes modelos do EEEE. No trabalho de Jesus (2015), concentrações mais elevadas foram detectadas, tais como 0,08% (na fração menor que 0,30 mm), 0,08% (maior que 0,30 e menor que 0,85 mm) e maior concentração de Au na fração mais grosseira (maior que 0,85mm e menor que 1,15 mm), de 0,10%. Desta forma, aponta-se que as PCIs das UEs ficaram no intervalo das outras PCIs de outros EEEs e com teores superiores.

Esse comportamento reforça a compatibilidade das PCIs de urna com padrões de PCIs de alto valor agregado, como as de computadores portáteis e smartphones, categoria que tende a apresentar maior densidade de trilhas banhadas a ouro devido às exigências de confiabilidade elétrica.

Na presente pesquisa, a Ag apresentou teores notavelmente elevados, variando de 0,0742% (PCIc-F4) a 0,2257% (PCId-F1) nas PCIs de urna. Na PCIa apresentou teor de 0,1790% (F1), seguido por 0,1595% (F2), 0,1171 (F4) e 0,1130% (F3). Na PCIb, 0,1373% (F1), 0,1230% (F2), 0,1323% (F4) e 0,1200% (F3). Na PCIc, 0,1807% (F1), 0,1703% (F2), 0,1070% (F3) e 0,0742% (F4) e na PCId, 0,2257% (F1), 0,2013% (F4), 0,1703% (F2) e 0,1530% (F3).

Da revisão de literatura, a pesquisa de Caldas *et al*., (2019) reportou a menor concentração no lote B, de 0,01% em PCIs de computadores. No mesmo trabalho, concentração de 0,03% foi diagnosticada tanto no Lote A quanto no Lote D a maior concentração, de 0,06%, foi detectada no lote C (ambos lotes com fração granulométrica maior e igual a 3 mm. Bezana (2019) reportou teor de 0,029% para PCIs de computadores acima de 0,150 mm. Jesus (2015) reportou teores de 0,21% (< 0,30 mm), 0,16% 0,30 > d < 0,85 mm) e 0,02% (0,85 > d < 1,15 mm).

Em PCIs diversas, a pesquisa de Gomes encontrou 0,06% de Ag (> 1,00 mm). Piovezan (2023) em sua pesquisa de diferentes modelos de tablet, detectou as concentrações entre 0,06% (tablet 2, na fração < 0,5 mm) a 0,11 % (tablet 1, na fração < 0,5 mm).

Sant'Ana *et al*., (2013) reportou que as PCIs de celulares após o ano de 2022 apresentaram teores de 0,12% de Ag e de 0,28% anterior ao ano de 2001 (ambas na fração > 1,00 mm). Na revisão de literatura, a maior concentração de Ag em PCI foi no trabalho de Sant'Ana *et al.*, (2013), de 0,28%. Teor de 0,16% de Ag em PCIs de computadores foi detectado no trabalho de Caldas *et al.,* 2017, em frações de 2 mm e de 0,21%, para PCIs de celulares, na mesma fração granulométrica.

Desta forma, a Ag encontra-se dentro da faixa de intervalo de outros EEEs. A presença elevada de Ag pode estar associada ao uso intensivo de contatos prateados em teclados, conectores e trilhas de alta condução, possivelmente refletindo requisitos de confiabilidade para equipamentos de uso governamental (TSE, 2024).

Na presente pesquisa, o Cu apresentou teores elevados, variando de 2,8180% (PCId-F1) a 48,3275% (PCIb-F3). A PCIa, apresentou maior teor de Cu na F3 (36,9987%), F4 (27,3370%), F2 (26,7697%) e F1 (5,5400%). A PCIb, teve seu maior teor na F4 (48,3275%), F3 (44,2597%), F2 (42,3613%) e F1 (11,2585%). A PCIc, novamente a F4 teve o maior teor (26,9299%), F3 (15,4225%), F2 (10,2423%) e F1 (6,4850%). A PCId, teor mais elevado na F3 (20,5915%), F4 (13,6398%), F2 (9,7855%) e F1 (2,8180%). Nota-se que as frações mais grosseiras (F3 e F4) reteram maior teor do metal.

O Cu confirmou sua posição como metal majoritário nas PCIs, comportamento amplamente reconhecido na literatura, atingindo suas maiores concentrações no trabalho de Piovezan (2023), variando de 49,67% a 70,77%. Magalhães (2023) reportou um teor de 43,89% em fração heterogênea. Jesus (2015) apresentou teores de 31% na maior fração granulométrica, 45% na fração intermediária e 50% na fração mais grosseira. Outros teores de Cu provindos da revisão da literatura (SANT'ANA *et al*., 2013; BEZANA, 2019; GOMES, 2021; PEREIRA, 2022) variaram entre 14,28% (CALDAS *et al*., 2019) e 34,49% (CALDAS *et al*., 2017).

De acordo com as detecções mínimas e máximas obtidas através da revisão da literatura, nota-se que o Au teve menores teores em relação ao valor de detecção mínima (14,28%), principalmente nas frações mais finas da PCIa, PCIc e PCId.

Na presente pesquisa, o Sn variou entre 2,053% (PCIc-F4) e 6,5123% (PCId-F1). Na PCIa, o Sn teve seu maior teor na F1 (4,6327%), F2 (4,3373%), F3 (3,4297%) e F4 (3,3178%). Na PCIb, F4 (5,2721%), F1 (4,6320%), F3 (4,4350%) e F2 (4,2443%). Na PCIc, F1 (4,9960%), F3 (3,6580%), F2 (3,3677%) e F4 (2,053%). Na PCId, F1 (6,5123%), F3 (5,6877%), F4 (4,2754%) e F2 (3,5400%).

O Sn, fortemente associado a ligas de solda, apresentou teores relevantes entre 8,83% (CALDAS *et al*., 2017) e 1,07% (PIOVEZAN, 2023). Ainda, no trabalho de Piovezan (2023), os teores de Sn variaram de 1,07% a 4,29%. Outros teores intermediários foram detectados nos trabalhos de Sant'Ana *et al*., (2013), Jesus (2015) e Caldas *et al*., 2019. Os teores detectados na presente pesquisa encontram-se no intervalo de deteção mínima e máxima provindos da revisão de literatura.

4.6.2 Discussão: Metais Perigosos e Substâncias Tóxicas em Placas de Circuito Impresso

A literatura demonstra de maneira consistente que as PCIs constituem um importante reservatório de metais pesados, elementos tóxicos e retardantes de chama bromados. Esses contaminantes representam riscos ambientais e à saúde humana tanto durante a fase de uso quanto, especialmente, durante o descarte, manuseio ou tratamentos inadequados desses resíduos. Entre os elementos de maior relevância encontram-se Pb, Cd, As e Br (este último associado principalmente aos BFRs.

Estudo de Ghosh *et al.,* (2015) aponta que o Pb é um dos metais mais presentes nas PCIs, sobretudo na forma de soldas Pb/Sn, que podem corresponder a 2–5% da massa total de uma placa, dependendo da tecnologia empregada. Esse metal, quando ingerido ou inalado a longo prazo, pode ocasionar danos neurológicos, prejuízos cognitivos, alterações comportamentais e comprometimentos hepáticos e renais. Além disso, resíduos de Pb são comumente encontrados tanto em poeiras de reciclagem quanto em cinzas oriundas de queima de sucata eletrônica, com concentrações podendo ultrapassar 11% em oficinas informais de desmanche (Bi *et al.,* 2010).

Na pesquisa de Hino *et al*., (2009), PCIs de computadores atingiram 2,96%, na de Hubau *et al*., (2019) entre 1,08 a 1,24%, na de Cestari *et al.,* (2015) para PCIs de televisores de 1,2%, nas PCIs de celulares entre 1,35 a 1,55% e na de Morf *et al.*, (2007) 0,19%.

Na pesquisa, o Pb variou na PCIa de 1,7303% (F1) a 2,3420% (F3), na PCIb de 2,0065% (F2) a 2,4770% (F1), na PCIc de 1,4625% (F4) a 2,5893% (F1) e na PCId de 2,0527% (F1) a 2,5050% (F3).

O Cd, embora presente em menores proporções nas PCIs, é igualmente preocupante. Estudos apontam sua ocorrência em concentrações que podem atingir 0,018% segundo Morf *et al*., (2007), 0,001% e menores que o limite de detecção de acordo com Cestari *et al.,* (2015) e 0,003% segundo Wienold *et al*., (2011). Esse metal interfere diretamente na estrutura de proteínas e enzimas ao se ligar a grupos sulfidrilas, carboxilas e imidazol, compromete a atividade de macromoléculas biológicas e está associado a danos renais, pulmonares e à indução de câncer de próstata (Ghosh *et al.,* 2015).

A literatura também evidencia que o Cd é altamente móvel em ambientes aquosos, sobretudo em condições de acidez, o que incrementa o risco de lixiviação quando placas são descartadas inadequadamente em aterros. Ensaios de lixiviação realizados no Brasil reforçam essa preocupação, mostrando que efluentes de PCIs podem exceder limites normativos para resíduos perigosos, exigindo tratamento e descarte controlado (JESUS, 2015). Na pesquisa, o Cd ficou abaixo do limite de quantificação do equipamento.

O As, frequentemente presente em pequenas quantidades em cabos, baterias e placas de circuito, é classificado como carcinogênico e pode causar alterações dermatológicas, respiratórias e hematológicas. Embora encontrado em menores teores que Pb, seu potencial tóxico exige atenção, especialmente porque muitos processos térmicos empregados informalmente na reciclagem podem volatilizá-lo e dispersá-lo no ambiente (GERBASE e OLIVEIRA, 2012).

Na pesquisa, o As variou na PCIa entre 0,1150% (F1) a 0,2622% (F4), na PCIb 0,0700% (F4) a 0,1997% (F2), na PCIc de 0,0495% (F4) a 0,2477% (F4) e na PCId de 0,1173% (F3) a 0,2250% (F2). Não foram encontradas pesquisas para realizar a comparação de teores.

Quanto ao Br, sua relevância não se dá apenas pela presença do elemento químico em si, mas principalmente pela utilização intensa de BFRs, empregados em quase 96% das PCIs. A concentração típica de Br em PCIs pode variar entre 0,3 e 1% (GUO, GUO e XU, 2009).

Durante a queima ou pirólise de PCIs, esses compostos podem gerar dioxinas e furanos bromados (PBDD/Fs), altamente tóxicos, mutagênicos e carcinogênicos. Estudos mostram que até 72% do Br total em PCIs pode ser convertido em gases halogenados como HBr durante a pirólise, elevando drasticamente o potencial poluidor dos processos de reciclagem não controlados (GUO, GUO e XU, 2009).

No ICP-OES o Br não foi analisado, mas o elemento foi detectado na técnica de MEV/EDS. Autores citam a concentração de 5,07% (HINO *et al.,* 2009) e 0,55% (MORF *et al*., 2007; GUO *et al.,* 2009).

Em conjunto, a presença desses elementos tóxicos implica riscos substanciais quando PCIs são submetidas a processos inadequados como queima, descarte a céu aberto, moagem sem controle ou lixiviação não monitorada. A exposição ocupacional em ambientes de reciclagem informal também tem sido documentada como fator crítico. Concentrações aéreas de metais como Pb, Cd, Zn e Cu em oficinas de desmanche na China chegam a ser 10 a 12 vezes maiores que as encontradas no ambiente urbano próximo, demonstrando a magnitude da contaminação atmosférica gerada nesses locais (BI *et al.,* 2010).

Complementarmente, elementos como Al, Zn, Fe e Ni também foram detectados em teores significativos, contribuindo para o valor metalúrgico total das PCIs. Esses metais possuem aplicações consolidadas em rotas de reciclagem pirometalúrgica e hidrometalúrgica, especialmente em cenários de recuperação multimetálica (SANT'ANA *et al*., 2013; CALDAS *et al*., 2019).

O teor de chumbo (Pb), variando entre 1,45% e 2,56%, revela o uso persistente de soldas à base de Sn-Pb, apesar das restrições ambientais. Esse padrão é compatível com resultados de Jesus (2015), que reportou níveis acima dos limites da ABNT NBR 10004 para PCIs de celulares, reforçando a necessidade de reciclagem ambientalmente adequada, conforme preconizado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010) e pela Convenção de Basileia.

Toda essa discussão é reforçada pelo conjunto de dados presentes no quadro comparativo compilado (Tabela 22), que reúne as faixas de concentração de metais em PCIs de tablets, computadores e celulares. Esse quadro evidencia que as PCIs de urnas eletrônicas apresentam teores de Ag dentro das faixas típicas da literatura, valores de Cu dentro do intervalo médio-alto e níveis de Au e Sn superiores aos comumente reportados.

O corpo de evidências sugerido pelas pesquisas analisadas demonstra a relevância das PCIs como "minas urbanas" de alto valor, conceito amplamente defendido por autores como Baker e Willard (2007), Hagelüken e Corti (2010) e Zeng *et al.* (2018). Segundo esses autores, a recuperação de metais a partir de PCIs pode ser até 40 vezes mais eficiente do que a mineração primária, reduzindo impactos ambientais significativos e colaborando para estratégias de economia circular.

A literatura também aponta que os REEEs apresentam composição complexa, contendo 40–50% de metais, 15–30% de plásticos — frequentemente contendo retardantes de chama

bromados (Kiddee, Naidu e Wong, 2013) — além de 10–15% de vidro e 3–7% de componentes tóxicos (CUCCHIELLA *et al*., 2015; FORTI *et al*., 2020). As PCIs se destacam como fração de maior valor agregado dentro desse conjunto, conforme apontado por Baker e Willard (2007), devido à presença simultânea de metais preciosos, metais básicos e substâncias tóxicas.

As PCIs de UEs representam um fluxo relevante de REEEs com potencial econômico considerável, mas cuja composição também exige rigorosas medidas de gestão ambiental. O conjunto de evidências discutido neste capítulo confirma a pertinência técnica da mineração urbana aplicada a esse tipo de resíduo e reforça a importância de rotas de reciclagem adaptadas às condições e especificidades dos metais presentes nessas placas.

Tabela 22 – Resultados provindos das placas de circuito impresso de urnas eletrônicas por Espectrometria de Emissão óptica com Plasma Indutivamente Acoplado

Elemento	PCIA								PCI (Revisão da literatura)	
	Fração granulométrica (mm)									
	F1		F2		F3		F4		Detecção mínima (%)	Detecção máxima (%)
	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)		
Prata	0,1790	0,0042	0,1595	0,0109	0,1130	0,0505	0,1171	0,0229	0,01	0,28
Platina	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	Dados não encontrados	
Ouro	0,0155	0,0035	0,0170	0,0042	0,0105	0,0064	0,0188	0,0087	0,002	0,10
Alumínio	6,5650	1,2271	9,7570	0,5810	12,8350	1,2049	18,2207	1,5838	0,06	7,50
Cobalto	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	-	0,01
Cromo	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	0,02	2,16
Cobre	5,5400	1,2634	26,7697	0,7234	36,9987	3,1385	27,3370	3,5874	14,28	70,77
Ferro	20,2090	2,6092	7,9443	0,6050	4,2105	0,2171	13,7685	8,8494	0,02	17,42
Magnésio	0,1830	0,0733	0,1647	0,0206	0,2617	0,0180	0,1707	0,0216	0,04	0,11
Manganês	1,7490	0,2927	0,7355	0,0827	0,4270	0,1513	0,0953	0,0251	-	0,005
Níquel	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	0,08	7,89
Chumbo	1,7303	0,4212	2,0820	0,4054	2,3420	0,0835	1,8452	0,3281	0,01	1,63
Zinco	3,2130	1,0483	3,1280	0,0442	1,3255	0,2100	1,895	0,2213	0,02	6,58
Arsênio	0,1260	0,0057	0,1150	0,0198	0,1680	0,0594	0,2622	0,0775	Dados não encontrados	
Estanho	4,6327	0,8992	4,3373	0,1767	3,4297	0,4459	3,3178	0,4233	1,07	8,83
Cádmio	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	-	0,017

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação; PCI: Placa de Circuito Impresso.

Tabela 22 – Resultados provindos das placas de circuito impresso de urnas eletrônicas por Espectrometria de Emissão óptica com Plasma Indutivamente Acoplado

Elemento	PCIB								PCI (Revisão da literatura)	
	Fração granulométrica (mm)									
	F1		F2		F3		F4		Detecção mínima (%)	Detecção máxima (%)
	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)		
Prata	0,1373	0,0265	0,1230	0,0919	0,1200	0,0485	0,1343	0,0670	0,01	0,28
Platina	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	Dados não encontrados	
Ouro	0,0237	0,0029	0,0545	0,0403	0,0207	0,0023	0,0135	0,0034	0,01	0,13
Alumínio	3,4007	0,0662	3,5187	0,1904	5,9700	0,0993	3,1697	0,0797	0,06	7,50
Cobalto	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	-	0,01
Cromo	0,0897	0,0055	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	0,02	2,16
Cobre	11,2585	0,0148	42,3613	2,0130	44,2597	6,1207	48,3275	3,7266	14,28	70,77
Ferro	6,8753	0,2524	2,5707	0,1158	2,9045	0,1704	8,1086	0,9108	0,02	17,42
Magnésio	0,3257	0,0159	0,2353	0,0025	0,2253	0,0360	0,1289	0,0290	0,04	0,11
Manganês	0,6253	0,0021	0,0513	0,0125	LOD	LOD	LOD	LOD	-	0,005
Níquel	0,1920	0,0159	0,4927	0,1515	0,2325	0,0431	0,2722	0,0220	0,08	7,89
Chumbo	2,4770	0,0085	2,0065	0,0841	2,3825	0,0233	2,1547	0,1257	0,01	1,63
Zinco	0,7193	0,0420	1,3195	0,2227	1,4760	0,6505	1,5295	0,2454	0,02	6,58
Arsênio	0,1803	0,0583	0,1997	0,0835	0,0900	0,0042	0,0700	0,0400	Dados não encontrados	
Estanho	4,6340	0,1372	4,2443	0,6393	4,4350	0,2829	5,2721	0,4839	1,07	8,83
Cádmio	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	-	0,017

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação; PCI: Placa de Circuito Impresso.

Tabela 22 – Resultados provindos das placas de circuito impresso de urnas eletrônicas por Espectrometria de Emissão óptica com Plasma Indutivamente Acoplado

Elemento	**PCIC**								**PCI (Revisão da literatura)**	
	Fração granulométrica (mm)									
	F1		F2		F3		F4		Detecção mínima (%)	Detecção máxima (%)
	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)		
Prata	0,1807	0,0293	0,1703	0,0662	0,1070	0,0295	0,0742	0,0031	0,01	0,28
Platina	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	Dados não encontrados	
Ouro	0,0250	0,0057	0,0170	0,0099	0,0165	0,0021	0,0135	0,0007	0,01	0,13
Alumínio	3,0670	0,0170	2,2457	0,2434	2,1705	0,0233	3,9754	0,6771	0,06	7,50
Cobalto	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	-	0,01
Cromo	0,0237	0,0110	0,7690	0,0679	LOD	LOD	LOD	LOD	0,02	2,16
Cobre	6,4850	0,2659	10,2423	0,6315	15,4225	0,9822	26,9299	2,2695	14,28	70,77
Ferro	3,3417	0,5183	4,2565	0,1930	0,8085	0,2807	3,2999	3,7458	0,02	17,42
Lítio	1,0793	0,0273	1,1080	0,0355	1,0040	0,0857	0,6336	0,0454	0,04	0,11
Magnésio	0,1867	0,0520	0,1670	0,0366	0,2540	0,0042	0,0906	0,0054	-	0,005
Manganês	0,0403	0,0178	0,0240	0,0042	LOD	LOD	LOD	LOD	0,08	7,89
Chumbo	2,5893	0,3599	2,0175	0,0488	2,3440	0,0750	1,4625	0,1931	0,01	1,63
Zinco	1,3860	0,2980	0,6485	0,0926	0,8235	0,0106	1,8963	0,0452	0,02	6,58
Arsênio	0,1740	0,0438	0,1950	0,0170	0,2477	0,0730	0,0495	0,0016	Dados não encontrados	
Estanho	4,9960	1,0083	3,3677	1,3234	3,6580	1,1447	2,053	0,4872	1,07	8,83
Cádmio	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	-	0,017

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação; PCI: Placa de Circuito Impresso.

Tabela 22 – Resultados provindos das placas de circuito impresso de urnas eletrônicas por Espectrometria de Emissão óptica com Plasma Indutivamente Acoplado

Elemento	**PCID**								**PCI (Revisão da literatura)**	
	Fração granulométrica (mm)									
	F1		F2		F3		F4		Detecção mínima (%)	Detecção máxima (%)
	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)		
Prata	0,2257	0,0791	0,1703	0,0126	0,1530	0,0365	0,2013	0,0957	0,01	0,28
Platina	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	Dados não encontrados	
Ouro	0,0150	0,0042	0,0160	0,0014	0,0080	0,0014	0,0077	0,0012	0,01	0,13
Alumínio	4,6363	0,3919	3,6940	0,7525	4,9080	0,5396	8,5034	2,8748	0,06	7,50
Cobalto	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	-	0,01
Cromo	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	0,02	2,16
Cobre	2,8180	0,1471	9,7855	0,8945	20,5915	3,0992	13,6398	6,2951	14,28	70,77
Ferro	5,6983	1,0114	3,1323	1,0072	2,8160	0,6166	2,5473	0,5514	0,02	17,42
Magnésio	0,3273	0,0412	0,2133	0,0621	0,2037	0,0790	0,2825	0,0992	0,04	0,11
Manganês	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	-	0,005
Níquel	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	0,08	7,89
Chumbo	2,0527	0,2952	2,3973	0,2041	2,5050	0,5320	2,1460	0,1968	0,01	1,63
Zinco	0,7713	0,1645	0,4273	0,1995	2,5015	0,6017	0,7893	0,5811	0,02	6,58
Arsênio	0,2120	0,0442	0,2250	0,0144	0,1173	0,0539	0,1575	0,0832	Dados não encontrados	
Estanho	6,5123	0,5328	3,5400	0,1146	5,6877	0,3611	4,2754	0,4351	1,07	8,83
Cádmio	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	-	0,017

Legenda: F1: < 0,25 mm; F2: 0,25 < n < 0,50 mm; F3: 0,50 < n < 1,00 mm; F4: > 1,00 mm; DP: Desvio Padrão; LOD: Limite de quantificação; PCI: Placa de Circuito Impresso.

4.7 Comparativo entre a Mineração Primária e a Mineração Secundária das Placas de Circuito Impresso de Urnas Eletrônicas

Os dados apresentados na Tabela 23 evidenciaram diferenças significativas entre os teores metálicos característicos da mineração primária, baseada na extração direta de jazidas naturais, e aqueles observados na mineração secundária, a partir da recuperação de metais contidos em PCIs. De modo geral, todos os elementos investigados (Au, Ag, Cu e Sn) apresentaram enriquecimento nas PCIs quando comparados às faixas típicas de teores reportadas para depósitos minerais convencionais.

O Au destacou-se com um teor equivalente de 142,5 g/t, valor que supera em aproximadamente 7 a 285 vezes os teores usualmente encontrados na mineração primária, caracterizando um enriquecimento de até duas ordens de magnitude. A Ag apresentou teor de 1.043,05 g/t, correspondente a um enriquecimento da ordem de 1 a 49 vezes em relação às jazidas naturais. O Cu, com 203.180,1 g/t, mostrou enriquecimento variando entre cerca de 10 e 47 vezes, enquanto o Sn, com 17.568,4 g/t, apresentou valores aproximadamente 3 a 6 vezes superiores aos teores típicos da mineração primária.

Esses resultados confirmaram que as PCIs de UEs constituem um depósito urbano enriquecido, especialmente para o Au, e reforçam o potencial da mineração secundária como fonte complementar e estratégica de recursos metálicos, particularmente no contexto da economia circular e da valorização de resíduos eletroeletrônicos.

Tabela 23 – Quadro comparativo entre os teores dos metais nas minerações primária e secundária, com o fator de enriquecimento da mineração secundária

Elemento	Faixa de teores típicos em minérios (g/t)	Autor/Literatura	PCIs de UEs (g) (soma das 4 placas)	PCIs de UEs (g/t) (soma das 4 placas)	Relação (vezes maior)
Au	0,5 –20,00	HUSTRULID e KUTCHA, 2013	0,142475	142,475	7 a 285
Ag	21,4 – 900	NEXA RESOURCES, 2024b; METALLIC MINERALS CORP, 2025	1,04305	1.043,050	1,2 a 48,7
Cu	4.300 – 20.800	NEXA RESOURCES, 2024b; BHP GROUP, 2024	203,1801	203.180,100	9,8 a 47,3
Sn	3.000 – 7.000	CPRM, 2010; DNPM, 2013	17,5684	17.568,400	2,5 a 5,9

Legenda: Au: ouro; Ag: prata, Cu: cobre; Sn: estanho; PCI: Placas de Circuito Impresso; UE: urnas eletrônicas.

4.8 Valoração econômica dos elementos de interesse contidos nas placas de circuito impresso de urnas eletrônicas

Para o cálculo de potencial de valoração econômica das PCIs foram utilizadas as massas totais de cada PCIs obtidas na etapa de desmonte manual e pesagem de cada componente da UE (Tabela 24).

Tabela 24 – Massa total de cada Placa de Circuito Impresso (a, b, c e d) provindas de uma urna eletrônica

PCI	Massa total de cada PCI (g)
a	0,462
b	0,325
c	0,121
d	0,063

Legenda: Placa de Circuito Impresso.

Ao todo, foram produzidas **1.489.115** UEs, entre os anos de 1996 e 2022. Deste quantitativo, **568.591** urnas já foram descartadas, **194.665** estavam em processo de descarte, **152.835** foram descontinuadas e **573.024** em uso (TSE, 2024d). A Tabela 25 apresenta de forma resumida, o somatório das quatro frações com classificação granulométrica (F1-F4).

Tabela 25 – Teores dos metais Au, Ag, Cu e Sn nas frações granulométricas F1 a F4 das PCIs (A–D), obtidos por ICP-OES e expressos em gramas (Continuação...)

Elemento	Massa total da amostra (g)	Class. gran. (mm)	Resultado ICP-OES (F1-F4) em g
		PCIa	
Total de Au	384	F1 a F4	0,059597
Total de Ag	384	F1 a F4	0,540360
Total de Cu	384	F1 a F4	90,1184
Total de Sn	384	F1 a F4	0,955317
Elemento		PCIb	
	Massa total da amostra (g)	Class. gran. (mm)	Resultado ICP-OES (F1-F4) em g
Total de Au	246,20	F1 a F4	0,06274
Total de Ag	246,20	F1 a F4	0,32035
Total de Cu	246,20	F1 a F4	89,506
Total de Sn	246,20	F1 a F4	11,671
Elemento		PCIc	
	Massa total da amostra (g)	Class. gran. (mm)	Resultado ICP-OES (F1-F4) em g
Total de Au	93,60	F1 a F4	0,01510
Total de Ag	93,60	F1 a F4	0,10039
Total de Cu	93,60	F1 a F4	18,4739
Total de Sn	93,60	F1 a F4	2,7451

Tabela 25 – Teores dos metais Au, Ag, Cu e Sn nas frações granulométricas F1 a F4 das PCIs (A–D), obtidos por ICP-OES e expressos em gramas (Conclusão)

	PCId		
Elemento	Massa total da amostra (g)	Class. gran. (mm)	Resultado ICP-OES (F1-F4) em g
Total de Au	44,00	F1 a F4	0,005038
Total de Ag	44,00	F1 a F4	0,08195
Total de Cu	44,00	F1 a F4	5,0818
Total de Sn	44,00	F1 a F4	2,1970

Legenda: Class. Gran.: Classificação Granulométrica; Au: Ouro, Ag: Prata, Cu: Cobre, Sn: Estanho. ICP-OES: Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado.

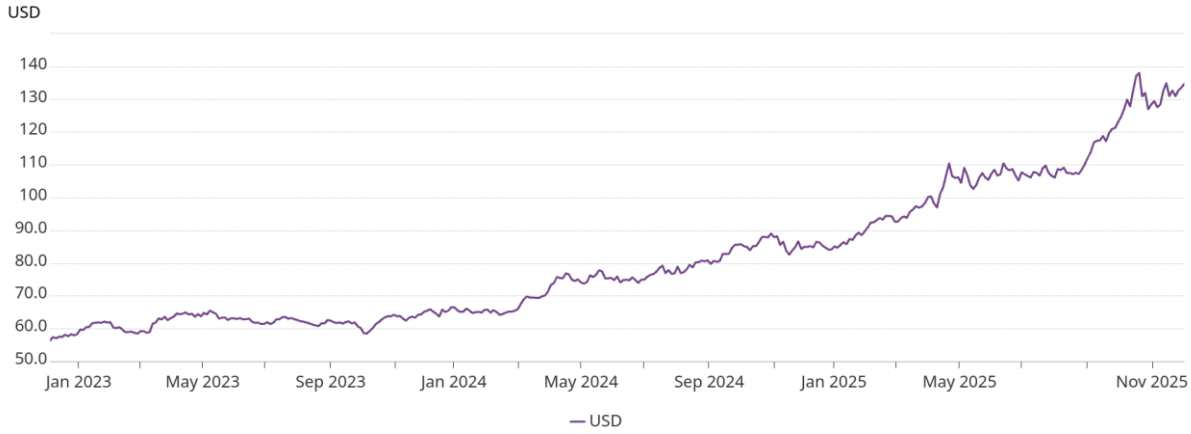
Entre 22 de setembro de 2025 e 21 de novembro de 2025, a média do preço do Au foi de 129,09 US$/g (BULLION RATES, 2025a). Nesse mesmo período, o preço médio da Ag foi de 1,57 US$/g (BULLION RATES, 2025b). A média do preço do Cu entre setembro e outubro de 2025, foi de 0,010 US$/g e para o Sn de 0,035 US$/g (LONDON METAL EXCHANGE, 2025) (Tabela 26).

