

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

TAMIRES AUGUSTIN DA SILVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO E VALORIZAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO
DE APARELHOS *SMARTPHONES***

São Leopoldo

2019

TAMIRES AUGUSTIN DA SILVEIRA

CARACTERIZAÇÃO E VALORIZAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE
APARELHOS *SMARTPHONES*

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes

Coorientadora: Dra. Angéli Viviani Colling

São Leopoldo

2019

S587c Silveira, Tamires Augustin da.

Caracterização e valorização de placas de circuito
impresso de aparelhos smartphones / Tamires Augustin da
Silveira. – 2019.

128 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestre) – Universidade do Vale do Rio
dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil, 2019.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Amanda Schuster – CRB 10/2517)

TAMIRES AUGUSTIN DA SILVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO E VALORIZAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO
DE APARELHOS CELULARES**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 27 de fevereiro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Feliciane Andrade Brehm – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

Hugo Marcelo Veit – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Fernando Hamerski – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

AGRADECIMENTOS À CAPES

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

AGRADECIMENTOS

A todos da Unisinos que me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho. À Susi do Sistema de Gestão Ambiental da Unisinos por me ajudar na coleta das amostras. Ao Leonardo por me auxiliar na desmontagem dos celulares. À Aline por poder contar na caracterização química. À Michele e Marlone do ITT Fóssil pela gentileza no atendimento e disponibilidade em auxiliar nos equipamentos. À toda equipe do grupo de pesquisa NucMat pelo convívio.

Ao prof. Carlos Moraes por todos os anos de orientação e parceria.

À Angéli pela co-orientação e pelas trocas de ideias nas idas e vindas de Montenegro a São Leopoldo.

À profa. Feliciane pela disponibilidade em me ajudar sempre no que fosse necessário.

Ao professor Veit por oportunizar a utilização dos equipamentos no laboratório da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Fernando, principalmente, por me auxiliar na operação dos mesmos, facilitando muito essa etapa.

À minha querida colega de mestrado Marilise pela amizade, pelas trocas de experiências e pelas cervejas e boas risadas que compartilhamos.

À toda minha família, especialmente ao meu pai e minha mãe por entenderem minhas escolhas e pelo apoio em todas as etapas da minha vida. À Cássia pela compreensão, por estar sempre presente e por ser minha fonte de equilíbrio. Ao Sky, Rafa e Olívia por me trazerem tranquilidade. Aos meus amigos por entenderem minha ausência nesse período.

A todos que me doaram seus aparelhos celulares para serem utilizados nesse estudo.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

RESUMO

Os aparelhos celulares são os eletroeletrônicos que mais se tornaram frequentes nos domicílios brasileiros nos últimos anos, especialmente os *smartphones*, oferecendo diversos benefícios para os usuários no âmbito das telecomunicações. Como consequência também vem crescendo a quantidade de aparelhos celulares descartados em um menor intervalo de tempo devido ao avanço da tecnologia. Os celulares contêm diversos metais pesados que podem causar impactos ambientais devido ao seu descarte inadequado. Por outro lado, há elementos como cobre, ouro, platina, prata, ferro, alumínio e outros possíveis de serem recuperados. Assim, o objetivo deste trabalho foi caracterizar aparelhos *smartphones* e empregar o processamento mecânico (através da moagem, separação granulométrica e separações magnética e eletrostática) em placas de circuito impresso (PCIs) a fim de concentrar metais, especialmente cobre, identificando os principais elementos obtidos por meio dos processos empregados. Foram coletados, desmontados manualmente e pesados 87 aparelhos *smartphones* que são constituídos por carcaça (31 %), *display* (30 %), bateria (20 %), PCI (16 %) e outros (3 %). As PCIs foram cominuídas em moinho de facas e separadas em 4 faixas granulométricas (F_1 , F_2 , F_3 e F_4). Após caracterização das 4 frações granulométricas foi possível observar quantidades médias de cobre (35 %), silício (11 %), alumínio (5 %), ferro (3 %), níquel (3 %), estanho (3 %) e outros em menor quantidade, variando de acordo com a granulometria estudada. As PCIs foram submetidas à separação magnética, através da qual se obteve, na parcela magnética, teores de 9 a 34 % de ferro, aumentando a concentração conforme o tamanho de granulometria, além de 3 a 11 % de níquel. Os materiais não magnéticos, a fim de concentrar o cobre, passaram pelo processo de separação eletrostática. A separação eletrostática gerou frações condutoras concentrando até 52 % de cobre, decrescendo conforme aumenta a granulometria.

Palavras-chave: Sucata eletrônica. Caracterização. Resíduo eletroeletrônico. *Smartphone*. Processamento mecânico.

ABSTRACT

The cell phones are the electronics that have become the most frequent in Brazilian homes in recent years, especially smartphones, offering several benefits to users in the field of telecommunications. As a consequence also has been growing the amount of cell phones discarded in a lower range of time due to the advancement of technology. Cell phones contain several heavy metals that can cause environmental impacts due to your inappropriate disposal. On the other hand, there are elements such as copper, iron, aluminum and others can be recycled. Thus, the aim of this study was to characterize smartphones devices and employ mechanical processing (through milling, grinding, magnetic and electrostatic separation) on printed circuit boards (PCBs) in order to concentrate metals, especially copper, identifying the key elements obtained by means of the processes employed. There were collected, removed manually and weighed 87 smartphones devices that consist of housing (31 %), display (30 %), battery (20 %), PCB (16 %) and other (3 %). PCBs were comminuted in knife mill and separated into 4 size ranges (F_1 , F_2 , F_3 and F_4). After characterization of 4 granulometric fractions it was observed medium quantities of copper (35 %), silicon (11 %), aluminum (5 %), iron (3 %) aluminum (5 %), iron (3 %), nickel (3 %), tin (3 %) and other in smaller quantities, varying according to the particle size. The PCBs were subjected to magnetic separation, by which was obtained in magnetic fraction 9-34 % of iron, increasing the concentration depending on the size of particle size, plus 3-11 % of nickel. The non-magnetic materials, in order to concentrate copper, passed through electrostatic separation process. Electrostatic separation generated conductive fractions concentrating up to 52 % of copper, decreasing the concentration as the particle size increases.

Key-words: Electronic scrap. Characterization. Electrical and electronic waste. Smartphone. Mechanical processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delimitação da pesquisa	17
Figura 2 - Equipamentos por categoria segundo classificação da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial	22
Figura 3 - Quantidade de resíduo eletrônico gerado e comparação da taxa de crescimento da América Latina (em laranja) e o mundo (verde) (kg/pessoa).....	25
Figura 4 - Aparelhos <i>feature phones</i> (à esquerda) e <i>smartphones</i> (à direita)	28
Figura 5 - Quantidade de resíduo eletrônico gerada por região em 2014	30
Figura 6 - Queima de resíduo eletroeletrônico a céu aberto	33
Figura 7 - Fontes de geração e destinos dos resíduos eletroeletrônicos no mundo .	34
Figuras 8 e 9 - Operação de reciclagem de resíduos eletroeletrônicos em oficinas informais.....	36
Figura 10 - Composição de um aparelho celular, em % em massa	40
Figura 11 - Identificação de camadas de cobre, fibra de vidro e resina (vista lateral)	44
Figura 12 - Classificação das PCI quanto ao número de camadas de cobre	45
Figura 13 – Comparação entre concentração de ouro e cobre através da mineração primária e urbana	51
Figura 14 - Esquema ilustrativo de um separador eletrostático.....	61
Figura 15 - Exemplos de diferentes comportamentos de partículas sólidas em uma reação química.....	65
Figura 16 - Fluxograma geral da metodologia.....	75
Figura 17 e Figura 18 – Moagem de placas de circuito impresso em moinho de facas	77
Figura 19 – Agitador mecânico marca Bertel com conjunto de peneiras	77
Figura 20 – Separador magnético de rolos a seco INBRAS	79
Figura 21 – Esquema da separação magnética em PCIs de <i>smartphones</i>	80
Figura 22 – Separador eletrostático INBRAS.....	81
Figura 23 – Esquema de funcionamento do separador eletrostático	82
Figura 24 – Analisador de Fluorescência de Raios-X	84
Figura 25 – Elementos quantificados e não quantificados pelo Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X	85
Figura 26– Amostras de aparelhos estudados.....	86

Figura 27 – Composição média de aparelhos <i>smartphones</i>	87
Figura 28 – Partes de carcaça externa (em vermelho) com uma peça de carcaça interna (cor amarela)	87
Figura 29 – Comparação de tamanhos e massas de placas de circuito impresso ao longo dos anos de fabricação da fabricante Motorola	89
Figura 30 – Placa de circuito impresso com componentes	90
Figura 31 – Caracterização granulométrica das PCIs após moagem	91
Figura 32 - PCI retida por fração granulométrica	92
Figura 33 – Análise elementar (média) de placas de circuito impresso brutas.....	93
Figura 34 – Concentração dos principais elementos nas PCIs brutas com diferentes faixas granulométricas – elementos em maior e menor quantidade	97
Figura 35 – Balanço de massa do processamento físico das PCIs.....	100
Figura 36 – Esquema da separação magnética e eletrostática das placas de circuito impresso e respectivo balanço de massa (%)	101
Figura 37 – Parcela de material magnético e não magnético por fração de PCI	102
Figura 38 – Quantidade de Fe, Ni e Cu nas frações granulométricas magnéticas..	106
Figura 39 - Quantidade de Fe, Ni e Cu nas frações granulométricas não magnéticas	107
Figura 40– Quantidade de PCI condutora, não condutora e intermediária após a separação eletrostática	108
Figura 41 - Quantidade de Cu, Al, Sn e Pb nas amostras condutoras e não condutoras de diferentes granulometrias	109
Figura 42 - Quantidade de Fe e Ni nas amostras condutoras e não condutoras	110

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Categorias de EEE conforme diretiva da União Europeia.....	21
Quadro 2 - Quantidade de resíduo eletroeletrônico gerada no mundo em 2014 por categoria de equipamento	30
Quadro 3 - Danos causados por metais presentes em REEE.....	42
Quadro 4 - Constituintes típicos de placas de circuito impresso	43
Quadro 5 - Elementos metálicos e sua utilização nas placas de circuito impresso ...	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equipamentos eletroeletrônicos nos domicílios de brasileiros nos anos 2001 e 2015	25
Tabela 2 - Faturamento e Mercado da Indústria Elétrica e Eletrônica.....	26
Tabela 3- Indicadores do mercado de aparelhos celulares	27
Tabela 4 - Composição de dois aparelhos celulares em massa %	39
Tabela 5 - Concentração de elementos em três frações distintas de resíduo de PCI, sua concentração média e a encontrada em cada minério	67
Tabela 6 - Planilha modelo de catalogação das amostras	76
Tabela 7 – Caracterização química de PCIs de <i>smartphones</i> após separação granulométrica.....	94
Tabela 8 – Concentração dos principais metais em placas de circuito impresso obtidos e comparação com outros autores	96
Tabela 9 – Massa específica (em g/cm ³) das amostras após processamento físico	103
Tabela 10 - Análise química semi quantitativa para amostras brutas, magnéticas, condutoras e não condutoras para as 4 granulometrias estudadas	104

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 TEMA	16
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	16
1.3 PROBLEMA	17
1.4 OBJETIVOS	17
1.4.1 Objetivo Geral	17
1.4.2 Objetivos Específicos	17
1.5 JUSTIFICATIVA	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (EEE)	21
2.2 RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE).....	23
2.3 O CENÁRIO DOS EQUIPAMENTOS E RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS..	24
2.3.1 Mercado dos Equipamentos Eletroeletrônicos	24
2.3.2 Geração de Resíduos Eletroeletrônicos	29
2.3.3 O Fluxo de Resíduos Eletroeletrônicos no Mundo e seus Impactos	32
2.4 APARELHO CELULAR	37
2.4.1 Placa de Circuito Impresso	42
2.4.1.1 Conceito, Função e Composição Geral.....	42
2.4.1.2 Fabricação.....	44
2.4.1.3 Composição Química das PCBs.....	45
2.5 RECICLAGEM.....	48
2.5.1 Contextualização	49
2.5.2 Mineração Urbana	50
2.5.3 Centrais de Desmanche de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos	52
2.6 PROCESSOS DE RECICLAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	54
2.6.1 Desmontagem e Triagem	54
2.6.2 Processamento Mecânico	55
2.6.2.1 Cominuição	56
2.6.2.2 Classificação Granulométrica.....	57
2.6.2.3 Separação.....	58
2.6.2.3.1 <i>Separação Magnética</i>	58

2.6.2.3.2 <i>Separação Electrostática</i>	59
2.6.3 Pirometalurgia	62
2.6.4 Hidrometalurgia	63
2.7 REEE: REVISÃO DE ESTUDOS ANTERIORES	65
3 METODOLOGIA	73
3.1 MATERIAIS	73
3.1.1 Equipamentos	73
3.2 MÉTODOS	74
3.2.1 Desmontagem, separação e pesagem	76
3.2.2 Cominuição e classificação granulométrica	76
3.2.3 Separação magnética	78
3.2.4 Separação eletrostática	80
3.2.5 Picnometria a gás	83
3.2.6 Caracterização química	83
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	86
4.1 COMPONENTES DOS <i>SMARTPHONES</i>	86
4.2 PROCESSAMENTO FÍSICO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	90
4.2.1 Caracterização química	93
4.2.2 Separação magnética e eletrostática	98
4.2.2.1 Massa específica.....	102
4.2.2.2 Caracterização química.....	103
4.2.2.2.1 <i>Caracterização química das amostras após a separação magnética</i>	106
4.2.2.2.2 <i>Caracterização química das amostras após a separação eletrostática</i>	108
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	112
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	114
REFERÊNCIAS	115
APÊNDICE A – PLANILHA DE CATALOGAÇÃO DOS APARELHOS	125

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico e crescimento das indústrias de equipamentos eletroeletrônicos, em paralelo com o preço mais acessível desses, o número de produtos eletrônicos per capita tem aumentado continuamente nas últimas duas décadas. Somente no Brasil, de 2001 para 2008 houve um acréscimo de 172 % na quantidade de computadores presentes nos domicílios de brasileiros, ficando os aparelhos celulares disparadamente na primeira colocação de crescimento com 424 %, de acordo com pesquisa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) que apresenta o percentual de equipamentos eletroeletrônicos por domicílio (IBGE, 2002 e 2009). Ao mesmo tempo, a vida útil média desses artefatos foi reduzida, resultando em uma geração maciça de bens eletrônicos em fim de vida, popularmente conhecidos como Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) ou Resíduos Eletrônicos (do inglês *E-waste*). Estimativas atuais mostram que quase 45 milhões de toneladas de REEE são geradas globalmente por ano, e este número está crescendo em uma taxa exponencial (GHOSH et al, 2015).

A indústria eletroeletrônica tem como característica o dinamismo tecnológico (ABINEE, 2009). O rápido avanço na tecnologia, proporcionando melhores modelos regularmente força o consumidor a mudar seus telefones com mais frequência (SARATH et al., 2015).

A obsolescência dos equipamentos eletroeletrônicos se dá em função de alguns fatores, como: *design* inovador, novas funcionalidades proporcionadas por tecnologias recentes, consumo desenfreado, maior capacidade e/ou velocidade para execução de tarefas. A vida útil cada vez mais curta desses equipamentos, aliado à obsolescência programada, se traduz, por consequência, em um aumento na geração de resíduos (SENA, 2012).

Comparado aos resíduos tradicionais, os resíduos eletrônicos manifestam desafios únicos e complexos, incluindo:

- a heterogeneidade e evolução dos produtos, em termos de tamanho, massa, funções e materiais na sua composição;
- a contínua introdução de novos produtos com novas características faz com que seja necessário o desenvolvimento contínuo das tecnologias de tratamento de fim de vida;

- o uso elevado de metais (ouro, prata, índio, platina, terras raras, etc.), os desafios da baixa concentração desses na natureza e a complexidade tecnológica envolvida na sua recuperação nos processos de reciclagem, somado ao grande e diverso grupo de fatores envolvidos nas várias etapas de fim de vida, como coleta, reciclagem, tratamento, reuso, revenda, disposição final e exportação dos resíduos (GSMA, 2015).

Dentro do universo dos resíduos sólidos encontram-se os REEE, os quais são originados dos Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) que se transformam em resíduos de pós-consumo, incluindo todos os componentes, subconjuntos e materiais no momento em que este é descartado (UNIÃO EUROPEIA, 2012). A Diretiva da União Europeia 2012/19/UE classifica os EEE em dez diferentes categorias, desde grandes e pequenos eletrodomésticos (geladeira, micro-ondas, torradeira), equipamentos de iluminação (lâmpadas), até equipamentos de informática e de telecomunicações. Dentre estes equipamentos eletrônicos podem ser destacados os aparelhos celulares, objeto de estudo deste trabalho, que se tornam cada dia mais acessíveis à população (KASPER, 2011).

Enquanto essa quantidade crescente é um desafio para qualquer sistema de gestão, os REEE também oferecem uma fonte secundária de recursos valiosos que estão prontamente disponíveis para a reciclagem (PARAJULY et al, 2017).

Diversos componentes podem ser encontrados nos equipamentos eletroeletrônicos, sejam eles oriundos de metais, plásticos ou outras substâncias. Em um telefone móvel, metais representam cerca de 23 % do peso do aparelho, sendo o restante plástico e material cerâmico. Este mesmo aparelho pode conter mais de 40 elementos da tabela periódica (UNEP, 2009).

Os REEE são química e fisicamente diferentes dos demais resíduos sólidos, como os urbanos e industriais. Eles contêm materiais valiosos, mas também perigosos, que exigem tratamento e métodos de reciclagem especiais, de forma a evitar a contaminação ambiental e efeitos prejudiciais à saúde humana. Os processos de reciclagem podem recuperar diversos componentes, como cobre e metais preciosos. No entanto, devido à falta de instalações e custos de operação elevados, além de regulamentos e legislações exigentes, os países tendem a não reciclar os REEE. Ao invés disso, eles são depositados em aterros controlados ou não, ou exportados dos países ricos aos países pobres, onde podem ser reciclados, utilizando técnicas de baixa

qualidade, que não consideram a segurança dos trabalhadores e a proteção ambiental (COBBING, 2008).

Entre os constituintes que fazem parte da composição dos REEE que geram maior preocupação pode-se citar o chumbo, cádmio, mercúrio e cromo hexavalente, além dos compostos polibromados, como as bifenilas polibromadas (PBB) e os éteres difenílicos polibromados (PBDE), sendo estes utilizados como retardantes de chama (GOUVEIA, 2014).

Tendo em vista que o referencial teórico é composto por, predominantemente, obras em língua estrangeira, no decorrer deste trabalho as traduções foram realizadas pelo autor, e não estarão acompanhadas pela expressão tradução nossa, em conformidade com as normas desta instituição.

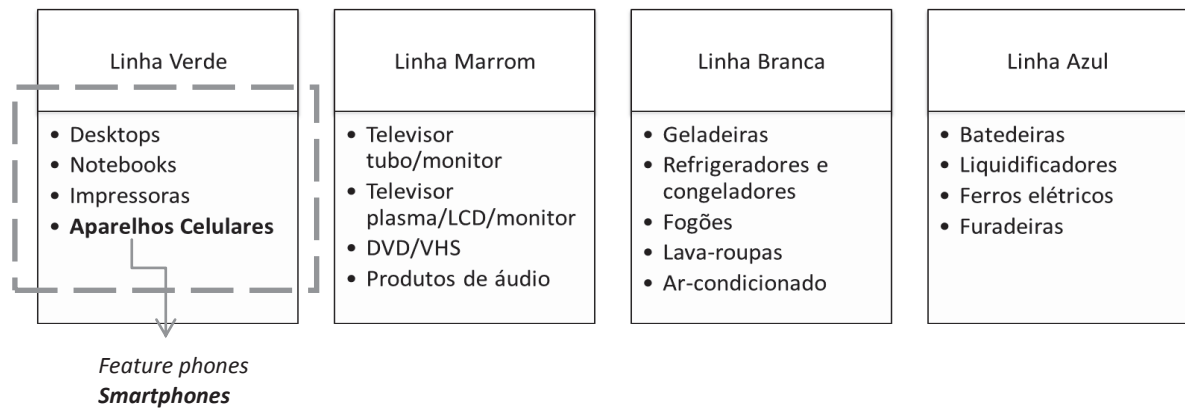
1.1 TEMA

Este trabalho tem como tema central os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, especificamente os aparelhos *smartphones*, e os principais fatores envolvidos desde o processo de fabricação até o pós consumo, como a sua composição química, problemas associados, como impactos ambientais e de saúde oriundos do descarte irregular, processos de reciclagem utilizados para sua reciclagem e sua caracterização.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esta pesquisa limita-se à aplicação de processos mecânicos para concentração de materiais de placas de circuito impresso de aparelhos celulares do tipo *smartphone*, incluídos na linha verde de acordo com ABDI (2013), conforme ilustrado na Figura 1, e posterior caracterização.

Figura 1 – Delimitação da pesquisa



Fonte: Elaborado pela Autora (2019) baseado em ABDI (2013).

1.3 PROBLEMA

Os resíduos tecnológicos, de forma geral, possuem uma grande variedade de materiais na sua composição, o que torna o seu processo de reciclagem muito complexo. Esses resíduos, no entanto, apresentam elementos perigosos que podem impactar de forma negativa o meio ambiente e a saúde humana.

Apesar de terem na sua composição metais economicamente interessantes, segundo Nicolai (2016), no Brasil apenas 2 % dos aparelhos celulares são reciclados.

1.4 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa estão descritos a seguir.

1.4.1 Objetivo Geral

Avaliar a concentração de materiais de placas de circuito impresso (PCIs) de *smartphones*, através de processos mecânicos, com o intuito de valorizar o resíduo estudado.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Identificar, classificar e quantificar as partes que constituem os aparelhos *smartphones*;

- b) Caracterizar química e fisicamente as placas de circuito impresso de sucatas de celulares do tipo *touch/smartphone* antes e após o processamento mecânico;
- c) Avaliar a influência da granulometria das PCIs na concentração de metais após beneficiamento.