Visto que a cotação do Au tem um peso muito maior que a cotação de outros metais, torna-se importante levar em conta sua variabilidade ao longo de um período mais extenso. A Figura 139 mostra a variação da cotação de Au em um período de 3 anos (entre 29/11/2022 e 27/11/2025 (WORLD GOLD COUNCIL, 2025). É possível notar que existe uma tendência clara de alta no preço, com cotações variando em uma faixa que vai desde aproximadamente 52 U$/g (setembro de 2022) até um pico de 140,07 U$/g em outubro de 2025. Assim, a fim de categorizar diferentes cenários, dividiu-se o intervalo considerado em três diferentes faixas:

(1) Cotação baixa: preços na faixa de 60 – 75 U$/g, com valor representativo de 70 U$/g;
(2) Cotação média: preços na faixa de 75 – 100 U$/g, com valor representativo de 90 U$/g;
(3) Cotação alta: preços na faixa de 100 – 135 U$/g, com valor representativo de 120 U$/g.

Na discussão que segue, usou-se o valor representativo do cenário de cotação média para as estimativas de valores contidos em Au nas Tabelas 27 – 32, enquanto estimativas que utilizem os outros cenários extremos são discutidas ao longo do texto.

Figura 139 - Variação da cotação de ouro no período entre 29/11/2022 e 27/11/2025



Fonte: WORLD GOLD COUNCIL, 2025.

Tabela 26 – Preço médio dos elementos de interesse

Elemento	Preço médio (US$/g)
Au	90,00
Ag	1,57
Cu	0,010
Sn	0,035

Legenda: Au: Ouro, Ag: Prata, Cu: Cobre, Sn: Estanho. Fonte: BULLION RATES (2025a; 2025b). LONDON METAL EXCHANGE (2025).

4.8.1 Cálculo de potencial econômico de cada elemento de interesse em cada Placa de Circuito Impresso

Com a aplicação da fórmula (massa de cada metal (g) de cada PCI multiplicado pela cotação do metal (US$/g) tem-se a cotação do elemento da respectiva placa (US$/g). Somando os valores encontrados para as quantidades de metais, tem-se o valor total de uma UE, que, multiplicado pelo número total de urnas produzidas (1.489.115 unidades produzidas no Brasil entre 1996 e 2022), permite estimar o valor total contido em metais de interesse nas PCIs de urnas eletrônicas (Tabela 27).

Tabela 27 – Potencial de valoração econômica dos quatro metais de interesse (Au, Ag, Cu e Sn) de cada Placa de Circuito Impresso com classificação granulométrica (F1-F4)

PCI	Au (total F1-F4) em $	Ag (total F1-F4) em $	Cu (total F1-F4) em $	Sn (total F1-F4) em $	US$/PCI	Total de UEs (US$)
a	5,3637300	0,8483652	0,9011840	0,0334361	7,1467153	10.642.280,95
b	5,6466000	0,5029495	0,8950600	0,4084850	7,4530945	11.098.514,82
c	1,3590000	0,1576123	0,1847390	0,0960785	1,7974298	2.676.579,677
d	0,4534200	0,1286615	0,0508180	0,0768950	0,7097945	1.056.965,637
∑	-	-	-	-	∑	**25.474.341,08**

Legenda: PCI: Placa de Circuito Impresso; Au: ouro; Ag: prata. Cu: cobre e Sn: estanho; US$: Dólar Americano.

É possível notar que as PCIs a e b apresentam os maiores potenciais econômicos individuais, com US$ 7,14 e US$ 7,45 por placa, respectivamente, enquanto as PCIs c e d possuem valores significativamente menores, refletindo teores reduzidos dos metais de interesse.

O Au é, de longe, o metal que mais contribuiu para a valoração total em todas as placas, sendo responsável por aproximadamente 80–85% do valor individual de cada PCI. Considerando-se os cenários de baixa e alta cotação deste metal, conforme definido na seção anterior (4.8), obtêm-se valores globais dos quatro metais contidos em PCIs de urnas variando entre US$ 21.231.107,89 (~ US$ 21,2 milhões) e US$ 31.839.190,87 (~ US$ 31,8 milhões).

De forma crítica, os resultados mostrados na Tabela 27 revelam que, embora todas as PCIs contenham os quatro metais de interesse (Au, Ag, Cu e Sn), a distribuição econômica é altamente desigual, refletindo diferenças profundas no design eletrônico e na densidade metalífera das placas. A preponderância absoluta do Au como principal componente de valor enfatiza que a mineração secundária de PCIs depende essencialmente da recuperação de Au, enquanto Ag e Cu exercem papéis complementares e o Sn assume relevância marginal.

É importante notar que os valores calculados correspondem ao valor teórico máximo (valor potencial) de recuperação dos metais contidos nas UEs, isto é, considerando a recuperação integral destes metais em todas as urnas já produzidas. Um valor mais realista exige levar em conta fatores como a eficiência da logística reversa e o rendimento metalúrgico na extração individual de cada metal das PCIs, características estas que fogem ao escopo do presente estudo.

A Tabela 28 apresenta a estimativa de valoração econômica do conjunto total de urnas eletrônicas produzidas pelo TSE (1.489.115 unidades) a partir das concentrações dos metais Au, Ag, Cu e Sn presentes nas quatro PCIs que compõem cada equipamento. A análise integra, portanto, o potencial máximo de recuperação metalífera considerando todo o parque de urnas já fabricadas, independentemente de seu estado (em uso, descartadas, descontinuadas ou em processo de descarte).

Os resultados confirmam que o Au é o principal responsável pelo valor agregado das urnas. A massa equivalente total por urna estimada em 0,142475 g resulta, quando multiplicada pelo número total de equipamentos, em 212.161,66 g de Au (212,16 kg), o que, a partir do preço médio considerado (90 US$/g), corresponde a US$ 19.094.549,36. Isso representa cerca de 75% do valor econômico total associado às PCIs, evidenciando a forte dependência da valoração global sobre esse metal nobre. Considerando-se os cenários de baixa e alta cotação de ouro,

conforme definidos na seção 4.8, os valores totais contidos em ouro apenas podem variar entre cerca de US$ 14,85 milhões e US$ 25,46 milhões.

O Cu apresenta a maior massa recuperável entre os quatro metais, de 203,1801 g por urna, totalizando 302.558.534,6 g (302,55 toneladas métricas) para todas as urnas. No entanto, devido ao seu relativo baixo valor de mercado (US$ 0,01/g), o impacto econômico é comparativamente reduzido, resultando em cerca de US$ 3,02 milhões. Apesar disso, o Cu ainda se destaca como o segundo maior contribuinte para o valor total, superando a Ag quando comparado em massa absoluta. Ainda, a configuração da sua distribuição nas placas (majoritariamente na forma de fios elétricos) torna sua recuperação consideravelmente mais simples e barata do que os outros metais, os quais necessitam de métodos químicos intensivos de extração.

A Ag e o Sn aparecem como os elementos com menor relevância financeira, cada qual somando, respectivamente, 1,55 e 26,16 toneladas métricas contidas no total de PCIs de urnas, e somando, conjuntamente, cerca de US$ 3,35 milhões. Embora sua participação seja relativamente baixa, estes metais ainda representam uma parcela significativa do valor contido no universo de urnas eletrônicas.

Tabela 28 – Estimativa do potencial de valoração do total de urnas eletrônicas produzidas, descartadas, em processo de descarte, descontinuadas e em uso.

Elemento	Total por urna (g)	Para 1.489.115 urnas	Preço médio (U$/g)	Total (US$)
Au	0,142475	212161,6596	90	$19.094.549,36
Ag	1,04305	1553221,401	1,57	$2.438.557,60
Cu	203,1801	302558534,6	0,01	$3.025.585,35
Sn	17,5684	26161393,28	0,035	$915.648,76
			∑	**$25.474.341,08**

Legenda: PCI: Placa de Circuito Impresso; Au: ouro; Ag: prata. Cu: cobre e Sn: estanho; US$: Dólar Americano.

As Tabela 29, 30, 31 e 32 exibem os potenciais econômicos associados às urnas descartadas, em processo de descarte, descontinuadas e em uso, respectivamente. As urnas descartadas correspondem a 38,18% (US$ 9,7 milhões) do valor global contido em metais nas PCIs de urnas eletrônicas, o que corresponde a praticamente o mesmo valor agregado às urnas ainda em uso (US$ 9,8 milhões). Em seguida, têm-se as urnas em processo de descarte (cerca de 13% do valor total) e as urnas descontinuadas (10,26% do total). O grupo de urnas em processo de descarte representa uma parcela importante quando se considera o fluxo contínuo de descontinuação do uso das urnas, indicando que a recuperação de metais poderia integrar planos permanentes de logística reversa.

Tabela 29 – Estimativa do potencial de valoração do total de urnas eletrônicas descartadas.

Elemento	Total por urna (g)	Para 568 591 urnas descartadas	Preço médio (U$/g)	Total (U$)
Au	0,142475	81010,00273	90	$7.290.900,246
Ag	1,04305	593068,8426	1,57	$931.118,0829
Cu	203,1801	115526376,2	0,01	$1.155.263,762
Sn	17,5684	9989234,124	0,035	$349.623,1943
			∑	**$9.726.905,285**

Legenda: PCI: Placa de Circuito Impresso; Au: ouro; Ag: prata. Cu: cobre e Sn: estanho; US$: Dólar Americano.

Tabela 30 – Estimativa do potencial de valoração do total de urnas em processo de descarte.

Elemento	Total por urna (g)	Para 194 665 urnas em processo de descarte	Preço médio (U$/g)	Total (U$)
Au	0,142475	27734,89588	90	$2.496.140,629
Ag	1,04305	203045,3283	1,57	$318.781,1654
Cu	203,1801	39552054,17	0,01	$395.520,5417
Sn	17,5684	3419952,586	0,035	$119.698,3405
			∑	**$3.330.140,677**

Legenda: PCI: Placa de Circuito Impresso; Au: ouro; Ag: prata. Cu: cobre e Sn: estanho; US$: Dólar Americano.

Tabela 31 – Estimativa do potencial de valoração do total de urnas descontinuadas.

Elemento	Total por urna (g)	Para 152 835 urnas descontinuadas	Preço médio (U$/g)	Total (U$)
Au	0,142475	21775,16663	90	$1.959.764,997
Ag	1,04305	159414,5468	1,57	$250.280,8385
Cu	203,1801	31053030,58	0,01	$310.530,3058
Sn	17,5684	2685066,414	0,035	$93.977,32449
			∑	**$2.614.553,465**

Legenda: PCI: Placa de Circuito Impresso; Au: ouro; Ag: prata. Cu: cobre e Sn: estanho; US$: Dólar Americano.

Tabela 32 – Estimativa do potencial de valoração do total de urnas ainda em uso.

	Total por urna (g)	Para 573 024 urnas em uso	Preço médio (U$/g)	Total (U$)
Au	0,142475	81641,5944	90	$7.347.743,496
Ag	1,04305	597692,6832	1,57	$938.377,5126
Cu	203,1801	116427073,6	0,01	$1.164.270,736
Sn	17,5684	10067114,84	0,035	$352.349,0194
			∑	**$9.802.740,764**

Legenda: PCI: Placa de Circuito Impresso; Au: ouro; Ag: prata. Cu: cobre e Sn: estanho; US$: Dólar Americano.

Em suma, estes resultados mostram que a mineração secundária de PCIs de urnas eletrônicas possui viabilidade econômica expressiva, particularmente quando escalada para o nível nacional. A Tabela 33 sumariza o potencial contido nas PCIs de urnas eletrônicas em moeda nacional, considerando os diferentes cenários para cotação de ouro e uma cotação de referência do dólar igual a US$ 1,00 = R$ 5,50. O somatório dos potenciais de valoração apresentados evidencia um potencial que pode chegar a R$ 140.108.871,05 (podendo

ultrapassar este valor, conforme variação da cotação de metais, em especial o ouro), reforçando que políticas de recuperação, logística reversa e reciclagem estruturada podem gerar receitas significativas, além dos benefícios ambientais associados.

Tabela 33 – Sumário das estimativas de valor contido nas diferentes categorias de UEs, em diferentes cenários de precificação de ouro.

Tipo de UEs	**Valor contido total (R$)**		
	Cotação baixa Au	Cotação média Au	Cotação alta Au
Descartadas	R$ 31.188.851,05	R$ 40.099.951,35	R$ 53.497.979,07
Em processo de descarte	R$ 10.677.934,91	R$ 13.728.773,46	R$ 18.315.773,72
Descontinuadas	R$ 8.383.439,15	R$ 10.778.707,48	R$ 14.380.044,06
Em uso	R$ 31.432.013,84	R$ 40.412.589,23	R$ 53.915.074,2
Total	**R$ 81.682.238,96**	**R$ 105.020.021,52**	**R$ 140.108.871,05**

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo central verificar o potencial de agregação de valor à cadeia de reciclagem das urnas eletrônicas brasileiras por meio da caracterização física, química e econômica das PCIs que as compõem. A pesquisa contemplou um conjunto articulado de etapas experimentais — cominuição, classificação granulométrica, análises qualitativas (MEV–EDS e FRX), análises quantitativas (ICP-OES) e valoração econômica, permitindo compreender em profundidade o comportamento metalífero das PCIs e a viabilidade da mineração secundária aplicada a este resíduo estratégico.

Os resultados demonstraram que as PCIs das UEs apresentaram teores expressivos de Au, Ag, Cu e Sn quando comparadas às faixas típicas da mineração primária. O Au alcançou 142,475 g/t, correspondendo a um enriquecimento de aproximadamente 7 a 285 vezes em relação às jazidas naturais. A Ag apresentou teor de 1.043,05 g/t, com enriquecimento variando entre cerca de 1 e 49 vezes, enquanto o Cu atingiu 203.180,1 g/t, valor aproximadamente 10 a 47 vezes superior aos teores convencionais da mineração primária. O Sn, por sua vez, registrou 17.568,4 g/t, representando um enriquecimento da ordem de 3 a 6 vezes.

Em relação aos objetivos específicos:

Objetivo 1 – Revisão da gestão de resíduos de UEs: a revisão da literatura permitiu estabelecer um panorama robusto da gestão e destinação das UEs no Brasil, incluindo aspectos logísticos, legais e operacionais, e evidenciou que o país não realiza recuperação interna dos metais contidos nas PCIs, que são enviadas ao exterior para processamento, desperdiçando valor econômico e tecnológico.

Objetivo 2 – Determinar composição quali-quantitativa das PCIs: as técnicas analíticas aplicadas permitiram identificar e quantificar Au, Ag, Cu e Sn com precisão, revelando diferenças metalúrgicas importantes entre as quatro PCIs (A–D). A análise granulométrica mostrou que a distribuição dos metais não é homogênea, com enriquecimento variável entre F1 e F4, implicando que a etapa de peneiramento é fundamental para a pré-concentração dos metais antes de rotas metalúrgicas.

Objetivo 3 – Comparar PCIs de UEs com PCIs de outros EEEs e mineração primária: os resultados demonstraram que as PCIs de UEs possuem teores metálicos compatíveis ou superiores aos de computadores, *smartphones* e equipamentos de telecomunicação, reforçando sua posição privilegiada dentro dos REEEs. Em comparação com a mineração tradicional, os fatores de enriquecimento confirmam o alto valor estratégico das PCIs, superando com larga margem os teores de minérios comercialmente explorados.

Objetivo 4 – Avaliação econômica do valor total recuperável: a valoração econômica foi realizada a partir dos teores obtidos por ICP-OES e dos preços médios internacionais. Os cálculos revelaram que: Au total: US$ 19.094549,36, Ag total: US$ 2.438.557,60, Cu total: US$ 3.025.585,35 e Sn total = US$ 915.648,76, resultando em um potencial econômico total de US$ 25.474.341,08, considerando uma cotação de referência do ouro de US$/g 90,00, e considerando todas as 1.489.115 urnas produzidas entre 1996 e 2022. Além disso, os cenários segmentados revelaram: urnas descartadas: US$ 9.726.905,285, urnas em processo de descarte: US$ 3.330.140,677, urnas descontinuadas: US$ 2.614.553,465 e urnas ainda em uso: US$ 9.802.740,764.

Os resultados integrados desta tese demonstram de forma inequívoca que as PCIs das UEs brasileiras constituem um depósito urbano de altíssima concentração metálica, significativamente superior à mineração primária em todos os metais avaliados. A redução de tamanho e a classificação granulométrica se confirmaram como etapas essenciais para a liberação dos metais.

A consolidação da mineração secundária aplicada às PCIs das UEs apresenta três pilares centrais: 1. Viabilidade técnica: a caracterização físico-química demonstrou que a recuperação de Au, Ag, Cu e Sn é tecnicamente factível e favorecida pela fragmentação e pelas características estruturais das PCIs; 2. Viabilidade econômica: os valores calculados demonstram uma oportunidade concreta: mais de US$ 25 milhões em metais em potencial de recuperação. 3. Relevância ambiental e estratégica: a mineração secundária reduz a dependência externa, diminui o impacto ambiental em comparação com a mineração primária e fortalece a cadeia produtiva nacional. Além disso, por se tratar de um resíduo institucionalmente controlado, as UEs apresentam logística favorável e rastreabilidade completa.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas limitações inerentes a esta pesquisa, foram identificadas possibilidades de continuidade e aprofundamento dos estudos relacionados à valorização de placas de urnas eletrônicas, com vistas à consolidação da mineração secundária no contexto nacional.

Em primeiro lugar, destaca-se a necessidade do desenvolvimento de rotas tecnológicas específicas para a recuperação dos metais de interesse detectados nas PCIs (Au, Ag, Cu e Sn). Estudos futuros poderão ser voltados à investigação de processos hidrometalúrgicos seletivos, avaliando a eficiência de diferentes agentes lixiviantes na extração seletiva de metais nobres e base.

Paralelamente, sugere-se a realização de estudos em escala piloto, visando à estruturação de uma planta experimental de processamento de PCIs de UEs, com modelagens de custos operacionais, produtividade e retorno financeiro.

A avaliação do potencial de implantação de uma cadeia de logística reversa dedicada exclusivamente a equipamentos públicos (como as urnas eletrônicas) também é uma vertente promissora, especialmente considerando as restrições relacionadas à segurança e confidencialidade dessas tecnologias.

No campo ambiental, recomenda-se a avaliação dos resíduos gerados nos processos de digestão e separação, bem como a análise do impacto ambiental dos efluentes e da viabilidade de reaproveitamento ou tratamento adequado. Estudos de análise do ciclo de vida (ACV) das placas, comparando cenários com e sem recuperação metálica, podem contribuir para a quantificação dos benefícios ambientais da mineração urbana.

Adicionalmente, recomenda-se a caracterização e reaproveitamento de outras frações das urnas eletrônicas, como carcaças plásticas, baterias e cabos, com vistas ao aproveitamento integral do equipamento. Por fim, podem ser propostos estudos voltados à inovação tecnológica, como a aplicação de técnicas de separação automatizada por sensores (como o utilizado na presente pesquisa), utilização de inteligência artificial na predição de teores metálicos com base em imagens das placas.

REFERÊNCIAS

ABREU, M. F.; ANDRADE, J.; FALCÃO, A. A. **Protocolos de Análises químicas**. Campinas: Instituto Agronômico, 2006. 121-158 p. Disponível em: https://scholar.google.com.br/citations?view_op=view_citation&hl=pt-BR&user=lyyP4d8AAAAJ&citation_for_view=lyyP4d8AAAAJ:mVmsd5A6BfQC. Acesso em: mar. de 2022.

AFINKO SOLUÇÕES EM POLÍMEROS. **MEV**: Entenda o que faz a Microscopia Eletrônica de Varredura. 2020. Disponível em: https://afinkopolimeros.com.br/o-que-e-microscopia-eletronica-mev/. Acesso em: mar. de 2022.

AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DOS ESTADOS UNIDOS. **EPA method 3051**. Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. 14 p. 1994. Acesso em: abr. 2022.

_____. **EPA method 3050B**. Acid digestion of sediments, sludges, and soils. 12 p. 1996. Acesso em: abr. 2022.

_____. **EPA method 3052**. Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. 20 p. 1996. Acesso em: abr. 2022.

_____. **EPA method 3051A.** Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. 30p. 2007. Acesso em: abr. 2022.

_____. **EPA method 3050**. Acid extraction of sediments, sludges and soils. 14 p. 2008. Acesso em: abr. 2022.

AGILENT TECHNOLOGIES. **Agilent 5110 ICP-OES: User Manual**. 1. ed. Santa Clara, CA: Agilent Technologies Inc., 2016. Disponível em: https://www.agilent.com. Acesso em: 01 jul. 2025.

ALDEBEI, F.; DOMBI M. **Mineração do ambiente construído**: contando a história da mineração urbana. Departamento de Economia Ambiental, Faculdade de Economia e Negócios, Instituto de Economia e Economia Mundial, Universidade de Debrecen, Debrecen, Hungria. 2021. Doi: https://doi.org/10.3390/buildings11090388. Acesso em: 28 9 de ag. 2025.

ANDRADE, R. **Caracterização e classificação de Placas de Circuito Impresso de computadores como resíduos sólidos.** Campinas, São Paulo: Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica, Térmica e Fluidos). Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos, Universidade Estadual de Campinas. 2002. 143 p. Disponível em: https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/269967. Acesso em: mar de 2022.

ANGLOGOLD, 2024. **FORM 20-F**. Washington, D.C: United States Securities And Exchange Commission. 133 p. Disponível em: https://reports.anglogoldashanti.com/23/wp-content/uploads/2024/05/AGA-AR23-spreads.pdf. Acesso em: out. 2024.

ANSANELLI, S. L. de M. **Os Impactos das Exigências Ambientais Européias para Equipamentos eletrônicos sobre o Brasil**. Campinas, São Paulo. Revista Brasileira de

Inovação. Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas. 2010. Vol. 10. 129-160 p. Disponível em: https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/426997. Acesso em: abr. 2022.

AQUINO, M. L. O.; AQUINO, J. A. de. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Disponível em: https://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/544. Acesso em: 14 jun. 2025.

ARAUJO, R.; CUGULA, J.; APOLONIO, L.; OTTONI, M.; XAVIER, L. H. **Spatial distribution analysis of e-waste Voluntary Delivery Points (VDP) by Green Eletron manager in São Paulo city (SP, Brazil)**. Venice, Itália. 5th Symposium on Urban Mining and Circular Economy. 2020. Disponível em: https://www.gov.br/cetem/pt-br/pesquisa-e-desenvolvimento/reminare/central-de-conteudos/publicacoes/sum2020spatialdistributionewastevdpgreeneletronsp.pdf.Acessoem: abr. 2022.

AROSSAT, 2024. **Montagem de placas e equipamentos eletrônicos**. Disponível em: https://www.arossat.com.br/. Acesso em: out. 2024.

ASHIQ, A.; KULKARNI, J.; VITHANAGE, M. **Hydrometallurgical Recovery of Metals from E-waste**. Electronic Waste Management and Treatment Technology. 2019. 225-246 p. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128161906000108. Acesso em: fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA (ABINEE). **Panorama Econômico. Desempenho setorial**. 2020. Disponível em: http://www.abinee.org.br/programas/50anos/public/panorama/2020/. Acesso em: mar de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004a. Acesso em: fev. de 2022.

_____. **NBR 10.005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b. Acesso em: fev. de 2022.

_____. **NBR 10.006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c. Acesso em: fev. de 2022.

_____. **NBR 16.156**: Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos – Requisitos para atividade de manufatura reversa. Rio de Janeiro, 2013. Acesso em: fev. de 2022.

_____. **NBR 16156:** Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos – Requisitos para atividade de manufatura reversa. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. Acesso em: fev. de 2022.

_____. **NBR 10.007**: Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004d. Acesso em: fev. de 2022.

BERNARDES, J. **Valiosas e versáteis**: pesquisas com terras raras mostram caminho para criar cadeia produtiva no Brasil. Jornal da USP. São Paulo. SP. 2021. Disponível em: https://jornal.usp.br/ciencias/valiosas-e-versateis-pesquisas-com-terras-raras-mostram-

caminho-para-criar-cadeia-produtiva-no-brasil/#:~:text=As%20terras%20raras%20s%C3%A3o,absor%C3%A7%C3%A3o%20e%20emiss%C3%A3o%20de%20luz. Acesso em: mai. 2022.

BAKER, R. D.; WILLARD, P. L. **Economic Evaluation of Electronic Waste Recycling**: A Study of Gold Recovery from Printed Circuit Boards. Journal of Environmental Management, v. 85, n. 2, p. 1002-1009, 2007. DOI: 10.1016/j.jenvman.2007.02.014. Acesso em: mai. 2022.

BALDE, C. P.; WANG, F.; KUEHR, R.; HUISMAN, J. **The global e-waste monitor** – 2014. United Nations University, 2016. Acesso em: mai. 2022.

BALDE, C. P.; WANG, F.; KUEHR, R.; HUISMAN, J. **The Global E-waste Monitor – 2017**. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & ISWA, 2017. Acesso em: 25 de jul. 2025.

BHP GROUP LIMITED. **Form 6-K Quarterly Activities Report – Jan 2025**. Disponível em: https://www.bhp.com. Acesso em: 1 jun. 2025.

BHP GROUP LIMITED, 2024. **FORM 20-F**. Washington, D.C: United States Securities And Exchange Commission, 406 p. Disponívelem: https://www.bhp.com/-/media/documents/investors/annual-reports/2024/bhpform20f2024.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

BI, X.; SIMONEIT, B. R. T.; WANG, Z.; WANG, X.; SHENG, G.; FU, J.**The major components of particles emitted during recycling of waste printed circuit boards in a typical e-waste workshop of South China**. AtmosphericEnvironment. 2010. Vol. 44(35), 4440-4445 p. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.07.04. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231010006205#!. Acesso em: fev. 2022.

BIRLOAGA, I.; COMAN, V.; KOPACEK, B.; VEGLIÒ, F. **An advanced study on the hydrometallurgical processing of waste computer printed circuit boards to extract their valuable content of metals**. Elsevier Waste Management, v. 34, p. 2581-2586, set. 2013. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X14003833. Acesso em: out. 2024.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: Ag. 2021.

_____. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 1998. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm. Acesso em: out. 2021.

_____. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 401, de 4 de novembro de 2008**. Estabelece os limites máximos de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias comercializadas no território nacional e os critérios e padrões para o seu gerenciamento ambientalmente adequado, e dá outras providências. Brasília, 2008. Disponível em:

https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=570. Acesso em: fev. de 2022.

_____. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**,Brasília, DF, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: out. 2021.

_____. Tribunal Superior Eleitoral. **Resolução TSE nº 23.474, de 19 de abril de 2016**. Dispõe sobre a criação e competências das unidades ou núcleos socioambientais nos Tribunais Eleitorais e implantação do respectivo Plano de Logística Sustentável da Justiça Eleitoral (PLS-JE). Brasília, 2016. Disponível em: https://www.tse.jus.br/legislacao/compilada/res/2016/resolucao-no-23-474-de-19-de-abril-de-2016. Acesso em: fev. de 2022.

_____. Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020. Regulamenta o inciso VI do caput do art. 33 e o art. 56 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e complementa o Decreto nº 9.177, de 23 de outubro de 2017, quanto à implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/d10240.htm. Acesso em: ag. 2021.

_____. Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021. Institui a Política de Apoio ao Licenciamento Ambiental de Projetos de Investimentos para a Produção de Minerais Estratégicos - Pró-Minerais Estratégicos, dispõe sobre sua qualificação no âmbito do Programa de Parcerias de Investimentos da Presidência da República e institui o Comitê Interministerial de Análise de Projetos de Minerais Estratégicos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2021a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Decreto/D10657.htm. Acesso em: ag. 2021.

_____. Comitê Interministerial de Análise de Projetos de Minerais Estratégicos (CTAPME). Resolução nº 2, de 18 de junho de 2021. Define a relação de minerais estratégicos para o País, de acordo com os critérios de que trata o art. 2º do Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021b. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 2021b. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-lanca-relatorio-anual-do-comite-interministerial-de-analise-de-projetos-de-minerais-estrategicos/resolucao2CTAPME.pdf. Acesso em: fev. de 2022.

_____. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2022. Disponível em: https://legis.senado.leg.br/norma/35443315#:~:text=Regulamenta%20a%20Lei%20n%C2%BA%2012.305,Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos. Acesso em: jan. 2022.

BEZANA, T. **Desenvolvimento de procedimento analítico para a caracterização de resíduos eletrônicos**. São Carlos, São Paulo: Dissertação (Mestrado em Química) –

Universidade Federal de São Carlos, 2019. 70 p. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/11331. Acesso em: mar. 2022.

BIRLOAGA, I.; MICHELIS, I. de; FERELLA, F.; BUZATU, M.; VEGLIÒ, F. **Study on the influence of various factors in the hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards for copper and gold recovery**. Waste Management. 2013. Vol. 33, 935-941 p. Doi:10.1016/j.wasman.2013.01.003. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X13000081. Acesso em: abr. 2022.

BIZZO, W. A.; FIGUEIREDO, R. A.; ANDRADE, V. F. DE. **Characterization of Printed Circuit Boards for Metal and Energy Recovery after Milling and Mechanical** Separation. Materials, v. 7, n. 6, p. 4555–4566, 2014. Diponível em: https://www.google.com/search?q=MAO%2C+J.+et+al.+Characterization+of+Printed+Circuit+Boards+for+Metal+and+Energy+Recovery+after+Milling+and+Mechanical+Separation&rlz=1C1GCEU_pt-BRBR1158BR1158&oq=MAO%2C+J.+et+al.+Characterization+of+Printed+Circuit+Boards+for+Metal+and+Energy+Recovery+after+Milling+and+Mechanical+Separation&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOdIBBjk2ajBqN6gCCLACAfEFUqK4dkREEvnxBVKiuHZERBL5&sourceid=chrome&ie=UTF-8. Acesso em: 20 abr. 2023.

BLEICHER, L.; SASAKI, J. M. **Introdução à difração de raios-X em cristais**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, UFC, 2000. Disponível em: http://www.raiosx.ufc.br/site/wp-content/uploads/downloads/2013/01/apostila.pdf. Acesso em: 02 jun. 2024.

BULLION RATES. **Preço histórico do Ouro em Dólares Americanos (USD)**. 2025a. Disponível em: https://pt.bullion-rates.com/gold/USD/Daily-60-chart.htm. Acesso em: 23 nov. 2025.

BULLION RATES. **Preço histórico da Prata em Dólares Americanos (USD)**. 2025b. Disponível em: https://pt.bullion-rates.com/silver/USD-history.htm. Acesso em: 23 nov. 2025.

CALDAS, M. P. K.; CARVALHO, M. A. de; MORAES, V. T. de; TENÓRIO, J. A. S.; ESPINOSA, D. C. R. **Caracterização de placas de memória de computadores obsoletos visando a recuperaçao de prata por meio de nanopartículas**. Anais do Congresso Anual da ABM**,** São Paulo, v. 1, n. 72, p. 3160-3167, 2017. Anual. Contribuição técnica ao 72º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 17º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas. Disponível em: https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/caracterizacao-de-placas-de-memoria-de-computadores-obsoletos-visando-a-recuperacao-de-prata-por-meio-de-nanoparticulas. Acesso em: 01 dez. 2023.

CALDAS, M. P. K.; LOUREIRO, B. M.; SILVAS, F. P. C.; MORAES, V. T. de; TENÓRIO, J. A. S.; ESPINOSA, D. C. R. **Placas de circuito impresso: caracterização e valor agregado**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 16, n. 2, p. 203-211, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.4322/2176-1523.20191722. Acesso em: 24 out. 2024.
CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL. **Projeto DATARE**. 2021. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2486. Acesso em: mar. 2022.

CETESB, 2020a. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Éteres difenílicos polibromados (PBDEs). Disponível em: cetesb.sp.gov.br. Acesso em: out. 2024.

CETESB, 202b. **Ficha de Informação Toxicológica**: ácido clorídrico. 2020b. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2020/07/A%CC%81cido-clori%CC%81drico.pdf. Acesso em: 03 ago. 2024.

CHANCEREL, P.; ROTTER, V.S.; RUDNIK, E.; UEBERSCHAAR, M.; MARWEDE, M. NISSEN, N. F.; LANG, K.D. **Quantification of critical metals in waste electrical and electronic equipment**. Waste Management, v. 33, n. 5, p. 1214-1227, May 2013. DOI: 10.1177/0734242X13499814. Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242x13499814. Acesso em: out. 2025.

CHANG, C. Y.; WU, C. H. **Soldering Materials and Reliability**. In: LIU, W. et al. (Ed.). *Advanced Electronic Packaging*. New York: Springer, 2015. p. 123–140. Acesso em: 15 jun. 2025.

CHEN, L.; LIU, Y.; ZHANG, H.; WANG, X. Electroless nickel–gold plating for electronic connectors: Corrosion resistance and reliability. *Surface and Coatings Technology*, v. 390, p. 125699, 2020. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125699. Acesso em: 3 jul. 2025.

CHI, X.; ZHANG, W.; XUE, F.; GUO, J. **Characteristic of the Br-containing flame retardants in the plastic from e-waste**. Waste Management, v. 31, n. 12, p. 2417–2420, 2011. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.005. Acesso em: 18 jun. 2025.

CHINA**. Administrative Measures on the Prevention and Control of Environmental Pollution by Electronic and Electrical Products**. Ministry of Ecology and Environment. Pequim, 2019. Disponível em: https://english.mee.gov.cn/. Acesso em: 18 jun. 2025.

CHUNG, S. W.; KIM, S. E.; LEE, J. Y.; KIM, Y. S.; LEE, C. K. Precious metals recovery from waste printed circuit boards using acid leaching and bioleaching. *Journal of Cleaner Production*, v. 244, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118817. Acesso em: 18 jun. 2025.

COMEX, 2018. **Innovative Industrials Technologies**: CXR Sorting System Series. 8 p. Disponível em: https://comex-group.com/download/. Acesso em: 02 jun. 2024.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, 2024. **FORM 20-F**. Washington, D.C: United States Securities And Exchange Commission. 225 p. Disponível em: https://ri.csn.com.br/noticia/relatorio-anual-20-f/. Acesso em: out. 2024.

CORREIO BRAZILIENSE. **Mundo gera 62 milhões de toneladas de lixo eletrônico em 2022, alerta relatório da ONU**. Correio Braziliense, 13 mar. 2024. Disponível em: https://www.correiobraziliense.com.br/ciencia-e-saude/2024/03/6822092-mundo-gera-62-milhoes-de-toneladas-de-lixo-eletronico-em-2022-alerta-relatorio-da-onu.html. Acesso em: 14 jun. 2025.

COSSU, R.; WILLIAMS, I. D. **Urban mining: Concepts, terminology, challenges**. Waste Management. 2015. Vol. 45. 1-3 p. Doi: 10.1016/j.wasman.2015.09.040. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X15005280?via%3Dihub. Acesso em: fev. 2022.

COSTA, C. das N.; MEURER, E. J.; BISSANI, C. A.; TEDESCO, M. J. **Fracionamento sequencial de cádmio e chumbo em solos**. Ciência Rural, Santa Maria. 2007. Vol. 37, 1323-1328 p. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cr/a/7nFKcK6rSw6bkGqJNR6qxQH/. Acesso em: jan. 2022.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Projeto Estanho de Rondônia – Relatório Final**. Brasília: CPRM, 2010. Acesso em: 1 ab. 2025.

CROWSON, P. **The economics of the gold mining industry**. Resources Policy, v. 66, 101638, 2020. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101638. Acesso em: 25 jun. 2025.

CSM PRODUTOS QUÍMICOS. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico (FISPQ)**: ácido nítrico. 2019. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://csmpq.com.br/wp-content/uploads/2017/11/FISPQ-03-%C3%81cido-N%C3%ADtrico-08_2019.pdf. Acesso em: 02 ago. 2024.

CUI, J.; FORSSBERG, E. **Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment**: a review. Journal of Hazardous Materials, v. 99, p. 243–263, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/7187160_Mechanical_Recycling_of_Waste_Electric_and_Electronic_Equipment_a_Review. Acesso em: 02 ago. 2024.

CUI, J.; ZHANG, V. **Metallurgical recovery of metals from electronic waste:** A review. Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 158 (2-3), 228-256 p. Doi:10.1016/j.jhazmat.2008.02.001. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389408002161. Acesso em: out. 2021.

CUCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; LORA, M.; PETRUCCI, E. **Recycling of WEEEs**: An economic assessment of present and future e-waste streams. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 51, p. 263–272, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.06.010. Acesso em: 18 jun. 2025.

D'ADAMO, I.; FRANCESCO, F.; MASSIMO, G.; FABIO, M.; PAOLO, R.; SERGIO, T. **Towards sustainable recycling processes**: Wasted printed circuit boards as a source of economic opportunities, Resources, Conservation and Recycling, 2019. Vol. 149. 455-467 p. Doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344919302733. Acesso em: jan. 2022.

DATA BRIDGE MARKET RESEARCH. **Global Precious Metals E-Waste Recovery Market – Industry Trends and Forecast to 2031**. Data Bridge Market Research, 2023. Disponível em: https://www.databridgemarketresearch.com/pt/reports/global-precious-metals-e-waste-recovery-market. Acesso em: 14 jun. 2025.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura**: aplicação e preparação das amostras. materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. Porto Alegre. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2007. 60 p. Disponível em: https://repositorio.pucrs.br/dspace/handle/10923/22337. Acesso em: 20 abr. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Sumário Mineral 2013**. Brasília: DNPM, 2013. Acesso em: 10 ab. 2025.

DOING HOLDING CO Ltd. **PCB recycling plant cost analysis**. Henan Doing Environmental Protection Technology, 2022. Disponível em: https://www.doinggroup.com/. Acesso em: 03 jul. 2025.

DOMINY, S. C.; GLASS, H. J.; O'CONNOR, L.; LAM, C. K.; PUREVGEREL, S. **Integrating the Theory of Sampling into underground mine grade control strategies**: case studies from gold operations. Minerals, v. 9, n. 4, p. 238, 2019. Disponível em: https://www.mdpi.com/2075-163X/9/4/238?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: nov. 2025.

ENVIRONMENTAL EXPERT. *Is E-waste recycling a profitable business?* 2023. Disponível em: https://www.environmental-expert.com/. Acesso em: 03 jul. 2025.

ERNST, T.; POPP, R.; WOLF, M.; VAN ELDIK, R. **Analysis of eco-relevant elements and noble metals in printed wiring boards using AAS, ICP–AES and EDXRF**. Environmental Systems Research. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2003. Vol. 375, 805–814 p. Doi: 10.1007/s00216-003-1802-8. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00216-003-1802-8. Acesso em: abr. 2022.

FÁBRICA CARIOCA DE CATALISADORES, 2024. **Desvios na Análise de FRX: Principais Erros na Determinação da Composição Química de Catalisadores de FCC**. Disponível em: https://fccsa.com.br/pt/fcc-connect/todas-publicacoes/desvios-na-analise-de-frx-principais-erros-na-dete/. Acesso em: out. 2024.

FONTANA, A.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, W. G.; BALIEIRO, F. de C. (ed.). **Protocolo para coleta de amostras e quantificação do carbono no solo da agricultura de baixo carbono**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2024. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1169442. Acesso em: 14 jun. 2025.

FORTI, V.; BALDÉ, C. P.; KOCHER, M.; KUEHR, R.; BEL, G. **The Global E-waste monitor 2020**: **Quantities, flows and the circular economy potential**. Bonn, Geneva and Rotterdam: United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), 2020. 120 p. Disponível em: https://collections.unu.edu/view/UNU:7737#viewAttachments. Acesso em: abr. 2022.

FORTI, V.; GRAY, V.; KÜHR, R.; BALDÉ, C.; STEGMANN, P. The Global E-Waste Monitor 2024*:* Quantities, Flows and the Circular Economy Potential. UNITAR SCYCLE / ITU, Geneva/Bonn, março 2024. Disponível em: https://ewastemonitor.info/monitors/?utm_source=chatgpt.com Acesso em: jul. 2025.

FRESNILLO PLC. *First Quarter Production Report* — Silver ore grade in 2025 expected to be in the range of 160–180 g/t. London Stock Exchange News Release, 22 Apr. 2025a. Disponível em: https://www.londonstockexchange.com/news-article/FRES/First-Quarter-Production-Report/17000284. Acesso em: 12 nov. 2025

FRESNILLO PLC. *Second Quarter Production Report* — Silver ore grade 213 g/t in 2Q25; range 200-220 g/t for 2025. Company Announcement via Investegate, 23 Jul. 2025b. Disponível em: https://www.investegate.co.uk/announcement/rns/fres/second-quarter-production-report/8993265. Acesso em: 12 nov. 2025.

GERBASE, A. E.; OLIVEIRA, C. R. de. **Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química**. Química Nova. 2012. Vol. 35 (7). 1486-1492 p. Disponível em: https://www.scielo.br/j/qn/a/KSRbFmmLnnrkxcrKY37QS9m/?lang=pt&format=pdf. Acesso em: abr. 2022.

GERSOL GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS. **Relatório Final do descarte das Urnas Eletrônicas UE1996, UE2004 e correlatos previsto no Contrato TSE nº 99/2018**. 2019. 111 p. Acesso em: jan. 2022.

GHOSH, B; GHOSH, S.; PARHI, P.; MUKHERJEE, P. S.; MISHRA, B. K. **Waste printed circuit boards recycling**: an extensive assessment of current status. Journal of Cleaner Production, v. 94, p. 5–19, 2015. Acesso em: 23 de jul. 2025.

GOLDSTEIN, J. I. **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis**. 4. ed. New York: Springer, 2017. Acesso em: 18 jun. 2025.

GOLDSTEIN, J.; NEWBURY D. E.; ECHLIN, P.; ALEGRIA, D. C.; ROMIG, A. D.; LYMAN, C. E.; FIORI, C.; LIFSHIN, E. **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis.** A text for biologist, Materials Scientist and Geologists. Plenum Press, New York, 2nd ed., 1992. Disponível em: https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4613-0491-3. Acesso em: jun. 2024.

GOMES, R. F. **Estudo multivariado da lixiviação ácida de ítrio presente em placas de circuito impresso. 2021**. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021. Disponível em: http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/13363. Acesso em: set. 2024.

GONÇALVES, S. G.; FERREIRA, K. C.; PEREIRA, L. F. S. **Descarte de placas de circuitos impressos de computadores: uma problemática ambiental crescente**. In: 14º Encontro de Profissionais da Química da Amazônia, 2015, Amazônia. Anais. p. 550-557, 2015. Disponível em: Acesso em: jan. 2022.

GREENBERG, M. I.; VEARRIER, D. **Exposição a ácido fluorídrico**. 2022. Disponível em: https://www.msdmanuals.com/pt-br/profissional/t%C3%B3picos-especiais/medicina-do-trabalho-e-ambiental/exposi%C3%A7%C3%A3o-a-%C3%A1cido-fluor%C3%ADdrico. Acessoem: 08 ago. 2024.

GUO, J.; GUO, J.; XU, Z. **Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards**: A review. Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 168 (2–3). 567-590 p.

Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389409002982. Acessoem: jan. 2022.

GUTIÉRREZ-GUTIÉRREZ, S. C.; COULON, F.; JIANG, Y.; WAGLAND, S. **Rare earth elements and critical metal content of extracted landfilled material and potential recovery opportunities**. Waste Management. 2015. Vol. 42, 128-136 p. Doi:10.1016/j.wasman.2015.04.024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X15003190. Acesso em: mai. 2022.

HADI, P.; XU, M.; LIN, C. S. K.; HUI, C.; MCKAY, G. **Waste Printed Circuit Board Recycling Techniques and Product Utilization**. Journal of Hazardous Materials (2014). Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.032. Acesso em: mar. 2022.

HAGELÜKEN, C.; CORTI, C. W. **Recycling of gold from electronics: Cost-effective use through 'Design for Recycling'**. SpringerLink. V.*43*, 209-2020 p. 2010. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/BF03214988. Acesso em: set. 2024.

HALL, W. J.; WILLIAMS, P. T. **Separation and recovery of materials from scrap printed circuit boards**. Resources, Conservation and Recycling. 2007. Vol. 51(3), 691-709 p. Doi:10.1016/j.resconrec.2006.11.0. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344906002643. Acesso em: mar. 2022.

HARPER, K.; OLIVEIRA, A. P. **Determinação de elementos traço em solos e lodos de esgotopor ICP-OES**. **Revista Analytica**. São Paulo, SP. 2006. Vol. 23, 53-59 p. Acesso em: mar. 2022.

HE, W.; LI, G.; MA, X.; WANG, H.; HUANG, J.; XU, M.; HUANG, C. **WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China**. Journal of Hazardous Materials. 2006. Vol. 136 (3). 502-512 p. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389406005644. Acesso em: mar. 2022.

HENRIQUE JÚNIOR, S. de S.; MOURA, F. P. de; CORREA, R. de S.; AFONSO, J. C.; VIANNA, C. A.; MANTOVANO, J. L. **Processamento de placas de circuito impresso de equipamentos eletroeletrônicos de pequeno porte**. Química Nova, v. 36, n. 4, p. 570-576, maio 2013. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422013000400015. Disponível em: https://www.scielo.br/j/qn/a/yFF93gvdWsDNXg3pnTYWdhc/#. Acesso em: 04 ago. 2024.

HERATH, M.; GAYAN, D.; BASNAYAKE, B. E-waste management in developing countries: Issues and challenges. *Environmental Engineering Research*, v. 24(1), p. 103–113, 2019. Acesso em: 23 de jul. 2025.

HINO, T.; AGAWA, R.; MORIYA, Y.; NISHIDA, M.; TSUGITA, Y.; ARAKI, T. **Techniques to separate metal from waste printed circuit boards from discarded personal computers**. Journal of Material Cycles and Waste Management. 2009. Vol. 11 (1), 42-54 p. Doi: 10.1007/s10163-008-0218-0. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-008-0218-0. Acessoem: mar. 2022.

HOLGERSSON, S.; STEEENARI, B. M.; BJÖRKMAN, M.; CULLBRAND, K. **Analysis of the metal content of small-size Waste Electric and Electronic Equipment (WEEEE) printed circuit boards – part 1**: **Internet routers, mobile phones and smartphones**. Resources, Conservation and Recycling. 2018.Vol. 133, 300-308 p. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917300551. Acessoem: jan. 2022.

HUANG, K.; GUO, J.; XU, Z. **Recycling of waste printed circuit boards**: a review of current technologies and treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials*, v. 164, p. 399–408, 2009. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.09.050. Acesso em: jan. 2025.

HUBAU, A.; CHAGNES, A.; MINIER, M.; TOUZÉ, S.; CHAPRON, S.; GUEZENNEC, A.-G. **Recycling-oriented methodology to sample and characterize the metal composition of waste Printed Circuit Boards**. Waste Management, 2019. Vol. 91. 62-71 p. Doi:10.1016/j.wasman.2019.04.041. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19302533. Acesso em: jan. 2022.

HUSTRULID, W.; KUTCHA, M. **Open Pit Mine Planning and Design**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2013. Disponível em: https://www.routledge.com/Open-Pit-Mine-Planning-and-Design-Three-Volume-Set/Hustrulid-Kutcha/p/book/9781466575095. Acesso em: nov. 2025.

ILYAS, S.; ANWAR, M. A.; NASEER, M. A.; ABBAS, M. **Waste electrical and electronic equipment (WEEE)**: recycling techniques and environmental considerations. In: ILYAS, S.; ANWAR, M. A. (ed.). E-waste recycling technologies. Amsterdam: Elsevier, 2021. p. 1–45. Acesso em: 30 jun. 2025.

ÍNDICE KITCO, 2024. Disponível em: https://kitco.com/price/precious-metals. Acessoem: set. 2024.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Industrial and Environmental Applications of Nuclear Analytical Techniques**. Vienna: IAEA, 1999. Disponível em: https://www.iaea.org/publications/5784/industrial-and-environmental-applications-of-nuclear-analytical-techniques. Acessoem: 11 set. 2023.

JAPÃO. **Home Appliance Recycling Law: Law for Recycling of Specified Kinds of Home Appliances**. Ministry of the Environment. Tóquio, 2001. Disponível em: https://www.env.go.jp/en/laws/recycle/01.pdf. Acesso em: 18 jun. 2025.
JENKINS, R. **X-Ray Fluorescence Spectrometry**. Second edition. New York: Wiley, 1999. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118521014. Acesso em: 02 jun. 2024.

JESUS, T. A. de. **Caracterização de placas de circuito impresso oriundas de telefones celulares e recuperação de cobre.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química. Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2015. Disponível em: https://tede.ufrrj.br/jspui/handle/jspui/1724. Acesso em: mar. 2022.

JI, L.; LIU, C.; HUANG, L.; HUANG, G. **The evolution of Resources Conservation and Recycling over the past 30 years: A bibliometric overview**. Resources, Conservation and Recycling, 2018. Vol 134, 34–43 p. Doi:10.1016/j.resconrec.2018.03.0. Disponívelem: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344918300983. Acesso em: fev. 2022.

JEOL. **Silicon drift detector (SDD) – Glossary**. 2012. Disponível em: https://www.jeol.com/words/semterms/20121024.042859.php. Acesso em: fev. 2022.

JUSTIÇA ELEITORAL. **Eleições 2024**: produção das 219.998 novas urnas eletrônicas é concluída. Brasília: Tribunal Superior Eleitoral, 17 abr. 2024a. Disponível em: https://www.tse.jus.br/comunicacao/noticias/2024/Abril/eleicoes-2024-producao-das-219-998-novas-urnas-eletronicas-e-concluida?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 04 nov 2025.

JUSTIÇA ELEITORAL. **Seguras, modernas e inclusivas: conheça os modelos de urnas das Eleições 2024**. Brasília: Tribunal Superior Eleitoral, 8 set. 2024b. Disponível em: https://www.tse.jus.br/comunicacao/noticias/2024/Setembro/seguras-modernas-e-inclusivas-conheca-os-modelos-de-urnas-das-eleicoes-2024?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 04 nov. 2025.

JUSTIÇA ELEITORAL. **Justiça Eleitoral destina mais de 195 mil urnas eletrônicas fora de uso para descarte ambientalmente correto**. Brasília: Tribunal Superior Eleitoral, 21 fev. 2025. Disponível em: https://www.tse.jus.br/comunicacao/noticias/2025/Fevereiro/justica-eleitoral-destina-mais-de-195-mil-urnas-eletronicas-fora-de-uso-para-descarte-ambientalmente-correto?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 04 nov. 2025.

KHALIQ, A.; RHAMDHANI, M. A.; BROOKS, G.; MASOOD, SH. **Metal extraction processes for electronic waste and existing industrial routes: a review and australian perspective**. Resources 3 (1), 152–179 p. 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/261181219_Metal_Extraction_Processes_for_Electronic_Waste_and_Existing_Industrial_Routes_A_Review_and_Australian_Perspective. Acessoem: set. 2024.

KHANNA, R.; ELLAMPARUTHY, G.; CAYUMIL, R.; MISHRA, S. K.; MUKHERJEEE, P. S. **Concentration of rare earth elements during high temperature pyrolysis of waste printed circuit boards**. Waste Management. 2018. Vol. 78. 602-610 p. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X18303933?via%3Dihub. Acessoem: jan. 2022.

KHARISOV, B. I.; TORRES, A. A. G.; KHARISOVA, V. V. Handbook of Electronic Waste Management: International Best Practices and Case Studies. Cambridge: Elsevier, 2021. Disponível em: https://shop.elsevier.com/books/handbook-of-electronic-waste-management/vithanage/978-0-12-817030-4. Acesso em: jul. 2025.

KIDDEE, P.; NAIDU, R.; WONG, M. H. **Electronic waste management approaches**: An overview. Waste Management, v. 33, n. 5, p. 1237–1250, 2013. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.01.006. Acesso em: 20 jun. 2025.

KAHHAT, R.; KIM, C.; XU, M.; ALLENBY, B.; HENDRICKSON, R. B.; MCBRIDE, M. L.; RAJAGOPALAN, S. Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and

technology options. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, n. 7, p. 955–964, 2008. DOI: 10.1016/j.resconrec.2008.01.002. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.01.002. Acesso em: 18 jun. 2025.

KAYA, M. **Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes**. Waste Management, v. 57, p. 64–90, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.004. Acesso em: jul. 2025.

KIDDEE, P.; PRADHAN, J. K.; MANDAL, S.a; BISWAS, J.a K; SARKAR, B. **An overview of treatment technologies of E-waste**. Handbook of Electronic Waste Management. 2020. 1-18 p. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012817030400022X. Acesso em: fev. 2022.

KIM, J.; CHOI, S.; KIM, B. Recovery of tin from waste printed circuit boards. *Materials Transactions*, v. 52, n. 9, p. 1858–1862, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.2320/matertrans.MBW201112. Acesso em: 18 jun. 2025.

KLOEPFFER, W. **Life cycle assessment in industry and business**. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2001. Vol. 6 (3), 184-184 p. doi:10.1007/bf02978739. Disponívelem: https://link.springer.com/article/10.1007/BF02978739. Acesso em: mar. 2022.

KRIKSUNOV, L. **Distribution of inorganic contamination on electronic packages and printed circuit boards**. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, v. 31, n. 2, p. 74–80, 2008. Acesso em: 20 jun. 2025.
KUMAR, A.; SINGH, R.; PATEL, S. **Analysis of Sn–Pb solders and their alternatives for electronic packaging**. Materials Today: Proceedings, v. 18, p. 110–115, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.005. Acesso em: 20 jun. 2025.

KRUG, F. J.; ROCHA, F. P. P. **Métodos de preparo de amostras para análise elementar**. 2. ed. São Paulo. Sociedade Brasileira de Química, 2016. 586 p. Disponível em: Acesso em: jan. 2022.

KRUMMENAUER, A. **Desenvolvimento e validação de metodologia analítica para análise de aços por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (EDXRF)**. 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/178232. Acesso em: 27 ago. 2024.

KUMAR, V.; GUPTA, M. **Comparative study of different natural fibre printed circuit board (PCB) composites**. Materials Today: Procedings. 2021. Vol. 44, Part 1, 2097-2101 p. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320398679. Acesso em: jan. 2022.

LEE, J. C.; SONG, H. T.; YOO, J. M. **Present status of the recycling of waste electrical and electronic equipment in Korea**. Resources, Conservation and Recycling, v. 50, p. 380–397, 2007.

LI, J.; SHRIVASTAVA, P.; GAO, Z.; ZHANG, H. C. **Printed Circuit Board Recycling**: A State-of-the-Art Survey. Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2004. Vol. 27, 1. Ed. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/3425066_Printed_circuit_board_recycling_A_state-of-the-art_survey. Acesso em: jan. 2022.

LI, J.; CHEN, X.; YANG, W.; LIU, Z.; ZHANG, H**.** Study on oxidation behavior of silver coatings in printed circuit boards. *Surface and Coatings Technology*, v. 201, n. 7, p. 3838–3842, 2007. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.11.064. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897206011864. Acesso em: 25 jul. 2025.

LI, J.; LOPEZ, N.; LIU, L.; GAO, R.; ZHANG, H.; FAN, F. **E-waste recycling and sustainability in urban mini**ng. Waste Management & Research, v. 38(9), p. 950–963, 2020. DOI: 10.1177/0734242X20918315. Acesso em: 20 jun. 2025.

LIAO, Y. **Practical Electron Microscopy and Database**. Second Edition. 2006. Disponível em: https://www.globalsino.com/EM/page4610.html. Acesso em: 20 jun. 2023.

LIU W.; FORD P.; UVEGI H.; MARGARIDO, F.; SANTOS, E.; FERRÃO, P; OLIVETI, Elsa. **Economics of materials in mobile phone preprocessing, focus on non-printed circuit board materials**. WasteManag 87:78–85. https:// doi. org/ 10. 1016/j. wasman. 2019. 01. 044. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19300662. Acesso em: out. 2024.

LOBATO, L. M.; COSTA, M. A. da. **Ouro**. Recursos Minerais de Minas Gerais, Minas Gerais, p. 01-21, 2021. Disponível em: http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/ouro/. Acesso em: set. 2024.

LONDON METAL EXCHANGE. ***Daily Prices & Monthly Averages Report***: *Monthly averages*. London, 2025. Disponível em: https://www.lme.com/en/Market-data/Reports-and-data/Monthly-averages?sc_camp=AF3FA9ED735B406B9E825CD90C74342E. Acesso em: 23 nov. 2025.

MAGALHÃES, C. A. **Caracterização de unidades centrais de processamento de computadores visando à recuperação de metais nobres. 2023**. 42 p. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023. Disponível em: https://monografias.ufop.br/handle/35400000/5581. Acesso em: set. 2024.

MALISKA, A. M. **Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise**. Florianópolis, 2020. 98 p. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Departamento de Engenharia Mecânica – EMC Laboratório De Materiais – LABMAT Laboratório De Caracterização Microestrutural e Análise De Imagens – LCMAI. Disponível em: <https://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV_Apostila.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2023.

MARQUES, A. C.; CABRERA, J. M; MALFATTI, C. de Fr. **Printed circuit boards**: A review on the perspective of sustainability. Journalof Environmental Management. 2013. Vol.

131. 298–306 p. doi:10.1016/j.jenvman.2013.10.003. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030147971300649X. Acesso em: mar. 2022.

MAURÍCIO, A. de C.; ALMEIDA, F. L.; SOUZA, M. A. **Tomografia por raios-X na análise de materiais eletrônicos**: potencialidades na avaliação de PCIs para reciclagem. Revista Tecnologia e Sociedade, Curitiba, v. 18, n. 45, p. 1–15, 2022. Disponível em: https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/13937. Acesso em: 1 jul. 2025.

MEDEIROS, N. M. **Caracterização e Separação Física de Placas de Circuito Impresso de Computadores Obsoletos**. Natal, Rio Grande do Norte. Dissertação de Mestrado em Engenharia química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2015. 82 p. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/20607. Acesso em: fev. 2022.

MENEZES, L. R. de. **Descarte de lixo eletrônico**: um estudo de caso no Tribunal Regional Eleitoral de Sergipe. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Sergipe. São Cristovão, Sergipe. 2019. 57 p. Disponível em: https://ri.ufs.br/handle/riufs/12408?mode=full. Acesso em: fev. 2022.

MENZIE, W. D.; REED, B. L.; SINGER, Donald A. **Models of grades and tonnages of some lode tin deposits**. In: *Geology of tin deposits in Asia and the Pacific*. [S.l.]: Springer, 1988. p. 73–88. DOI: 10.1007/978-3-642-72765-8-4. Acesso em: 10 de ago. 2025.
MODAIS EM FOCO. **Reciclar lixo eletrônico pode gerar R$ 800 Mi ao ano no Brasil**. Modais em Foco, 12 mar. 2024. Disponível em: https://modaisemfoco.com.br/noticias/reciclar-lixo-eletronico-pode-gerar-rs-800-mi-ao-ano-no-brasil. Acesso em: 14 jun. 2025.

METALLIC MINERALS CORP. **Keno Hill Silver Project – Life-of-Mine Grade Exceeding 804 g/t**. Projeto Web Page, 11 Abr. 2024. Disponível em: https://metallic-minerals.com/projects/keno-silver/keno-hill-silver-district/. Acesso em: 12 nov. 2025.

MORAES, V. T. de. **Recuperação de metais a partir do processamento mecânico e Hidrometalúrgico de placas de circuito impressos de celulares obsoletos**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-19042011-100037/pt-br.php#:~:text=Os%20processos%20hidrometal%C3%BArgico%20aplicados%20para,presen%C3%A7a%20de%20per%C3%B3xido%20de%20hidrog%C3%AAnio.Acesso em: fev. 2022.