1.5 JUSTIFICATIVA

Este trabalho justifica-se por contribuir com os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), e em especial o desenvolvimento sustentável. A visão sistêmica na gestão de resíduos sólidos presente nestes princípios, que considere as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública e o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social é fundamental (BRASIL, 2010).

Este trabalho também visa colaborar para que os principais objetivos da reciclagem de resíduos eletroeletrônicos, dados pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) sejam atingidos. São eles: tratar as substâncias tóxicas e/ou perigosas contidas nos resíduos eletroeletrônicos de forma ambientalmente correta, evitando emissões secundárias e terciárias; recuperar os materiais valiosos de forma mais eficaz possível; criar negócios economicamente e ambientalmente sustentáveis; considerar as implicações sociais e o contexto local de operações (UNEP, 2009).

A valorização de resíduos e produtos em fim de vida têm uma importância muito grande nos dias atuais, não somente por motivos econômicos, mas também devido à conservação de recursos naturais. Os resíduos que apresentam em sua composição materiais metálicos constituem um caso muito particular, porque além da necessidade da sua correta gestão, é possível retirar benefícios econômicos através da sua recuperação, devido ao valor de alguns dos metais contidos. Este é o caso dos REEE (OLIVEIRA, 2012).

Os aparelhos celulares são fabricados com recursos e materiais valiosos, a partir de polímeros, vidros e metais. Os metais utilizados são extraídos de diferentes minérios e demandam energia para o seu beneficiamento. Desta forma, esses aparelhos, após sua vida útil, geram resíduos ricos em diversos recursos naturais não renováveis conhecidos como metais nobres, metais raros ou críticos. Reciclá-los significa conservar

os recursos naturais, pois evita que novos minerais sejam extraídos, bem como evita a poluição do solo e da água oriundos da incorreta disposição, assim como a poluição do ar com as emissões de gases de efeito estufa que são causados pela extração de matéria prima virgem. Cui e Forssberg (2003) afirmam que a utilização de materiais reciclados ao invés de matérias-primas virgens traz valores de economia significativos, além de outros benefícios, em especial na comparação de redução de consumo de energia da produção de metais e ligas a partir da reciclagem com a de seu minério. A reutilização de alumínio gera uma economia de energia de 95% (CUI e FORSSBERG, 2003).

A concentração de metais preciosos nas placas de circuito impresso, especialmente ouro, prata, paládio e platina é muito maior que seus respectivos recursos primários, tornando resíduos de PCIs um minério urbano economicamente atrativo para reciclagem (GHOSH et al., 2015). Segundo Nicolai (2016), “a partir de 1 tonelada de *e-waste* consegue-se a mesma quantidade de ouro que em 12 toneladas de minério aurífero”. Além do mais, a pureza de metais preciosos nas PCIs é 10 vezes superior à pureza dos minérios (ZHOU e QIU, 2010; KAYA, 2016).

De acordo com Nicolai (2016), o resíduo eletrônico é o resíduo sólido que mais cresce no Brasil e no mundo atualmente, devido às suas características únicas, como obsolescência programada, alta tecnologia e exponencial consumo no mercado. Sarath et al. (2015) afirmam que a fase ou tempo médio de utilização de um telefone móvel é menor que 3 anos nos países em desenvolvimento e menor que 2 anos em países desenvolvidos, o que acarreta em um descarte muito frequente desses aparelhos. No Brasil, a troca de aparelhos celulares ocorre, em geral, a cada 2 anos (BORGES et al., 2016).

A geração mundial de REEE está aumentando a cada ano, conforme dados já mencionados anteriormente, e tornou-se um grande problema ambiental nos países industrialmente desenvolvidos (HOLGERSSON et al., 2018). A elevada quantidade de resíduos atualmente gerados, além das previsões futuras de aumento desses, por si só já são motivos pelos quais são necessárias atuações no sentido de valorização desses resíduos, fato que justifica esta pesquisa.

O lançamento de novos modelos de *smartphones* no mercado pode contribuir significativamente para a parcela de resíduos eletrônicos e tem o potencial de gerar impactos ambientais. *Smartphones* podem conter materiais pesados, raros e preciosos como outros resíduos eletrônicos. Assim, esses aparelhos em fim de vida podem

impactar a disponibilidade de recursos, a saúde humana e os ecossistemas. Dessa forma, os resíduos de *smartphones* devem ser geridos de forma adequada, eficaz e preventiva, a fim de evitar possíveis impactos ambientais (MEJAME et al., 2016).

Segundo dados de empresa em inteligência de mercado e consultoria nas indústrias de tecnologia da informação IDC Brasil (2017)-, a comercialização de *smartphones* atingiu 11,4 milhões de aparelhos entre janeiro a março de 2017, enquanto foram vendidos apenas 1 milhão de unidades de aparelhos convencionais ou *feature phones* (IDC, 2017).

Dados da ANATEL (2018) indicaram que em novembro de 2018 o Brasil finalizou o mês com cerca de 231,8 milhões de aparelhos celulares e densidade de 110,55 cel/100 hab, ou seja, mais que um aparelho por habitante. Considerando a rápida obsolescência desses dispositivos, em pouco tempo esses se tornarão resíduos e precisarão ser encaminhados a processos de valorização a fim de evitar impactos sociais e ambientais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este tópico apresenta revisão bibliográfica necessária para dar embasamento dos assuntos que norteiam o tema deste trabalho.

2.1 EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (EEE)

A União Europeia (2012) define os equipamentos elétricos e eletrônicos (ou eletroeletrônicos) como “equipamentos dependentes de corrente elétrica ou de campos eletromagnéticos para funcionarem corretamente, bem como equipamentos para geração, transferência e medição dessas correntes e campos (...)”, conforme categorias definidas no anexo I da Diretiva da União Europeia 2012/19/UE, que abrange desde pequenos a grandes eletrodomésticos e apresenta grupos específicos como de aparelhos médicos, classificando os EEE em dez categorias diferentes conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Categorias de EEE conforme diretiva da União Europeia

Categoria	Exemplo de equipamentos
Grandes eletrodomésticos	Geladeiras, máquinas de lavar, microondas, fogão, ar condicionado, etc.
Pequenos eletrodomésticos	Torradeira, aspirador, balança, fritadeira, relógio de sala, secador de cabelo, etc.
Equipamentos informáticos e de telecomunicações	Computador pessoal, computador portátil, impressora, telefone celular, etc
Equipamentos de consumo	Aparelhos de rádio, aparelhos de televisão, instrumentos musicais, etc.
Equipamentos de iluminação	Lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de sódio de baixa pressão, outros equipamentos de iluminação, etc.
Ferramentas elétricas e eletrônicas	Serras, máquinas de costura, ferramentas equipamento para pulverizar, etc.
Brinquedos e equipamento de desporto e lazer	Jogos de vídeo, vídeo-games, computadores para ciclismo, mergulho, caça-níqueis, etc.
Aparelhos médicos	Equipamentos de radioterapia, cardiologia e diálise, ventiladores pulmonares, etc.
Instrumentos de monitoramento e controle	Termostato, reguladores de aquecimento, etc.
Distribuidores automáticos	Distribuidores de bebidas quentes, garrafas, latas, produtos sólidos, dinheiro, etc.

Fonte: Adaptado de União Europeia (2012).

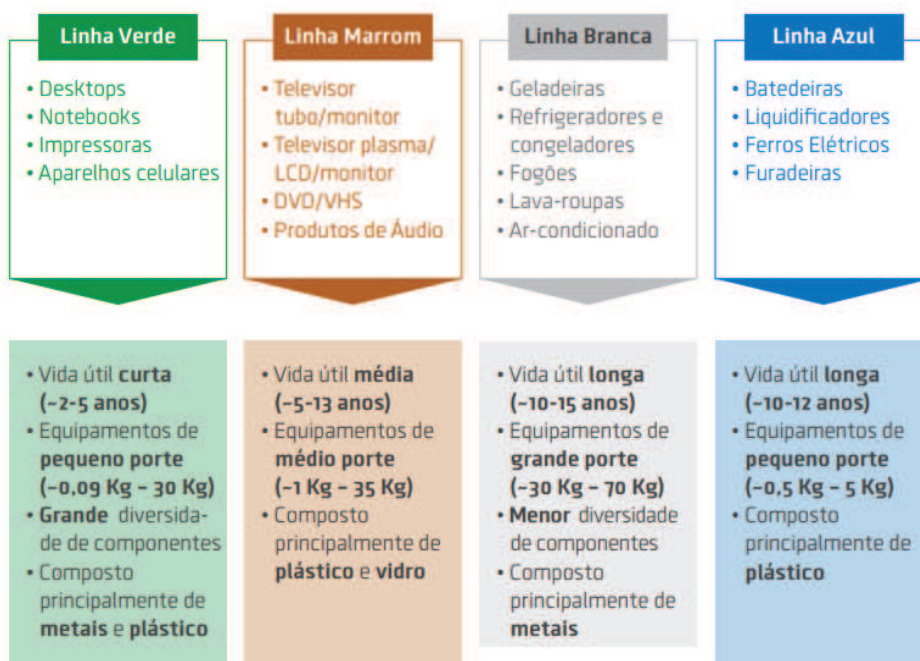
De acordo com esta classificação, os aparelhos celulares classificam-se como equipamentos informáticos e de telecomunicações.

No Brasil, a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE) e a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) possuem maneiras distintas de classificar os EEE. Para a ABINEE (2017), esses são divididos em oito áreas diferentes:

- a) Automação Industrial
- b) Componentes Elétricos e Eletrônicos
- c) Equipamentos Industriais
- d) Geração, transmissão e Distribuição de Energia Elétrica
- e) Informática
- f) Material Elétrico de Instalação
- g) Telecomunicações
- h) Utilidades domésticas

No entanto, a ABDI (2013) segmenta os equipamentos em quatro áreas mais amplas, separando os equipamentos em quatro linhas: branca, marrom, verde e azul, conforme Figura 2.

Figura 2 - Equipamentos por categoria segundo classificação da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial



Fonte: ABDI (p.29, 2013).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua Norma Brasileira (NBR) 16156:2013 - Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos para Atividade de Manufatura Reversa, traz uma definição de EEE muito semelhante à da Diretiva da União Europeia 2012/19/UE, definindo-os como os “equipamentos, partes e peças cujo funcionamento adequado depende de correntes elétricas ou campos eletromagnéticos, bem como equipamentos para a geração, transmissão, transformação e medição dessas correntes e campos, os quais podem ser para uso doméstico, industrial, comercial e uso de serviço” (ABNT, 2013).

2.2 RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE)

Na literatura há diversas formas de se referir a esse tipo de resíduo. Entretanto, a definição mais aceita mundialmente vem da Diretiva da União Europeia 2012/19/UE, a qual define que esses são os EEE que geram ou se transformam em resíduos de pós-consumo, incluindo todos os componentes, subconjuntos e materiais consumíveis que fazem parte do produto no momento em que este é descartado (UNIÃO EUROPEIA, 2012).

Segundo a ABNT (2013, p. 06), os REEE são os “equipamentos elétricos e eletrônicos, partes e peças que chegaram ao fim da sua vida útil ou o uso foi interrompido”.

Shagun et al. (2013) afirmam que *e-waste* (“lixo” eletrônico) é um nome popular informal para produtos eletrônicos chegando ao fim de sua vida útil, sendo esta uma das nomenclaturas mais usuais encontradas na literatura.

O Centro de Tecnologia Mineral (CETEM, 2015, p.10) denomina como resíduo eletrônico ou tecnológico “todo resíduo oriundo do descarte de aparelhos eletrônicos que seja passível de reciclagem, como computadores, celulares, dispositivos eletrônicos portáteis, televisões, pilhas, baterias, rádios, dentre outros”.

Para Nicolai (2016, p.43), resíduo eletrônico “são as matérias-primas advindas de resíduos gerados da utilização de aparelhos eletrônicos que não apresentam mais utilidade e são destinados para a recuperação, reciclagem ou disposição”.

2.3 O CENÁRIO DOS EQUIPAMENTOS E RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS

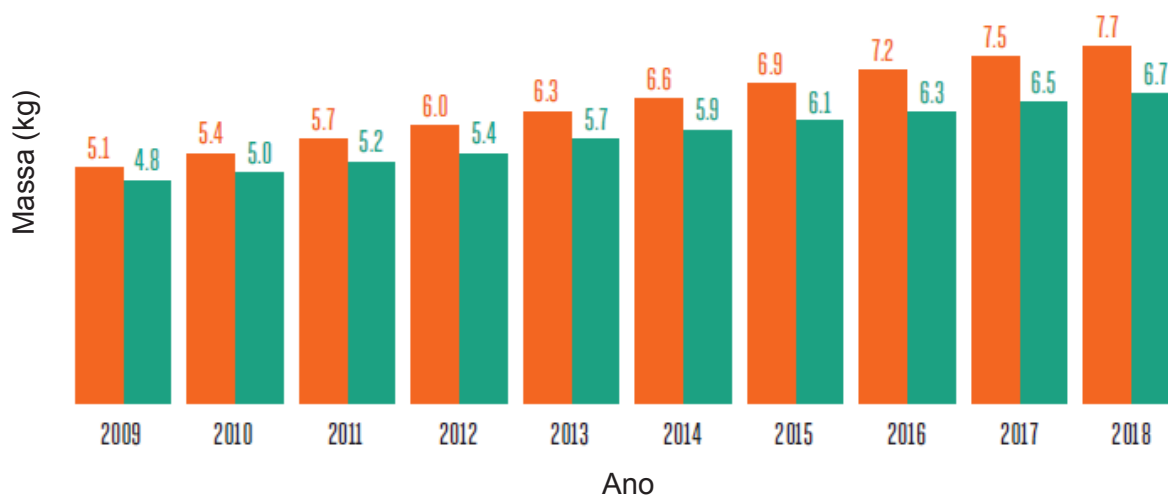
Este tópico traz informações sobre a situação do mercado dos equipamentos eletroeletrônicos, assim como dados de crescimento, no seu primeiro item. No segundo momento foram trazidas referências sobre os números de geração dos resíduos eletroeletrônicos, e, por fim, foi falado sobre a transferência dos REEE de países desenvolvidos para os em desenvolvimento, assim como os seus impactos gerados.

2.3.1 Mercado dos Equipamentos Eletroeletrônicos

Ao longo das últimas décadas, a indústria eletrônica e a indústria de tecnologia da informação e comunicação (TIC), em particular, revolucionaram o mundo. Os equipamentos elétricos e eletrônicos tornaram-se onipresentes ao redor do planeta. Sem esses produtos, a vida moderna não seria reconhecível nos países desenvolvidos e em desenvolvimento (GSMA, 2015).

Uma análise do mercado internacional de equipamentos eletroeletrônicos apontou que produtos como televisores, refrigeradores, máquinas de lavar, e sistemas de som alcançaram relativa estabilidade de mercado nos países desenvolvidos, enquanto nos países em desenvolvimento ainda ocorre expansão do mercado desses equipamentos, devido ao crescente nível de renda e ao aumento da urbanização. Segundo Araújo (2013), nos países desenvolvidos esses mercados podem ser classificados como maduros. O mesmo já não ocorre para produtos como computadores, *tablets* e telefones celulares, que internacionalmente ainda estão em crescimento, tanto em países desenvolvidos como os em desenvolvimento (ARAÚJO, 2013). Isso pode explicar o crescimento na geração de resíduos eletrônicos por pessoa na América Latina quando comparado ao resto do mundo (Figura 3).

Figura 3 - Quantidade de resíduo eletrônico gerado e comparação da taxa de crescimento da América Latina (em laranja) e o mundo (verde) (kg/pessoa)



Fonte: GSMA (pg.17, 2015).

Dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – PNAD do IBGE (2002 e 2015), a qual apresenta o percentual de equipamentos eletroeletrônicos por domicílios, indicaram um crescimento acentuado para computadores e aparelhos celulares no período de 2001 a 2015 (Tabela 1). Segundo Araújo (2013), o potencial de expansão do mercado desses produtos ainda é grande devido ao aumento de poder aquisitivo e da urbanização no país, além do desenvolvimento tecnológico e preços mais acessíveis dos aparelhos celulares.

Tabela 1 - Equipamentos eletroeletrônicos nos domicílios de brasileiros nos anos 2001 e 2015

Equipamento	Percentual de domicílios	
	2001	2015
Televisão	89	97,1
Refrigerados	85	97,8
Freezers	19	16,9
Máquinas de lavar	34	61,1
Computadores	13	46,2
Aparelhos celulares	8	58

Fonte: Elaborado pela Autora (2019), baseado em IBGE, 2002 e 2015.

De acordo com Ventura (2014), o aumento do consumo de EEE nas últimas décadas está associado ao crescimento da população e a uma melhor qualidade de vida, o que conduz, em consequência, num agravamento da quantidade de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos.

A manufatura e a importação são os meios responsáveis de inserção dos EEE no mercado brasileiro, sendo que juntas compõem um cenário significativo: dados de abril de 2017 indicam que o faturamento da indústria eletroeletrônica no ano de 2016 atingiu R\$129,4 bilhões, apresentando uma queda de 9% com relação ao ano de 2015, consequência da queda de renda da população aliada à alta e crescente taxa de desemprego. Apesar disto, alguns ramos faturaram mais em 2016: somente os telefones celulares foram responsáveis pelo aumento de 10% do faturamento em comparação com o ano anterior (ABDI, 2013; ABINEE, 2017). As únicas áreas que tiveram um maior desempenho de vendas em 2016 foram as áreas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (GTD) e de telecomunicações, abrangendo, essa última, os aparelhos celulares. Todas as demais áreas sofreram queda de faturamento como reflexo da crise econômica, conforme demonstram os dados da Tabela 2.

Tabela 2 - Faturamento e Mercado da Indústria Elétrica e Eletrônica

Referência		2013	2014	2015	2016	
Faturamento da Indústria Elétrica e Eletrônica por áreas (R\$ milhões)	Área	Automação Industrial	4.368	4.523	4.508	4.167
		Componentes Elétricos e Eletrônicos	10.696	10.370	10.071	9.913
		Equipamentos Industriais	23.599	25.718	26.550	23.790
		GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica	16.220	15.742	16.103	16.580
		Informática	47.046	37.660	30.170	21.200
		Material Elétrico de Instalação	9.478	9.689	8.472	7.867
		Telecomunicações	26.689	29.592	28.309	29.583
		Utilidades domésticas	18.649	20.522	18.357	16.346
Mercado (mil unidades)	PCs e tablets	Desktops	-	3.973	2.546	1.659
		Notebooks e netbooks	-	6.361	4.044	2.841
		Tablet	-	9.463	5.846	3.987

Fonte: Elaborado pela Autora (2019), baseado em IDC (2017) e ABINEE (2017).

De acordo com Araújo (2012), a telefonia móvel é considerada um mercado não maduro, ou seja, não estável e de rápido crescimento. O número de assinaturas de telefonia móvel cresceu 42 % nos países desenvolvidos entre 2005 e 2010, enquanto em países em desenvolvimento o crescimento foi de surpreendentes 226 %, gerando problemas com os aparelhos pós-consumo e a necessidade de organização de uma estrutura adequada de tratamento (ITU, 2009; ARAÚJO, 2013).

Com relação ao mercado dos aparelhos celulares no Brasil, especificamente, este segue o ritmo dos países em desenvolvimento, aumentando substancialmente seu faturamento ao longo dos anos, sendo que a grande maioria dos aparelhos são absorvidos pelo mercado interno, conforme indica a Tabela 3, a qual mostra os indicadores do mercado de aparelhos celulares no Brasil. Apesar de ter sido vendida uma quantidade inferior de unidades de aparelhos celulares em 2015 e 2016, o faturamento foi superior devido ao maior valor agregado dos aparelhos, sendo cada vez mais vendidos *smartphones*, deixando o faturamento dos aparelhos tradicionais bem abaixo.

Tabela 3- Indicadores do mercado de aparelhos celulares

Indicador (milhões de unidades)	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Mercado total de celulares	47,46	52,77	65,42	58,59	65,57	70,3	51,1	48,41
Mercado de celulares tradicionais	45,5	47,9	56,42	42,22	30,38	15,75	4,15	4,92
Mercado de smartphones	1,96	4,87	9	16,37	35,19	54,55	46,94	43,49
Exportações totais de telefones celulares	16,3	13,17	7,4	3,4	1,89	0,72	0,43	0,41
Importações totais de telefones celulares	3,98	7,3	15,7	16,8	11,89	10,44	4,83	12,75

Fonte: Elaborado pela Autora (2019), baseado em ABINEE (2017).

Dados do IDC Brasil (2017) apontaram um crescimento de 25,4 % nas vendas de celulares no primeiro trimestre de 2017: de janeiro a março foram comercializados 1 milhão de *feature phones* e 11,4 milhões de *smartphones*, o que

corresponde a uma receita de R\$13,3 bilhões geradas neste período. A mesma pesquisa previa que até o fim de 2017 seriam vendidos aproximadamente 4,2 milhões de *feature phones* e 47 milhões de *smartphones*, devido às estratégias competitivas dos fabricantes e ao elevado número de aparelhos antigos no Brasil, o que pode ter feito com que os usuários tenham buscado por modelos mais tecnologicamente desenvolvidos (IDC, 2017).

O maior acesso da população, aliada aos avanços tecnológicos constantes e a busca por produtos e serviços de melhor qualidade leva os consumidores a trocarem rapidamente de aparelhos, como, no caso dos celulares, por outros mais leves, com mais funcionalidades e modernos, conforme Figura 4, que compara modelos de aparelhos convencionais, ou *feature phones*, e *smartphones* (KASPER, 2011).

Figura 4 - Aparelhos *feature phones* (à esquerda) e *smartphones* (à direita)



Fonte: Google imagens.

Essa característica de rápida mudança tecnológica desses equipamentos indica que mesmo quando esses mercados se tornarem saturados, o crescimento de vendas ainda se tornará possível, visto que os consumidores tenderão a comprar novos produtos e mais avançados tecnologicamente (ARAÚJO, 2013).