MORF, L. S.; TREMP, J.; GLOOR, R.; SCHUPPISSER, F., STENGELE, M.; TAVERNA, R. **Metals, non-metals and PCB in electrical and electronic waste – Actual levels in Switzerland.** Waste Management. 2007. Vol. 27, 1306-1316 p. Doi: 10.1016/j.wasman.2006.06.014. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X06002133. Acesso em: abr. 2022.

MUDD, G. M. **Global trends in gold mining**: Towards quantifying environmental and resource sustainability? Resources Policy, v. 32, n. 1–2, p. 42–56, 2007. Acesso em: 1 jul. 2025.

MUO, P.; WA L.; XIANG, D.; GAO, J.; DUAN, G. **A physical process for recycling and reusing waste printed circuit boards**. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. Conference Record. 2004. 237-242 p. doi:10.1109/isee.2004.1299722. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/1299722. Acesso em: abr. 2022.

NAMIAS, J. **The characterization of metals in waste printed circuit boards**. Resources, Conservation and Recycling, v. 92, p. 36–42, 2014

NASCIMENTO FILHO, V. F. **Técnicas Analíticas Nucleares de Fluorescência de Raios-X Por Dispersão de Energia (ED-XRF) e por Reflexão Total (TXRF)**. 1999. Departamento de Ciências Exatas – ESALQ. Laboratório de Instrumentação Nuclear – CENA. Disponível em: http://www.raiosx.ufc.br/site/wp-content/uploads/downloads/2012/10/EDXRF_TXRF.pdf. Acesso em: 11 set. 2023.

NAVARRO, E. M. G.; TAGLE, M. E. V.; MARÍN, M. T. L.; ALFONSO, M. S. P. **Comparison of USEPA 3050B and ISO 14869-1: 2001 digestion methods for sediment analysis by using FAAS and ICP-OES quantification techniques**. Química Nova. 2011. Vol. 34(8), 1443-1449 p. doi:10.1590/s0100-40422011000800025. Disponível em: https://www.scielo.br/j/qn/a/fFxhbJLGRB6ZBRTnXBdLj5G/?lang=en. Acessoem: abr. 2022.

NEXA RESOURCES, 2024a. **FORM 20-F**. Washington, D.C: United States Securities And Exchange Commission. 291 p. 2024a. Disponível em: https://minedocs.com/25/Nexa-F20F-2023.pdf. Acesso em: out. 2024.

NEXA RESOURCES.2024b. **Reserves & Resources Update 2024**. Disponível em: https://ri.nexaresources.com. Acesso em: 10 ab. 2025.

NEWS.MARKET.US. **Rising Consumer Electronics in Many Regions Have Enabled More Consumers to Spend on Devices**. Market.us, 2024. Disponível em: https://www.news.market.us/rising-consumer-electronics-in-many-regions-have-enabled-more-consumers-to-spend-on-devices/. Acesso em: 14 jun. 2025.

NUSS, P.; ECKELMAN, M. J**. Life Cycle Assessment of Metals**: A Scientific Synthesis. *PLoS ONE*, v. 9, n. 7, e101298, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101298. Acesso em: 10 ab. 2025.

OGUNNIYI, I. O.; VERMA, R. S.; STEYN, F. P. **Extractive metallurgy of rare earths and precious metals from waste PCBs**. Waste Management, v. 29, n. 8, p. 2140–2146, 2009. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.02.012. Acesso em: 10 ab. 2025.

OGUNSEITAN, O. A.; SCHOENUNG, J. M.; SAPHERES, J. D. M.; SHAPIRO, A. A. **The Electronics Revolution: From E-Wonderland to E-Wasteland**. Science, 326,670 p. 2009. Disponível em: https://www.science.org/doi/10.1126/science.1176929. Acessoem: out. 2023.

ONU. **Convenção da Basileia sobre o Controle dos Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu Depósito**. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente Basiléia: PNUMA, 1989. Disponível em: https://www.basel.int. Acesso em: 5 jun. 2025.

_____. **Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs)**. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Estocolmo, 2001. Disponível em: https://www.pops.int. Acesso em: 5 jun. 2025.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE NORMATIZAÇÃO. **ISO 11466**. International Standard: Soilquality. Extraction of trace elements soluble in aqua regia. 1995. Acesso em: abr. 2022.

_____. **ISO 12914**. International Standard: Soil quality. Microwave-assisted extraction of the aqua regia soluble fraction for the determination of elements. 2012. Acesso em: abr. 2022.

OTUNNIYI, I. O.; VERMAAK, M. K. G.; GROOT, D. R. **Chemical composition and liberation characterization of printed circuit board comminution fines for beneficiation investigations**. Waste Management. 2009. Vol. 29. 2140-2146 p. Doi: 10.1016/j.wasman.2009.03.004. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X09000853. Acesso em: abr. 2022.

PARK, Y. J.; FRAY, D. J. **Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards**. Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 164 (2-3). 1152-1158 p. Doi:10.1016/j.jhazmat.2008.09.043. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389408013460. Acesso em: jan. 2022.

PAUMANN, J. T.; DORNELES, K. E. O.; BATISTA, G. L.; MORAES, C. A. M. **Recuperação de metais através da reciclagem de placas de circuito impresso oriundas de sucata eletrônica**. Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento. Edição Especial Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. Curitiba. 2018. Vol. 7 (3). 405-421 p. Disponível em: https://periodicos.utfpr.edu.br/rbpd/article/view/8647. Acesso em: jan. 2022.

PEREIRA, I. J. U. V. **Estudo da adaptação de microrganismos mesófilos a placas de circuito impresso. 2022**. 63 p. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022. Disponível em: https://monografias.ufop.br/handle/35400000/4084. Acesso em: set. 2024.

PEREIRA, J. S. F.; MORAES, D. P.; ANTES, F. G.; DIEHL, L. O.; SANTOS, M. F. P.; GUIMARÃES, R. C. L.; FONSECA, T. C. O.; DRESSLER, V. L.; FLORES, É. M. M. **Determination of metals and metalloids in light and heavy crude oil by ICP-MS after digestion by microwave-induced combustion**. Microchemical Journal. 2010. Vol. 96(1). 4-11 p. Doi:10.1016/j.microc.2009.12.016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026265X10000032. Acesso em: jan. 2022.

PIOVEZAN, N. F. **Caracterização dos materiais e processamento mecânico de resíduos de tablets.** Repositório digital LUME - UFRGS. Trabalho de conclusão de curso. Escola de Engenharia. Engenharia de Materiais. 53 p. 2023. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/257934. Acesso em: set. 2024.

PRIYA, A.; HAIT, S. **Qualitative and quantitative metals liberation assessment for characterization of various waste printed circuit boards for recycling**. Environmental Science and Pollution Research. 2017.Vol. 24(35), 27445-27456 p. doi:10.1007/s11356-017-0351-1. Acesso em: abr. 2022.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). **Guidelines on Environmentally Sound Management of Used and End-of-Life Computing Equipment**. Nairobi: UNEP, 2011. Disponível em: https://www.unep.org. Acesso em: 18 jun. 2025.

POTTS, P. J.; WEST, M. **Portable X-ray Fluorescence Spectrometry: capabilities for in situ analysis**. Royal Society of Chemistry, 2008. Cambridge. Disponível em: https://doi.org/10.1002/xrs.1129. Acesso em: 27 ago. 2024.

QUINÁGLIA, G. A. **Estabelecimento de um protocolo analítico de preparação de amostras de solos para determinação de metais e sua aplicação em um estudo de caso.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Saúde Ambiental. Faculdade de Saúde Pública. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2001. Disponível em: https://repositorio.usp.br/item/001220468. Acesso em: fev. 2022.

RAELE, M. P.; DE PRETTO, L. R.; ZEZELL, D. M. **Soldering mask laser removal from printed circuit boards aiming copper recycling**. Waste Management, v. 68, p. 475-481, 2017.

REBELLO, R. Z.; LIMA, M. T. W. D. C.; YAMANE, L. H.; SIMAN, R. R. **Characterization of end-of-life LED lamps for the recovery of precious metals and rare earth elements.** Resources, Conservation & Recycling. 2020. Vol. 153, 1-7 p. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092134491930463X.Acesso em: fev. 2022.

RESENDE, L. F. de. **Manual de amostragem e preparação de amostras de fertilizantes**. São Paulo: Verde Agritech, 2014. Disponível em: https://newblog.verde.ag/pt/verde/amostragem-de-fertilizantes-como-enviar-uma-amostra-do-k-forte-para-analise. Acesso em: 14 jun. 2025.

RIO GRANDE DO SUL. Conselho Estadual do Meio Ambiente. **Resolução nº 372, de 2018**. Dispõe sobre os empreendimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais, efetiva ou potencialmente poluidores ou capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental, passíveis de licenciamento ambiental no Estado do Rio Grande do Sul, destacando os de impacto de âmbito local para o exercício da competência municipal no licenciamento ambiental. Porto Alegre, RS. 2018. Acesso em: ag. 2021.

ROBINSON, B. H. **E-waste**: An assessment of global production and environmental impacts. Science of the Total Environment, v. 408, n. 2, p. 183–191, 2021. Acesso em: 3 jul. 2025.

SANT'ANA, H. B. da S. de. **Caracterização físico-química de placas de circuito impresso de aparelhos de telefone celular**. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 10, n. 3, p. 231-238, 2013. Editora Cubo. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/217309. Acesso em: 20 mar. 2024.

SANTOS, T. C. G.dos; LIRA, E. B. de S.; MORAES, A. S. **Printed circuit boards: its characteristics and its potential for recycling**. RevistaGeama. Geama Journal. The Journal of environment Scientific Review. 2016. Vol. 2. (4). 473-481 p. Disponível em: https://caccl-copper.primo.exlibrisgroup.com/discovery/fulldisplay?docid=cdi_doaj_primary_oai_doaj_org_article_dadb89a037464888b982b49d1a050844&context=PC&vid=01CACCL_COPPER:COPPER&lang=en&search_scope=MyInst_and_CI&adaptor=Primo%20Central&tab=Everything&query=sub,exact,%20m%C3%A9taux%20,AND&mode=advanced&offset=20. Acesso em: fev. 2022.

SANTOS, F. G. dos; LIMA, L. S.; PEREIRA, F. J. **Caracterização físico-química de resíduos eletroeletrônicos: técnicas e desafios.** Revista Tecnologia e Sociedade, v. 16, n. 42, p. 90–105, 2020. Acesso em: 18 mar. 2025.

SANTOS, L. F. **Characterization of gold-bearing materials in electronic scrap using SEM-EDS and XRD**. Journal of Materials Research and Technology, v. 15, p. 1401–1410, 2021. Acesso em: 18 mar. 2025.

SAVIO, M.; CERUTTI, S.; MARTINEZ, L. D.; SMICHOWSKI, P.; GIL, R. A. **Study of matrix effects and spectral interferences in the determination of lead in sediments, sludges and soils by SR-ETAAS using slurry sampling**. Talanta. 2010. Vol. 82(2), 523-527 p. Doi:10.1016/j.talanta.2010.05.017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0039914010003577. Acesso em: fev. 2022.

SCHLOTMANN, F.; DORNFELD, D. **Circular economy strategies in electronics recycling**: A systems perspective. Resources, Conservation and Recycling, v. 162, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920302755. Acesso em: 24 de jul. 2025.

SCHLUMMER, M.; GRUBER, L.; MÄURER, A.; WOLZ, G.; VAN ELDIK, R. **Fire retardants in waste electrical and electronic equipment**: levels and methods of disposal. *Environmental Science & Technology*, v. 41, n. 14, p. 5078–5086, 2007. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es051170k . Acesso em: 18 mar. 2025.

SCHRIJVERS, D.; HOOL, A..; BLENGINI, G. A.; CHEN, W.; DEWULF, J.; EGGERT, R.; ELLEN, L.; GAUSS, R.; G., J.; HABIB, K.; HAGELÜKEN, C.; HIROHATA, A.; HOFMANN-AMTENBRINK, M.; KOSMOL, J.; LE GLEUHER, M.; GROHOL, M.; KU, A.; LEEE, M.-H.; LIU, G.; NANSAI, K.; NUSS, P.; PECK, D.; RELLER, A.; SONNEMANN, G.; TERCERO, L.; THORENZ, A.; WÄGER, P. A. **A review of method sand data to determine raw material criticality**. Resources, ConservationandRecycling, 2020. Vol. 155. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344919305233. Acesso em: Ab. 2022.

SHOCKMETAIS, 2024. **Acompanhamento da LME e Dólar**. Disponível em: https://shockmetais.com.br/lme. Acesso em: 30 set. 2024.

SONG, Q.; LI, J. Environmental effects of heavy metals derived from the e-waste recycling activities in China: a systematic review. *Waste Management*, v. 34, n. 12, p. 2587–2594, dez. 2014. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.08.012. Acesso em: 18 mar. 2025.

STOCKLYTICS. **Global Spending on Consumer Electronics to Drop by $5.3B in 2024**. Stocklytics, 12 mar. 2024. Disponível em: https://stocklytics.com/content/global-spending-on-consumer-electronics-to-drop-by-5-3-billion-in-2024/. Acesso em: 14 jun. 2025.

SUN, Z.; XIAO, Y.; SIETSMA, J.; AGTERHUIS, H.; VISSER, Geert; YANG, Y. **Characterization of metals in the electronic waste of complex mixtures of end-of-life ICT products for development of cleaner recovery technology**. Waste Management. 2015. Vol. 35, 227-235 p. Doi: 10.1016/j.wasman.2014.09.021.Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X14004437. Acesso em: abr. 2022.

TAN, Q.; LI, J. **Recycling metals from waste printed circuit boards**: A review. Journal of Hazardous Materials, v. 158, n. 2–3, p. 228–256, 2008. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.001. Acesso em: 18 mar. 2025.

TAKAHASHI, K.; TSUDA, M.; NAKAMURA, J.; OTABE, K.; TSURUOKA, M.; MATSUNO, Y.; ADACHI, Y. **Elementary analysis of mobile phones for optimizing end-of-life scenarios**. IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, Tempe, AZ, EUA. v. 20, 1403–1408 p. 2009. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/5156682. Acesso em: set. 2024.

THE GLOBAL E-WASTE STATISTIC PARTNERSHIP. 2022. Disponível em: https://globalewaste.org/. Acesso em: set. 2024.

THERMO FISHER SCIENTIFIC, 2024. Espectroscopia de Dispersão de Energia. Mapeamento elementar de espectroscopia de raios X dispersiva de energia para caracterização química confiável. Disponível em: https://www.thermofisher.com/br/en/home/materials-science/eds-technology.html. Acesso em: out. 2024.

THERMO SCIENTIFIC. **Niton XL3t Gold+ XRF Analyzer User's Manual**. Version 3.2. Thermo Fisher Scientific Inc., 2019. Acesso em: 18 mar. 2025.

TRIBUNAL SUPERIOR ELEITORAL. **Descarte das urnas, 2020**. Disponível em: https://www.tse.jus.br/eleicoes/historia/processo-eleitoral-brasileiro/logistica-e-preparacao/descarte-das-urnas. Acesso em: out. 2023.

_____. **Urna eletrônica**. 2022. Disponível em: https://www.tse.jus.br/eleicoes/urna-eletronica. Acesso em: mai. 2022.

_____ 2023a. **Justiça Eleitoral recebeu mais de 53 mil novas urnas para as Eleições 2024**, 2023a. Disponível em: https://www.tse.jus.br/comunicacao/noticias/2023/Outubro/justica-eleitoral-recebeu-mais-de-53-mil-novas-urnas-para-as-eleicoes-2024. Acesso em: out. 2023.

_____2023b. **Plano de logística sustentável 2021-2026**. Brasília: Tribunal Superior Eleitoral, 2023. 50 p. Disponível em:

https://bibliotecadigital.tse.jus.br/xmlui/handle/bdtse/11855. Acesso em: out. 2023.

_____, 2023c. **Leilão define empresa para descarte 100% ecologicamente correto das urnas, 2023**. Disponível em: https://www.tse.jus.br/comunicacao/noticias/2023/Novembro/leilao-define-empresa-para-descarte-100-ecologicamente-correto-das-urnas. Acesso em: out. 2023.

_____, 2024a. **Eleições 2024**: produção das 219.998 novas urnas eletrônicas é concluída, 2024a. Disponível em: https://www.tre-go.jus.br/comunicacao/noticias/2024/Abril/eleicoes-2024-producao-das-219-998-novas-urnas-eletronicas-e-concluida. Acesso em: out. 2023.

_____, 2024b. B**rasil tem mais de 155 milhões de eleitoras e eleitores aptos a votar em 2024**. Disponível em: https://www.tse.jus.br/transparencia-e-prestacao-de-contas/licitacoes-e-contratos/licitacoes. Acesso em: out. 2023.

_____, 2024c. Sistema de Controle de Licitação, 2024. Disponível em: https://silic.tse.jus.br/silic/pages/internet/licitacao/licitacoes-concluidas.faces. Acesso em: out. 2023.

_____, 2024d. **Informações técnicas dos modelos de urna eletrônica.** Disponível em: https://www.justicaeleitoral.jus.br/urna-eletronica/informacoes-tecnicas.html. Acesso em: out. 2023.

_____, 2025. Descarte das urnas eletrônicas. Informação institucional disponível no site oficial do TSE, 2025. Disponível em: https://www.tse.jus.br/eleicoes/historia/processo-eleitoral-brasileiro/logistica-e-preparacao/descarte-das-urnas. Acesso em: jul. 2025

TUNCUK, A.; STAZI, V.; AKCIL, A. U.; YAZICI, E. Y.; DEVECI, H. **Aqueous metal recovery techniques from e-scrap:** Hydrometallurgy in recycling. Minerals Engineering. 2012. Vol. 25 (1), 28-37 p. Doi:10.1016/j.mineng.2011.09.019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687511003669. Acesso em: fev. 2022.

UNEP. United Nations Environment Programme. **Guidelines for Environmentally Sound Management of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)**. Geneva: UNEP, 2011. Disponível em: https://www.unep.org/resources/report/guidelines-environmentally-sound-management-waste-electrical-and-electronic-equipment-weee. Acesso em: fev. 2024.

UNIÃO EUROPEIA. **Diretiva 2011/65/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 8 de junho de 2011 sobre a restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrônicos**. Jornal Oficial da União Europeia, Bruxelas, L 174, p. 88–110, 1 jul. 2011. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32011L0065. Acesso em: 18 jun. 2025.

_____. **Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 4 de julho de 2012 relativa a resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE)**. Jornal Oficial da União Europeia, Bruxelas, L 197, p. 38–71, 24 jul. 2012. Disponível em:

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32012L0019. Acesso em: 18 jun. 2025.

UMICORE, 2024. Site oficial. Disponível em: https://www.umicore.com.br/pt/. Acessoem: 2023; 2024.

VATS, M. C.; SINGH, S. K. **Assessment of gold and silver in assorted mobile phone printed circuit boards (PCBs)**: original article. WasteManag 45:280–288. https:// doi. org/ 10. 1016/j. wasman. 2015a. Disponível em: https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57214304923. Acesso em: set. 2024.

VATS, M. C.; SINGH, S. K. **E-waste characteristic and its disposal**. International Journal of Ecological Science and Environmental Engineering, v. 2, n. 3, p. 23–28, 2015b.

VECCHINI, L. D.; PIRES, M. A. F.; MÜLLER, I. L.; BERTUZZI, R. **Tomographic characterization of printed circuit boards for material recovery**. Journal of Electronic Materials, New York, v. 48, n. 2, p. 876–885, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s11664-018-06884-6. Acesso em: 10 jun. 2025.

VEIT, H. M. **Emprego do Processamento Mecânico na Reciclagem de sucatas de Placas de Circuito Impresso**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2001. 110 p. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/3432. Acesso em: nov. 2021.

VEIT, H. M.; BERNARDES, A. M.; FERREIRA, J. Z..; TENÓRIO, J. A. S.; MALFATTI C. de F. **Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy**. JournalofHazardousMaterials. 2006. 1704-1709 p. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16757116/. Acesso em: nov. 2021

VEIT, H. M.; BERNARDES, A. M.; BERTUOL, D. A.; OLIVEIRA, C. T. **Utilização de processos mecânicos eeletroquímicos para reciclagem de cobre desucatas eletrônicas**. Metalurgia &Materiais. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto. 2008. Vol. 61 (2). 159-164 p. abr. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rem/a/fZGHYZy9pYSv8RfNNGKDHkw/?lang=pt. Acesso em: nov. 2021.

VERIFIED MARKET REPORTS. **Electronic Precious Metal Material Recovery Market Size And Forecast**. Verified Market Reports, 2023. Disponível em: https://www.verifiedmarketreports.com/pt/product/electronic-precious-metal-material-recovery-market/. Acesso em: 14 jun. 2025.

VERMEŞAN, H.; TIUC, A.-E.; PURCAR, M. Advanced Recovery Techniques for Waste Materials from IT and Telecommunication Equipment Printed Circuit Boards. *Sustainability*, v. 12, n. 1, art. 74, 2020. DOI: 10.3390/su12010074. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/12/1/74. Acesso em: 25 jul. 2025.

VILHENA, A. J.; SANTOS, R. L. dos; SOUZA, P. H. de; SILVA, M. R. da. **Comparação de diferentes técnicas de homogeneização e quarteamento**. In: Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação (CONNEPI), 2024, Belém. Anais eletrônicos... Belém: IFPA, 2024.

Disponível em: https://www.even3.com.br/anais/connepi-belem-2024/839578-comparacao-de-diferentes-tecnicas-de-homogeneizacao-e-quarteamento/. Acesso em: 14 jun. 2025.

WANG, F.; LIU, Y.; ZHU, S.; GUO, L.; LI, Y.; ZHANG, Y. **Decomposition and emissions of waste printed circuit board with brominated flame retardants in a high temperature furnace**. *Environmental Science & Technology*, v. 39, n. 15, p. 5862–5867, 2005. Acesso em: 10 jun. 2025.

WIDMER, R.; OSWALD-KRAUSEL, H.; KAPLAN, A. M. **Global perspectives on e-waste.** Environmental Impact Assessment Review, v. 25, n. 5, p. 436–458, 2005. DOI: 10.1016/j.eiar.2005.04.001. Acesso em: 20 jun. 2025.

WIENOLD, J.; RECKNAGEL, S.; SCHARF, H.; HOPPE, M.; MICHAELIS, M. **Elemental analysis of PCB considering the ROHS regulation**. Waste Management. 2011. Vol. 31, 530-535 p. Doi: 10.1016/j.wasman.2010.10.002. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X10005052. Acesso em: abr. 2022.

WIESZCZYCKA, K.; TYLKOWSKI, B.; STASZAK, K. (Ed.). **Metals in wastes**. Berlin, Germany: De Gruyter, 2018. Disponível em: https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9783110547061/html. Acesso em: abr. 2022.

WORLD GOLD COUNCIL. **Gold prices**. Disponível em: https://www.gold.org/goldhub/data/gold-prices. Acesso em: 02 dez. 2025.

XAVIER, L. H. da S. M.; LINS, F. A. F. **Mineração Urbana de resíduos eletroeletrônicos: uma nova fronteira a explorar no Brasil**. Brasil Mineral. 2018. 379, 22-26 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324748369_Mineracao_Urbana_de_Residuos_Eletroeletronicos_uma_nova_fronteira_a_explorar_no_Brasil. Acesso em: jan. 2022.

XAVIER, L. H. da S. M.; OTTONI, M. de S. O.; ARAUJO, R .A.; CUGULA, J. S.; CONTADOR, L.; PETRUNGARO, G. N.; ABREU, L. P. P.; SANTOS, L. A.; REBELLO, R. Z.; GOMES, C. F.; SIERPE, R.; MANÇANO, M. R.; CARDOSO, E. R.; ROMAY, K. V. M.; SUEMITSU, W.; CALDAS, M. B. **Manual de destinação de resíduos eletroeletrônicos. Orientações à sociedade sobre como dispor adequadamente os resíduos eletroeletrônicos no estado do Rio de Janeiro**. 3. Ed. Rio de Janeiro. 2020. 47 p. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2378. Acesso em: jan. 2022.

XAVIER, L. H. da S. M.; OTTONI, M. de S. O. (org). **Mineração Urbana:** Conceitos e análise do potencial dos resíduos eletroeletrônicos**.** 1. ed. Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia Mineral. 2021. 198 p. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2483. Acesso em: mar. 2022.

XIANG, Y.; WU, P.; ZHU, N.; ZHANG, T.; LIU, Wen; WU, J.; LI, P. **Bioleaching of copper from waste printed circuit boards by bacterial consortium enriched from acid mine drainage**. Journal of Hazardous Materials. 2010. Vol. 184, 812-818 p. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.08.113.Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389410011465. Acessoem: abril, 2022.

YAMANE, L. H.; MORAES, V. T. de; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. **Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers**. Waste Management, 31, 2553-2558 p. 2011a. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X11003114. Acesso em: set. 2024.

YAMANE, L. H. et al. **Characterization of printed circuit boards for metal and energy recovery after milling and mechanical separation**. Waste Management, v. 31, n. 12, p. 2553–2558, 2011b. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.003. Acesso em: 20 jun. 2025.
YOO, B.; LIU, H.; WANG, M.; YIN, H.; ZHANG, X.; HUANG, L. **Techno-economic analysis of waste PCB recycling in Australia**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 190, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107830. Acesso em: 20 jun. 2025.

ZEISS. **EVO Series***:* User Manual and Operating Instructions. Oberkochen: Carl Zeiss Microscopy GmbH, 2020. Acesso em: 20 jun. 2025.

ZENG, X.; LI, J.; CHAN, H. M. **A review on metal recovery from electronic waste**. Journal of Cleaner Production, v. 18, n. 1, p. 11–21, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.020. Acesso em: 20 jun. 2025.

ZENG, X.; MATHEWS, J. A.; LI, J. **Urban Mining of E-Waste is Becoming More Cost-Effective Than Virgin Mining**. Environmental Science & Technology. 2018. Vol. 52(8), 4835–4841 p. doi:10.1021/acs.est.7b04909. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b0490. Acesso em: mar. 2022.

ZHANG, H.; LIU, Y.; WANG, X.; CHEN, L.; ZHOU, D. **Investigation on mechanical and electrical properties of Ag-Cu-Zn ternary alloys for electronic packaging applications**. *Materials Science and Engineering: A*, v. 748, p. 88–95, 2019. DOI: 10.1016/j.msea.2019.02.060. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509319302165. Acesso em: 25 jul. 2025.

ZHANG, L.; XIAN, Y.; WU, Y.; YANG, W.; ZENG, X. **Evaluation of metal recovery from waste printed circuit boards through various technologies**: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 279, 123844, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123844. Acesso em: jul. 2025.

ZHANG, L.; YAN, M. **Recovery of metals from waste printed circuit boards using environmentally friendly techniques**: A review. Journal of Environmental Management, v. 105, p. 76–85, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.036. Acesso em: 20 jun. 2025.

ZHOU, C.; LI, J.; HSU, E.; SONG, Q. **Recycling of waste electrical and electronic equipment in China**: Policies and status. *Journal of Hazardous Materials*, v. 254–255, p. 342–347, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.03.008. Acesso em: 20 jun. 2025.

ZHOU, X.; LIU, D.; BU, H.; DENG, L.; LIU, H.; YUAN, P.; DU, P.; SONG, H. **XRD-based quantitative analysis of clay minerals using reference intensity ratios, mineral intensity factors, Rietveld, and full pattern summation methods**: a critical review. Solid Earth Sciences, 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451912X17300703?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: out. 2023.

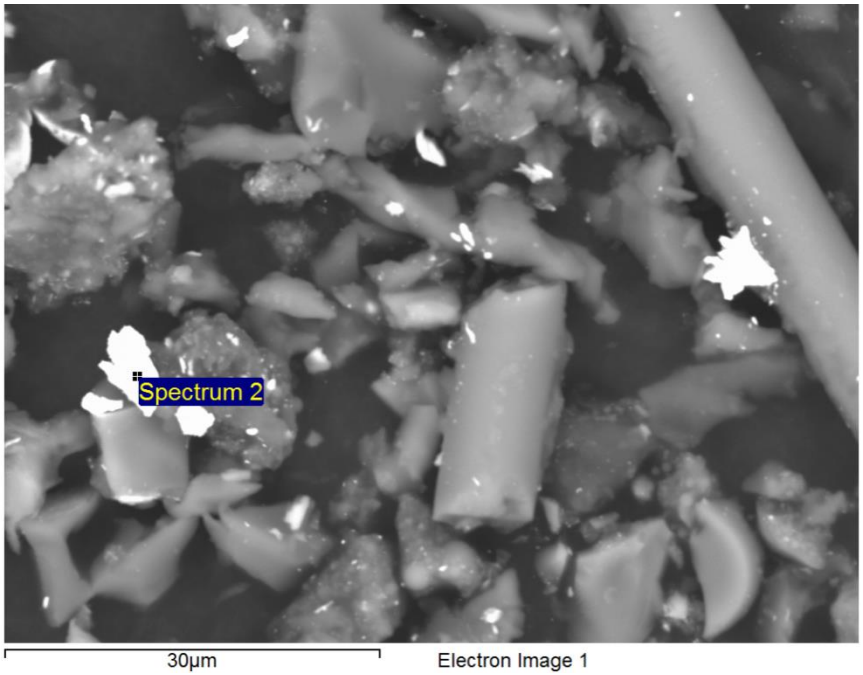
ZUFFO, A. M. (org.). **A produção do Conhecimento nas Ciências Agrárias e Ambientais 2**. Editora Atena. 2019. Vol. 2. 28p. Ponta Grossa, Paraná, ISBN 978-85-7247-285-2. Doi 10.22533/at.ed.852192604. Disponível em: https://www.atenaeditora.com.br/arquivos/ebooks/a-producao-do-conhecimento-nas-ciencias-agrarias-e-ambientais-2. Acesso em: mai. 2022.

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO ATRAVÉS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E DA ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA

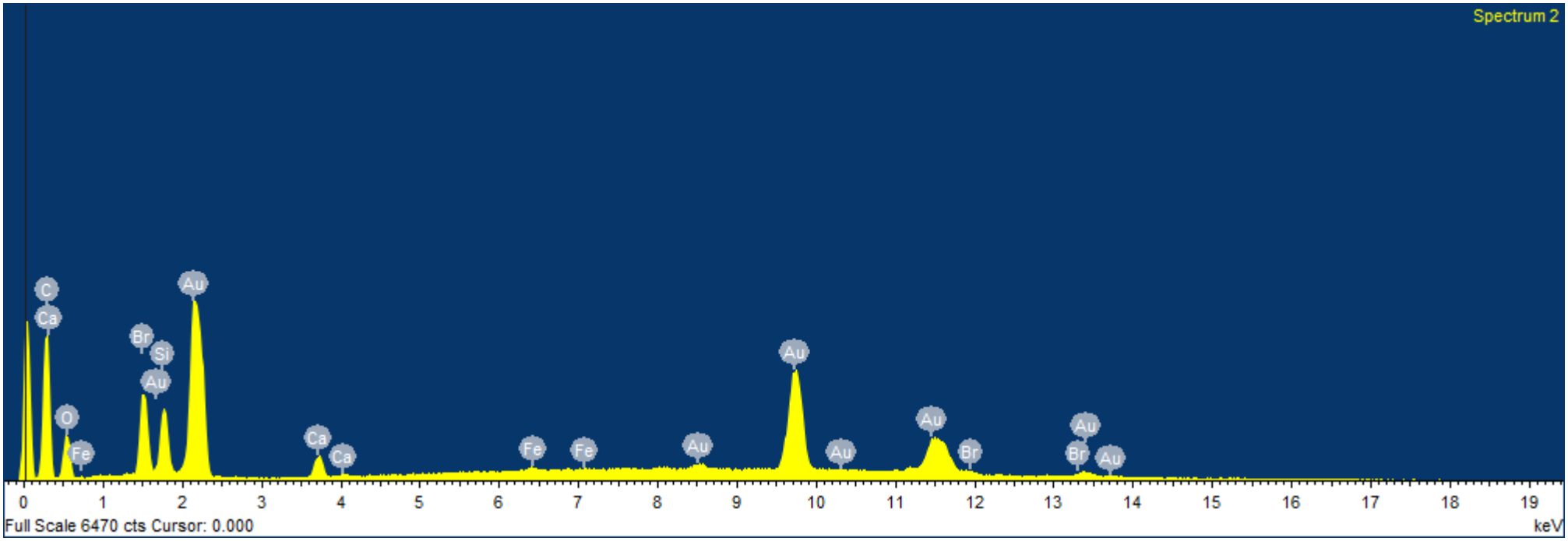
OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

Andressa 19.10 10/19/2023 10:31:58 AM

Imagem de retroespelhamento da PCIa, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 2*"corresponde à partícula de Au



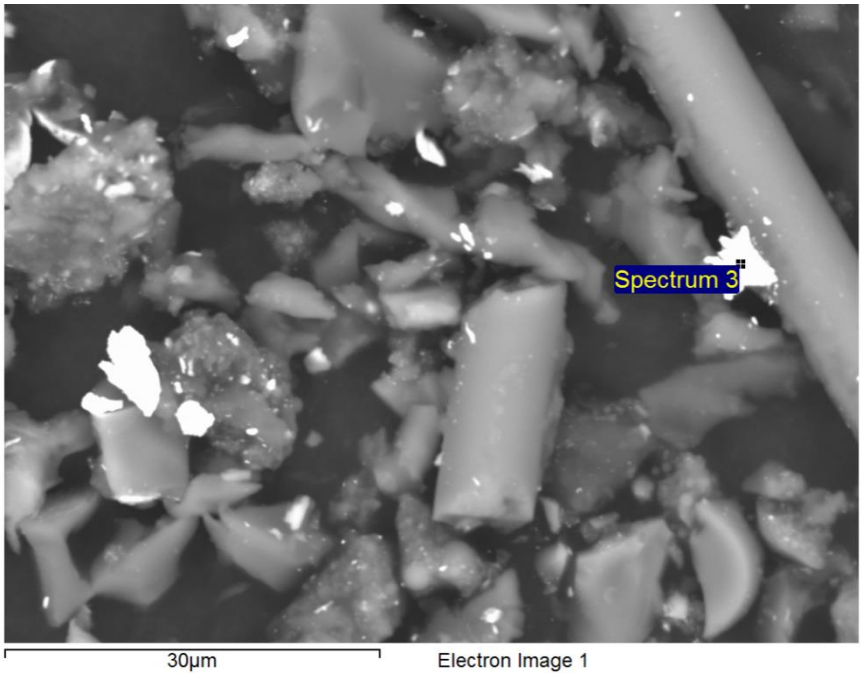
Element	Weight %	Atomic %
O K	22.52	65.60
Si K	5.54	9.20
Ca K	3.29	3.83
Fe K	1.03	0.86
Br L	13.00	7.58
Au M	54.62	12.93
Totals	100.00	



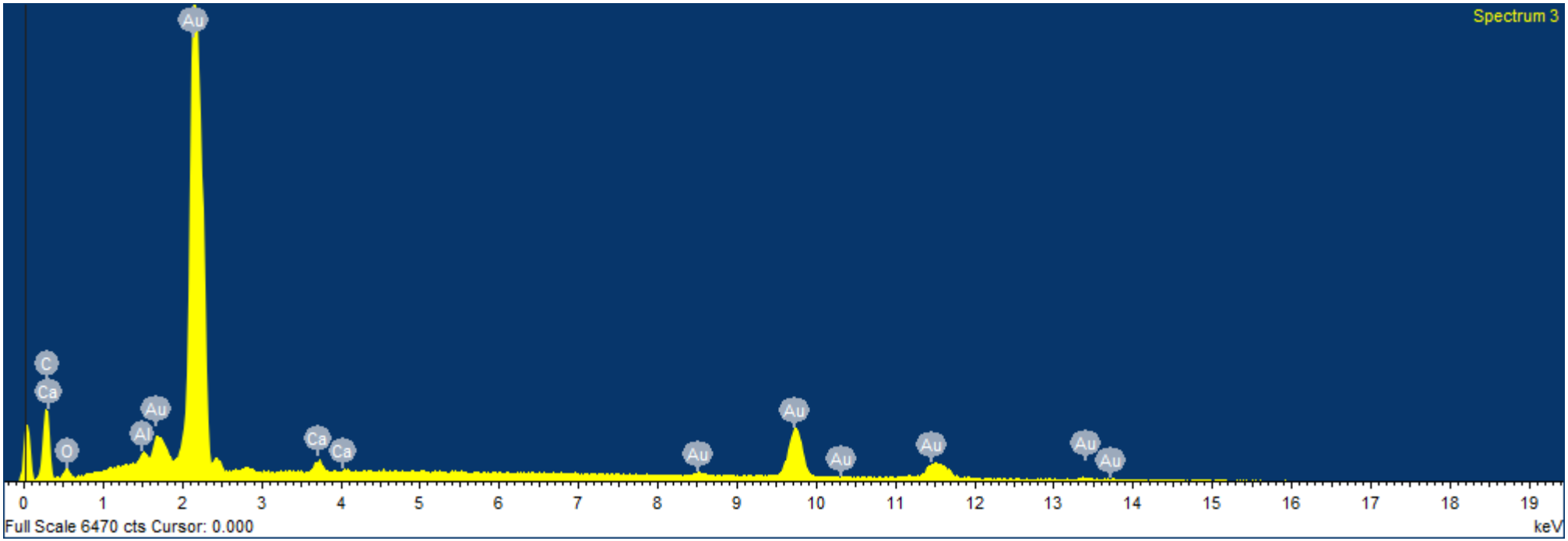
OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

Andressa 19.10 10/19/2023 10:32:09 AM

Imagem de retroespelhamento da PCIa, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 3*"corresponde à partícula de Au

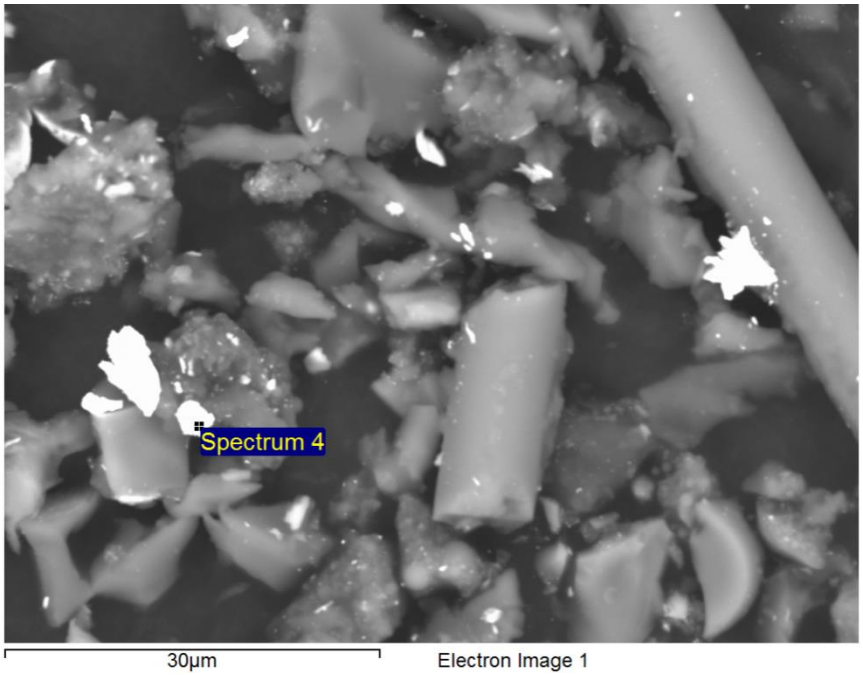


Element	Weight %	Atomic %
O K	4.75	35.61
Al K	0.80	3.56
Ca K	1.42	4.24
Au M	93.02	56.59
Totals	100.00	

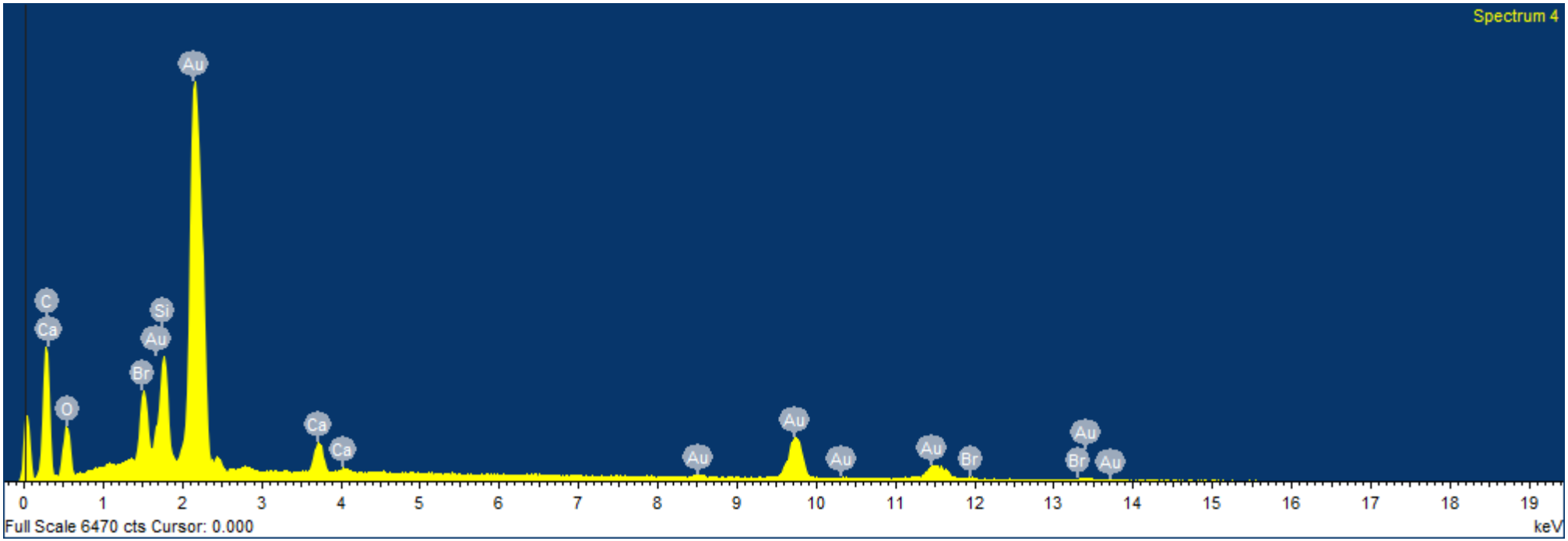


Andressa 19.10 10/19/2023 10:32:17 AM

Imagem de retroespelhamento da PCIa, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 4*"corresponde à partícula de Au



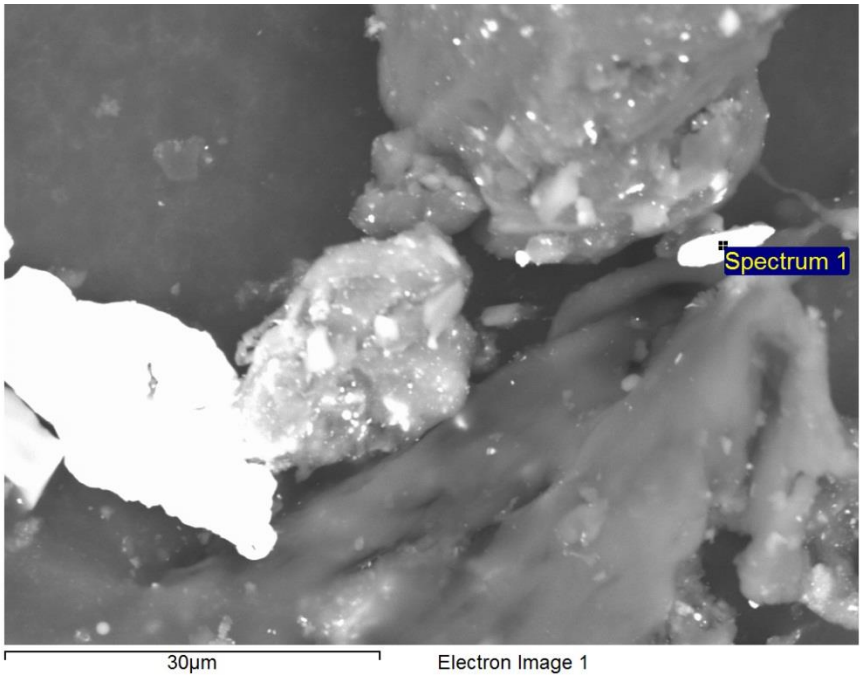
Element	Weight %	Atomic %
O K	17.18	61.45
Si K	4.69	9.56
Ca K	2.96	4.22
Br L	6.89	4.94
Au M	68.27	19.83
Totals	100.00	



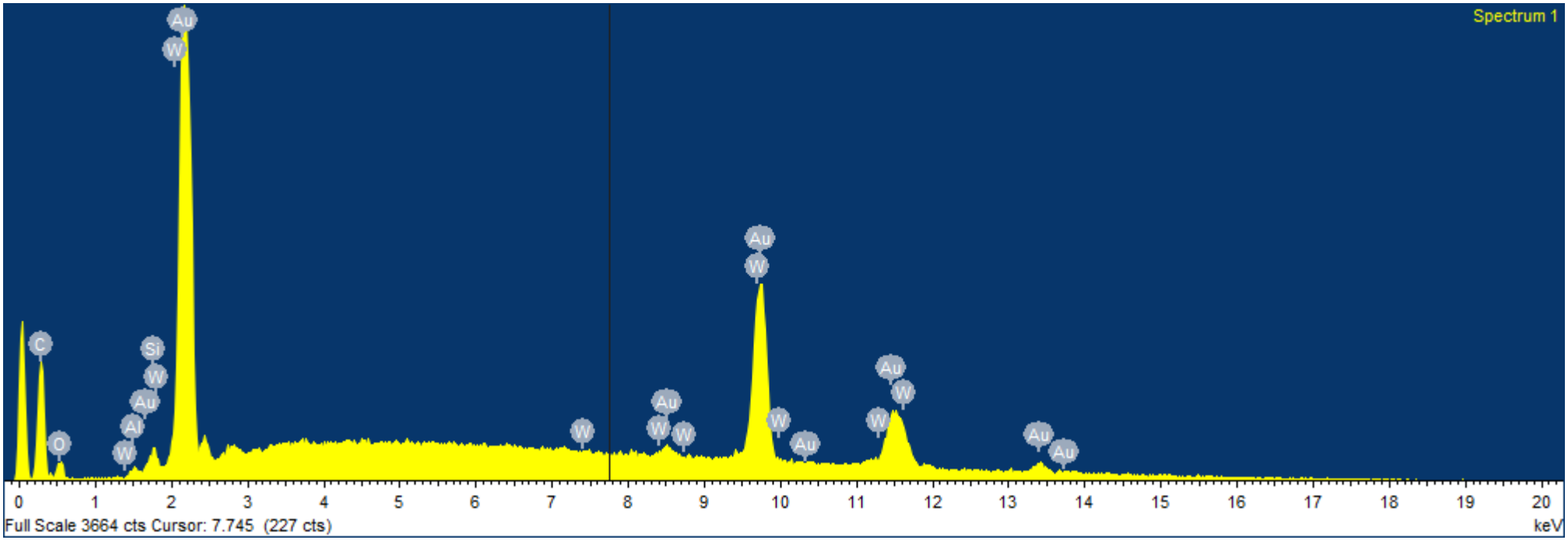
OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

Andressa Piovezan_4 8/27/2024 8:55:36 AM

Imagem de retroespelhamento da PCIb, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 1*"corresponde à partícula de Au

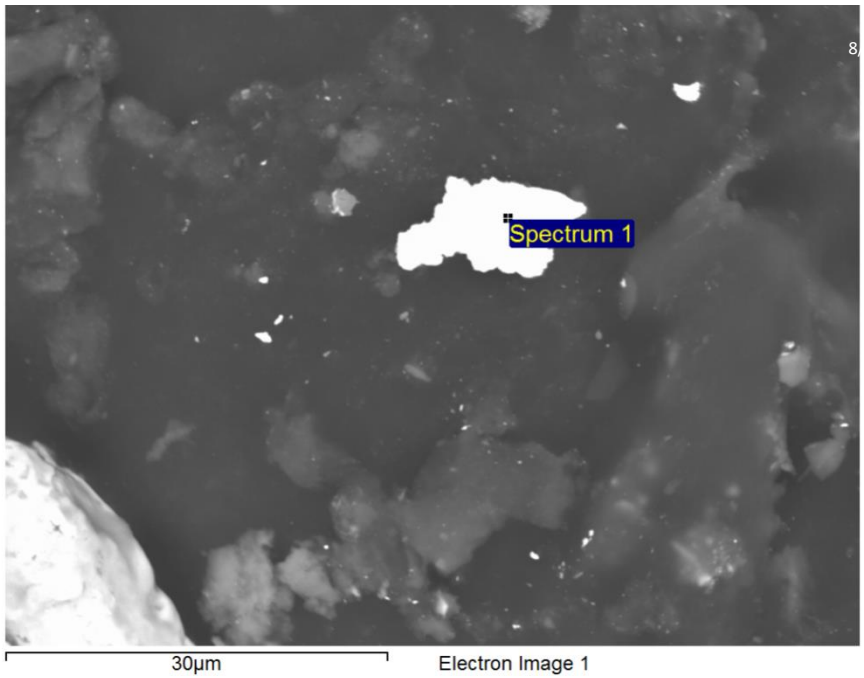


Element	Weight %	Atomic %
O K	7.64	47.49
Al K	0.57	2.08
Si K	1.32	4.69
W M	1.27	0.69
Au M	89.21	45.05
Totals	100.00	

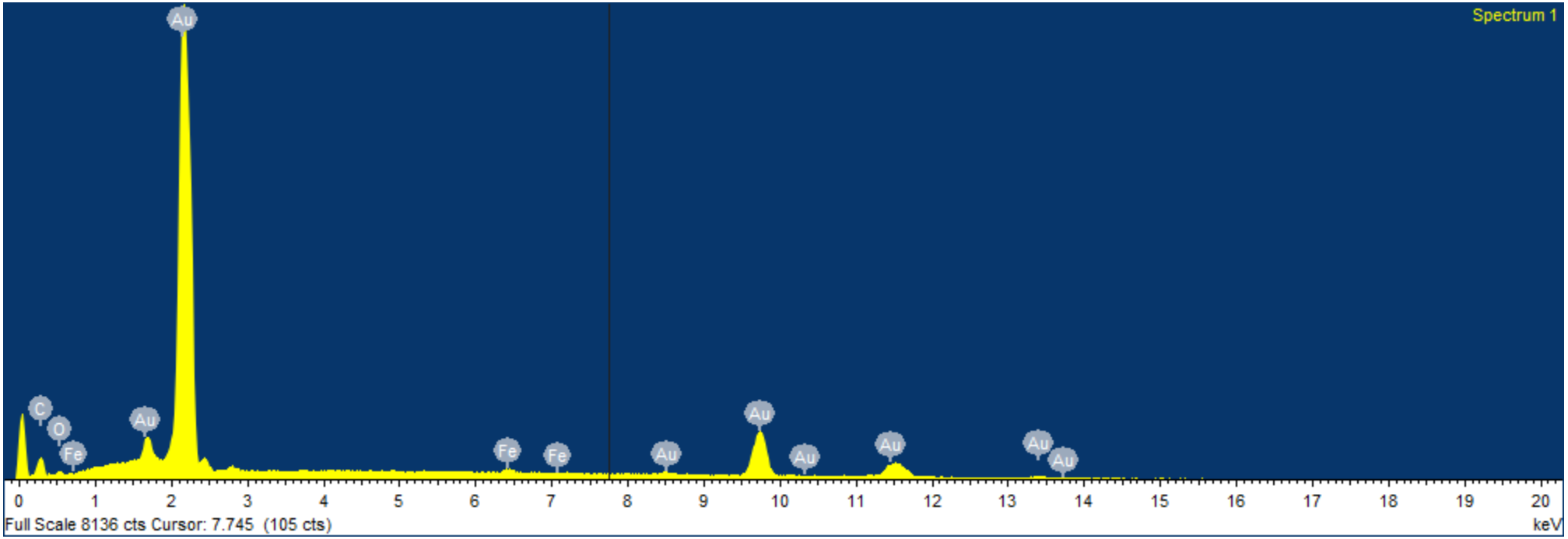


Andressa Piovezan_4

Imagem de retroespelhamento da PCIc, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 1*"corresponde à partícula de Au

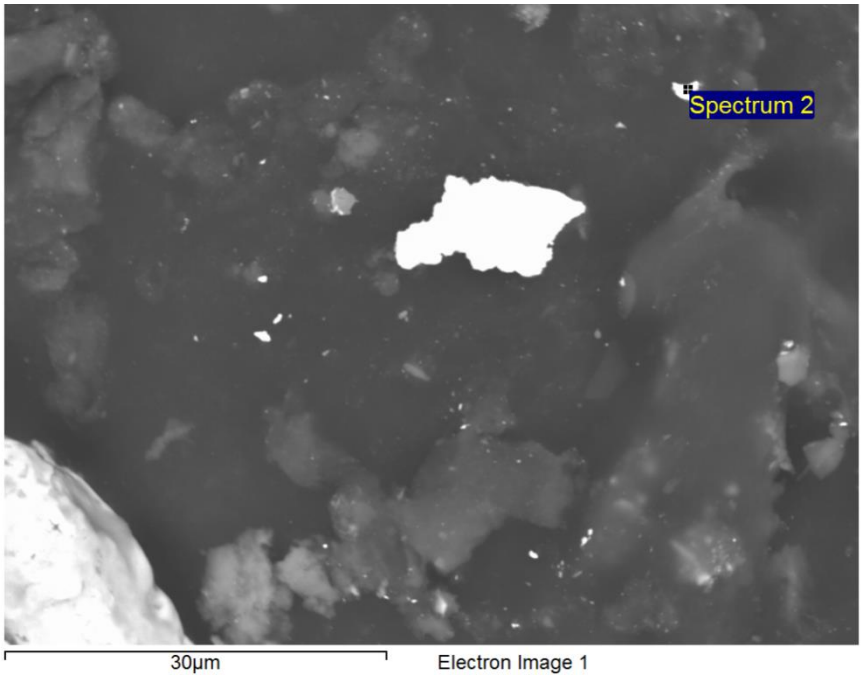


Element	Weight %	Atomic %
O K	1.95	19.29
Fe K	0.92	2.61
Au M	97.13	78.10
Totals	100.00	

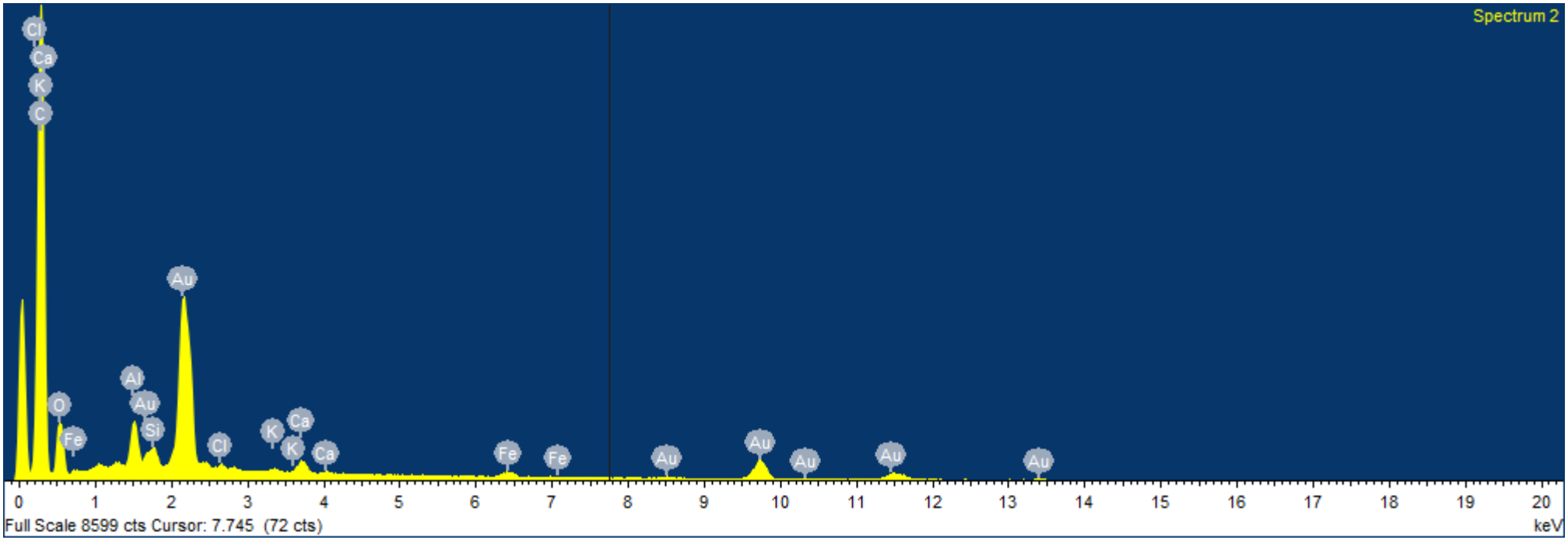


Andressa Piovezan_4 8/27/2024 9:08:51 AM

Imagem de retroespelhamento da PCIc, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 2*"corresponde à partícula de Au

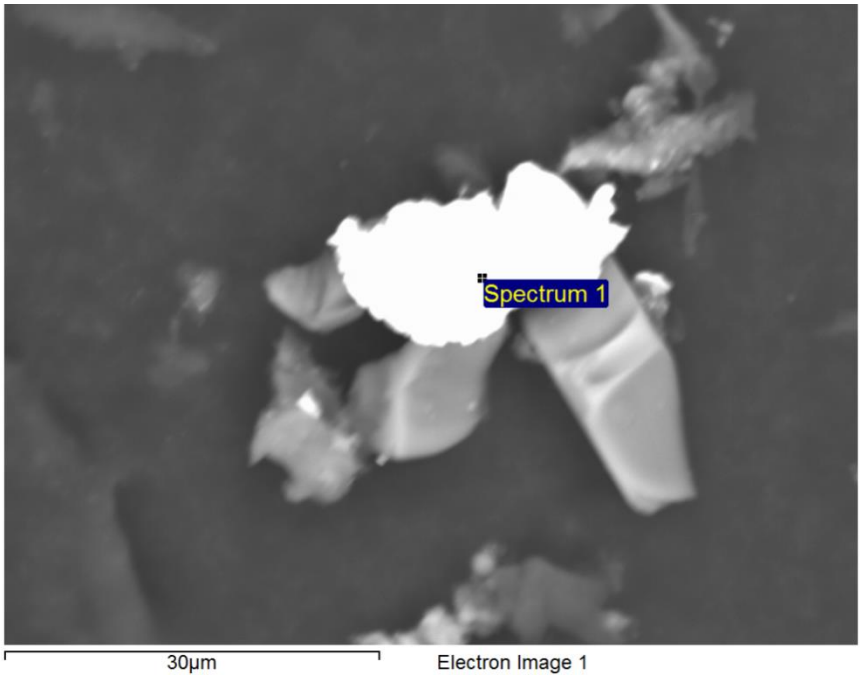


Element	Weight %	Atomic %
O K	32.17	76.17
Al K	4.33	6.07
Si K	1.46	1.97
Cl K	1.04	1.11
K K	0.50	0.48
Ca K	2.30	2.18
Fe K	1.69	1.15
Au M	56.51	10.87
Totals	100.00	