Segundo a ABINEE (2009), na sua Estratégia em Desenvolvimento até 2020, a indústria elétrica e eletrônica no Brasil vai seguir em ritmo acelerado, com o consumo aumentando 8 % ao ano e o faturamento das empresas brasileiras crescendo cerca de 10 % ao ano. Ou seja, para os próximos dois anos, pelo menos, a tendência é de crescimento contínuo desse mercado.

2.3.2 Geração de Resíduos Eletroeletrônicos

Não há dados confiáveis sobre quantidades de resíduos sólidos gerados no Brasil, embora haja algumas estimativas realizadas pela ABRELPE que são divulgadas anualmente em seu Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ARAÚJO et al., 2012; ARAÚJO, 2013). É importante ressaltar que esta fonte de informações, é representada pelas empresas do setor. O Panorama contempla dados nacionais, regionais e estaduais de resíduos sólidos urbanos (RSU), resíduos de construção e demolição (RCD) e resíduos de serviços de saúde (RSS) (ABRELPE, 2015).

Tampouco há dados seguros sobre a geração de REEE a nível nacional e mundial. Para Ribeiro (p.13, 2017): “Não há até o momento, um sistema oficial de informações com dados precisos sobre a quantidade de resíduo eletrônico gerada, coletada e tratada no Brasil”.

Os resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos atualmente são considerados como um dos tipos de resíduos de maior crescimento no mundo, com uma taxa estimada que varia de 3 % a 5 % ao ano (CUCCHIELLA et al., 2015).

Segundo Araújo (2013), a vida útil do equipamento é a principal variável na estimativa da geração de resíduos eletroeletrônicos, ou seja, a obsolescência do equipamento, definida no momento em que o consumidor decide que esse equipamento não mais lhe serve (ARAÚJO, 2013).

De acordo com a GSMA (2015), Associação GSM que representa os interesses dos operadores de redes móveis no mundo, e a STEP (2015), iniciativa para resolver os problemas de REEE pertencente à Universidade das Nações Unidas, em 2014 foram geradas 41,8 milhões de toneladas de REEE, o que representa 5,9 kg de REEE por habitante a nível mundial. Os pequenos e grandes equipamentos foram os resíduos que lideraram a geração em 2014 em quantidade de massa, gerando, respectivamente, cerca de 13 e 11 milhões de toneladas, conforme Quadro 2. Os resíduos eletrônicos descartados geralmente são agrupados em cinco ou seis categorias, desde pequenos equipamentos a um grupo específico para telas.

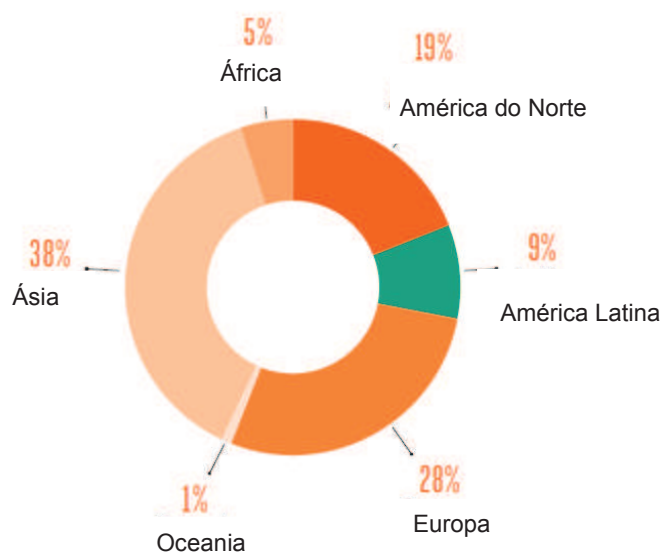
Quadro 2 - Quantidade de resíduo eletroeletrônico gerada no mundo em 2014 por categoria de equipamento

Fluxo / categoria	Equipamentos	Quantidade (milhões de toneladas)
Equipamentos pequenos	Aspiradores de pó, microondas, aparelhos para cuidados com cabelo e corpo, gravadores, rádios e outros produtos eletrônicos de consumo	12,8
Equipamentos grandes	Máquinas de lavar roupa, fogões, máquinas de lavar louça e outros	11,8
Equipamentos de troca de temperatura	Refrigerador, freezer, ar condicionado, bombas de calor e outros equipamentos para troca de temperatura	7,0
Telas	Telas, monitores e outros como telas de televisão, computadores portáteis, netbooks	6,3
Pequenos dispositivos e equipamentos de telecomunicação	Telefones celulares, dispositivos GPS e outros produtos de TI pequenos	3,0
Lâmpadas	Qualquer tipo de lâmpada	1,0

Fonte: Elaborada pela autora (2019), baseado em GSMA (2015).

Dados da mesma fonte indicam que, de todas as regiões do mundo, a maioria dos resíduos eletroeletrônicos é gerada na Ásia, região que contribuiu com 16 milhões de toneladas de REEE em 2014, representando 38 % do total gerado. Em seguida está a Europa com 28 % da geração de REEE, e as Américas, conforme pode ser visto na Figura 5 (GSMA, 2015).

Figura 5 - Quantidade de resíduo eletrônico gerada por região em 2014



Fonte: Traduzido de GSMA (2015).

Observando localmente, estudos brasileiros estimaram a quantidade de REEE gerados por habitante/ano em 2008: Rocha e Gomes (2009) indicaram que o brasileiro gerou 3,4 kg, valor semelhante aos 3,77 kg encontrados por Araújo et al. (2012). Ambos os estudos avaliaram somente a quantidade de sete equipamentos selecionados: televisores, refrigeradores, freezers, máquinas de lavar, equipamentos de som, computadores, aparelhos celulares. Já em 2015, segundo pesquisa da STEP (2015), cada habitante gerou 7 kg de REEE, o que poderia significar um crescimento de aproximadamente 45 %.

Atualmente, grande parte dos REEE é disposta junto aos resíduos domésticos, causando a perda de materiais valiosos que poderiam ser recuperados, como o cobre, e acarretando a poluição do meio ambiente por diversos metais pesados que fazem parte da composição desses resíduos, como o chumbo (VEIT, 2005).

De acordo com um relatório divulgado pelo Programa da ONU para o Meio Ambiente (PNUMA) da UNEP, a indústria eletrônica gera, anualmente, 41 milhões de toneladas de REEE, e a estimativa é que até o final de 2017 se atinja a marca de 50 milhões de toneladas a nível mundial (UNEP, 2015). Segundo essa mesma pesquisa, entre 60 e 90 % desses resíduos são comercializados ilegalmente ou descartados como resíduos comuns. A reciclagem de resíduos eletroeletrônicos poderia fazer com que o Brasil produzisse um lucro anual de R\$18 bilhões de reais (NICOLAI, 2016).

Com relação aos telefones móveis em particular, 17 mil toneladas foram descartadas na América Latina em 2014. Levando-se em conta que a massa média de um aparelho é 140 gramas, isso significa 120 milhões de aparelhos descartados, o que representou um aumento de 30,8 % em relação ao ano de 2009. O mesmo estudo demonstra que o Brasil lidera o *hanking* dos países da América Latina que mais geraram REEE entre os anos 2009 e 2018.

Em âmbito nacional, um estudo sobre a Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos, apresentado pela ABDI em 2013, revelou que no ano de 2017 seriam geradas aproximadamente 1,37 milhões de toneladas de REEE no Brasil (ABDI, 2013).

Segundo Pariatamby e Victor (2013), a obsolescência em ritmo acelerado no setor eletrônico é o motivo que resulta na geração de resíduos eletroeletrônicos. Há preocupações de que os REEE gerados nos países desenvolvidos acabem nos

países em desenvolvimento, especialmente na Ásia, resultando em muitos impactos ambientais e de saúde adversos.

De acordo com GSMA (2015), a gestão e o gerenciamento adequados de resíduos eletroeletrônicos são fundamentais para garantir o acesso de futuras gerações a produtos eletrônicos, preservar os recursos naturais e a saúde humana, proteger as condições de trabalho para se evitar trabalho infantil e ilegal e reduzir os impactos ambientais associados à produção, uso e disposição de equipamentos eletroeletrônicos.

2.3.3 O Fluxo de Resíduos Eletroeletrônicos no Mundo e seus Impactos

Os movimentos transfronteiriços ilegais de resíduos perigosos de países desenvolvidos para países em desenvolvimento tornaram-se uma crescente preocupação global devido aos custos elevados de tratamento e disposição de resíduos perigosos, leis ambientais fracas e até mesmo a ausência dessas, aliados à baixa consciência ambiental (UNEP, 2015). Um estudo da EPA revelou que é dez vezes mais barato exportar REEE para a Ásia do que processá-lo nos Estados Unidos da América (LUNDGREN, 2012).

A gestão e o destino dos resíduos eletrônicos em diferentes países apresentam diferenças significativas entre países desenvolvidos e países subdesenvolvidos. Uma das opções de gestão de resíduos mais comumente usada para os REEE é a disposição em cenários sem controle algum, como o da Figura 6. A potencial incompatibilidade dos materiais depositados em aterros, por exemplo, cria ambientes perigosos, podendo aumentar a mobilidade dos metais e outros compostos orgânicos nos aterros sanitários, mesmo após o seu encerramento, gerando a possível contaminação do solo e corpos d'água (TANSEL, 2017).

Figura 6 - Queima de resíduo eletroeletrônico a céu aberto

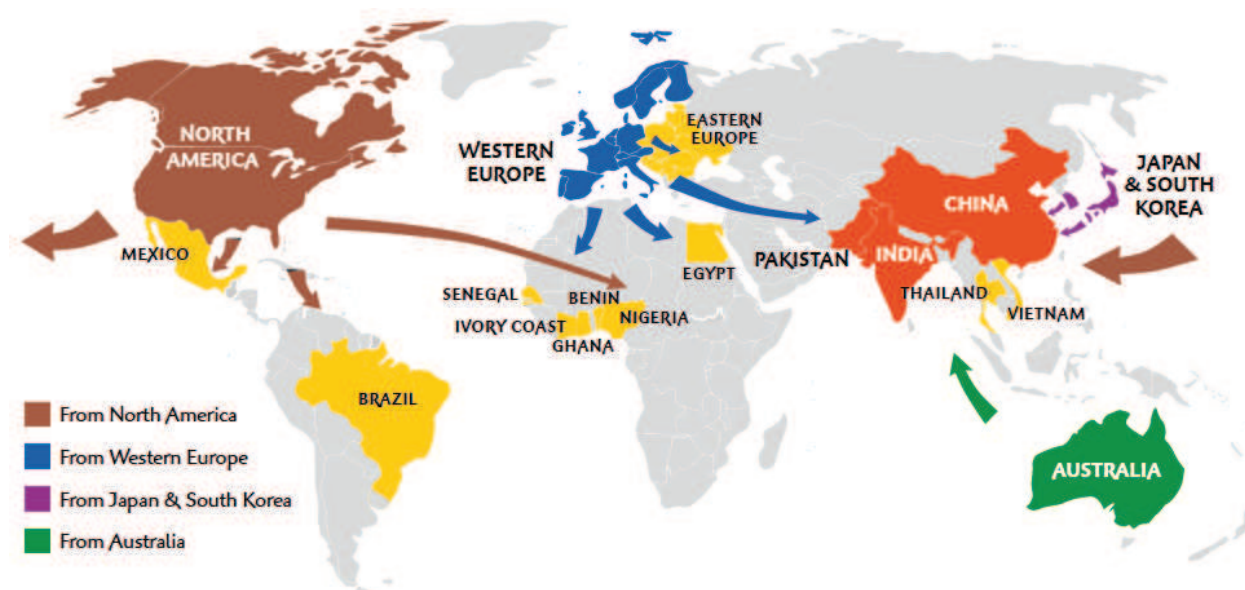


Fonte: UNEP (p.18, 2015).

O tamanho exato do comércio global e ilegal dos REEE é desconhecido (UNEP, 2015). Em geral, o resíduo eletrônico flui para áreas historicamente marginalizadas e desfavorecidas (...). Desde 2006, o crescimento no comércio mundial global tem sido principalmente na Ásia, tornando-se o destinatário dominante das exportações globais (LUNDGREN, 2012). Segundo a UNEP (2015), a reciclagem de resíduo eletrônico está florescendo em muitas partes do mundo, sendo o sul e sudeste da Ásia os principais destinos regionais, incluindo, mas não limitado a, China, Hong Kong, Índia, Paquistão e Vietnã. Na África Ocidental, os destinos mais comuns, são Gana, Nigéria e Benin, entre outros (UNEP, 2015).

As principais rotas de deslocamento de resíduos eletrônicos podem ser visualizadas na Figura 7.

Figura 7 - Fontes de geração e destinos dos resíduos eletroeletrônicos no mundo



Fonte: Lundgreen (p.15, 2012).

Operações de reciclagem de resíduos eletrônicos foram identificadas em vários locais na China e na Índia. Alguns locais menos investigados estão nas Filipinas, Nigéria (cidade de Lagos), Paquistão (Karachi) e Gana (Acra) (...). Estima-se que a China receba a maior quantidade de REEE – cerca de 70 %, e esse percentual continua aumentando (...). A área mais proeminente na qual ocorrem os processamentos informais de reciclagem é o sul da província de Guangdong, os grandes centros sendo Guiyu, Guangzhou, Dongguan, Foshan, Shunde, Zhongshan, Dali, Longtang e Shenzhen. A partir desses locais, o REEE é distribuído para outras províncias e cidades que hospedam centros de processamento, tais como Hunan, Jiangxi, Fujian. No entanto, não há nenhuma fonte segura para avaliar quão substancial são esses fluxos transfronteiriços de REEE (NI & ZENG, 2009; LUNDGREEN, 2012).

Na China, há cerca de 130 empresas de reciclagem de REEE registradas. No entanto, nem todas elas possuem certificados que apresentam ter conhecimento técnico para a execução, nem mesmo licenças ambientais (...). A cidade de Guiyu na Província Guangdong é referida como a capital de REEE do mundo, sendo o lar de mais de 300 empresas e 3000 oficinas que empregam pessoas em atividades de reciclagem informais, como a extração de metais de placas de circuito de computadores e a queima de cabos de plásticos para retirada de cobre (WANG et al., 2013; UNEP, 2015).

Na África, a reciclagem e o reprocessamento de REEE informal é uma indústria relativamente nova e importante, operando com ausência de controles e regulamentos. Estima-se que a destinação de REEE para a África Ocidental aumentará no futuro, devido a regulamentos recentes na Ásia tornando mais rigorosa a destinação de REEE para seus países (LUNDGREEN, 2012).

A crescente quantidade de REEE encoraja o estabelecimento de pequenos, artesanais e informais negócios de reciclagem com condições muito básicas de saúde, ambiental e de normas de segurança nos países de destino. Às vezes, a reciclagem pode ser realizada em instalações domésticas (UNEP, 2015).

A mão de obra da reciclagem é artesã, sendo a maioria dos trabalhadores em Guiyu migrantes rurais provenientes de regiões agrárias de países vizinhos que trabalham por salários relativamente baixos. Muitos desses trabalhadores são mulheres e crianças (WANG et al., 2013; UNEP, 2015).

Segundo Chi et al. (2011) e relatório da UNEP (2015), os métodos comumente utilizados pelos recicladores informais na Ásia, incluem:

- 1 – desmantelamento físico utilizando martelos e outras ferramentas para separar diferentes materiais;
- 2 - remoção de componentes de placas de circuito impresso por aquecimento sobre grelhas de carvão;
- 3 - remoção de metais em céu aberto através de banhos ácidos para recuperar ouro e outros metais;
- 4 - arrebentar e derreter plásticos sem ventilação adequada no ambiente;
- 5 – queima de cabos ao ar livre para recuperar o cobre;
- 6 – disposição de material irrecuperável e sem valor econômico em campos e margens de rios.

As Figuras 8 e 9 apresentam algumas áreas de reciclagem informais na Ásia.

Figuras 8 e 9 - Operação de reciclagem de resíduos eletroeletrônicos em oficinas informais



Fonte: UNEP (p.15, 2015).



Fonte: UNEP (p.37, 2015).

De acordo com Lundgreen (2012), existem três principais grupos de substâncias que podem ser liberadas durante a recuperação e reciclagem de material e que são motivo de preocupação: constituintes originais do equipamento, como o chumbo e mercúrio; substâncias que podem ser adicionadas durante alguns processos de recuperação, como cianeto; e substâncias que podem ser formadas através da reciclagem nos processos, como as dioxinas e furanos. Se gerenciado incorretamente, essas substâncias podem representar riscos significativos ao meio ambiente e à saúde humana. Para Lundgreen (2012), as substâncias tóxicas podem ser encontradas a partir das seguintes saídas geradas nos processos de reciclagem informais de REEE: lixiviados, material particulado do desmantelamento físico, cinzas das atividades de queima, vapores de mercúrio no aquecimento para dessoldagem e em outras queimas, efluentes na desmontagem dos REEE, contendo, também cianeto.

Os riscos para a saúde humana, segundo Yu Welford & Hills (2006), incluem dificuldade na respiração, irritação respiratória, tosse, asfixia, pneumonite, tremores, problemas neurológicos, convulsões, comas e até mesmo a morte.

Song & Li (2014) avaliaram os efeitos dos metais oriundos de REEE nos impactos ambientais na China. O estudo elencou contaminações no solo, nas plantas, a acumulação em culturas de vegetais, arroz, dentre outras, no ar e na água. Alguns dos metais avaliados foram cobre, mercúrio, cromo e chumbo, apresentando concentrações elevadíssimas quando comparadas ao permitido em leis, normas e decretos.

Em âmbito nacional, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) proibiu definitivamente a importação de resíduos perigosos através do seu artigo 49, o qual diz que:

é proibida a importação de resíduos sólidos perigosos e rejeitos, bem como de resíduos sólidos cujas características causem dano ao meio ambiente, a saúde pública e animal e a sanidade vegetal, ainda que para tratamento, reforma, reuso, reutilização ou recuperação.

Antes disso, o Brasil já havia aderido à Convenção da Basileia sobre o Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu Depósito. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA), “ao aderir à convenção, o governo brasileiro adotou um instrumento que considerava positivo, uma vez que estabelece mecanismos internacionais de controle desses movimentos, baseados no princípio do consentimento prévio e explícito para a importação, exportação e o trânsito de resíduos perigosos”.

Ainda assim, o Brasil não está fora das rotas de tráfico ilegal de resíduos eletroeletrônicos, conforme notícia do site O Globo do mês de agosto de 2015. De acordo com a reportagem, intitulada “Rota do tráfico de resíduos eletrônicos se amplia no mundo e inclui o Brasil”, somente no período de 2010 a 2015 o Ibama interceptou aproximadamente 500 toneladas de resíduos eletrônicos entrando no país por portos e fronteiras. Dentre algumas dessas tentativas pode-se citar: 353 toneladas de resíduos de televisores chegando em Porto de Navegantes e 9 toneladas de baterias veiculares do Uruguai entrando no Brasil sendo transportadas em carroças.

Além disto, segundo Nicolai (2016), o Instituto de Tecnologia Suíço (EMPA) alerta para a existência de um mercado negro informal de compra de resíduos eletroeletrônicos no Brasil.

2.4 APARELHO CELULAR

Conforme o IPMI (2003), tipicamente um aparelho celular é composto pelas seguintes partes: bateria; tela de *display* de cristal líquido (LCD) e vidro; antena; circuito eletrônico e acessórios, como fone de ouvido.

Li et al. (2010) definem *smartphone* como um telefone móvel que oferece capacidade mais avançada de computação e conectividade em relação a outros

telefones celulares. Normalmente é equipado com câmera, possui conectividade *wi fi*, interface para a instalação de novos aplicativos, telas sensíveis ao toque (*touch-screen*) e outras funções equivalentes a capacidades de computação como computadores pessoais.

Desde que os *smartphones* possuem diversas funções de telecomunicações e de computadores, eles têm substituído os aparelhos *feature phones* em uma taxa de crescimento muito acelerada (MEJAME et al., 2016).

Bachér et al. (2015) avaliaram a composição de dois aparelhos celulares, sendo um denominado grande, fabricado em 2005 e outro de tamanho pequeno, fabricado em 2004. A partir da sua caracterização foram identificadas diferenças na distribuição de massa, como na PCI, a qual apresentou massa superior (26 %) para o telefone menor quando comparado ao maior, com percentual mássico de 10 %.

Em média, um aparelho celular fabricado nos anos 2000 era composto por 40 % em massa de polímeros, em especial na carcaça e na PCI, 23 % de metais (na PCI principalmente), vidro e cerâmicos (20 %) presentes nas telas LCD e chips, 10 % de Cu nas trilhas de PCIs e outros dispositivos soldados, compósitos e outros em menor quantidade (UNEP, 2009; BOLLINGER, 2010).

Silveira et al. (2016) caracterizaram *smartphones* e identificaram uma massa superior a 25 % de polímeros, incluindo a carcaça dos aparelhos, fabricadas neste material. A PCI representou quase 20 % da massa total do aparelho, sendo detectado na sua composição Cu, majoritariamente, além de outros metais, como Sn, Si, Al, dentre outros. A composição ainda apresentou variação de acordo com a marca e modelo de cada aparelho.