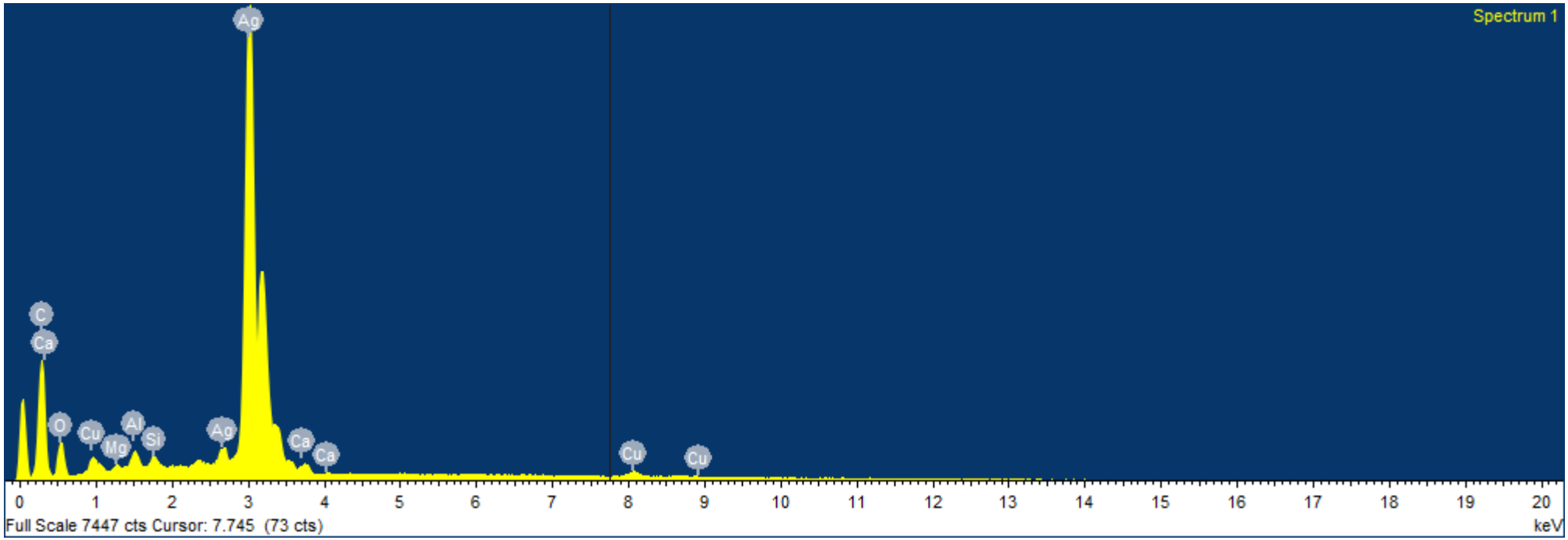


Andressa Piovezan_4

Imagem de retroespelhamento da PCIa, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 1*"corresponde à partícula de Ag

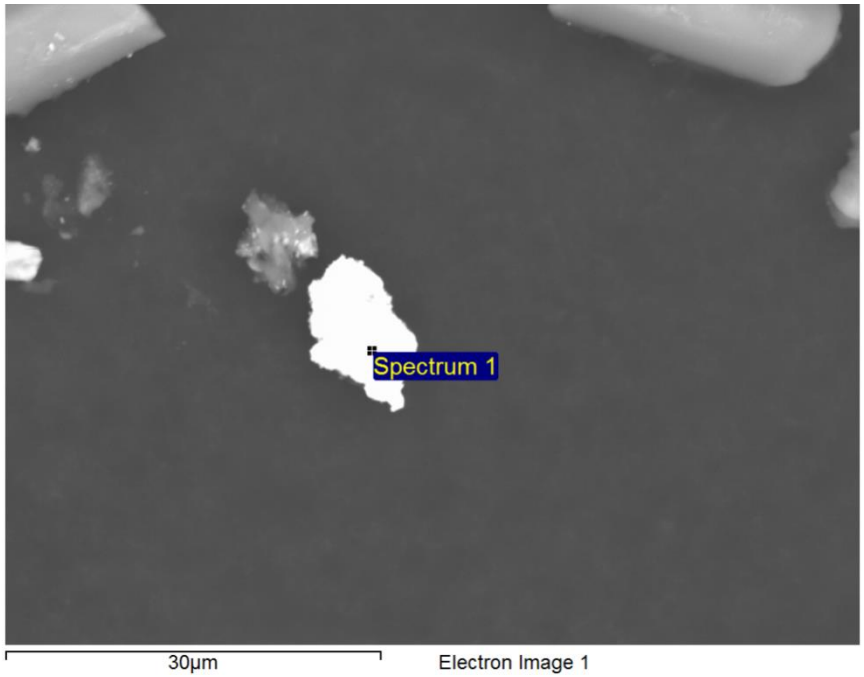


Element	Weight %	Atomic %
O K	23.72	65.34
Mg K	0.43	0.79
Al K	1.06	1.74
Si K	0.55	0.86
Ca K	0.63	0.69
Cu K	1.79	1.24
Ag L	71.81	29.34
Totals	100.00	

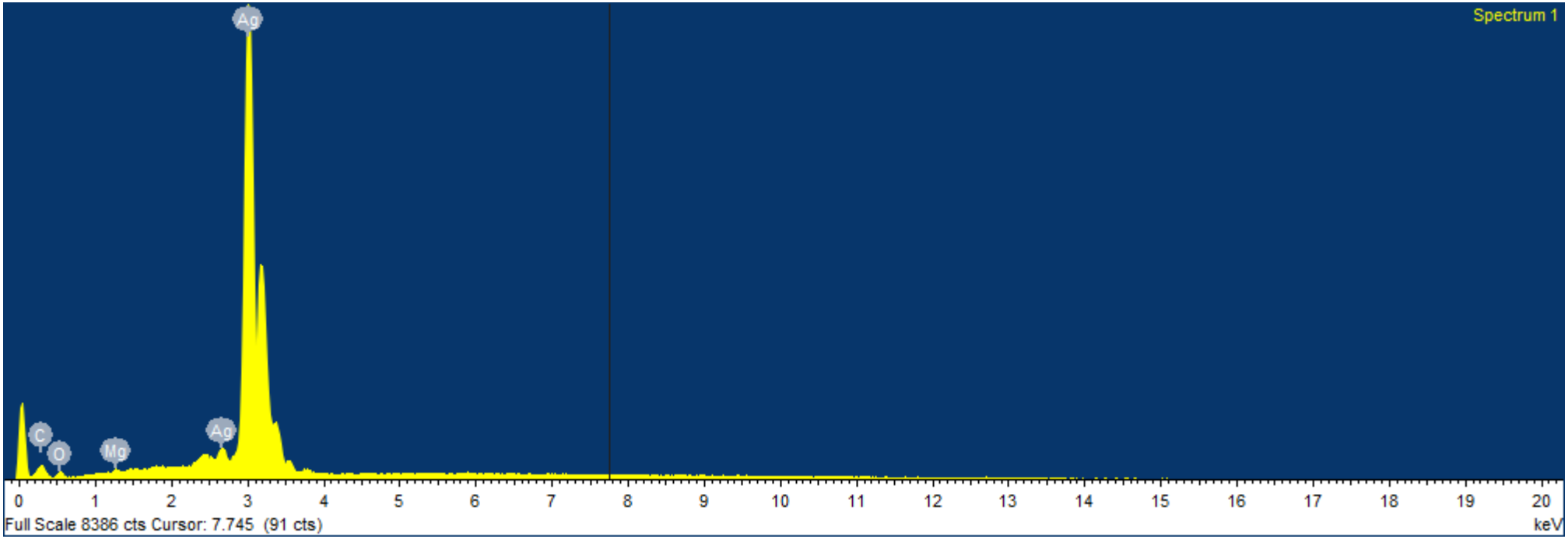


Andressa Piovezan_4

Imagem de retroespelhamento da PCIb, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 1*"corresponde à partícula de Ag



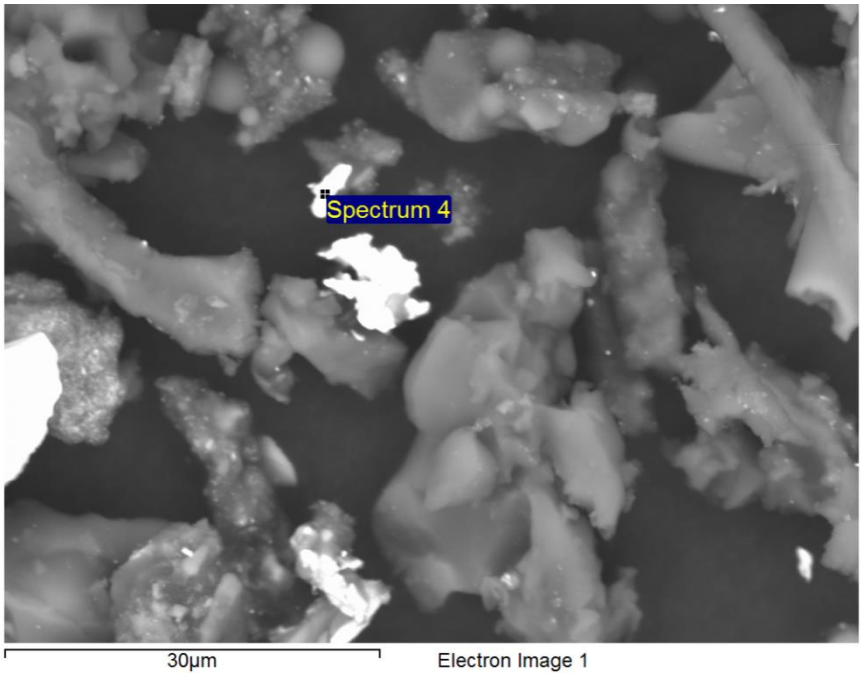
Element	Weight %	Atomic %
O K	6.16	30.31
Mg K	0.47	1.52
Ag L	93.37	68.17
Totals	100.00	



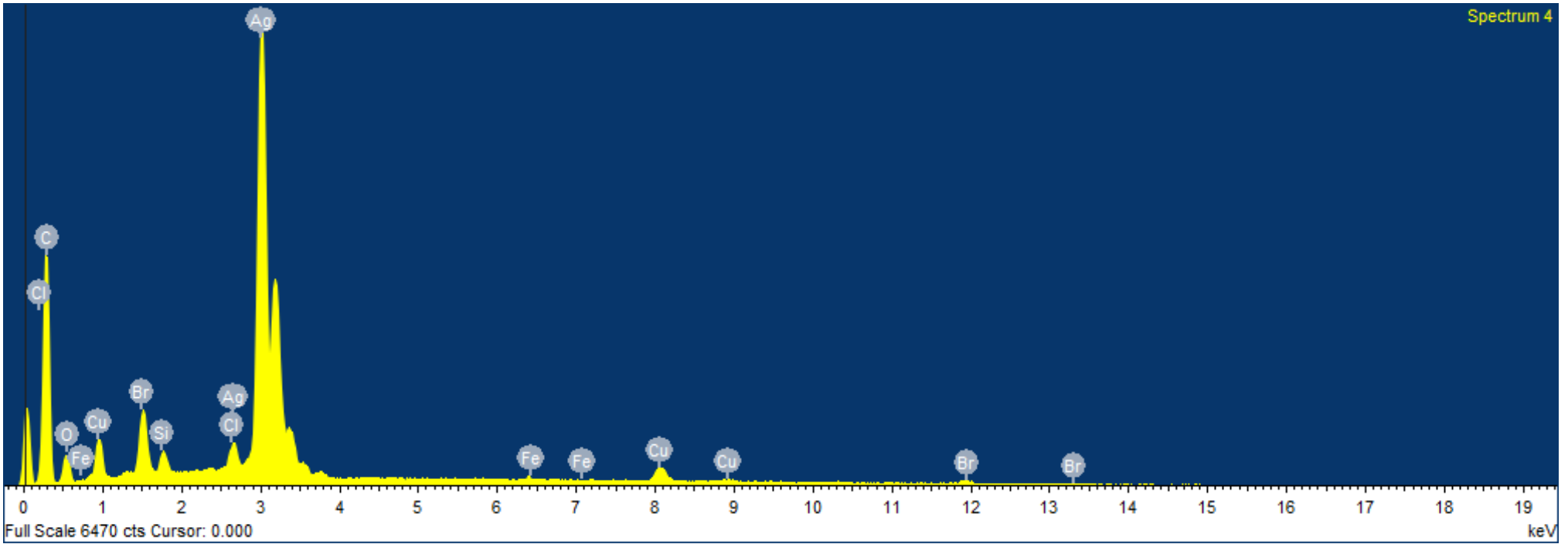
OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

Andressa 12/1/2023 10:48:51 AM

Imagem de retroespelhamento da PCIc, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 4*"corresponde à partícula de Ag

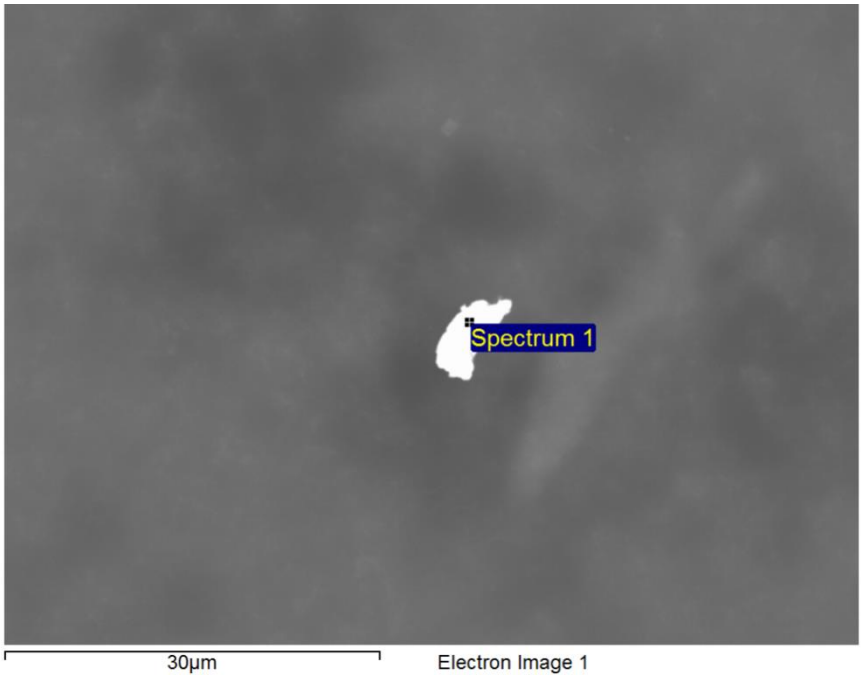


Element	Weight%	Atomic%
O K	17.97	56.58
Si K	1.22	2.18
Cl K	0.62	0.88
Fe K	0.40	0.36
Cu K	4.53	3.59
Br L	7.76	4.89
Ag L	67.50	31.52
Totals	100.00	

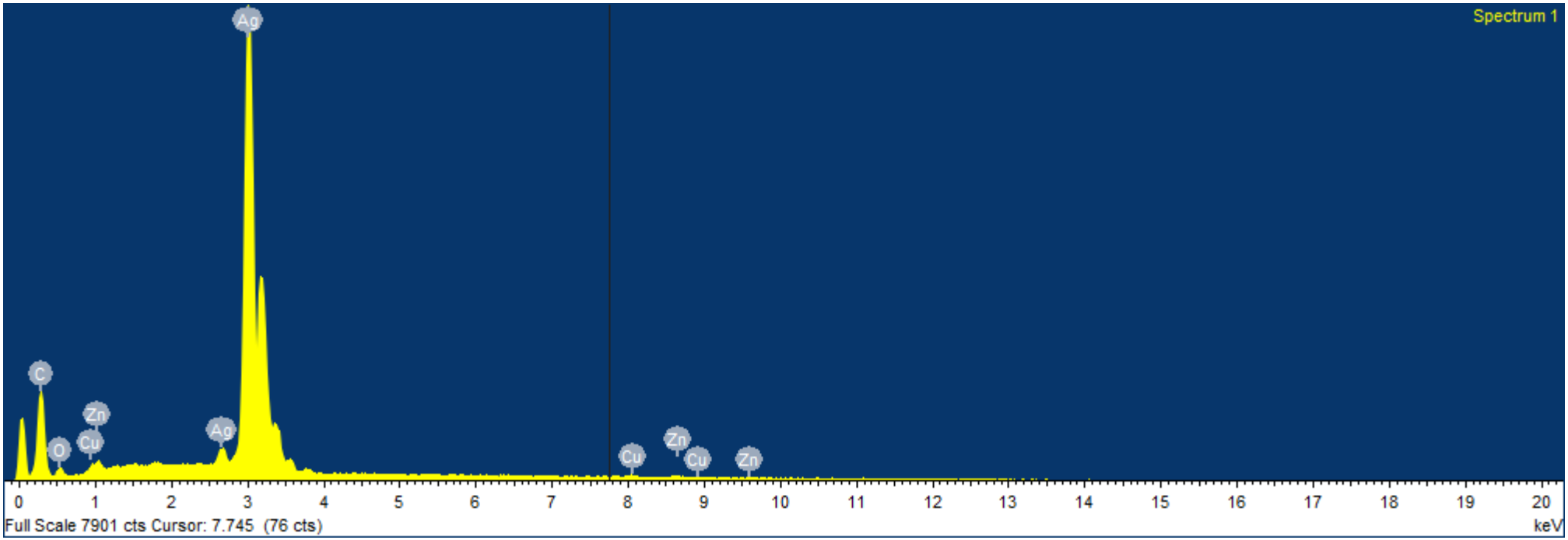


Andressa Piovezan_4 8/27/2024 9:13:41 AM

Imagem de retroespelhamento da PCId, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Ag



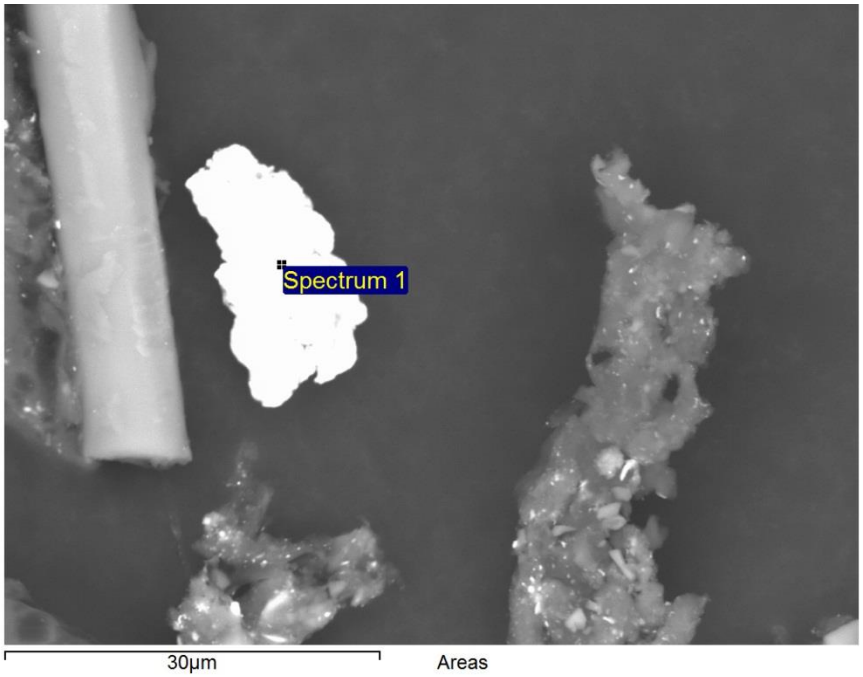
Element	Weight%	Atomic%
C K	14.76	51.40
O K	6.80	17.76
Cu K	0.66	0.43
Zn K	0.99	0.63
Ag L	76.80	29.77
Totals	100.00	



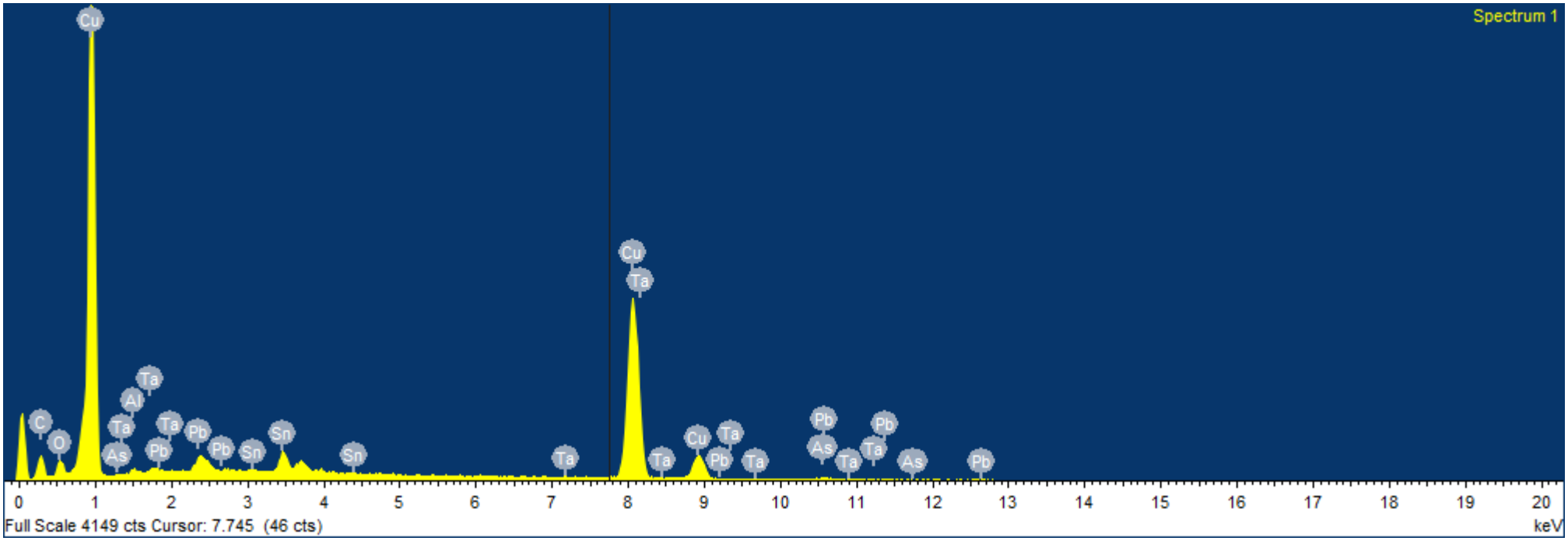
OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

Andressa Piovezan_4 8/27/2024 8:56:16 AM

Imagem de retroespelhamento da PCIa, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Cu



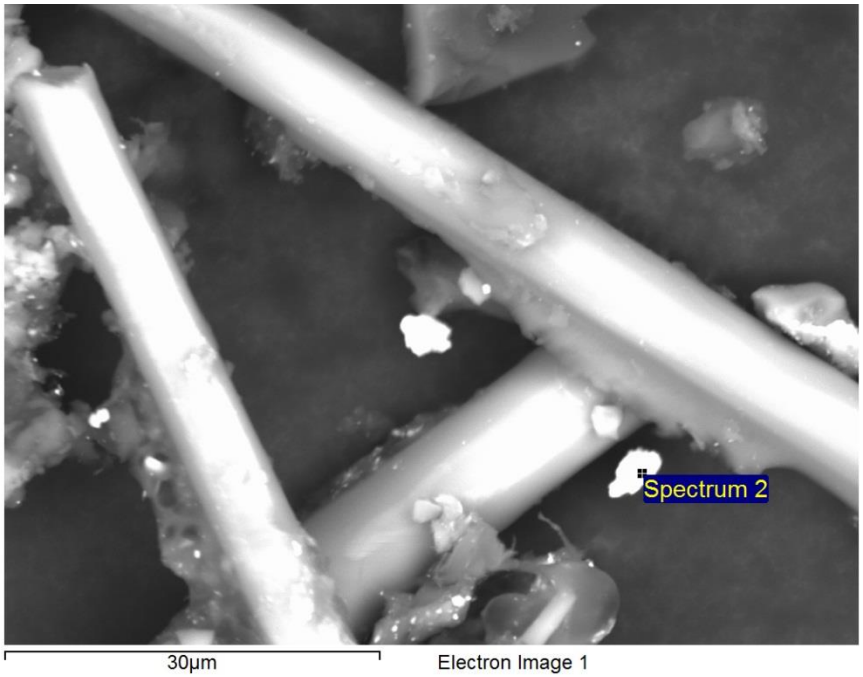
Element	Weight %	Atomic %
O K	5.13	18.57
Al K	0.53	1.13
Cu K	83.24	75.85
As L	0.24	0.19
Sn L	5.64	2.75
Ta M	1.31	0.42
Pb M	3.91	1.09
Totals	100.00	



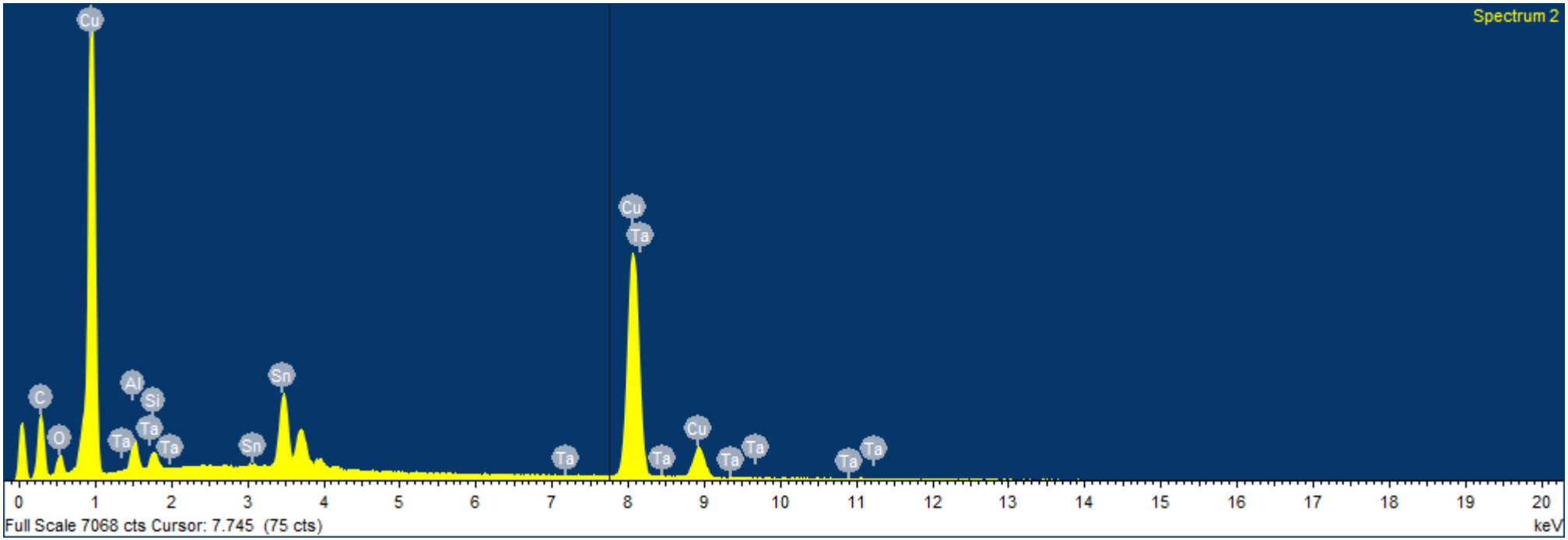
OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

Andressa Piovezan_4 8/27/2024 8:57:34 AM

Imagem de retroespelhamento da PCIb, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 2*" corresponde à partícula de Cu



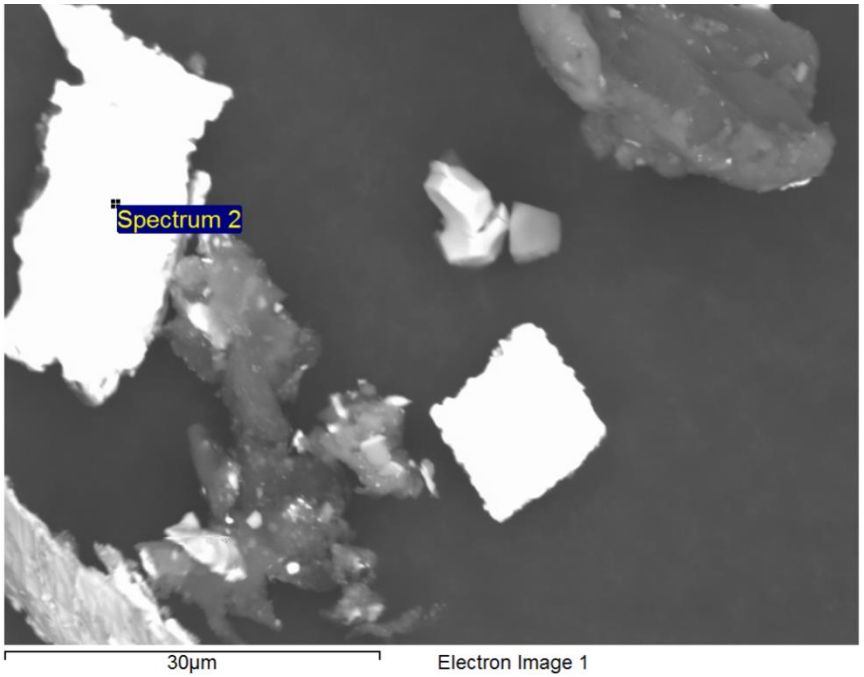
Element	Weight %	Atomic %
O K	5.77	19.76
Al K	2.86	5.80
Si K	1.45	2.84
Cu K	75.02	64.70
Sn L	15.02	6.94
Ta M	-0.13	-0.04
Totals	100.00	



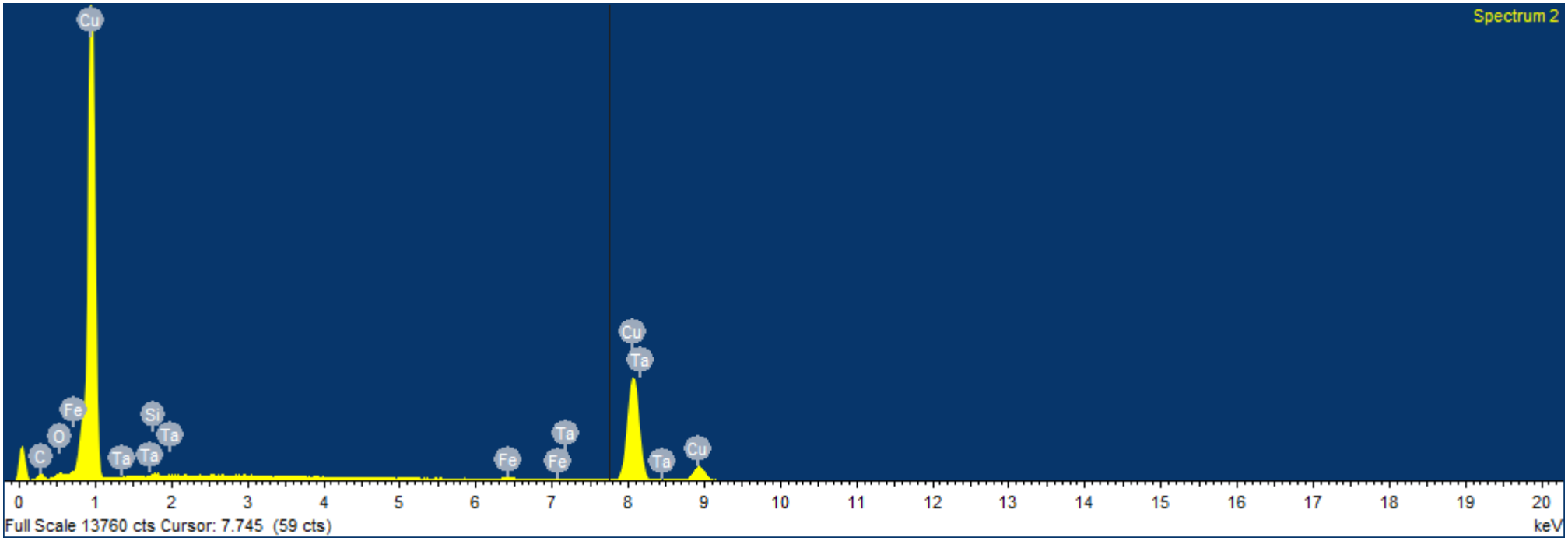
OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

Andressa Piovezan_4 8/27/2024 9:09:16 AM

Imagem de retroespelhamento da PCIc, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 2*" corresponde à partícula de Cu



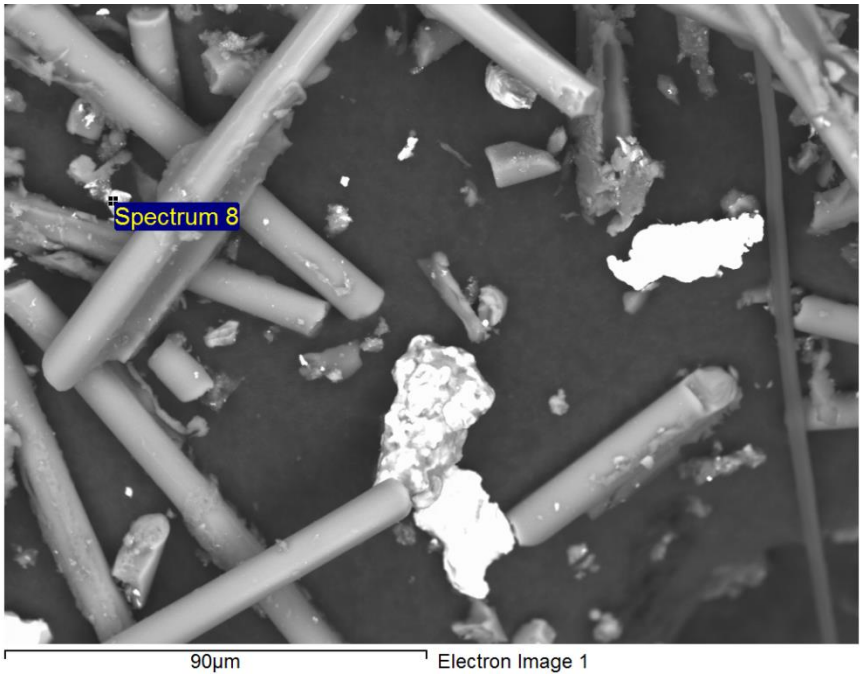
Element	Weight %	Atomic %
O K	1.69	6.27
Si K	1.00	2.11
Fe K	0.42	0.44
Cu K	98.17	91.60
Ta M	-1.27	-0.42
Totals	100.00	



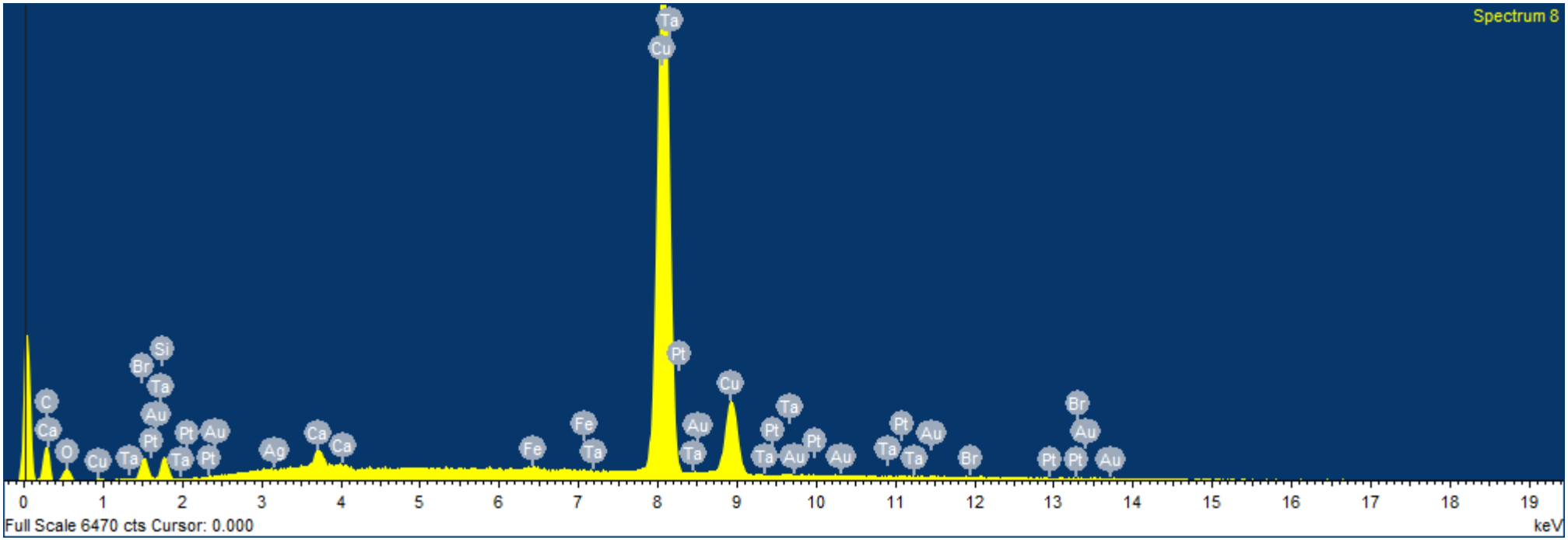
OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

Andressa 19.10 10/19/2023 9:53:23 AM

Imagem de retroespelhamento da PCId, obtida por MEV, com magnificação de 1500x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 8*" corresponde à partícula de Cu



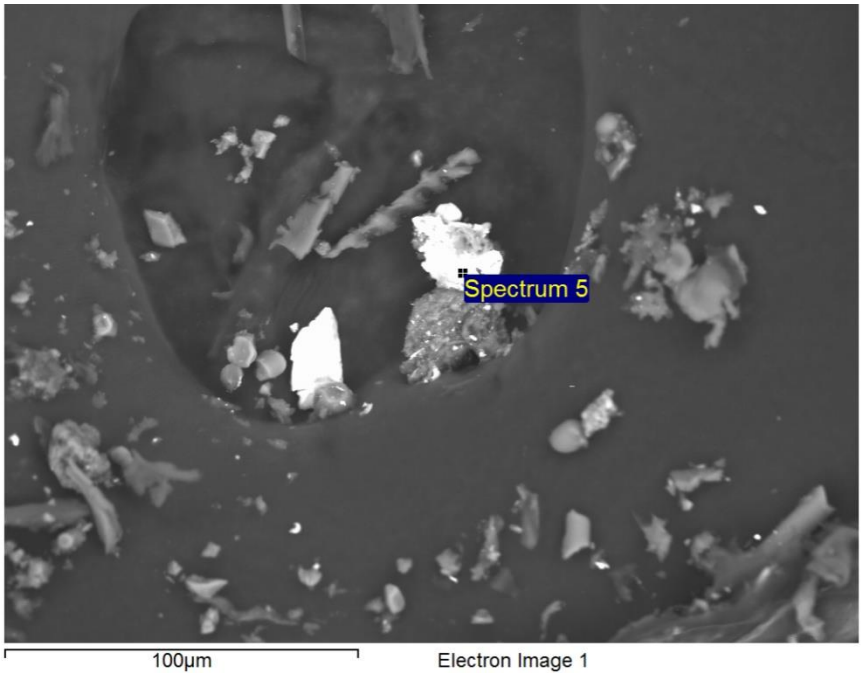
Element	Weight %	Atomic %
O K	1.22	4.59
Si K	1.25	2.67
Ca K	0.68	1.02
Fe K	0.27	0.30
Cu K	95.04	89.95
Br L	2.30	1.73
Ag L	-0.02	-0.01
Ta M	-0.78	-0.26
Pt M	0.00	0.00
Au M	0.03	0.01
Totals	100.00	



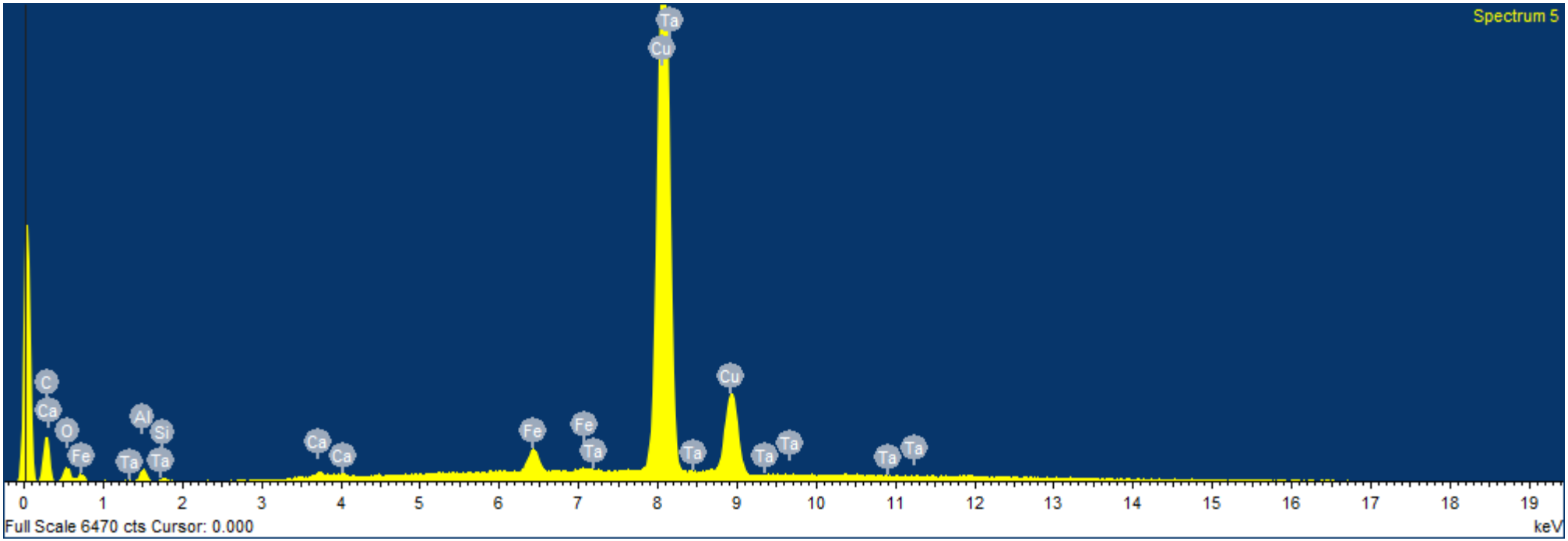
OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

Andressa 19.10 10/19/2023 10:55:42 AM

Imagem de retroespelhamento da PCId, obtida por MEV, com magnificação de 1250x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 5*" corresponde à partícula de Cu



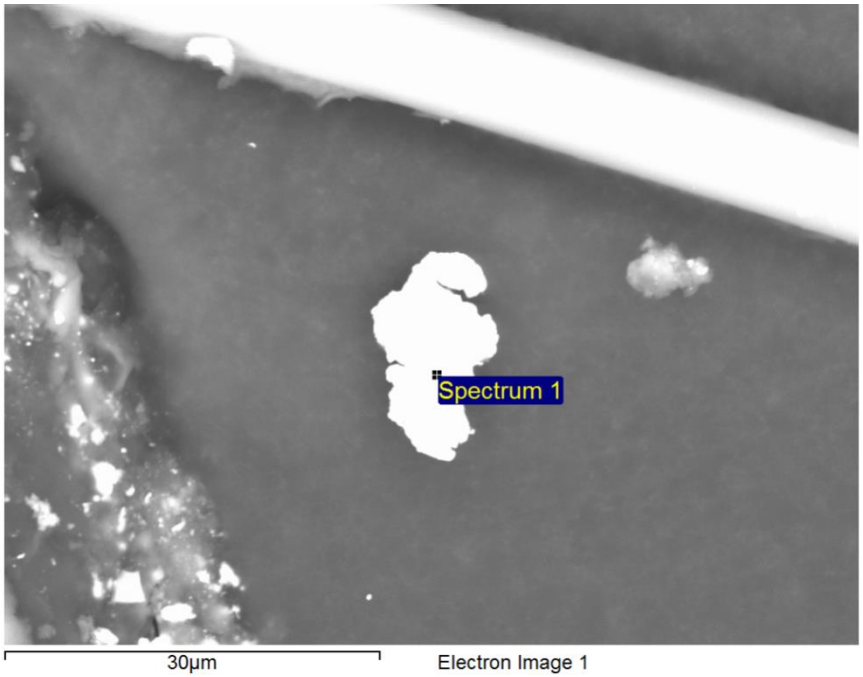
Element	Weight %	Atomic %
O K	1.38	5.22
Al K	0.62	1.39
Si K	0.11	0.24
Ca K	0.17	0.26
Fe K	1.74	1.88
Cu K	95.91	91.00
Ta M	0.06	0.02
Totals	100.00	



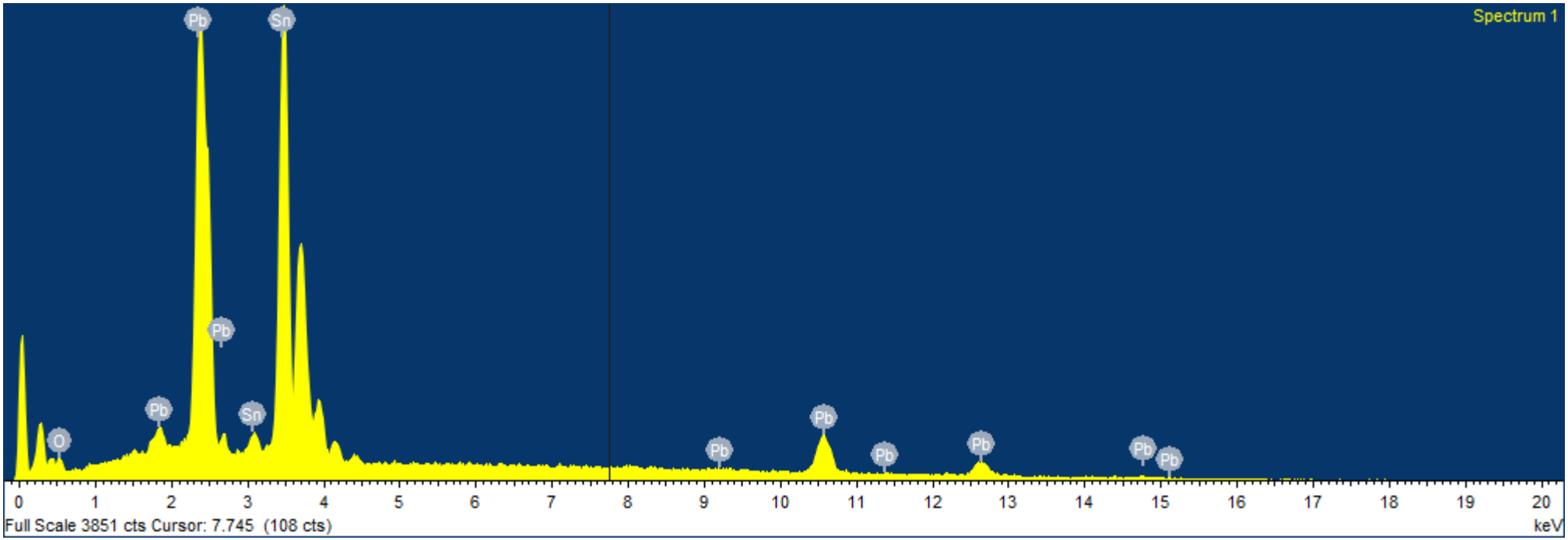
OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

Andressa Piovezan_4 8/27/2024 8:56:50 AM

Imagem de retroespelhamento da PCIa, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Sn e Pb



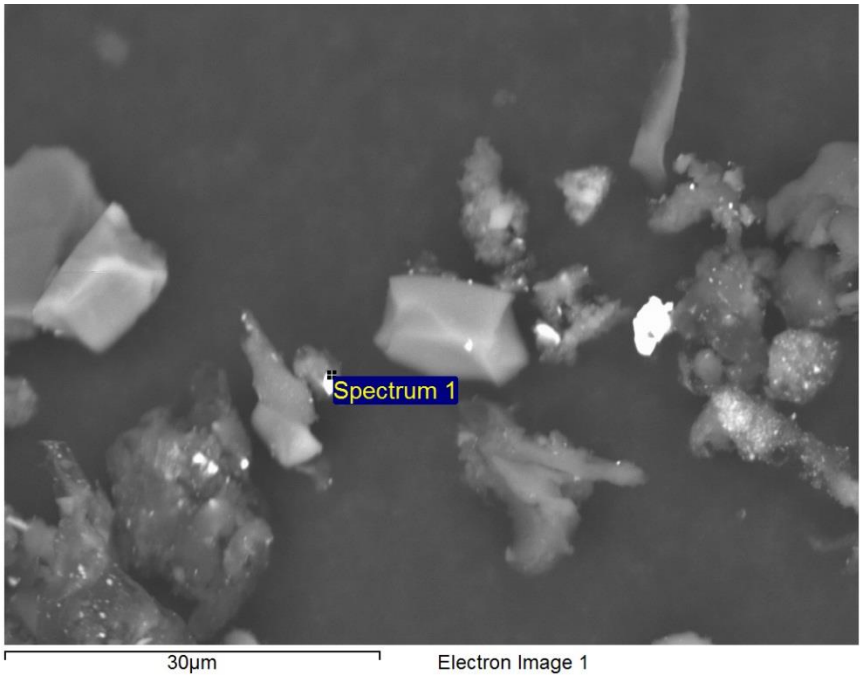
Element	Weight %	Atomic %
O K	4.08	27.60
Sn L	57.16	52.14
Pb M	38.77	20.26
Totals	100.00	



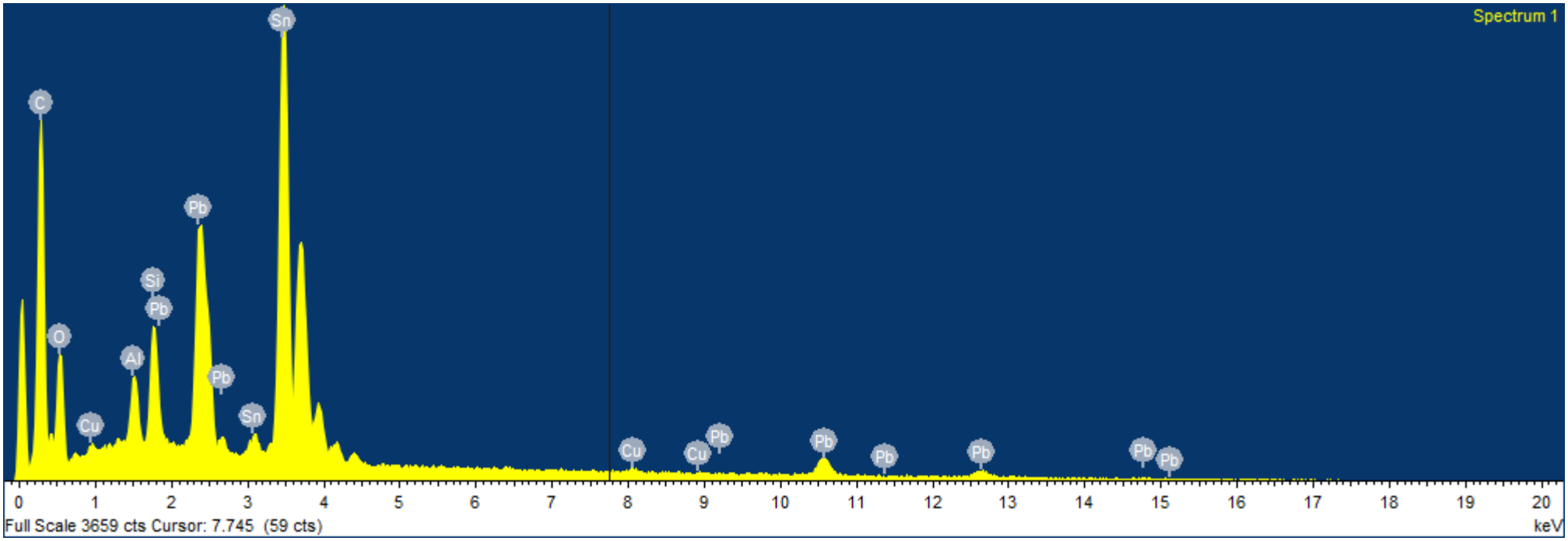
OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

Andressa Piovezan_4 8/27/2024 8:57:01 AM

Imagem de retroespelhamento da PCIb, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Sn e Pb

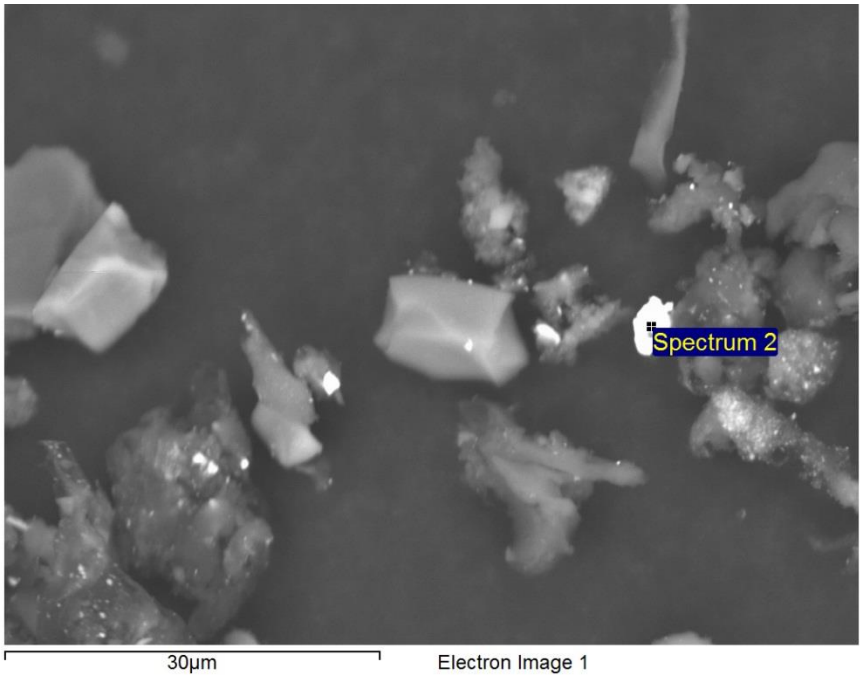


Element	Weight %	Atomic %
O K	28.83	72.32
Al K	2.06	3.06
Si K	3.39	4.85
Cu K	0.61	0.39
Sn L	46.90	15.86
Pb M	18.21	3.53
Totals	100.00	

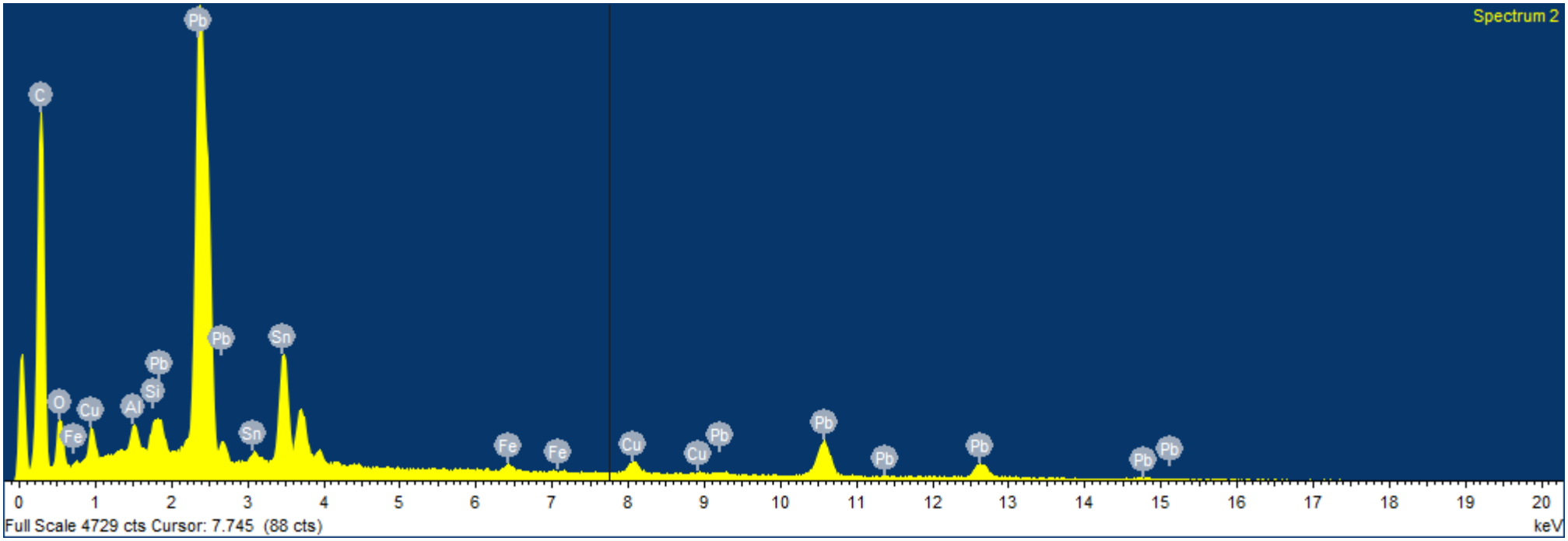


Andressa Piovezan_4 8/27/2024 8:57:07 AM

Imagem de retroespelhamento da PCIb, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 2*" corresponde à partícula de Sn e Pb



Element	Weight %	Atomic %
O K	17.15	64.32
Al K	1.18	2.62
Si K	1.05	2.24
Fe K	1.04	1.12
Cu K	3.06	2.89
Sn L	21.46	10.85
Pb M	55.07	15.95
Totals	100.00	



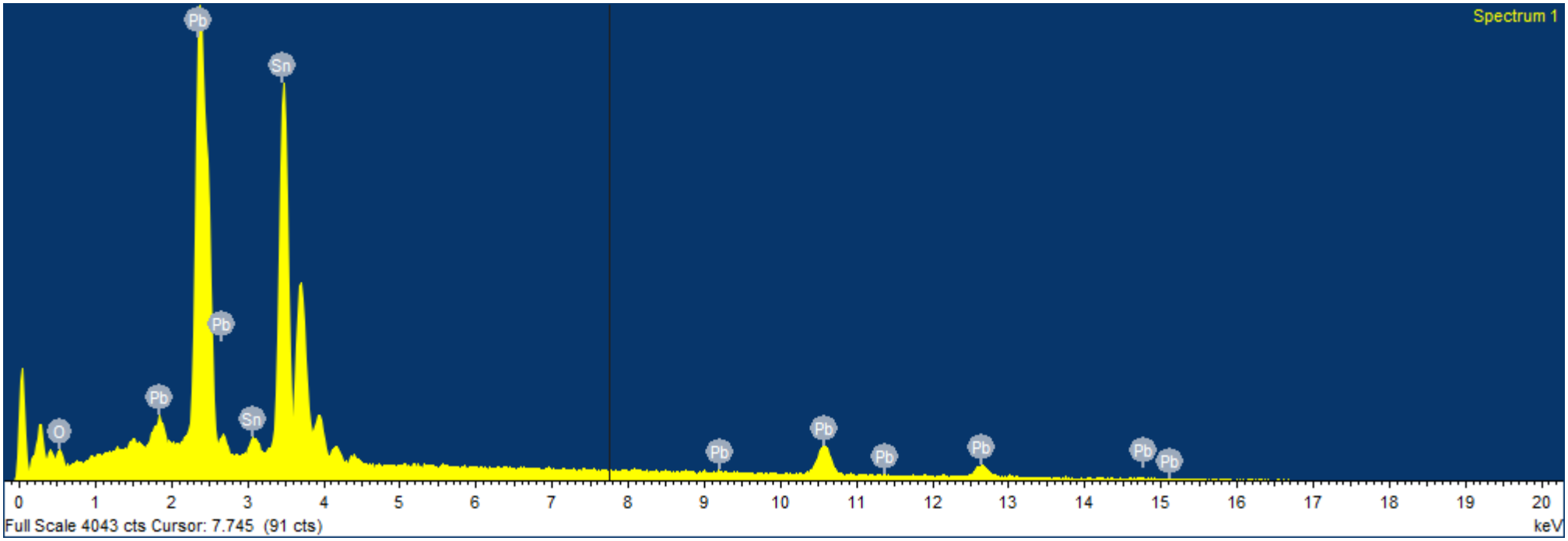
OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