Holgersson et al. (2018) desmontaram e caracterizaram 30 *feature phones* e 30 *smartphones*, fazendo uma comparação da composição dos dois tipos de aparelhos, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Composição de dois aparelhos celulares em massa %

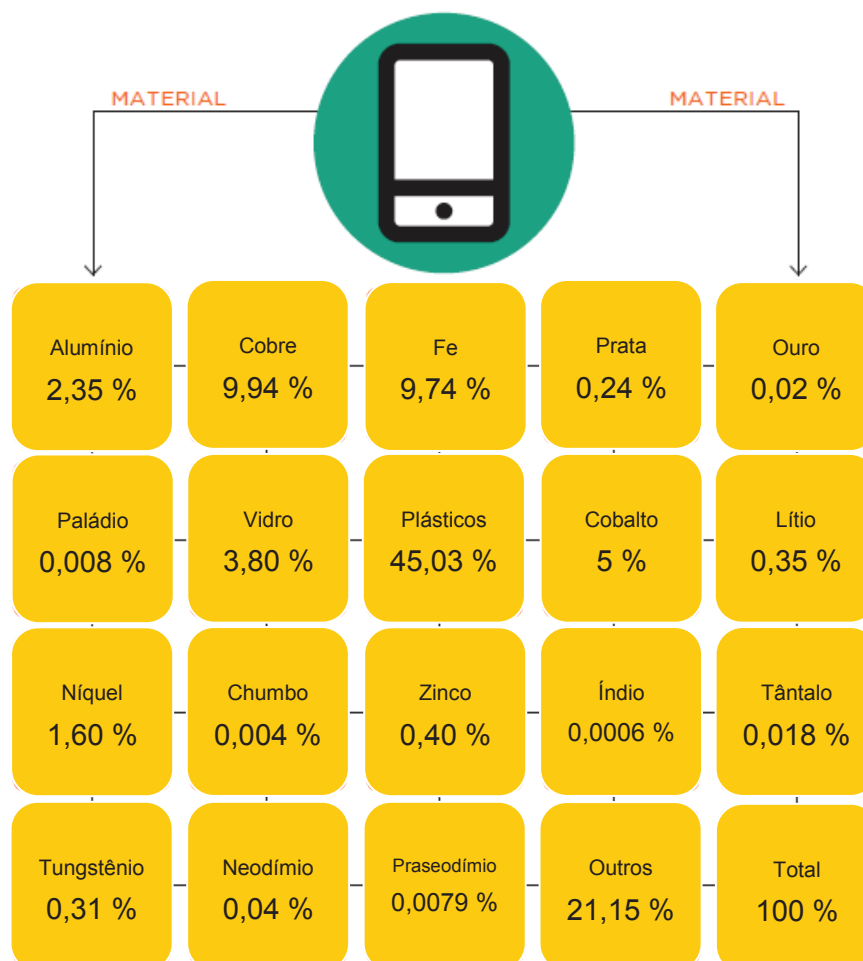
	Feature phone	Smartphone
Ano de produção aproximado	2001-2010	2004-2013
Massa média do aparelho (g)	99,646	108,04
Placa de circuito impresso	20,5	20
Carcaça plástica e metal	39	33
Carcaça metálica	3,5	3
Bateria	19	13
Tela	8	26
Magnético	3	2,5
Metal removido da PCI (dispositivos)	5	6,5
Outros	2	1,5

Fonte: Adaptado de Holgersson et al. (2018).

Os resultados encontrados por Holgersson et al. (2018) indicam que, apesar de se tratar do mesmo tipo de resíduo eletrônico, ou seja, celulares, ainda sim a sua composição varia em função do ano de fabricação e tamanho, revelando uma heterogeneidade entre os aparelhos estudados.

De acordo com a GSMA (2015), a massa de polímeros é a mais expressiva em um telefone móvel, representando até 45 % da massa total. A Figura 10 apresenta a composição simplificada, em massa, de um aparelho celular.

Figura 10 - Composição de um aparelho celular, em % em massa



Fonte: Adaptado de GSMA (2015).

Um aparelho celular, segundo dados da UNEP (2009), pode conter mais de 40 elementos da tabela periódica, desde metais básicos como cobre e estanho, até metais preciosos como prata, ouro e paládio. (UNEP, 2009).

Para Palmiere et al. (2014), os REEE como os aparelhos celulares representam uma fonte de recursos secundários para a recuperação de importantes metais, pois além dos metais básicos e preciosos, esses resíduos contêm elementos de terras raras. Os elementos de terras raras são constituídos por um conjunto de 17 elementos, formados pelos lantanídeos, ítrio e escândio e são usados na indústria eletrônica, células fotovoltaicas, turbinas eólicas, dentre outras, por apresentarem propriedades químicas, magnéticas e luminescentes que não se encontra em nenhum outro elemento (LOUREIRO, 2013).

Uma característica comum das melhorias tecnológicas é o uso massivo de metais. Alguns metais, chamados de metais de alta tecnologia, são indispensáveis

em equipamentos modernos, como os celulares, em particular; antimônio, cobalto, lítio, tântalo, tungstênio e molibdênio são amplamente utilizados. Nota-se que, além de metais comumente conhecidos, como alumínio e cobre, podem ser encontrados outros metais, às vezes em percentagens muito pequenas nos telefones celulares. Eles são particularmente utilizados pelas suas propriedades químicas e físicas e às vezes para habilitar funcionalidades. Tungstênio, por exemplo, devido a sua alta densidade, é usado como um contrapeso na extremidade do eixo do pequeno motor que atua como o vibrador nos celulares (GSMA, 2015).

Em razão da grande quantidade de metais presentes na composição dos aparelhos celulares, a esses equipamentos são conferidos periculosidade. Conforme a NBR 10.004 da ABNT (2004), a periculosidade de um resíduo é uma característica apresentada por tal que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, pode apresentar risco à saúde pública – provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices, e riscos também ao meio ambiente – quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

Muitos são os impactos negativos causados pelo descarte incorreto de resíduos tecnológicos. Os metais pesados afetam as funções orgânicas, podendo em doses mais elevadas levar a morte. O contato pode acontecer devido à introdução no ciclo biológico, através de água contaminada (pelo lençol freático) por esses elementos, pelo solo, ou até mesmo pelo ar. Diversos efeitos são causados pelo contato direto ou indireto com metais. As respostas podem ser agudas, algumas crônicas, outras tardias e assim dificultam o diagnóstico da doença obtida (MOREIRA e MOREIRA, 2004).

O Quadro 3 apresenta um resumo dos principais danos causados por metais pesados presentes em resíduos de telefones celulares e outros REEE.

Quadro 3 - Danos causados por metais presentes em REEE

Substância	Dano
Alumínio	Alguns autores sugerem existir relação da contaminação crônica do alumínio como um dos fatores ambientais da ocorrência de mal de Alzheimer.
Arsênio	Pode ser acumulado no fígado, rins, pulmões, ossos, unhas, etc. Alguns efeitos crônicos são o câncer de pele e dos pulmões e anormalidades cromossômicas.
Cádmio	Acumula-se nos rins, fígado, pulmões, pâncreas, testículos e coração. Causa deformação fetal e câncer.
Bário	Provoca efeitos no coração, constrição dos vasos sanguíneos, elevação da pressão arterial e efeitos no sistema nervoso central.
Cobre	Intoxicações como lesões no fígado.
Chumbo	É o mais tóxico dos elementos; acumula-se nos ossos, cabelos, unhas, cérebro, fígado e rins, em baixas concentrações causa dores de cabeça e anemia. É um elemento cumulativo de intoxicações crônicas que provocam alterações gastrintestinais, neuromusculares e hematológicas, podendo levar a morte.
Mercúrio	Atravessa facilmente as membranas celulares e é rapidamente absorvido pelos pulmões. É altamente tóxico ao homem. Doses de 3 g a 30 g são fatais. Provoca lesões cerebrais, além de efeitos de envenenamento no sistema nervoso central. Pode causar deformações em fetos.
Cromo	Pode provocar anemia, alterações hepáticas e renais, além de câncer do pulmão.
Níquel	Atua diretamente na mutação genética.
Zinco	Tem efeito tóxico sobre os peixes e algas.
Prata	10 g como nitrato de prata é letal ao homem.

Fonte: Adaptado de Greenpeace (2007).

2.4.1 Placa de Circuito Impresso

2.4.1.1 Conceito, Função e Composição Geral

A placa de circuito impresso (PCI) é o componente integral de qualquer equipamento eletrônico, já que conecta eletricamente e proporciona suporte

mecânico aos componentes eletrônicos. A estrutura básica das PCIs é a estratificação folheada de cobre, consistindo de resina epóxi reforçada com fibra de vidro e uma série de materiais metálicos, incluindo metais preciosos (GHOSH et al., 2015). Segundo Kasper (2011) e Ghosh et al. (2015), todas as PCIs consistem essencialmente em três unidades básicas: (1) um substrato não condutor ou laminado, (2) circuitos condutores impressos na superfície ou dentro dos substratos e (3) os componentes fixados ao substrato.

A PCI tem duas funções: promover a sustentação mecânica dos componentes que fazem parte do circuito, como capacitores, resistores e outros, e possibilitar as conexões que fazem o contato elétrico desses componentes, através das trilhas de cobre (FILHO, 2013). O Quadro 4 apresenta os constituintes característicos de uma PCI, sua função principal e alguns materiais utilizados na fabricação.

Quadro 4 - Constituintes típicos de placas de circuito impresso

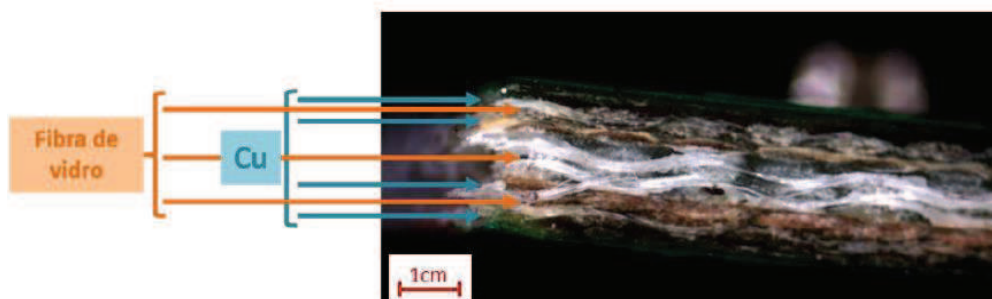
Constituinte	Função principal	Exemplo de material
Armadura	Proporciona força mecânica e propriedades elétricas	Tecido de fibra de vidro
Agente de acoplamento	Faz a ligação do vidro inorgânico com resina orgânica e transfere tensões através do laminado	Organosilanos
Resina	Age como um aglutinante e agente de transferência de carga	Epóxi (DGEBA)
Agente de cura	Melhora a polimerização linear/cruzada na resina	Dicianodiamida (DICY), fenol novolac (fenólico)
Retardante de chama	Reduz a flamabilidade do laminado	Halogenados (TBBPA), sem halogênio (compostos de fósforo)
Adesivos condutivos (<i>fillers</i>)	Reduz a expansão térmica e o custo do laminado	Sílica, hidróxido de alumínio
Aceleradores	Eleva a taxa de reação, reduz o tempo de cura, controla a densidade de reticulação	Imidazole, Organofosfato

Fonte: Adaptado de Sanapala et al. (2009).

Existem diferentes relatos na literatura quanto ao conceito e à composição de uma PCI. De acordo com o IPMI (2003), a placa de circuito impresso é um circuito eletrônico contendo um microprocessador, processador de sinal digital, memória somente de leitura - ROM, *chips* de memória *flash* (aos quais são ligados conectores), um pequeno microfone e alto-falante; carcaça; um conector (pequeno transformador, com plásticos, ligações de cobre, utilizado para recarregar a bateria).

Para Rodrigues (2007), uma placa de circuito impresso é composta por uma resina epóxi, na qual é adicionado retardante de chama bromado, fibra de vidro e cobre. A Figura 11 ilustra as camadas das PCIs.

Figura 11 - Identificação de camadas de cobre, fibra de vidro e resina (vista lateral)



Fonte: Silvas (p.74, 2014).

As partes eletrônicas, ou seja, os dispositivos das PCIs, geralmente contêm silício (Si), ouro (Au), prata (Ag), níquel (Ni), ferro (Fe), alumínio (Al) e outros metais, os quais são fixados por uma solda de estanho (Sn) e chumbo (Pb).

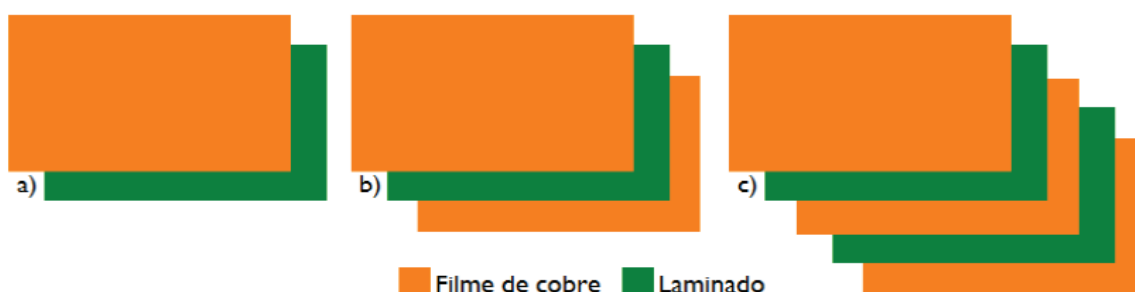
2.4.1.2 Fabricação

Segundo Moraes (2011), existem dois processos principais de fabricação de PCIs: o processo subtrativo e o aditivo. O processo subtrativo é o mais utilizado porque pode ser aplicado a qualquer número de camadas, porém é o processo que consome mais cobre. O processo consiste em utilizar uma chapa recoberta de uma camada fina de cobre em uma ou nas duas faces, onde é transferida uma imagem do circuito por processo serigráfico ou laminação de filmes. Para formar a trilha, o excesso de cobre da chapa é retirado através de corrosão química. Já o processo aditivo é baseado na eletrodeposição das trilhas de cobre sob a chapa de base sem o cobre na superfície e é mais vantajoso economicamente.

Os dois tipos mais comuns de PCIs usadas em computadores e equipamentos de comunicação são feitos de fibra de vidro reforçadas com resina epóxi – denominadas comercialmente de FR-4. Em televisões e eletrônicos domésticos predominantemente são utilizadas as FR-2, placas feitas de papel de celulose reforçadas com resina fenólica (WILLIAM e WILLIANS, 2007). De acordo com Yahame et al. (2011), o FR-4 é utilizado em dispositivos pequenos, como telefones celulares.

As placas de circuito impresso podem ser classificadas baseadas no número de camadas revestidas de cobre (Figura 12), ou seja, de acordo com a sua tecnologia, como face simples (uma face revestida com cobre), face dupla (os dois lados da placa são revestidos) ou multicamadas (4 a 16 camadas de cobre entre as camadas de vidro) (MORAES, 2011). Ainda conforme este autor, a classificação das PCIs também pode ser associada ao tipo de material ou laminado, e identificados como FR-1 (retardante de chama, do inglês *fire retardant*), FR-2, FR-4, teflon, espessuras críticas, CEM-1.

Figura 12 - Classificação das PCI quanto ao número de camadas de cobre



a) Face simples b) Face dupla c) Multicamadas

Fonte: Ventura (p.01, 2014).

As PCIs dos telefones celulares, denominadas de FR-4, são de fibras de vidro reforçadas com resina epóxi. O laminado dos aparelhos varia entre 4 a 16 camadas de fibra de vidro com resina epóxi, espessura que varia de 0,075 mm a 3,2 mm, intercaladas com microfilmes de cobre, que podem variar de 0,018 mm a 0,70 mm, resistente à água e que impossibilita a ação de raios ultravioleta (MORAES, 2011).

2.4.1.3 Composição Química das PCIs

A composição química varia de acordo com o tipo de PCI e suas aplicações, determinada pelo tipo de equipamento e da tecnologia empregada e disponível na fabricação (FILHO, 2013; GHOSH, 2015). Em geral, uma PCI contém aproximadamente 28 % de metais, 23 % de plásticos e a porcentagem restante de materiais cerâmicos e vidro (ZHOU e QIU, 2010; GHOSH, 2015).

Para Veit (2001), as PCIs em geral são constituídas por cerca de 30 % de polímeros em massa (especialmente poliolefinas, poliésteres e policarbonatos), 30 % de óxidos refratários em massa (dividem-se em 50 % de sílica, 20 % de alumina, 20 % de óxidos de terras raras e 10 % de outros óxidos), 40 % de metais bases em massa (composto de 50 % de Cu, 20 % de Fe, 10 % de Sn, 5 % de Ni, 5 % de Pb, 5 % de Al e 3 % de Zn) e metais preciosos – em torno de 1655 g/ton de Ag, 850 g/ton. de Au e 42 g/ton. de Pd.

O principal material de reforço para substrato da PCI é uma placa, feita de fibras de vidro ou de sílica. Os materiais cerâmicos, sobretudo, são representados por alumina e sílica, dado que a sílica é componente da fibra de vidro, usada para reforçar a placa (OLIVEIRA, 2012). Outros materiais cerâmicos que fazem parte da composição como alumina, óxidos alcalinos e alcalino-terrosos e pequenas quantidades de outros óxidos mistos como titanato de bário, estão também presentes (SUM, 1991; SILVAS, 2014; GHOSH et al., 2015). O substrato é feito principalmente de resina epóxi ou resinas de cianato (para PCIs multicamadas) ou resinas fenólicas (para PCIs com somente uma camada), nas quais são adicionados retardante de chama, que podem ser fabricados com poliamidas, naftalato de polietileno ou polietileno tereftalato, além de bisfenol A e resinas contendo fenol, cresol e ésteres de cianeto, assim como resinas termofixas (SILVAS, 2014; GHOSH et al., 2015). Retardantes de chamas, assim como metais pesados, são elementos perigosos que fazem parte da composição das PCIs. Ambos representam grave perigo para o meio ambiente quando submetidos aos tratamentos convencionais de resíduos como aterro e incineração (GHOSH et al., 2015).

Quanto aos metais, nas placas de circuito impresso encontra-se uma grande variedade, sendo possível encontrar não só metais básicos, como metais nobres, além de metais perigosos e tóxicos (OLIVEIRA, 2012). Segundo Sena (2014), nos anos 80, 12 elementos eram utilizados na fabricação das PCIs, na década seguinte 16 elementos, e na primeira década desse novo século seriam potencialmente mais 45. O Quadro 5 relaciona alguns metais com a sua função nas PCIs.

Quadro 5 - Elementos metálicos e sua utilização nas placas de circuito impresso

Grupo	Elemento	Utilização na placa de circuito impresso
Metais ferrosos	Ferro e suas ligas	Em alguns componentes magnéticos e nas ligações das placas ao exterior
Metais não ferrosos	Cobre	Principal metal, utilizado nas trilhas condutoras, nos pinos de ligação e em alguns componentes eletrônicos
	Alumínio	Em alguns componentes eletrônicos (ex.: capacitores)
	Estanho	Soldas e revestimentos anticorrosivos de outros metais
	Zinco	Em alguns componentes eletrônicos (ex.: varistor – resistor) e em soldas Sn-Zn
	Níquel	Ligas metálicas em componentes eletrônicos (ex.: fios e filmes condutores em resistências)
	Cromo	
Metais nobres	Cobalto	Pequenos teores em alguns componentes eletrônicos. Utilizado como um auxílio para a difusão de ouro em substratos.
	Ouro	Revestimentos de pinos de ligação dos microchips e nos circuitos integrados. Usado pela sua natureza maleável e dúctil, bem como boa condutividade elétrica e solubilidade em soldas de estanho.
	Prata	Utilizada em conectores, pastas condutoras e em resistências. Utilizado pelos mesmos motivos que o ouro
	Platina	Revestimentos de contatos de interruptores e sensores
Paládio		
Metais tóxicos	Chumbo	Presente nas soldas (atualmente proibido na europa)
	Cádmio	Resistências SMD e detectores
	Mercúrio	Utilizado em relés, interruptores e alguns sensores (atualmente proibido na europa)
	Antimônio	Utilizado em soldas, revestimento do cobre, aditivo em alguns compósitos poliméricos retardantes de chama
Outros metais (leves)	Arsênio	Utilizado em LEDs, transistores, amplificadores e em dopantes de semicondutores
	Titânio	Presente nos revestimentos de tinta usados em alguns componentes (ex.: resistências, capacitores)
	Magnésio	Podem ser encontrados em alguns componentes eletrônicos
Berílio		
Outros metais (raros)	Germânio	Semicondutor alternativo ao silício
	Gálio	Utilizado em transistores e retificadores
	Índio	
	Tântalo	Presente em capacitores
	Outras terras raras (Ce, Tb, Y)	Componentes das placas de circuito impresso
Rutênio, Ródio, Bismuto, Selênio, Nióbio		

Fonte: Elaborado pela Autora (2019), baseado em Oliveira (2012) e GSMA (2015).

Os principais metais presentes nas placas são o Cu, Fe, Al, Sn, Ta, Au, Ag, Cr, Hg, Cd, Cr, Ni, e Pb (WILLIAM e WILLIAMS, 2007; BURKE, 2007; MORAES, 2011).

Aproximadamente 10 a 20 % da PCI é composta por Cu, que forma a camada de condução para a conexão elétrica entre diferentes componentes. Típicas soldas Pb/Sn, que são usadas para unir diferentes dispositivos na PCI, contribuem para 4-6% da massa total de PCIs. Os dispositivos que são soldados na PCI também contêm diferentes metais valiosos, como Ga, In, Ti, Si, Ge, As, Sb, Se, Te, Ta, dentre outros (GHOSH et al., 2015).

O Cu é o metal com maior concentração presente nas placas de circuito impresso de telefones celulares. Considerando que a concentração de Cu é de cerca de 33 %, 1 tonelada de placas de circuito impresso contém aproximadamente 330 kg desse elemento (VEIT, 2005; KROWINKEL e DALMIJN, 2000; YAMANE et al., 2011).

Segundo Silvas (2014), a composição é ainda influenciada pela tecnologia, uma vez que nos aparelhos fabricados mais recentemente observa-se uma tendência na substituição da liga de Sn/Pb, utilizada nos aparelhos mais antigos, por ligas contendo Sn/Ag e Sn/Bi, assim como outros materiais que têm sido substituídos, como Hg, Cd, Cr VI e retardantes de chama (bifenil polobromado-PBB e éter difenil polibromado-PBDE), devido à exigência da Legislação Europeia que determina a Restrição de Certas Substâncias Perigosa (RoHS) (UNIÃO EUROPEIA, 2012; SILVAS, 2014).

2.5 RECICLAGEM

Neste item foram abordados alguns temas referentes à reciclagem de resíduos eletroeletrônicos: uma breve contextualização, a mineração urbana, conceito recente na área ambiental, em que os metais têm uma importância estratégica, e por fim foram compiladas algumas informações sobre empresas que atuam nos serviços de desmanche de REEE no Brasil.