Andressa Piovezan_4 8/27/2024 8:59:41 AM

Imagem de retroespelhamento da PCIc, obtida por MEV, com magnificação de 1750x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Sn e Pb

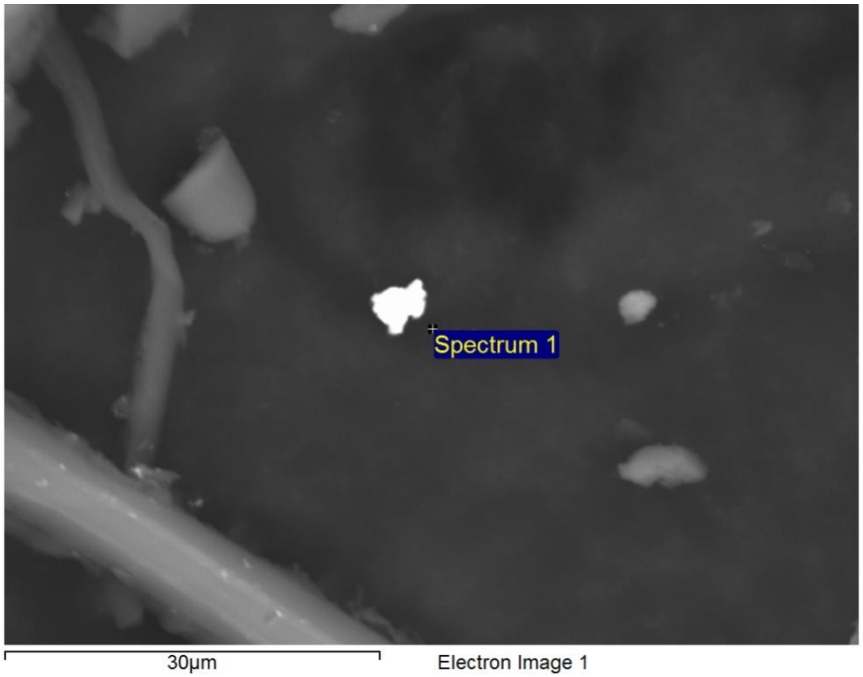


Element	Weight %	Atomic %
O K	5.78	36.03
Sn L	51.87	43.58
Pb M	42.35	20.38
Totals	100.00	

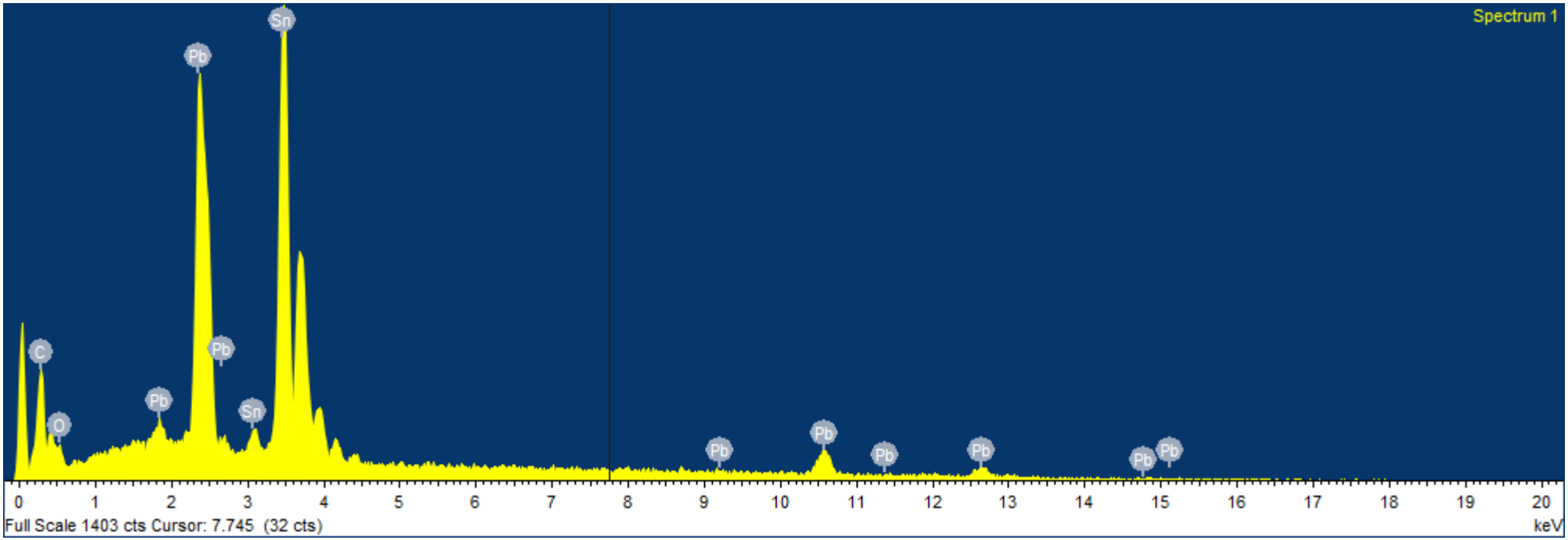


Andressa Piovezan_4 8/27/2024 9:02:22 AM

Imagem de retroespelhamento da PCIc, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Sn e Pb



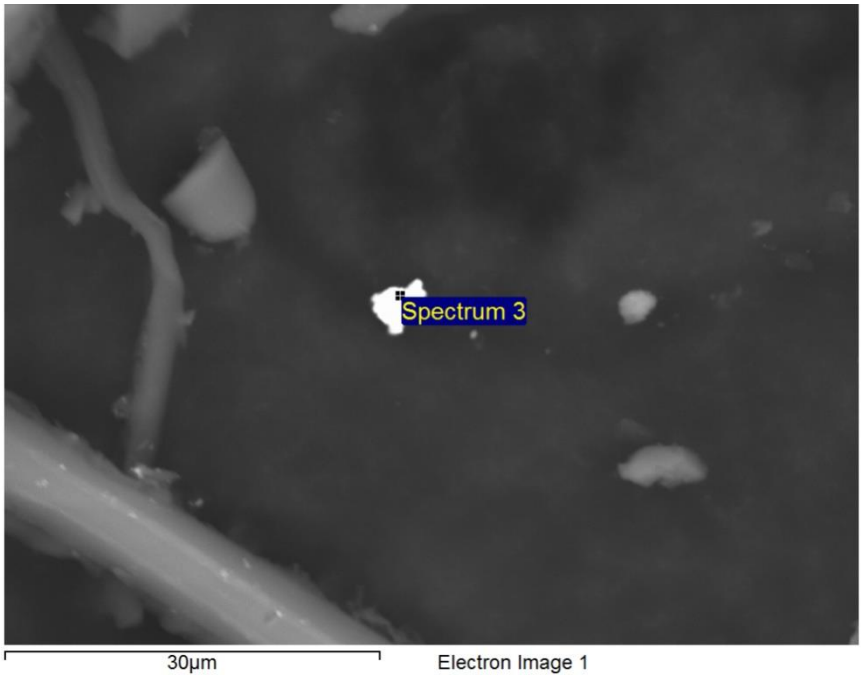
Element	Weight %	Atomic %
O K	5.98	35.93
Sn L	59.18	47.91
Pb M	34.84	16.16
Totals	100.00	



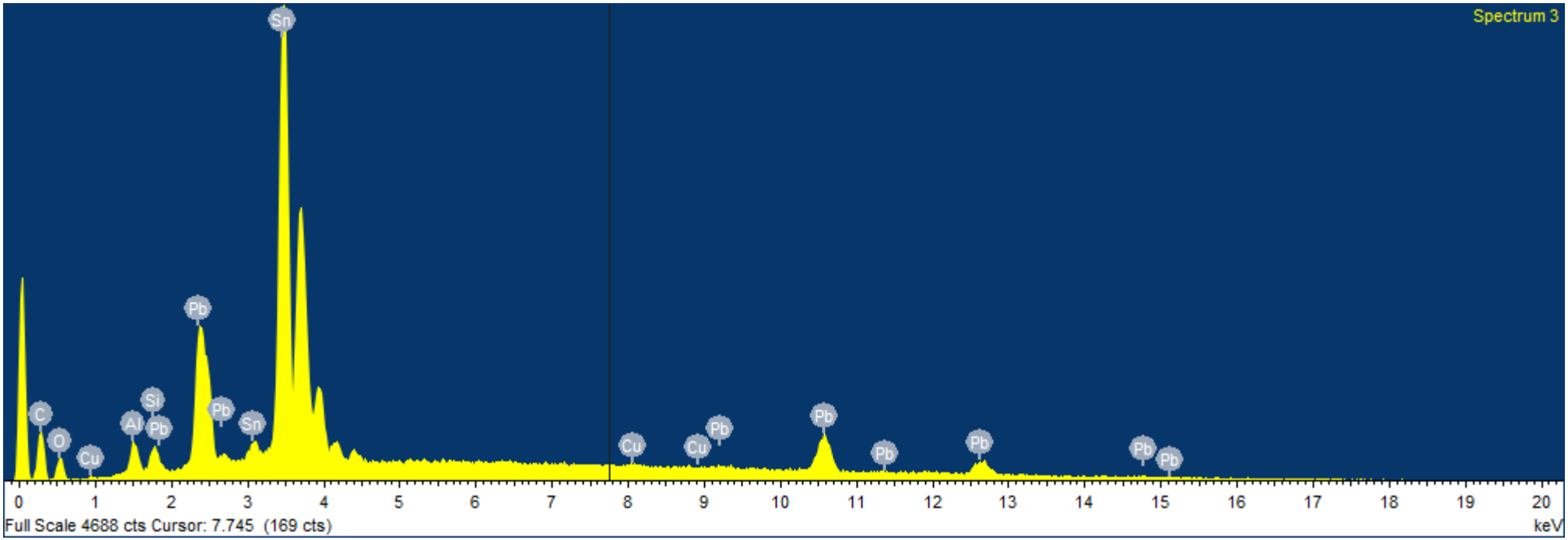
OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

Andressa Piovezan_4 8/27/2024 9:02:34 AM

Imagem de retroespelhamento da PCId, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 3*" corresponde à partícula de Sn e Pb



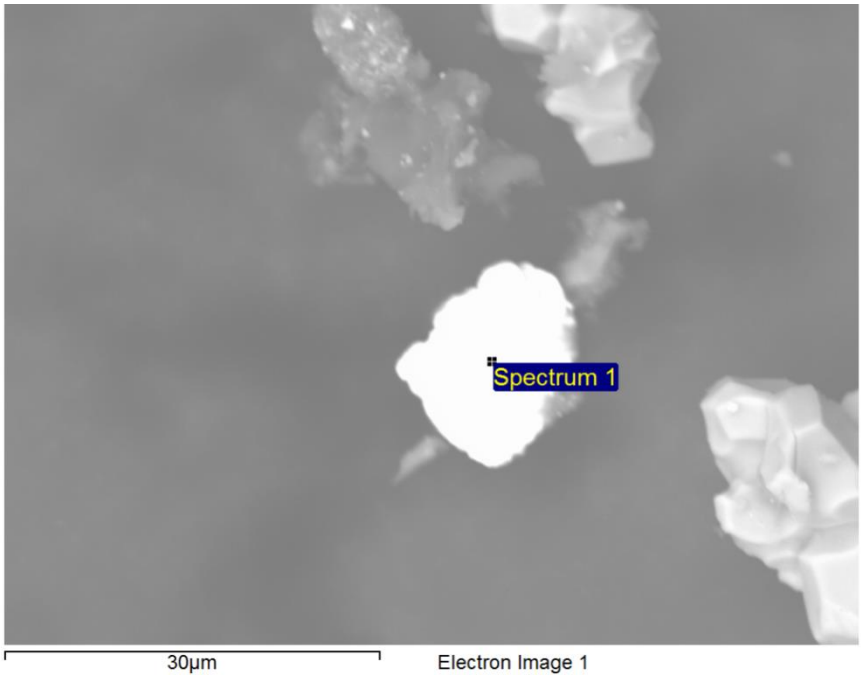
Element	Weight %	Atomic %
O K	10.67	46.48
Al K	1.38	3.58
Si K	1.18	2.91
Cu K	0.56	0.62
Sn L	69.50	40.80
Pb M	16.70	5.62
Totals	100.00	



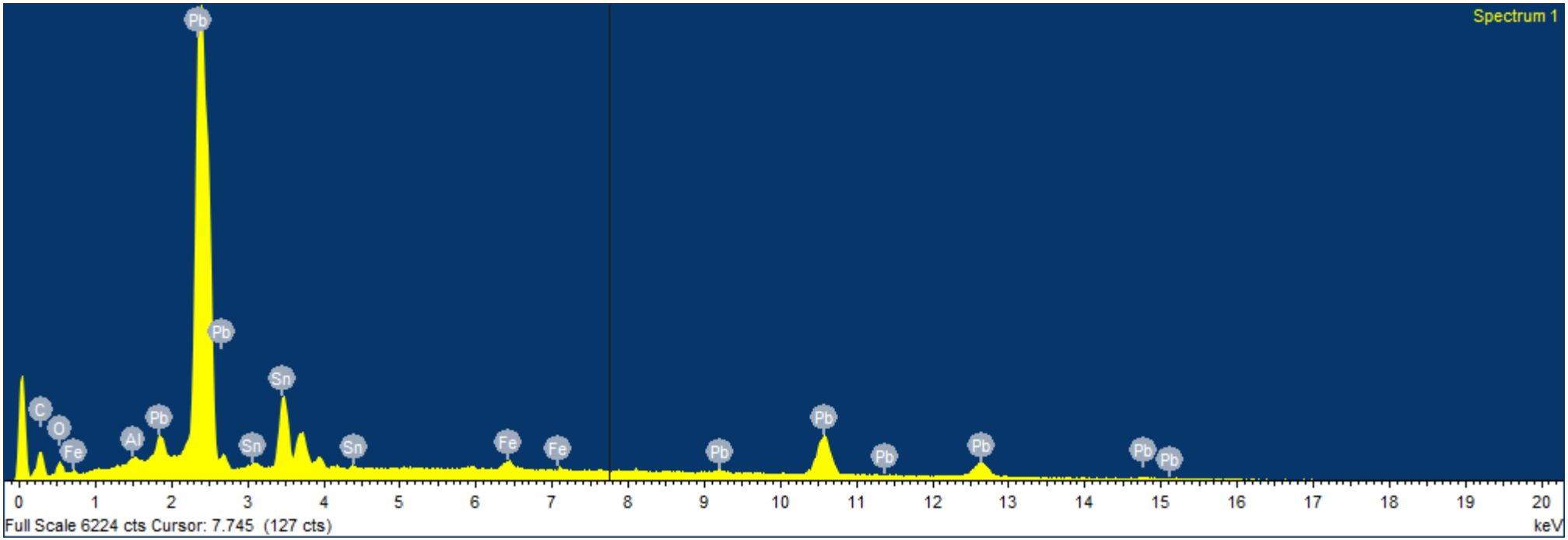
OXFORD INSTRUMENTS
The Business of Science®

Andressa Piovezan_4 8/27/2024 9:09:58 AM

Imagem de retroespelhamento da PCId, obtida por MEV, com magnificação de 4000x e mapeamento químico obtido por EDS. O ponto "*Espectrum 1*" corresponde à partícula de Sn e Pb



Element	Weight %	Atomic %
O K	6.73	43.18
Al K	0.37	1.42
Fe K	1.54	2.82
Sn L	19.84	17.15
Pb M	71.52	35.42
Totals	100.00	



APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO ATRAVÉS DA FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

APÊNDICE B – Elementos e Concentrações detectados através da Técnica de Fluorescência de Raios-X nas Placas de Circuito Impresso

Elemento	PCIa								PCIb							
	Fração granulométrica (mm)															
	F1	DP	F2	DP	F3	DP	F4	DP	F1	DP	F2	DP	F3	DP	F4	DP
	Média (%)															
Alumínio	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Bário	0,57	0,02	1,03	0,14	0,92	0,11	0,19	0,14	2,99	0,57	2,62	0,40	1,32	0,27	2,08	1,33
Antimônio	0,60	0,05	1,78	0,31	1,32	0,35	2,43	2,37	0,69	0,14	1,09	0,13	2,07	0,62	6,97	2,81
Estanho	3,22	0,23	2,47	0,17	2,19	0,14	1,30	0,96	5,37	0,43	3,90	0,70	3,35	1,25	0,48	0,23
índio	0,01	0,00	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cádmio	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Paládio	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Prata	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0,26	0,05	0,25	0,22	0,58	0,40	< LOD	< LOD
Molibdênio	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Nióbio	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Zircônio	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0,10	0,03	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Bismuto	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Chumbo	2,75	0,27	3,18	0,80	1,98	0,17	1,60	0,99	4,20	0,12	1,93	0,59	2,05	0,82	< LOD	< LOD
Mercúrio	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Bromo	2,73	0,36	9,17	0,58	8,25	0,72	12,75	6,95	18,89	3,40	33,12	2,72	22,52	3,28	33,53	2,12
Selênio	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ouro	0,20	0,04	0,75	0,19	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Tungstênio	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0,99	0,22	0,94	0,08	0,29	0,06	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Platina	< LOD	< LOD	0,13	0,00	< LOD	< LOD	0,15	0,07	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Zinco	13,56	0,61	12,71	1,94	6,52	0,71	8,96	2,71	2,05	0,25	0,45	0,17	0,85	0,43	2,61	1,61
Cobre	19,52	1,86	35,17	1,87	60,19	11,34	49,65	8,69	39,46	3,22	49,75	3,02	63,21	3,38	42,96	9,03
Níquel	0,64	0,02	1,10	0,89	0,31	0,25	0,41	0,19	0,91	0,16	0,47	0,26	0,66	0,25	0,28	0,07
Cobalto	0,39	0,03	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0,14	0,06	0,05	0,02	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ferro	48,00	1,76	24,86	2,07	12,24	2,64	19,81	3,55	19,47	1,83	3,89	0,71	1,63	0,90	4,28	2,07
Manganês	6,94	0,41	6,18	0,34	3,29	0,77	0,51	0,21	2,45	0,27	0,53	0,01	0,20	0,01	0,41	0,24
Cromo	0,23	0,02	0,15	0,01	0,14	0,09	0,10	0,05	0,46	0,03	0,29	0,03	0,11	0,02	< LOD	< LOD
Vanádio	0,05	0,00	0,07	0,00	0,07	0,03	< LOD	< LOD	0,36	0,05	0,23	0,06	0,22	0,07	1,24	0,26
Titânio	0,55	0,02	1,26	0,11	1,20	0,15	0,99	0,84	1,93	0,25	1,41	0,27	1,16	0,34	5,62	0,45
SOMA	**99,96**		**100,01**		**99,61**		**99,81**		**100,00**		**99,99**		**99,92**		**100,46**	

Legenda: Class. Gran.: Classificação Granulométrica; Au: Ouro, Ag: Prata, Cu: Cobre, Sn: Estanho. ICP-OES: Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado; F: fração; LOD: Limite de detecção; PCI: Placa de Circuito Impresso.

APÊNDICE B – Elementos e Concentrações detectados através da Técnica de Fluorescência de Raios-X nas Placas de Circuito Impresso

Elemento	PCIC								PCID							
	Fração granulométrica (mm)															
	F1	DP	F2	DP	F3	DP	F4	DP	F1	DP	F2	DP	F3	DP	F4	DP
	Média (%)															
Alumínio	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Bário	2,61	0,13	1,62	0,25	2,15	1,13	3,08	2,04	2,03	0,45	2,15	0,47	1,34	0,98	0,43	0,03
Antimônio	5,16	0,56	4,06	0,92	8,59	4,02	13,37	8,51	3,39	0,57	4,34	0,70	8,48	4,97	0,52	0,18
Estanho	13,57	0,08	3,65	1,00	5,37	1,09	3,84	0,98	16,73	1,97	8,90	1,10	3,61	1,31	6,14	1,26
índio	0,05	0,00	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0,14	0,06	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cádmio	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Paládio	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Prata	0,30	0,00	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0,31	0,11	0,20	0,01	0,27	0,05	0,11	0,04
Molibdênio	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Nióbio	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Zircônio	0,09	0,03	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Bismuto	< LOD	< LOD	3,29	0,46	0,49	0,27	0,83	0,36	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	3,29	1,04	< LOD	< LOD
Chumbo	9,59	0,55	< LOD	< LOD	4,13	0,75	1,92	0,61	8,09	1,48	4,05	0,32	< LOD	< LOD	3,62	2,04
Mercúrio	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Bromo	18,52	2,09	28,29	3,37	36,54	6,66	36,28	1,42	23,46	1,53	41,86	4,52	31,40	9,76	21,17	2,93
Selênio	< LOD	< LOD	0,25	0,04	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ouro	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Tungstênio	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0,41	0,25	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Platina	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Zinco	6,59	0,17	4,50	0,30	3,44	2,17	1,76	0,66	2,15	0,34	1,35	1,15	2,66	1,96	3,33	2,21
Cobre	24,97	1,62	46,12	4,80	33,15	8,04	24,85	16,91	17,25	5,61	24,35	6,48	41,41	13,39	40,72	3,67
Níquel	1,79	0,06	0,43	0,20	0,31	0,24	0,82	0,49	1,23	0,32	0,43	0,12	0,50	0,12	1,57	0,95
Cobalto	0,26	0,02	< LOD	< LOD	0,06	0,03	0,05	0,01	< LOD	< LOD	0,12	0,03	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ferro	12,69	0,80	5,58	1,71	1,70	0,53	2,66	1,77	20,72	1,44	10,18	3,18	5,85	0,36	20,45	6,44
Manganês	0,82	0,03	0,40	0,00	0,36	0,13	0,35	0,14	0,65	0,17	0,68	0,14	0,33	0,15	0,18	0,03
Cromo	0,64	0,03	0,26	0,11	0,36	0,17	1,14	0,62	0,75	0,17	0,61	0,14	0,29	0,29	0,16	0,03
Vanádio	0,28	0,04	0,14	0,04	0,08	0,08	0,26	0,16	0,04	0,00	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Titânio	2,02	0,19	1,77	0,58	2,84	1,91	3,44	1,23	1,40	0,24	1,01	0,19	0,93	0,51	1,51	0,39
SOMA	**99,94**		**100,87**		**99,97**		**100,03**		**98,20**		**100,23**		**100,80**		**99,93**	

Legenda: Class. Gran.: Classificação Granulométrica; Au: Ouro, Ag: Prata, Cu: Cobre, Sn: Estanho. ICP-OES: Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado; F: fração; LOD: Limite de detecção; PCI: Placa de Circuito Impresso.

APÊNDICE C – CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO POR ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA POR PLASMA INDUTIVAMENTE ACOPLADO

APÊNDICE C – Médias e Desvios Padrão das Placas de Circuito Impresso A e B Por Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Indutivamente Acoplado

Elemento	PCIA							
	Fração granulométrica (mm)							
	F1		F2		F3		F4	
	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)
Prata	0,1790	0,0042	0,1595	0,0109	0,1130	0,0505	0,1171	0,0229
Platina	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Ouro	0,0155	0,0035	0,0170	0,0042	0,0105	0,0064	0,0188	0,0087
Alumínio	6,5650	1,2271	9,7570	0,5810	12,8350	1,2049	18,2207	1,5838
Cobalto	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Cromo	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Cobre	5,5400	1,2634	26,7697	0,7234	36,9987	3,1385	27,3370	3,5874
Ferro	20,2090	2,6092	7,9443	0,6050	4,2105	0,2171	13,7685	8,8494
Magnésio	0,1830	0,0733	0,1647	0,0206	0,2617	0,0180	0,1707	0,0216
Manganês	1,7490	0,2927	0,7355	0,0827	0,4270	0,1513	0,0953	0,0251
Níquel	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Chumbo	1,7303	0,4212	2,0820	0,4054	2,3420	0,0835	1,8452	0,3281
Zinco	3,2130	1,0483	3,1280	0,0442	1,3255	0,2100	1,895	0,2213
Arsênio	0,1260	0,0057	0,1150	0,0198	0,1680	0,0594	0,2622	0,0775
Estanho	4,6327	0,8992	4,3373	0,1767	3,4297	0,4459	3,3178	0,4233
Cádmio	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Elemento	**PCIB**							
	Fração granulométrica (mm)							
	F1		F2		F3		F4	
	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)
Prata	0,1373	0,0265	0,1230	0,0919	0,1200	0,0485	0,1343	0,0670
Platina	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Ouro	0,0237	0,0029	0,0545	0,0403	0,0207	0,0023	0,0135	0,0034
Alumínio	3,4007	0,0662	3,5187	0,1904	5,9700	0,0993	3,1697	0,0797
Cobalto	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Cromo	0,0897	0,0055	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Cobre	11,2585	0,0148	42,3613	2,0130	44,2597	6,1207	48,3275	3,7266
Ferro	6,8753	0,2524	2,5707	0,1158	2,9045	0,1704	8,1086	0,9108
Magnésio	0,3257	0,0159	0,2353	0,0025	0,2253	0,0360	0,1289	0,0290
Manganês	0,6253	0,0021	0,0513	0,0125	LOD	LOD	LOD	LOD
Níquel	0,1920	0,0159	0,4927	0,1515	0,2325	0,0431	0,2722	0,0220
Chumbo	2,4770	0,0085	2,0065	0,0841	2,3825	0,0233	2,1547	0,1257
Zinco	0,7193	0,0420	1,3195	0,2227	1,4760	0,6505	1,5295	0,2454
Arsênio	0,1803	0,0583	0,1997	0,0835	0,0900	0,0042	0,0700	0,0400
Estanho	4,6340	0,1372	4,2443	0,6393	4,4350	0,2829	5,2721	0,4839
Cádmio	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD

Legenda: Class. Gran.: Classificação Granulométrica; Au: Ouro, Ag: Prata, Cu: Cobre, Sn: Estanho. ICP-OES: Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado; F: fração; LOD: Limite de detecção; PCI: Placa de Circuito Impresso.

APÊNDICE C – Médias e Desvios Padrão das Placas de Circuito Impresso A e B Por Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Indutivamente Acoplado

Elemento	PCIC							
	Fração granulométrica (mm)							
	F1		F2		F3		F4	
	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)
Prata	0,1807	0,0293	0,1703	0,0662	0,1070	0,0295	0,0742	0,0031
Platina	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Ouro	0,0250	0,0057	0,0170	0,0099	0,0165	0,0021	0,0135	0,0007
Alumínio	3,0670	0,0170	2,2457	0,2434	2,1705	0,0233	3,9754	0,6771
Cobalto	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Cromo	0,0237	0,0110	0,7690	0,0679	LOD	LOD	LOD	LOD
Cobre	6,4850	0,2659	10,2423	0,6315	15,4225	0,9822	26,9299	2,2695
Ferro	3,3417	0,5183	4,2565	0,1930	0,8085	0,2807	3,2999	3,7458
Lítio	1,0793	0,0273	1,1080	0,0355	1,0040	0,0857	0,6336	0,0454
Magnésio	0,1867	0,0520	0,1670	0,0366	0,2540	0,0042	0,0906	0,0054
Manganês	0,0403	0,0178	0,0240	0,0042	LOD	LOD	LOD	LOD
Chumbo	2,5893	0,3599	2,0175	0,0488	2,3440	0,0750	1,4625	0,1931
Zinco	1,3860	0,2980	0,6485	0,0926	0,8235	0,0106	1,8963	0,0452
Arsênio	0,1740	0,0438	0,1950	0,0170	0,2477	0,0730	0,0495	0,0016
Estanho	4,9960	1,0083	3,3677	1,3234	3,6580	1,1447	2,053	0,4872
Cádmio	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Elemento	**PCID**							
	Fração granulométrica (mm)							
	F1		F2		F3		F4	
	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)
Prata	0,2257	0,0791	0,1703	0,0126	0,1530	0,0365	0,2013	0,0957
Platina	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Ouro	0,0150	0,0042	0,0160	0,0014	0,0080	0,0014	0,0077	0,0012
Alumínio	4,6363	0,3919	3,6940	0,7525	4,9080	0,5396	8,5034	2,8748
Cobalto	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Cromo	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Cobre	2,8180	0,1471	9,7855	0,8945	20,5915	3,0992	13,6398	6,2951
Ferro	5,6983	1,0114	3,1323	1,0072	2,8160	0,6166	2,5473	0,5514
Magnésio	0,3273	0,0412	0,2133	0,0621	0,2037	0,0790	0,2825	0,0992
Manganês	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Níquel	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Chumbo	2,0527	0,2952	2,3973	0,2041	2,5050	0,5320	2,1460	0,1968
Zinco	0,7713	0,1645	0,4273	0,1995	2,5015	0,6017	0,7893	0,5811
Arsênio	0,2120	0,0442	0,2250	0,0144	0,1173	0,0539	0,1575	0,0832
Estanho	6,5123	0,5328	3,5400	0,1146	5,6877	0,3611	4,2754	0,4351
Cádmio	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD

Legenda: Class. Gran.: Classificação Granulométrica; Au: Ouro, Ag: Prata, Cu: Cobre, Sn: Estanho. ICP-OES: Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado; F: fração; LOD: Limite de detecção; PCI: Placa de Circuito Impresso.