2.5.1 Contextualização

As oportunidades e processos existentes para a recuperação de produtos em fim de vida dependem não apenas da presença de elementos valiosos em sua composição, mas também da complexidade do produto, bem como da escala de operação dos processos economicamente viáveis (GOLEV e CORDER, 2017).

As melhorias no *design*, que aumentam a durabilidade e comercialização de produtos de alta tecnologia, também criam desafios para os processos de reciclagem, como por exemplo, das placas de circuito impresso, em que se tem a laminação de componentes e sistemas embutidos que aumentam sua durabilidade e diminuem seu tamanho. Materiais estruturalmente integrados se tornam difíceis para desmontagem e recuperação de materiais. Outro exemplo são os revestimentos e selantes aplicados a polímeros à base de siloxano (misto de material orgânico e inorgânico), aplicados para melhorar a resistência à umidade e a durabilidade dos produtos, porém esses precisam ser removidos por dissolução ácida ou por aplicação de calor (SURITA e TANSEL, 2015; TANSEL, 2017).

Para Nicolai (2016), a hierarquia genérica de tratamento do REEE baseia-se primeiramente na revenda do equipamento (sem modificação), posteriormente na recuperação dos materiais através de técnicas de reciclagem e, como última alternativa, a incineração ou deposição em aterros sanitários. A reciclagem de placas de circuito impresso, todavia, é um processo bastante complexo devido à grande heterogeneidade dos materiais na sua composição, conforme já destacado (OLIVEIRA, 2012).

Além do processo de reciclagem, entre as opções existentes destacam-se a reutilização de partes como baterias e carcaças, a reparação e substituição de peças danificadas como dispositivos, a incineração e ainda a disposição final em aterro sanitário (CUI e ZHANG, 2008).

De acordo com Oliveira (2012), para um processo de reciclagem ser bem sucedido não se pode considerar somente a recuperação de elementos com valor agregado, mas também os custos inerentes a esse processo (...), sendo que dentre os metais, o cobre é trivialmente o mais vantajoso do ponto de vista econômico e o principal componente metálico nas PCIs, embora os metais nobres, como ouro e prata, também sejam visados nos processos de recuperação.

A composição heterogênea das PCIs dificulta sua reciclagem, porém a presença de metais (sejam eles metais de base, preciosos, nobres ou terras raras) torna esse resíduo um material atraente de se recuperar (VEIT, 2001). Essa problemática na reciclagem das PCIs se dá devido à mistura de material orgânico, metais e fibra de vidro (WILLIAM e WILLIAMS, 2007).

Segundo Tansel (2017), são necessárias mudanças no *design* de produtos para facilitar os processos de desmontagem e recuperação dos diversos e diferentes materiais presentes. A variedade de produtos presentes nos resíduos eletrônicos requer um trabalho de intensiva separação e manuseio e os métodos de recuperação utilizados limitam-se ao que é mais lucrativo, não valorizando o resíduo como um todo. Os processos de recuperação também têm tido sua eficiência limitada, por exemplo, devido à necessidade de uso de solventes e ácidos químicos, o que gera efluentes adicionais que também exigem tratamentos apropriados. Esta situação pode inviabilizar economicamente e ambientalmente processos de recuperação.

2.5.2 Mineração Urbana

No que diz respeito aos resíduos eletrônicos, a mineração urbana é um novo conceito de obtenção de minerais a partir da reciclagem dos REEE pelo tratamento adequado e economicamente viável deste (NICOLAI, 2016).

Para Krook e Bass (2013), "urbana" significa a área dentro das fronteiras da cidade e "mineração" é entendida como a extração de recursos de produtos pós-consumo obsoletos.

O conceito de mineração urbana diz respeito a todas as atividades e processos de recuperação de compostos, energia e elementos de produtos, construções e resíduos gerados a partir das atividades humanas (DI MARIA et al., 2013; WEN et al., 2015).

A Umicore (2016) considera as placas de circuito impresso como "depósitos" de mineração urbana, pois nelas existem mais metais concentrados do que na mineração primária. Com relação ao ouro, por exemplo, reciclando-se uma placa de computador se obtém uma média de 250 g por 1 tonelada de resíduo, quantidade para qual precisaria se extrair da natureza 60 toneladas de minério aurífero para ser

obtida a mesma quantidade de ouro (NICOLAI, 2016), como pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 – Comparação entre concentração de ouro e cobre através da mineração primária e urbana



Fonte: Elaborado pela Autora (2019), baseado em Umicore (2016).

Para Wen et al. (2015), fontes primárias de cobre e ferro podem ser substituídas por metais de fontes secundárias efetivamente. De 2020 para 2040, as taxas de substituição desses metais vão crescer de 19,6 % para 48,8 %. Os autores afirmam que o potencial de exploração de recursos primários da China continuará crescendo entre 2020 e 2040, mas que o potencial de substituição de recursos primários por secundários, através de REEE, por exemplo, terá grande significância e dará segurança para continuar com o desenvolvimento do país asiático.

A partir dos REEE podem ser obtidos desde metais básicos, como o cobre, até preciosos, como ouro, assim como os elementos de terras raras (PALMIERE et al., 2014). Os terras raras são conhecidos como elementos de difícil extração e separação, além do perigo para minerar, em virtude da presença, muitas vezes, de elementos radioativos juntos a esses minérios, como o urânio, sendo que qualquer má manipulação pode causar danos (RARE ELEMENT RESOURCES, 2016).

Cada tonelada de terra rara produzida gera aproximadamente 8,5 kg de flúor e 13 kg de poeira. Para se obter um concentrado do material, são gerados 75 metros cúbicos de efluentes ácidos, 9,6 a 12 mil metros cúbicos de gás contendo, dentre

outros, ácido sulfúrico e dióxido de enxofre, além de gerar aproximadamente 1 tonelada de resíduo radioativo (TUNSU et al., 2015).

Os elementos de terras raras excepcionalmente formam corpos de minérios contínuos. Ou seja, não estão presentes em grandes quantidades em um só local. Isto significa que para a obtenção desses elementos é necessário a mineração de uma grande área (TUNSU et al., 2015).

Ayres e Peiró (2013) afirmam que os elementos terras raras nunca são encontrados em altas concentrações individuais. Ao contrário, eles são distribuídos como contaminantes ou elementos traços nas concentrações de minerais de certos metais “atratores”, ao qual eles são quimicamente semelhantes. No caso dos terras raras, o metal atrator é o ferro, majoritariamente. Um número grande de outros metais raros é encontrado nos minérios de cobre, chumbo, níquel ou zinco. Os metais atratores são os que estão em grandes concentrações no seu minério, como ferro, alumínio, cobre, níquel, zinco, dentre outros, enquanto os *hitch-hiker*, ou “caroneiros”, são metais geologicamente raros que estão relacionados quimicamente com um dos metais atratores.

Os terras raras são usados na indústria eletrônica, pois possuem propriedades que nenhum outro elemento apresenta, sendo usados como dopantes para semicondutores, em placas de circuito impresso, catalisadores, células fotovoltaicas, dentre outras aplicações (AYRES e PEIRÓ, 2013; LOUREIRO, 2013).

A China é responsável por 97% das 125 mil toneladas de terras raras produzidas mundialmente e há uma sólida busca por novos depósitos para se extrair os terras raras (LOUREIRO, 2013).

2.5.3 Centrais de Desmanche de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos

Dados da ABDI (2013) indicam que existem 94 empresas que atuam no desmanche e separação de REEE no Brasil, sendo São Paulo o estado que apresenta a maior quantidade dessas. Dentre essas companhias, pode-se citar a Essencis, Lorene, Reverse e Sinctronics. Porém não há nenhuma publicação mais recente atualizando esse número pela ABDI.

Em pesquisa realizada no portal do Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE) utilizando a palavra-chave “resíduo eletrônico”, foram encontradas 138 empresas em todo o Brasil. Restringindo a pesquisa para o Rio

Grande do Sul, foram encontradas 6 empresas no Estado cadastradas na plataforma (CEMPRE, 2017).

Existem empresas em operação no país que realizam somente as etapas de separação e moagem do material, que posteriormente será processado em plantas na Ásia. Somente em 2011 mais de 20 mil toneladas de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos foram exportados para outros países. Isso pode estar ocorrendo devido a baixas condições de investir em tecnologias de ponta, limitando os processos de reciclagem a baixas eficiências quando comparado às tecnologias de outros países (ABDI, 2013).

A Sinctronics é uma empresa com sede em São Paulo criada em 2012 que atende clientes como a HP, Lenovo, Toshiba, Flex, dentre outros. São processados suprimentos de impressão, resíduos industriais e hardware de desktops, notebooks, celulares, dentre outros REEE. Segundo o Relatório de Indicadores da empresa do ano de 2016, os materiais plásticos são separados por cor e se tornam resinas recicladas, as partes metálicas são transformadas em novas partes metálicas, as espumas de tinta e pó de toner são coprocessadas para reaproveitamento energético e os circuitos elétricos, ou seja, as placas de circuito impresso são enviadas para recuperação de metais fora do País (SINCTRONICS, 2016).

A Umicore é a empresa mais citada em trabalhos da área de resíduos eletroeletrônicos, pois processa sucatas eletrônicas de todas as partes do mundo. Segundo Kasper (2011), as operadoras de telefonia no Brasil Claro, Nokia e Motorola enviam seus aparelhos celulares para serem processados na sua sede situada na Bélgica. Santanilla (2012) afirma que as empresas de reciclagem brasileiras prestam serviços de desmontagem, descaracterização e destinação final de resíduos. No entanto, as placas de circuito impresso não são recicladas no Brasil, são direcionadas principalmente para países da Europa. De acordo com Kasper (2011), em 2008 a Umicore exportou 50 toneladas somente de aparelhos celulares do Brasil para suas fábricas na Europa.

A Umicore utiliza uma combinação de processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e eletrometalúrgicos para a reciclagem de resíduos, a partir dos quais são recuperados cerca de vinte metais preciosos e outros metais não ferrosos (KASPER, 2011; SANTANILLA, 2012).

2.6 PROCESSOS DE RECICLAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Reciclagem é o “processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos (...)” (BRASIL, 2010).

As principais tecnologias utilizadas para a reciclagem de placas de circuito impresso envolvem processos físicos, químicos, térmicos e mecânicos, combinando muitas vezes mais de um processo (OLIVEIRA, 2012). Os principais processos são o processamento mecânico, a eletrometalurgia, pirometalurgia e biotecnologia (VEIT, 2001; VIVAS e COSTA, 2013).

2.6.1 Desmontagem e Triagem

Esta é uma etapa preliminar que consiste na retirada de componentes tóxicos ou valiosos de sucatas de EEE, de forma manual ou automatizada, a fim de aperfeiçoar as seguintes etapas no tratamento (MORAES, 2011). A maioria das plantas de reciclagem utiliza a desmontagem (ou desmantelamento) manual (CUI e FOSSBERG, 2003).

Essa etapa possibilita a separação dos diferentes metais presentes nos componentes que podem seguir para tratamentos apropriados de acordo com as suas características; os componentes metálicos, por exemplo, que apresentam na sua composição metais nobres, podem ser valorizados em refinarias de metais, e os materiais remanescentes como os cerâmicos, polímeros e fibra de vidro podem ser valorizados por outras vias, dado que os processos metalúrgicos não são apropriados a sua recuperação (OLIVEIRA, 2012).

Para KNOTH et al. (2002), a desmontagem é o primeiro e mais importante processo dentre todos da reciclagem, sendo executado principalmente de forma manual. O autor salienta, entretanto, que com a enorme quantidade crescente de produtos a serem reciclados, é necessária a automatização para aumentar a eficiência, afirmando ainda que a alta flexibilidade e baixo custo de desmontagem serão necessários.

Para Oliveira (2012), existem diversas vantagens oriundas da etapa de desmontagem e triagem dos materiais:

- recuperação de componentes que ainda possam estar em condições de reutilização;
- remoção e isolamento de componentes potencialmente perigosos, dando-lhes um destino apropriado que minimize os eventuais impactos ambientais negativos ou que impeça a contaminação dos produtos de valor a produzir;
- separação de frações por tipos de materiais (metais, frações ricas em polímeros, frações ricas em cerâmicos); e
- separação de componentes que tenham elevado valor econômico, para processamento diferenciado e valorização, como *micro-chips* e componentes contendo metais nobres.

O processo de desmontagem das placas de circuito impresso pode ser classificado em duas categorias diferentes: desmontagem gradual (ou seletiva) e desmontagem simultânea. Na desmontagem seletiva, os componentes da PCI são removidos individualmente com ferramentas de precisão, enquanto na desmontagem simultânea todos os componentes são removidos ao mesmo tempo, sendo triados posteriormente (LAYIDING et al., 2005; OLIVEIRA, 2012).

O objetivo dessa etapa é otimizar as etapas seguintes do processo de reciclagem ou recuperação (MORAES, 2011; SILVAS, 2014). Estas etapas seguintes podem ser hidrometalúrgicas, pirometalúrgicas, dentre outras, tendo um material mais concentrado em metais a partir das técnicas de processamento mecânico/físico.

2.6.2 Processamento Mecânico

O processamento mecânico, também chamado de processamento físico por alguns autores, é considerado um pré-tratamento que tem como objetivo a separação prévia de metais, polímeros e cerâmicos, através das etapas de cominuição, classificação (granulométrica) e separação por diferentes métodos (GERBASE e OLIVEIRA, 2012).

Para Moraes (2011), o tratamento mecânico de placas de circuito impresso pode envolver as etapas de moagem, classificação granulométrica, separação magnética, separação eletrostática, separação em meio denso, dentre outras.

2.6.2.1 Cominuição

A cominuição se traduz na fragmentação mecânica das PCIs, com ou sem os componentes eletrônicos na superfície da placa (VENTURA, 2014). É a redução do tamanho do material de maneira controlada. A moagem se dá dentro de uma câmara fechada, através do movimento de facas, martelos ou bolas, em moinhos verticais ou horizontais (VEIT, 2001). Neste estágio o material é reduzido pela combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito, a um tamanho adequado, geralmente a ser concentrado nos processos subsequentes (CETEM, 2004). Os objetivos dessa etapa, segundo Richter (2009), podem ser:

- a) adequar a forma ou o tamanho das partículas;
- b) gerar área de contato para facilitar alguma reação química;
- c) liberar minerais da parte não aproveitada da fragmentação de minérios.

A cominuição também tem influência na separação de materiais orgânicos e inorgânicos, permitindo uma maior eficiência posteriormente nessa separação, seja ela por diferença de densidade ou granulométrica. De todas as etapas do processamento mecânico, é a etapa mais cara, especialmente a cominuição fina (SUN et al., 2015; RIBEIRO, 2017).

De acordo com Veit (2005), para a cominuição de REEE geralmente são utilizados três equipamentos:

- a) moinho de martelos: o material é quebrado pelos martelos e pela colisão com as paredes do moinho. A redução é obtida por martelos que giram sobre um eixo;
- b) moinho de facas/corte: a redução é obtida pelo corte do material através de facas montadas em dois eixos que giram em direções opostas;
- c) moinho criogênico: é um equipamento que utiliza o congelamento, que se dá com a ajuda de nitrogênio líquido para reduzir o tamanho dos materiais. Aumenta a fragilidade do material e, assim, a eficiência do moinho e separação dos materiais.

De acordo com Koyanaka et al. (2006) e Oliveira (2012), a energia necessária para que ocorra a redução de granulometria do material está relacionada à sua

estrutura interna. A energia fornecida ao moinho é usada para ocasionar deformação elástica das partículas antes da ocorrência da fratura e produzir deformação não elástica, originando redução de tamanho. O processo de cominuição é formado por duas fases: o início de pequenas fissuras e, em seguida, a formação de uma nova superfície.

Após a etapa de moagem, são executados os processos de separação dos materiais, que, dentre outros, podem ser: separação granulométrica, separação magnética, separação eletrostática, separação gravimétrica e lixiviação (MORAES, 2011).

2.6.2.2 Classificação Granulométrica

A classificação e o peneiramento têm como objetivo comum a separação de um material em duas ou mais frações, com partículas de tamanhos distintos. No peneiramento, existe uma separação segundo o tamanho geométrico das partículas, enquanto que na classificação, a separação é realizada tomando-se como base a velocidade que os grãos atravessam um meio fluido (CETEM, 2004).

A classificação granulométrica é realizada através de peneiras vazadas onde as partículas se movimentam. As partículas menores passam através das perfurações, enquanto as maiores ficam retidas. Embora esse processo diferencie o material somente pelo tamanho das partículas (HAYES, 1993; KASPER, 2011), Oliveira (2012) afirma que os componentes ligados mecanicamente às placas podem ser separados e liberados através de uma trituração eficiente.

Zhang e Fossberg (1997) averiguaram esse comportamento em seu estudo, em que após uma moagem secundária realizada em um moinho de martelos de laboratório os principais metais presentes em sucatas de PCI se concentraram na fração de 5 mm. Já Oliveira (2012) cita que para se conseguir uma liberação eficiente dos materiais as partículas devem estar em diâmetro inferior a 1 mm – ou ainda, preferencialmente, 0,5 mm ou menor - dependendo das tecnologias subsequentes que serão utilizadas.

Segundo Veit (2005), a eficiência do peneiramento pode ser afetada tanto por aspectos do material quanto por condições do equipamento. Com relação ao equipamento, seus fatores influenciadores são a superfície da peneira (área, % de área vazada, tamanho dos orifícios, forma dos orifícios e espessura da peneira),

movimento (amplitude, frequência e direção), ângulo de inclinação e método de alimentação da peneira. Quanto ao material, sua densidade, a distribuição do tamanho de partículas, sua forma e superfície são características que podem interferir na eficiência desta etapa.

O ensaio consiste em empilhar as peneiras da menor abertura (base) à maior (topo) e depositar o material sobre a peneira de maior abertura, agitando-as através de agitador mecânico. Posteriormente, o material retido e/ou passante é pesado.

2.6.2.3 Separação

De acordo com Kasper (2011), a separação pode ser feita por granulometria, propriedades magnéticas, propriedades elétricas e densidade (gravimetria). As etapas de separação também são denominadas, por Ventura (2014), como etapas de enriquecimento.

2.6.2.3.1 Separação Magnética

Cada material apresenta características magnéticas distintas, e essas dependem de alguns critérios: composição do material (elementos presentes), concentrações e estado de ionização, estrutura cristalina, dentre outros (MORAES, 2011).

As propriedades magnéticas de um material são influenciadas, também, tanto pelo arranjo dos átomos quanto pela estrutura eletrônica dos elementos presentes no material. As formas dos grãos, seus tamanhos e sua distribuição dentro das partículas têm somente uma pequena função relacionado ao comportamento desses materiais compostos em um campo magnético (CETEM, 2004; KASPER, 2011). Os elementos presentes, a concentração desses elementos e a estrutura cristalina no sólido igualmente influenciam as características de magnetismo dos materiais (RIBEIRO, 2013).

Os materiais e minerais são classificados com base em sua susceptibilidade magnética, que é a propriedade que determina a sua resposta a um campo magnético. Com base nisso, podem ser categorizados como minerais ferromagnéticos – os que são atraídos pelo campo magnético, ou paramagnéticos,

que são fracamente atraídos. Os materiais ou minerais que não sofrem interferência do campo magnético aplicado são intitulados de diamagnético (CETEM, 2004).

No caso das placas de circuito impresso, através desse tipo de separação é possível obter uma fração magnética rica em ferro e níquel e uma fração não magnética contendo o restante dos materiais. Essa última fração geralmente segue para tratamentos posteriores, como, por exemplo, para separadores eletrostáticos ou gravíticos (VEIT et al., 2005; WEN et al., 2005; VENTURA, 2014).

Alguns metais, como o cobre, são encontrados tanto na fração magnética quanto na não magnética, pois como é um metal com elevada quantidade na PCI de REEE, o cobre acaba sendo arrastado junto com as partículas de ferro e níquel atraídas (VEIT, 2005). Isso também é resultado da aglomeração de partículas que resulta na atração de alguns não ferrosos sendo carregados pela fração ferrosa.

De acordo com Oliveira (2012), os separadores magnéticos são usados amplamente, geralmente os de baixa intensidade, para fazer a recuperação de metais ferromagnéticos de misturas contendo metais não ferrosos e resíduos não magnéticos.

Há diversos equipamentos que realizam a separação magnética. Dentre dois grandes grupos têm-se os separadores a seco e a úmido. Os separadores a seco são utilizados para partículas maiores, enquanto os a úmido são usados para partículas de menor granulometria. Há os separadores de tambor, de rolos induzidos, de correias cruzadas, entre outros (CETEM, 2004).

2.6.2.3.2 Separação Eletrostática

A separação eletrostática utiliza a diferença de algumas das propriedades dos materiais a serem concentrados, como a susceptibilidade em adquirir cargas elétricas superficiais, condutibilidade elétrica, forma geométrica, densidade e outras. Para que ocorra esse desprendimento são necessários dois fatores: carga elétrica superficial das partículas ou indução da polarização para que permita que as partículas sofram a influência do campo elétrico com intensidade suficiente para desviar uma partícula carregada eletricamente quando está se movendo na região do campo (CETEM, 2004).

Os separadores eletrostáticos são utilizados para separar materiais condutores de não condutores e têm sido usados na recuperação de cobre e outros

metais de sucatas de placas de circuito impresso e também na recuperação de alumínio e cobre em fios e cabos elétricos (CUI E FOSSBERG, 2003; VEIT, 2005).

Veit (2005) afirma que a diferença extrema entre a condutividade elétrica entre metais e não metais é uma condição excelente para a utilização dessa tecnologia com sucesso na reciclagem de resíduos.

Dentre outros fatores, a separação eletrostática está condicionada ao mecanismo do sistema que produz as cargas superficiais, como também à granulometria de liberação, a qual deve proporcionar uma partícula com massa suficiente para que haja uma atração efetiva por parte do campo elétrico aplicado. Para os equipamentos modernos, tal limite de granulometria mínima inferior indicada é na faixa de 20 μm (UFG, 2012).

Segundo Oliveira (2012), os separadores eletrostáticos, dentre outros tipos, podem ser :

- a. Corona: os materiais condutores são separados dos não condutores através de carga por indução ou alta tensão;
- b. Triboeletrostático: a separação é realizada por contato, separando partículas com condutividades bastante semelhantes.

Para os separadores triboeletrostáticos, UFG (2012) salienta que são obtidos bons resultados, através dessa separação, em operações repetidas, necessárias devido à pequena área de contato entre as partículas. Em aplicações industriais, os principais influenciadores em ambiente operacional são a umidade, a temperatura e o campo elétrico.

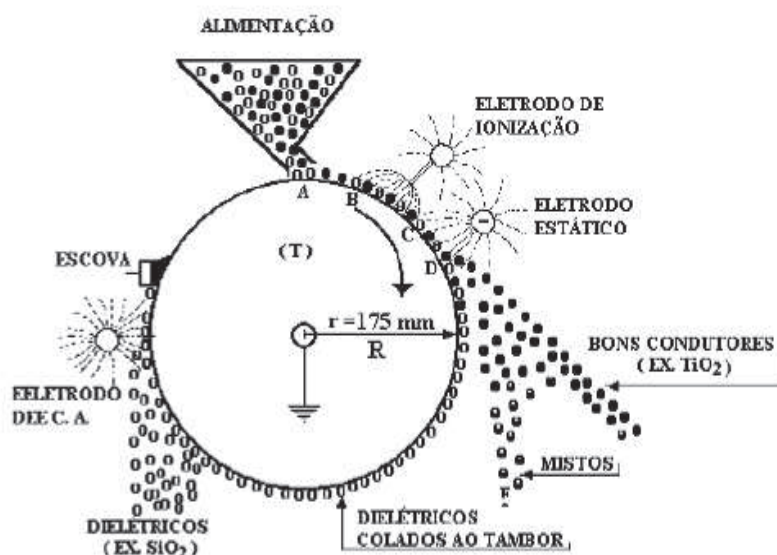
A separação em dois estágios (um com menor tensão e outro com tensão mais elevada) também é uma alternativa desenvolvida para minimizar as perdas de materiais intermediários que acontecem ao se processar frações com elevada granulometria. As partículas condutoras com pequena granulometria são bombardeadas, através de tensões elevadas, com uma descarga elétrica, enquanto que com baixas tensões não se consegue atingir carga suficiente para as partículas maiores não metálicas (OLIVEIRA, 2012).

Segundo Veit (2005), inicialmente os separadores eletrostáticos foram desenvolvidos para o beneficiamento de minérios. Hoje esses equipamentos são usados largamente com outros objetivos, como na recuperação de metais não

ferrosos de sucatas automotivas, no tratamento de resíduos sólidos municipais, nas sucatas eletrônicas, entre outros.

Em um separador eletrostático, a amostra de material com diversos minerais que apresentam condutividades elétricas diferentes é alimentada. Logo em seguida as partículas recebem bombardeamento iônico pelo eletrodo, que funciona com corrente contínua, sendo carregadas negativamente devido ao efeito corona, fenômeno luminoso que ocorre durante uma descarga elétrica, permanecendo aderidas na superfície do tambor. Por indução, o eletrodo estático, com intuito de reverter as cargas das partículas condutoras, faz com que essas sejam desprendidas do tambor, sendo coletadas como material condutor. Já os dielétricos, ou seja, a fração de material não condutor, com carga negativa, se mantém aderida à superfície do tambor e é removida com o auxílio de uma escova e do eletrodo de corrente alternada (SAMPAIO et al., 2007). A Figura 14 ilustra um esquema de separação em um separador de alta tensão.

Figura 14 - Esquema ilustrativo de um separador eletrostático



Fonte: Sampaio et al. (p.343, 2007).

2.6.3 Pirometalurgia

No processamento pirometalúrgico os metais são fundidos e refinados adequadamente para produzir metais puros, pode-se tomar como base o processo metalúrgico de obtenção do cobre e do chumbo. Nas etapas de refinamento são produzidas fases secundárias ricas em outros metais, como metais preciosos, sendo esses encaminhados para refinadores específicos (OLIVEIRA, 2012).

Alguns dos processos de reciclagem de PCI por via pirometalúrgica incluem, entre outros: incineração, fusão, pirólise e sinterização (VEIT, 2005).

Tendo em vista que as placas são compostas por uma resina polimérica reforçada com fibra de vidro, além de metais, a aplicação de pirólise para processar as PCIs produz um resíduo sólido a partir do qual os metais e a fibra de vidro podem ser recuperados. No entanto, a incineração é a forma mais comum de eliminar os materiais poliméricos e outros materiais orgânicos que estejam presentes nos REEE metálicos como nas PCIs. Nesse processo os materiais poliméricos contidos são volatilizados e destruídos quando esses resíduos são queimados, obtendo-se um resíduo metálico (OLIVEIRA, 2012).

A pirólise é um processo de decomposição do material orgânico por aquecimento em atmosfera com nenhuma quantidade ou pouca de oxigênio. Esse processo, quando aplicado em PCIs leva à formação de óleos e gases que podem ser utilizados como combustível ou matéria-prima em refinarias. Esse método, porém, não é o mais indicado no tratamento de PCIs, uma vez que, devido à presença de materiais inorgânicos na sua composição, como a fibra de vidro, a eficiência energética na queima é diminuída (SUM, 1991; GUO et al., 2009; OLIVEIRA, 2012).

A decomposição de material orgânico por processos pirometalúrgicos se mostra uma forma adequada para recuperação de metais, de certa maneira, pois a maioria das substâncias orgânicas se decompõem e volatilizam a elevadas temperaturas, enquanto as cargas inorgânicas, os metais, suportam essas temperaturas e permanecem inalterados ou formam ligas com os metais que tenham afinidade química. Entretanto, esse processo quando aplicado a materiais com retardantes de chamas, como no caso das PCIs, acarreta a volatilização de compostos halogenados, liberação de dioxinas e furanos, formação de escória devido a materiais cerâmicos e vidros do resíduo, baixas eficiências na recuperação

de estanho, chumbo, dentre outras desvantagens. (BLAZSÓ et al., 2002; VEIT, 2005; KASPER, 2011; OLIVEIRA, 2012). Na América do Norte são emitidas 36 toneladas de mercúrio e 16 toneladas de cádmio anualmente devido à incineração de resíduos com cobre, além de gerar dioxinas e furanos oriundos dos materiais poliméricos (CUI E ZHANG, 2008; NICOLAI, 2016).

2.6.4 Hidrometalurgia

A hidrometalurgia é um processo baseado na solubilização dos metais em meio aquoso apropriado, procedendo-se então ao tratamento das soluções resultantes até a obtenção dos metais em formas valorizáveis (OLIVEIRA, 2012). Nesse processo são realizados ataques com soluções para dissolver e separar os materiais sólidos, soluções essas que são submetidas a procedimentos posteriores como extração por solvente, precipitação, refino, dentre outros, a fim de favorecer a seletividade dos materiais (VEIT, 2005; MORAES, 2011).

Segundo Silvas (2014), há diversas técnicas hidrometalúrgicas que podem ser utilizadas no tratamento de REEE, como a lixiviação química com cianeto, tiosulfato, a lixiviação química envolvendo ligantes (usando EDTA, DTPA, NTA, oxalato), a lixiviação química envolvendo tratamento ácido (usando ácido sulfúrico, ácido clorídrico, água régia, ácido sulfúrico e ácido nítrico, hipoclorito de sódio) e a decapagem hidrometalúrgica (usando solventes orgânicos, cloreto de ferro, cloreto de cobre e ácido clorídrico). Os ácidos são os mais utilizados, dentre os agentes de lixiviação, e a sua concentração vai depender de qual metal se deseja solubilizar, por exemplo, os metais básicos se solubilizam em meios ácidos não muito concentrados, já nesse mesmo meio os metais nobres não são solubilizados (OLIVEIRA, 2012).

A lixiviação tem como princípio a solubilização de componentes no estado sólido pelo contato com um agente lixiviante (SILVAS, 2014). De acordo com o mesmo autor, há diversos fenômenos envolvidos nesse processo que podem ser influenciados por muitos fatores, dentre esses, o acontecimento de reações químicas e físicas entre os componentes do sólido/agente lixiviante.

Alguns fatores químicos importantes nesse processo incluem o pH da solução, a composição do material, a relação sólido/líquido, o potencial de oxirredução, dentre outros. Fatores físicos influenciadores são a porosidade, o

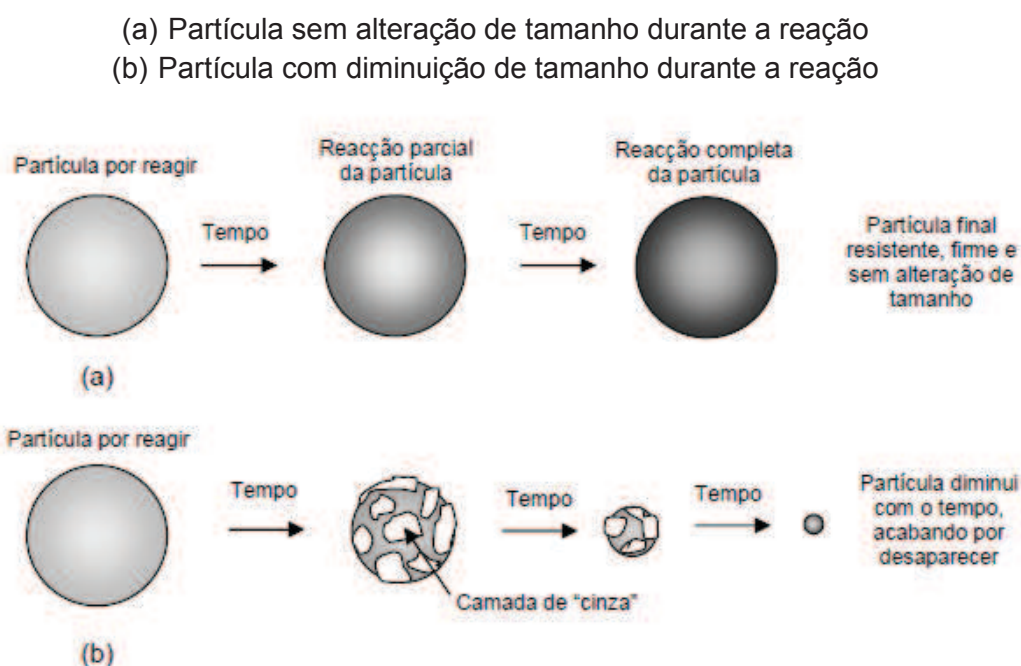
tamanho da partícula, a permeabilidade e a geometria desempenham um papel importante na determinação da velocidade em que os constituintes se transportam de uma fase sólida para uma fase líquida (LEAF, 2017).

Para Oliveira (2012), os tratamentos químicos, como a lixiviação, geralmente implicam a necessidade de etapas preliminares de natureza física, como a diminuição do seu tamanho (moagem) e separação granulométrica de maior exigência, no intuito de liberar os materiais metálicos para que esses fiquem mais facilmente acessíveis ao reagente lixiviante, ou seja, aumentando a área de contato do material com o fluido. Embora, salienta o mesmo autor, esse processo já tenha sido aplicado a PCIs inteiras ou em pedaços maiores, no entanto o processo ocorre em velocidade muito mais lenta devido a limitações difusionais dos agentes químicos, apesar de ocorrer uma agitação espontânea e natural por liberação de gases nas reações entre ácidos e elementos metálicos.

Ping et al. (2009) utilizaram em seu estudo, assim como outros autores, placas de circuito impresso com partículas que apresentavam uma área superficial de aproximadamente $2,5 \text{ mm}^2$ e granulometria de $80 \text{ }\mu\text{m}$ ($0,8 \text{ mm}$), sendo a redução do tamanho das partículas considerada fundamental para o processamento químico, de maneira que o reagente lixiviante possa atingir todas as camadas dos circuitos impressos (OLIVEIRA, 2012).

Aumentar a área superficial de contato no processo de lixiviação é fundamental para aumentar a velocidade de extração dos metais, devido à maior área de contato entre o sólido (PCI) e o reagente lixiviante, como também para diminuir as resistências envolvidas na penetração do lixiviante para o interior das partículas, proporcionando uma maior eficiência no processo hidrometalúrgico (KIRCHNER et al., 1999; OLIVEIRA, 2012). Durante as reações químicas, as partículas sólidas se comportam de modo diferente ao longo do processo (Figura 15), podendo diminuir ou se manterem inalteradas quando apresentarem quantidades elevadas de impurezas ou quando se tratar de um material muito resistente (OLIVEIRA, 2012).

Figura 15 - Exemplos de diferentes comportamentos de partículas sólidas em uma reação química



Fonte: Oliveira (p.199, 2012).

Oliveira (2012) afirma ainda que é necessário encontrar um modelo cinético que represente o que acontece na realidade com as partículas durante uma reação química, para que a cinética dessa reação traduza o processo de lixiviação de acordo com o seu comportamento e a natureza das mesmas. No caso das partículas estudadas nesse trabalho (PCIs), o modelo que as descreve é o modelo de fissuração e redução dos grãos formados ("*Cracking Shrinking Model – CSM*"), o qual considera que a partícula sólida sofre fissuras e reage diminuindo o seu tamanho.

2.7 REEE: REVISÃO DE ESTUDOS ANTERIORES

O estudo publicado por Veit (2001) é referência na área de reciclagem de REEE no Brasil, pois foi o primeiro trabalho publicado no país que empregou o processamento mecânico em placas de circuito impresso a fim de reciclá-las, de acordo com os trabalhos obtidos em pesquisa bibliográfica realizada. A técnica, no entanto, foi aplicada a PCIs provenientes de computadores pessoais. As placas foram avaliadas de três maneiras: completas (substrato e os componentes),

somente os componentes e somente o substrato. A cominuição foi realizada em duas etapas, onde na primeira etapa o moinho de facas que possuía maiores dimensões foi utilizado para uma moagem preliminar. A segunda etapa da moagem teve por objetivo que as partículas ficassem com granulometria inferior a 1 mm, usando, para isto, um moinho de facas que deixasse o material com dimensões menores. Outra etapa do processamento físico utilizada neste trabalho foi a classificação granulométrica. Aproximadamente 400 g de resíduo de PCIs foram submetidos à agitação por 1 hora, classificando os materiais em três frações granulométricas diferentes: $F_1 < 0,25$ mm, $0,25$ mm $< F_2 < 0,5$ mm e $0,5$ mm $< F_3 < 1,0$ mm. Posteriormente o material foi separado pela técnica de líquidos densos, na qual foi utilizada solução de tetrabromoetano diluída com acetona, adquirindo densidade final de 2500 kg/m³. Com relação ao observado nas etapas do processo físico, o autor identificou que a maior parte do material moído se concentrou em granulometria superior a 1 mm. Na moagem secundária, toda essa fração foi diminuída, atingindo uma granulometria abaixo de 1 mm. Segundo Veit (2001), trabalhar com granulometria abaixo de 1 mm garante a eficiência do processo. A maior parte do material (54,37 %), na segunda moagem, concentrou-se na fração mais grosseira ($0,5$ mm $< F_3 < 1,0$ mm), evidenciando a tendência do resíduo de PCIs de se concentrar em faixas de maior granulometria. Isto acontece, segundo o autor, porque as PCIs são materiais difíceis de moer devido à presença de metais, isto é, é mais fácil moer materiais frágeis do que dúcteis. Os metais acabam se concentrando na fração de maior granulometria porque a maioria dos metais é menos frágil que alguns polímeros e cerâmicos. Através do ensaio de lixiviação foi identificada concentração de 35,4 % de metais na F_3 , 30,5 % na F_2 e 16,7 % na F_1 . Após digestão em água régia as frações foram caracterizadas quanto a sua composição química. A Tabela 5 apresenta a análise química das frações e traz ainda um comparativo entre a média de cada elemento encontrada na PCI e a quantidade desse metal originalmente nos minérios.

Tabela 5 - Concentração de elementos em três frações distintas de resíduo de PCI, sua concentração média e a encontrada em cada minério

Elemento (%)	Na placa de circuito impresso				No minério
	F ₁	F ₂	F ₃	Média	
Cobre	6,28	23,53	24,34	12,5	0,5-3,0
Zinco	0,05	0,08	0,23	0,08	1,7-6,4
Ferro	0,13	0,13	0,18	30-60	0,6
Alumínio	3,01	1,55	1,56	-	-
Níquel	0,05	0,2	0,2	0,7-2,0	0,7
Chumbo	0,35	0,95	1,35	0,3-7,5	2,7
Estanho	2,51	2,5	2,51	0,2-0,85	4

Fonte: Veit (2001).

Foi observado, ainda, que a quantidade de cobre aumenta conforme aumenta a granulometria do material: 6,28 % na F₁, 23,53 % na F₂ e 24,34 % na F₃. Com relação aos resultados da moagem e separação granulométrica, ou seja, as etapas do processamento mecânico utilizado no trabalho de Veit (2001), o autor relatou também que foi possível obter um concentrado de metais a partir desses estágios, ressaltando que somente na moagem seguida da classificação granulométrica foi possível atingir uma concentração de 35 % de metais nas frações mais grosseiras, com no mínimo 25 % de cobre, 2,5 % de estanho e 1,35 % de chumbo. Sabendo que as fontes naturais desses metais atingem cerca de 1 % de metal, o autor concluiu que as PCIs são uma fonte de matéria prima interessantíssima.

Quatro anos depois, Veit (2005) publicou outro estudo no qual foi testado a aplicabilidade do processo mecânico, utilizando, além da cominuição e classificação granulométrica, a separação magnética e eletrostática. As etapas de cominuição e classificação granulométrica foram executadas da mesma forma que no estudo anterior, passando as frações, na sequência, em um separador magnético de correias cruzadas a seco (6000 a 6500 Gauss). A fração não magnética foi sujeita à separação eletrostática, processo que separou materiais condutores de não condutores. Na separação magnética a quantidade de material retida foi dita como baixa, pois as quantidades de metais fortemente magnéticos (ferro e níquel) são baixas. O ferro foi o principal elemento obtido na fração magnética (~42 %), seguido de níquel (~15 %) e cobre (~18 %). Já a separação eletrostática foi considerada eficiente, pois através dela foi obtida uma fração com cerca de 50 % de cobre, 25 % de estanho e 7 % de chumbo.

Kasper (2011) utilizou o processamento mecânico/físico para recuperar metais presentes em PCIs de celulares convencionais. Foram cominuídos 5,5 kg de PCIs com dispositivos em um moinho de martelos, a fim de se obter uma parte mais grosseira (granulometria < 10 mm) e posteriormente foi atingida uma fração mais fina (partículas < 1 mm) em um moinho de facas. Através da classificação granulométrica, realizada na sequência, foram obtidas duas frações com granulometrias distintas: F_1 – partículas menores que 0,5 mm e F_2 – partículas entre 0,5 mm e 1,0 mm. Ambas as frações foram submetidas à separação magnética em um separador de correias cruzadas composto por um polo de alta intensidade magnética e um polo de baixa intensidade magnética, variando entre 6000 e 6500 Gauss o campo magnético. Para um melhor resultado, as frações foram passadas duas vezes pelo equipamento. Ao término da separação foram obtidas três frações distintas para cada granulometria (F_1 e F_2): Fortemente magnética, fracamente magnética e não magnética. A fração não magnética foi submetida à separação eletrostática, onde foram utilizadas fonte de alta tensão (45 – 46 kV), rotação do rotor em 85 rpm e a distância da amostra e ângulos foram testadas em três regulagens diferentes. Através dessa metodologia foi obtida uma fração contendo polímeros e cerâmicos e uma fração concentrada principalmente de ferro na fração magnética e cobre na fração condutora. Segundo o autor essa técnica foi ineficiente para concentração de alguns metais como ouro e prata, mas por meio dela se obteve frações concentradas de metais com mais de 60% de cobre.

No mesmo ano, Moraes (2011) publicou uma pesquisa sobre a recuperação de metais a partir do processamento mecânico e hidrometalúrgico. As PCIs de aparelhos celulares, assim como no trabalho anterior, foram triadas, desmanteladas, moídas em um moinho de martelos e classificadas granulometricamente. A separação magnética foi realizada em um separador de tambor via seca, com potência de 0,75 cv. A regulagem foi acertada em 27,6 rpm para o rolo magnético e 25 % de vibração. Posteriormente, o resíduo não magnético foi submetido à separação eletrostática de rolo. Desta forma, foram obtidos, em seis frações granulométricas diferentes, material magnético, material não magnético condutor, material não magnético misto e material não magnético não condutor. Realizadas essas etapas, foi feita a caracterização do material. Foi identificado que o material não magnético era o que apresentava as maiores concentrações de cobre. Essa fração foi então submetida ao processo hidrometalúrgico visando à maior

concentração de cobre. As PCIs de celulares foram caracterizadas quanto a sua composição e se identificou que essas apresentam 12,7 % de materiais poliméricos, 24 % de materiais cerâmicos e 63,3 % de metais. O autor não identificou a concentração de materiais em nenhuma faixa granulométrica específica, afirmando, portanto, a importância da moagem e da separação magnética no processamento mecânico.

Em 2014, Gouveia (2014) publicou um estudo onde utilizou algumas etapas do processamento mecânico para posterior recuperação de metais via hidrometalurgia. O autor trabalhou com lotes de placas de circuito impresso de celulares, computadores, placas de memória RAM e chips, os quais foram caracterizados separadamente. As PCIs dos aparelhos celulares foram cominuídas inteiras, ou seja, com os componentes aderidos à placa. O material moído passou pela classificação granulométrica em um agitador de peneiras por 10 minutos, escala 10 de agitação e amplitude 8, de forma que fosse selecionado em três frações granulométricas: partículas entre 2 e 1,70 mm, entre 1,7 e 0,850 mm e partículas menores que 0,850 mm. O material foi caracterizado por lupa estereoscópica, a fim de ser caracterizado morfológicamente, e a determinação do teor de metais se deu pela técnica de espectrofotometria de absorção atômica de chama (EAA). Foram utilizados dois métodos de extração de metais distintos: (1) calcinação e digestão em água régia, baseados na norma ISO 11466:1995, (2) digestão ácida conforme norma 3050B da EPA. Através da metodologia utilizada e dos resultados obtidos, no que tange o processamento mecânico o autor evidenciou a vantagem de se efetuar o processamento inicial das placas, desmontando e removendo alguns componentes, no caso dos computadores, por exemplo. A concentração de metais como ouro e cobre obtida após essas etapas, aliadas ao processamento hidrometalúrgico, foi superior nas PCIs de celulares (1066 mg/kg) quando comparadas as PCIs de computadores (206 mg/kg), ficando atrás somente dos chips (2105 mg/kg). Relativo ao cobre, suas concentrações não variaram consideravelmente em função de faixa granulométrica. Dentre as conclusões obtidas, o estudo demonstrou que, em escala laboratorial, os processos utilizados permitiram a recuperação dos metais, mas que são necessários estudos para avaliar a viabilidade econômica da aplicação dos processos em escala industrial.

Silvas (2014) avaliou a aplicabilidade de uma rota combinada de processamento físico seguida por processo hidrometalúrgico e biohidrometalúrgico

visando à reciclagem de placas de circuito impresso de impressoras. As PCIs foram avaliadas de três maneiras diferentes: placas completas, ou seja, substrato e dispositivos, placas incompletas (faltando um ou mais dispositivos) e placas nuas, as quais apresentavam o substrato com as trilhas de cobre, pontos com resquícios de solda e alguns dispositivos. As placas foram desmontadas manualmente. No que se refere ao processamento físico, foram utilizadas as etapas de cominuição (moinho de facas com grelha de 9 mm seguido de moinho de martelo com grelha de 1 mm), classificação granulométrica e separação magnética através um separador magnético de tambor via seca. O material moído foi separado em seis frações granulométricas diferentes: maior que 1 mm, entre 1 e 0,5 mm, entre 0,5 e 0,21 mm, entre 0,210 e 0,125 mm, entre 0,125 e 0,053 mm e menor que 0,053 mm. Para fins de caracterização foi utilizada lupa binocular, microscópio eletrônico de varredura acoplado com detector de energia dispersiva de raios X (MEV/EDS), perda ao fogo, digestão ácida em água régia e análises químicas por Espectrometria de Absorção Atômica (AAS) e Espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), através da qual se quantificou os metais Cu, Sn, Fe, Al, Ni, Pb, Ba, Ca e Ag. Ao observar as frações granulométricas na lupa, o autor verificou que quanto menor a granulometria, maior a quantidade de fibra de vidro presente na amostra, sendo que essas ainda estavam contaminadas por ferro puro, tornando o material magnético. A composição da PCI estudada foi de 44 % metais (sendo 32,5 % Cu, 0,3 % Ag, 3,7 % Al, 0,004 % Au, 0,3 % Ni, 0,9 % Sn, 0,6 % Zn e 4,1 % de outros metais), 28,5 % polímeros e 27,5 % cerâmicos. O autor obteve uma concentração de 75,6 % de material não magnético e 25,4% de material magnético. Após as etapas de processamento mecânico as amostras foram submetidas ao processamento hidrometalúrgico através da lixiviação em meio sulfúrico, sendo caracterizadas pela técnica de ICP na sequência a fim de determinar os metais concentrados após o processo. Ocorreu 90 % de extração de Al, 40 % de Zn, 8,6 % de Sn. Não houve extração de Cu e Ni. Também foram realizados ensaios envolvendo microorganismos, para os quais se obteve a extração de 100% no quarto dia. No entanto, o autor relata que o menor tempo de extração através do método hidrometalúrgico é uma vantagem quando comparado ao biohidrometalúrgico. As placas possuíam quatro camadas de cobre intercaladas, não tinham chumbo em sua composição, ou seja, eram *lead free* e os dispositivos soldados representaram 53,3 % da massa da placa.

Holgersson et al. (2018) publicaram um artigo sobre os metais presentes em REEE considerados de tamanho pequeno. Foram desmontados e estudados 10 roteadores de internet, 30 aparelhos celulares convencionais e 30 *smartphones*. Os aparelhos coletados eram das marcas Apple, Samsung, Blackberry, HTC, LG, Motorola, Nokia, Sony e ZTE. Após a desmontagem, os aparelhos tiveram as peças separadas em PCI, carcaça plástica, carcaça metálica, tela e outros materiais. As placas de circuito impresso foram separadas e moídas até que atingissem granulometria entre 2 e 3 mm. As amostras foram lixiviadas por uma solução de água régia e tiveram os metais seguintes metais quantificados por ICP-MS: Ag, Al, As, Au, Be, Bi, Cd, Cr, Cu, Hg, Fe, Ni, Pb, Pd, Pt, Rh, Sb, Sn e Zn. Os resultados identificaram que as PCIs representam 21 % da massa dos aparelhos analisados, para ambos os tipos, e 43 % da massa dos roteadores. Quanto à composição encontrada, os polímeros representaram 34 %, 30 % e 25 % da massa dos roteadores, aparelhos convencionais e *smartphones*, respectivamente. Cobre foi detectado em concentração de 22 %, 34 % e 40 %, nesta ordem. De acordo com os autores, os resultados demonstraram que a presença de metais pesados, como chumbo, é menor nos aparelhos *smartphones* (260 ppm) do que nos aparelhos mais antigos (3747 ppm). Com relação aos metais preciosos, prata e ouro foram encontradas em concentrações muito próximas, 2640 ppm em aparelhos convencionais e 2773 ppm nos mais modernos.

Ainda no mesmo ano, Hamerski (2018) empregou o processamento mecânico com objetivo de concentrar cobre oriundo de placas de circuito impresso de computadores descartados, fazendo ainda uma comparação com resíduo sintético. As PCIs foram moídas e classificadas em duas partes: fração A (granulometria <0,5 mm) e fração B (granulometria entre 0,5 e 1 mm). O material passou por separação magnética e eletrostática, sendo testadas diferentes variáveis nos equipamentos. Houve uma perda de 7 % das PCIs no processo de moagem. Para a amostra de menor granulometria foi obtido 76 % de polímeros/cerâmicos e 24 % de metais. A amostra B teve quantidade superior de metais: 36,3 % contra 63,7 % de polímeros e cerâmicos. A separação magnética possibilitou uma concentração de material com características magnéticas entre 52 e 70,6 % (amostra A) e entre 5,48 a 7,72 % (amostra B). Já a parcela obtida de material não magnético variou entre 23,5 a 40,4 % para a amostra A e 88 a 90,2 % para as amostras de maior granulometria. Com relação à separação eletrostática, o autor observou uma variação, para a amostra A,

de 27,3 a 75,3 % de material condutor, onde está contida a maior parte de cobre. Para a amostra B o percentual foi de 41,8 a 82,4 %. A caracterização química elementar, através da técnica de ICP-OES, identificou para o resíduo de PCIs concentrações mínimas de cobre (0,12-0,17 %) na fração magnética, indicando que o processo foi eficiente, pois nessa etapa o objetivo era concentrar ferro, o qual se constatou presente em teores que variaram de 11,9 a 14,1 %. Nas frações não magnéticas foi identificado cobre em quantidades mais elevadas (5,3-13,2 %). Ferro também ficou retido no material não magnético, devido ao arraste com outros materiais não magnéticos, variando entre 5,4 a 8,2 %. Para a maior granulometria estudada ($0,5 < B < 1,0$ mm) o autor obteve um teor de cerca de 20 % de cobre. Também foram testadas diferentes variáveis nos equipamentos utilizados. No separador magnético a melhor vibração de calha foi de 50 Hz e velocidade do rolo de 175 rpm. Já na separação eletrostática a condição mais eficiente foi a que utilizou tensão de 35 kV e rotação de 100 rpm, possibilitando concentrar até 51,1 % de cobre na fração A.

3 METODOLOGIA

Este tópico apresenta os materiais e equipamentos utilizados, bem como os métodos que foram empregados no desenvolvimento da pesquisa.

3.1 MATERIAIS

Neste trabalho foram utilizados 10 kg de aparelhos *smartphones*, massa correspondente a 87 unidades de celulares. Os equipamentos eletrônicos foram obtidos através de campanhas realizadas na UNISINOS pelo Sistema de Gestão Ambiental (SGA) e também através de doações pessoais nos anos de 2017 e 2018. Além das amostras, neste trabalho foram utilizados, ainda, ferramentas para desmontar os celulares (chaves *Philips* e sextavados de diferentes tamanhos), além dos equipamentos descritos a seguir.

3.1.1 Equipamentos

Tanto para a etapa do processamento mecânico quanto para a dos ensaios de caracterização foram utilizados diferentes equipamentos, cujas especificações seguem abaixo.

- a) Balança semi-analítica BEL Engineering: utilizada na pesagem dos celulares e suas partes (PCI, tela, bateria, etc.).
- b) Moinho de facas WEG W22 plus: utilizado na cominuição das placas de circuito impresso.
- c) Conjunto de peneiras série Tyler com caixilho INOX 8" x 2" e agitador Bertel: utilizado na distribuição granulométrica das placas de circuito impresso e separação das frações estudadas.
Peneiras com as seguintes aberturas: 4,75 mm; 3,35 mm; 2 mm; 1,70 mm; 1,0 mm; 0,85 mm; 0,60 mm; 0,50 mm; 0,425 mm; 0,30 mm; 0,21 mm; 0,15 mm; 0,106 mm; 0,075 mm; 0,053 mm.
- d) Separador magnético de rolos INBRAS-ERIEZ, modelo RE-05/04-1: utilizado para separar os materiais magnéticos dos não magnéticos.

Corrente 0,25 A
Campo magnético de 1300 Gauss
80 rpm
45 Hz
Taxa de alimentação de 67 g/min

- e) Separador eletrostático de efeito corona INBRAS-ERIEZ: utilizado para separar os materiais condutores dos não condutores.

Modelo ESP-14/01S
30 Kv de tensão
Rotação do rolo 50 rpm

- f) Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X (FRX) por Energia Dispersiva da PANanalytical.

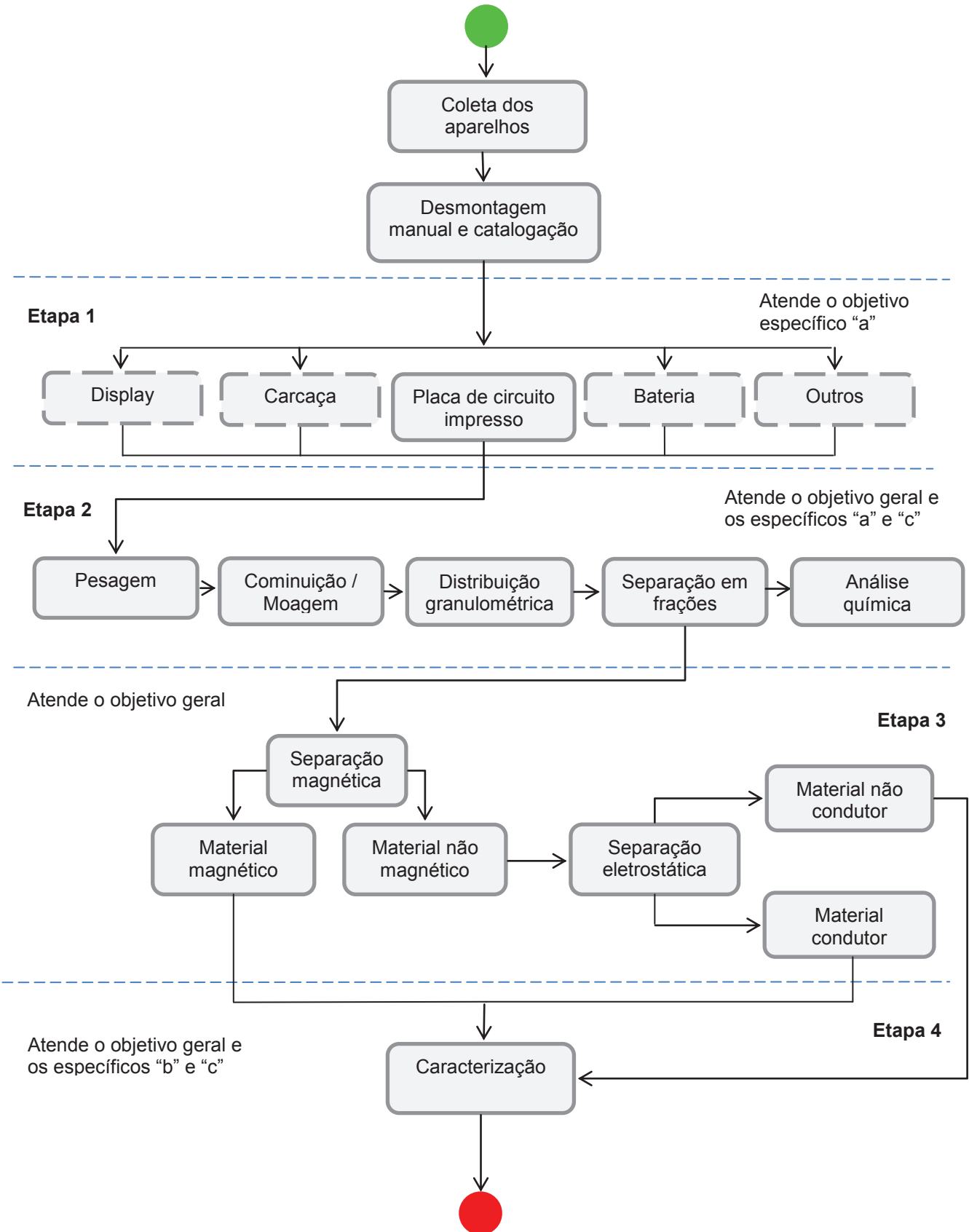
Modelo Epsilon 1
Ânodo de prata
Gerador de 50 Kv.

- g) Picnômetro a gás hélio Micromeritics, modelo AccuPyc II 1340: utilizado para verificar a massa específica das PCIs

3.2 MÉTODOS

A metodologia do trabalho teve início com a coleta das amostras. O fluxograma simplificado (Figura 16) mostra as etapas do processo.

Figura 16 - Fluxograma geral da metodologia



Fonte: Elaborado pela Autora (2019).

3.2.1 Desmontagem, separação e pesagem

Os celulares foram desmontados, pesados e catalogados conforme ordem de desmontagem, registrando a marca/fabricante, a cor, o modelo e a massa total do aparelho.

A desmontagem dos *smartphones* foi realizada manualmente no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) da Unisinos com o auxílio de diversos tipos de ferramentas. Os aparelhos foram separados em placa de circuito impresso, *display*, bateria, carcaça e outros (peças que não se enquadraram em nenhuma das categorias anteriores). Após a desmontagem, cada parte dos aparelhos foi também pesada, catalogada e tiveram seus respectivos percentuais em massa calculados. Todas as informações foram registradas e a planilha completa está contida no Apêndice A do trabalho. A Tabela 6 apresenta o modelo utilizado.

Tabela 6 - Planilha modelo de catalogação das amostras

Numeração	Fabricante	Cor	Modelo	Massa total do aparelho	PCI	Tela	Carcaça	Bateria	Outros

Fonte: Elaborada pela Autora (2019).

A pesagem foi realizada em balança semi-analítica da BEL Engineering, instalada no LCVMat. As próximas etapas do trabalho foram realizadas somente com as PCIs, sendo o restante das partes armazenadas para estudos futuros.

3.2.2 Cominuição e classificação granulométrica

Após a pesagem e separação, as placas de circuito impresso dos aparelhos foram cominuídas inteiras em um moinho de facas, totalizando aproximadamente 1,5 kg de material (Figuras 17 e 18).

Figura 17 e Figura 18 – Moagem de placas de circuito impresso em moinho de facas



Fonte: A Autora (2019).

Em seguida, o material foi submetido a um peneiramento para classificação do tamanho das partículas. O ensaio foi realizado de acordo com a norma CEMP 081 da Associação Brasileira de Fundição (ABIFA) utilizando peneiras com aberturas padronizadas (mencionadas em 3.1.1 c), sobrepostas em ordem decrescente de abertura de malha. O conjunto foi colocado em agitação em um peneirador mecânico por 30 minutos (Figura 19).

Figura 19 – Agitador mecânico marca Bertel com conjunto de peneiras



Fonte: A Autora (2019).

Posteriormente, o material foi separado em diferentes frações. As PCIs moídas passaram por um segundo peneiramento em agitação por 15 minutos, de modo que fossem obtidas as seguintes frações:

- F_1 : fração com granulometria menor que 0,5 mm ($F_1 < 0,5$ mm)
- F_2 : fração com granulometria entre 0,5 e 1 mm ($0,5 \text{ mm} < F_2 < 1$ mm)
- F_3 : fração com granulometria entre 1 e 2 mm ($1 \text{ mm} < F_3 < 2$ mm)
- F_4 : fração com granulometria maior que 2 mm ($F_4 > 2$ mm)

Após as etapas de moagem, classificação granulométrica e separação das frações, o material foi submetido à separação magnética, e, parte dele, à separação eletrostática.

3.2.3 Separação magnética

Conforme mencionado na revisão bibliográfica, através da separação magnética é possível obter, de cada fração de resíduo de PCIs, uma parcela de material magnético, com ferro e níquel, sobretudo, e outra parcela de material não magnético, contendo outros metais como cobre, estanho, chumbo, alumínio, zinco, bem como polímeros e cerâmicos.

Nesta etapa foi usado um separador magnético de rolos de alta intensidade (Figura 20) instalado no Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais (LACOR), do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O equipamento foi operado usando um campo magnético de 1300 Gauss, conforme referência de estudo de Hamerski (2018), com uma rotação de rolos de 80 rpm. A rotação foi definida de modo que não houvesse sobreposição de partículas. A alimentação foi realizada de forma manual e calculada, posteriormente, em 67 g/min.

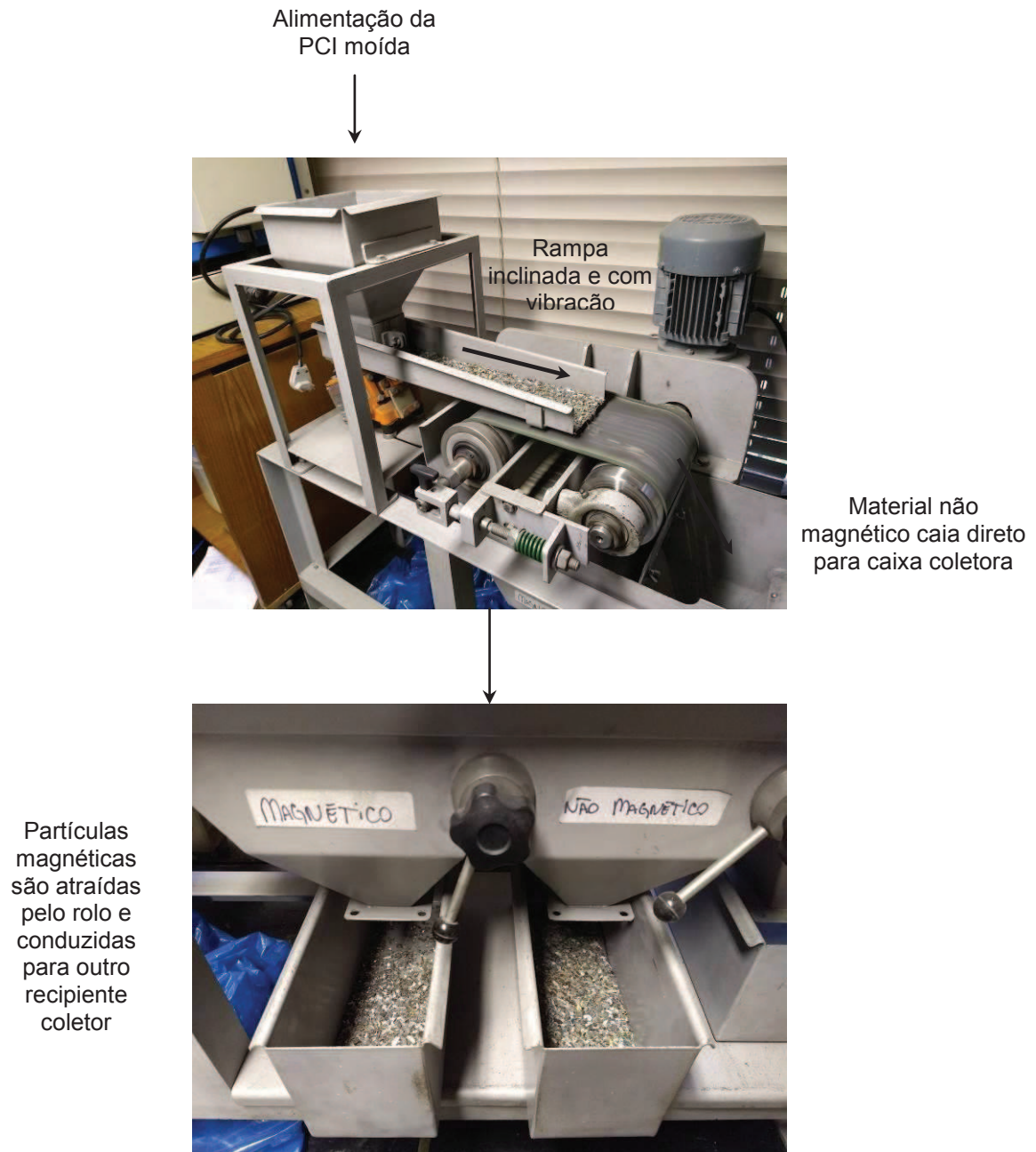
Figura 20 – Separador magnético de rolos a seco INBRAS



Fonte: A Autora (2019).

Conforme o equipamento foi sendo alimentado com as placas moídas através do silo de alimentação, o material foi descendo em direção aos rolos magnéticos, devido a uma pequena vibração e inclinação na calha de alimentação. O material não magnético caía direto do rolo para uma caixa coletora, enquanto o material magnético, atraído pelo ímã, era conduzido para outro recipiente de coleta (Figura 21).

Figura 21 – Esquema da separação magnética em PCIs de *smartphones*



Fonte: A Autora (2019).

As parcelas de material não magnético foram submetidas, na sequência, à separação eletrostática.

3.2.4 Separação eletrostática

No separador eletrostático, os materiais a serem separados são alimentados em uma velocidade conhecida, onde as partículas passam através do campo elétrico

gerado pelo eletrodo. As partículas que entram no campo elétrico são submetidas à indução eletrostática e a um bombardeio iônico. As partículas condutoras são rapidamente descarregadas, enquanto o material não condutor é atraído para o rolo giratório, sendo retido no compartimento de material não condutor (HAMERSKI, 2018).

Neste trabalho foi utilizado um separador eletrostático da marca INBRAS-ERIEZ (Figura 22), modelo ESP-14/01S no Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem (LACOR) do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRGS.

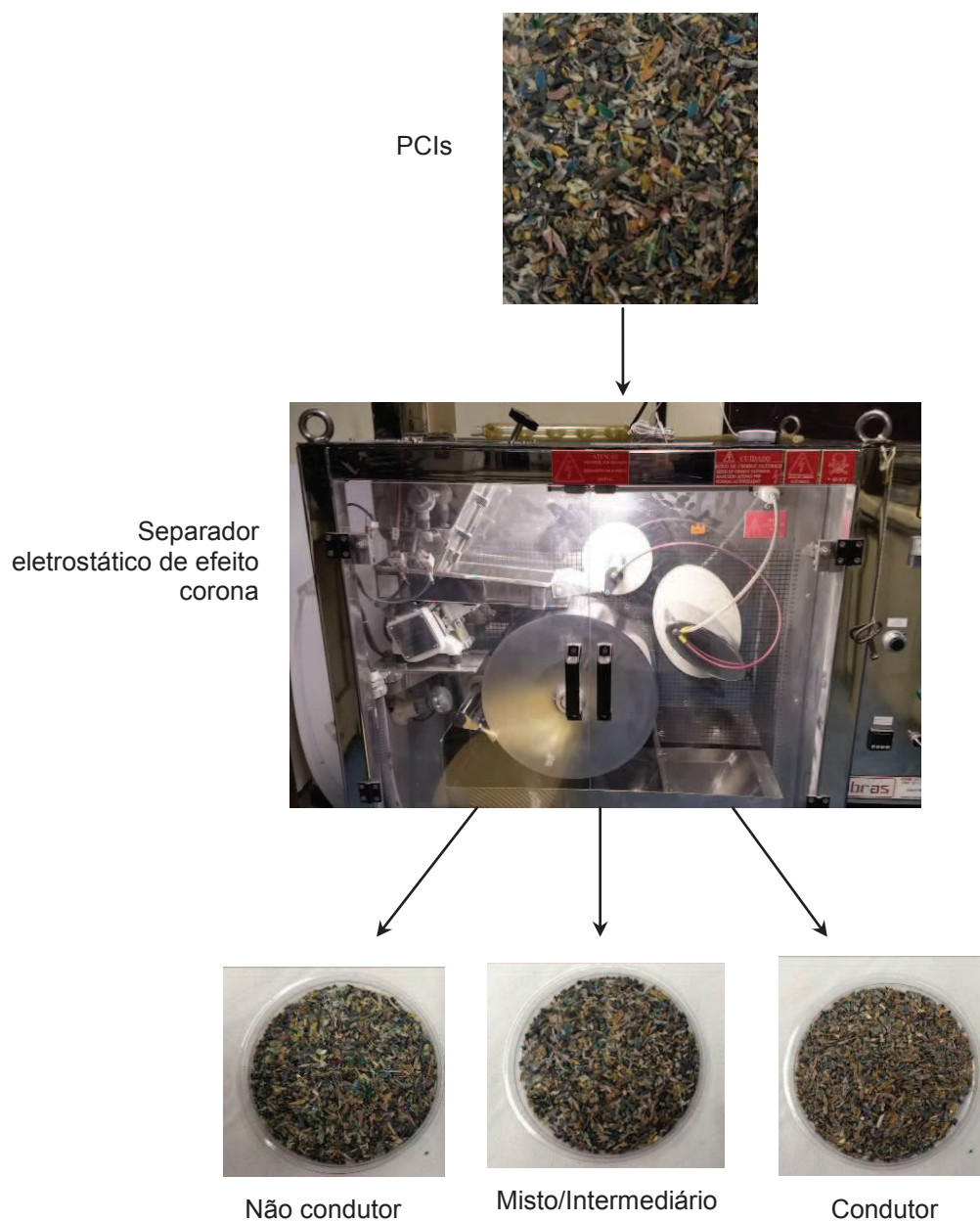
Figura 22 – Separador eletrostático INBRAS



Fonte: A Autora (2019).

O equipamento foi regulado em 30 kV de tensão e rotação do rolo de 50 rpm. Com o intuito de diminuir a umidade do ar, que era de 44% no momento de operação, foi acoplado um desumidificador no separador. A partir desse processo foram obtidas três saídas diferentes de materiais: uma condutora, uma intermediária ou mista (material conduz momentaneamente) e uma não condutora, conforme esquema da Figura 23.

Figura 23 – Esquema de funcionamento do separador eletrostático



Fonte: A Autora (2019).

Após as etapas de separação magnética e eletrostática, 16 amostras foram obtidas. Para fins de avaliação dos processos, foram selecionadas 12 amostras, sendo excluídas as de condução intermediária por representarem uma quantidade muito pequena (5 % em massa) de material quando comparado aos materiais condutores e não condutores.

As parcelas magnéticas, condutoras e não condutoras (12 amostras) das frações de PCIs estudadas foram caracterizadas a fim de verificar os materiais predominantes em cada uma delas.

3.2.5 Picnometria a gás

A densidade de diferentes constituintes de uma amostra é vital para avaliar o uso de métodos de separação e estimar a porcentagem de material existente nas frações (SARVAR et al., 2015).

Essa análise é importante para este trabalho porque pode sugerir o tipo de material predominante em cada fase (metal ou polímero), sabendo-se que metais possuem massa específica mais elevada que os polímeros, sendo utilizado também de forma complementar a análise química.

O ensaio foi realizado nas amostras de saída dos processos de separação magnética e eletrostática, através da técnica de picnometria com picnômetro a gás hélio da Micromeritics AccuPyc II 1340, instalado no LCVMat.

3.2.6 Caracterização química

Os ensaios de caracterização tiveram como objetivo a identificação e quantificação dos constituintes das placas de circuito impresso.

As análises químicas foram realizadas em diferentes momentos do processo. A primeira, após a moagem e separação das placas de circuito em diferentes granulometrias, com o intuito de identificar os metais presentes nas PCIs brutas, ou seja, antes das separações magnética e eletrostática.

A segunda sequência de análises químicas foi realizada após o processo de separação magnética, apontando, assim, os metais que se concentraram na fração magnética e na não magnética, bem como suas quantidades.

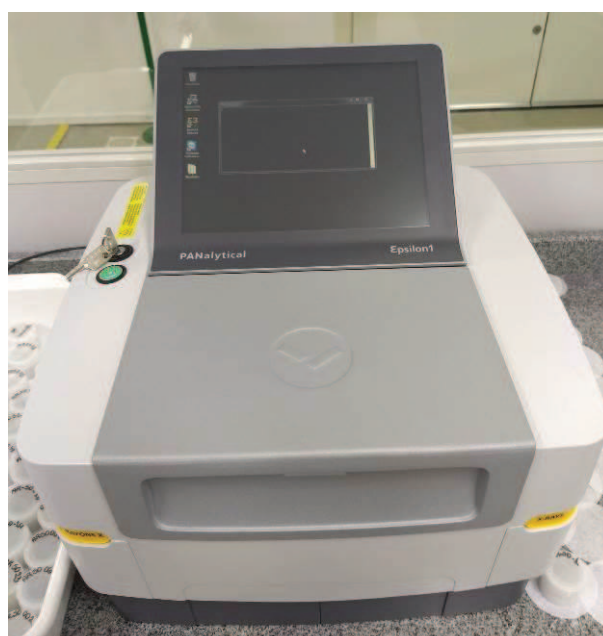
No terceiro e último momento analisou-se quimicamente as amostras após o processo de separação eletrostática, identificando e quantificando os metais oriundos da fração condutora e não condutora, de forma a constatar se houve ou não uma concentração, especialmente de cobre, através do método empregado.

Nesta etapa foi utilizada a técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX) para identificar a composição química elementar das frações de resíduo de PCIs, a fim de

verificar os elementos presentes e estimar suas quantidades, uma vez que não foi utilizado padrão específico para determinação dos elementos nos REEE estudados.

As análises foram realizadas em um espectrômetro Epsilon 1 da PANalytical (Figura 24) do Instituto Tecnológico (ITT) Fóssil na Unisinos, modelo MiniPal 4, Versão 7.0, com a aplicação Omniam de análise semi-quantitativa. A técnica utilizada para a leitura das amostras consistiu na técnica do pó solto e a área de análise de 32 mm, correspondente ao diâmetro do recipiente.

Figura 24 – Analisador de Fluorescência de Raios-X



Fonte: A Autora (2019).

Essa técnica permite analisar de forma semi-quantitativa elementos do Sódio ao Amerício, não identificando elementos leves como Carbono, Nitrogênio, dentre outros. Ou seja, os polímeros presentes nas PCIs dos REEE estudados não são quantificados pelo equipamento. A Figura 25 traz os elementos possíveis e não possíveis de se analisar através da técnica empregada.

Figura 25 – Elementos quantificados e não quantificados pelo Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X

Possível de analisar com Epsilon 1
 Não possível de analisar com Epsilon 1

1 H 1.008																	2 He 4.003															
3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.81	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180															
11 Na 22.990	12 Mg 24.31											13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.974	16 S 32.065	17 Cl 35.452	18 Ar 39.948															
19 K 39.098	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.61	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80															
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.1	45 Rh 102.95	46 Pd 106.4	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29															
55 Cs 132.905	56 Ba 137.32	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.85	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.28	82 Pb 207.21	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)																
87 Fr (223)	88 Ra 226.02																															
																		57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.97	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97
																		89 Ac (227)	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np 237.05	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)

Fonte: PANalytical (2019).

A escolha dessa técnica para caracterização química se deu devido à disponibilidade e aos custos de análise. Por esse motivo também o ensaio não foi realizado em duplicata ou triplicata. Para estudos futuros, sugere-se a utilização de técnicas complementares como espectroscopia de absorção atômica (AAS) e também a aquisição de padrão de FRX para quantificação de metais.

Ao longo da discussão dos resultados foram apresentadas as quantificações de diferentes elementos em cada etapa, de acordo com a importância de cada metal para cada fase do processo.

Nas amostras brutas e na avaliação por fração granulométrica estudada, a discussão dos resultados se atentou aos elementos Al, Si, Cr, Fe, Ni, Cu, Sn, Pb e Zn, tendo sido apresentada na sequência todos os elementos quantificados pela técnica de FRX.

Após a separação magnética e eletrostática foram discutidos os resultados com base nos elementos Fe e Ni por serem os principais elementos magnéticos e Cu (elemento mais abundante). Os resultados de cada amostra com a concentração de todos os elementos identificados nas PCI estudadas foram também apresentados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho estão descritos e discutidos nos itens na sequência.

4.1 COMPONENTES DOS SMARTPHONES

Na primeira etapa do trabalho foram desmontados e identificadas as partes de 87 aparelhos *smartphones* (Figura 26) cujos anos de lançamento ficam na faixa de 2009 a 2015. Do total de aparelhos, 19 não continham bateria. Os celulares pertenciam a 11 fabricantes diferentes: Apple, Asus, Booster, LG, Motorola, Nokia, Positivo, Samsung, Sony, Wei e ZTC.

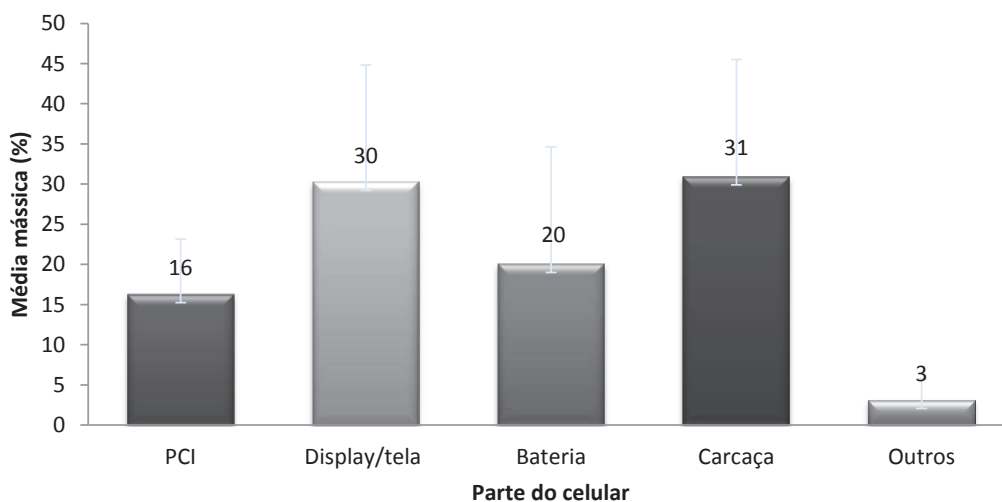
Figura 26– Amostras de aparelhos estudados



Fonte: A Autora (2019).

A massa dos aparelhos totalizaram 10 kg. A partir da caracterização inicial foi possível identificar que a carcaça é a parte de maior massa (31 %), seguido de *display* (30 %), bateria (20 %), PCI (16 %) e outros (3 %). A Figura 27 apresenta a composição média dos *smartphones*.

Figura 27 – Composição média de aparelhos *smartphones*



Fonte: A Autora (2019).

A massa mais elevada para a carcaça ocorre pelo fato de que em muitos aparelhos celulares esta parte possui uma carcaça externa, geralmente fabricada em policarbonato (PC) ou acrilonitrila butadieno estireno (ABS), ou ainda uma blenda de ambos, além de uma carcaça interna mais pesada, fabricada com material metálico ou compósito, como pode ser visto na Figura 28. A literatura relata que um celular tem, em média, de 40 a 45 % em massa de polímeros (UNEP, 2009; BOLLINGER, 2010; GSMA, 2015). Este percentual se refere à soma de polímeros da carcaça e da PCI. Já o valor encontrado por Holgersson et al. (2018) ao quantificar toda a carcaça (parte externa plástica e interna) de *smartphones* foi de 33 %, muito próximo ao encontrado nesse trabalho (31 %).

Figura 28 – Partes de carcaça externa (em vermelho) com uma peça de carcaça interna (cor amarela)



Fonte: A Autora (2019).

Os *displays* dos aparelhos apresentaram uma massa também elevada, inferior somente à carcaça, correspondendo a 30 % da massa total dos celulares. Esse resultado já era esperado, uma vez que os *displays* dos *smartphones* são do tipo *touch* e possuem dimensões elevadas, além do que com o avanço da tecnologia tem sido observado tamanhos superiores de telas aos celulares da geração anterior. Holgersson et al. (2018) ao compararem a composição de *smartphones* e *feature phones* verificaram que 26 % da massa total dos aparelhos fabricados mais recentemente advém das telas, contra somente 8 % nos aparelhos convencionais. O mesmo comportamento foi observado por Dorneles et al. (2016) ao caracterizar os aparelhos das duas gerações, em que os *displays* de *smartphones* equivalem a 18 % em massa do celular, contra também 8 % nos aparelhos convencionais.

As placas de circuito impresso correspondem a 16 % de um *smartphone* e apresentaram uma média de 18 g de massa, mesmo valor encontrado por Moraes (2011) ao desmantelar celulares convencionais, e muito próximo ao encontrado por Silveira (2016) ao caracterizar *smartphones* - 19,9 g. Foi observado que as PCIs variam de tamanho conforme fabricante e modelo, não havendo um padrão até mesmo entre aparelhos de um mesmo fabricante, como pode ser observado nos aparelhos dispostos em linha do tempo da fabricante Motorola, que apresenta modelos com diferentes anos de fabricação e as respectivas massas das PCIs (Figura 29). A falta de padrão foi observada também para outros fabricantes como a Nokia, LG e Samsung.

Figura 29 – Comparação de tamanhos e massas de placas de circuito impresso ao longo dos anos de fabricação da fabricante Motorola



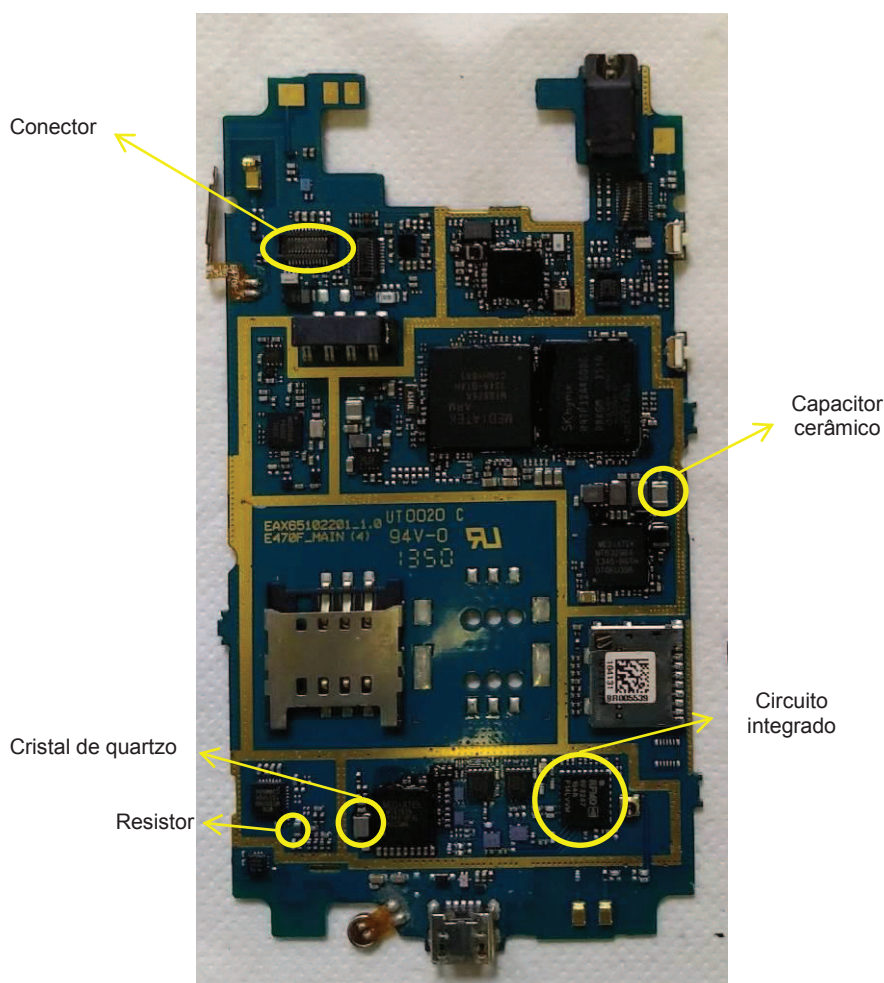
Fonte: A Autora (2019)

Embora os aparelhos não apresentem um padrão quanto ao tamanho do circuito eletrônico, muitos dos componentes utilizados são comuns às PCIs, como por exemplo, a lente da câmera, capacitores, resistores, dentre outros, podendo dessa forma ser reutilizados tanto em aparelhos novos quanto usados, promovendo uma maior durabilidade para esses equipamentos e gerando menos resíduos. Alguns princípios do *ecodesign* vêm sendo utilizados pela indústria, como a modularidade, que se refere à produção de objetos intercambiáveis que possam ser trocados em caso de defeito, evitando a troca e descarte de todo o produto (SILVEIRA e MORAES, 2018; MMA, 2017).

No total, as PCIs estudadas corresponderam a 1,50 kg dos 10 kg de celulares. Isso significa que a cada 10 kg de resíduos de *smartphones*, aproximadamente 1,50 kg são de circuitos eletrônicos com metais disponíveis para recuperação e inserção novamente na cadeia produtiva.

Observou-se a predominância de componentes em uma das faces da PCI, em que podem ser vistos conectores, capacitores, circuitos integrados e outros (Figura 30).

Figura 30 – Placa de circuito impresso com componentes



Fonte: A Autora (2019).

A partir da cominuição das PCBs inteiras, ou seja, sem a retirada de nenhum componente soldado ou outras partes, foram obtidos os resultados descritos na sequência.

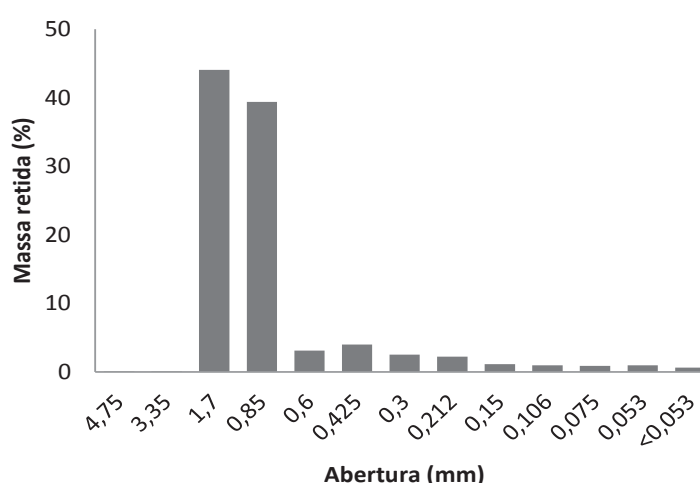
4.2 PROCESSAMENTO FÍSICO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

As placas de circuito impresso submetidas à moagem passaram de 1559 g (inteiras) para 1412 g após a cominuição, tendo uma perda de 9% no processo. As perdas nessa etapa são observadas em outros estudos, segundo relata Moraes (2011) ao processar celulares, ele observou uma diminuição do material de 25 % em massa entre o início e final da moagem. Segundo Tuncuk et al. (2012), perdas entre 10 % e 30 % podem ocorrer por conta da liberação insuficiente dos metais durante o

processo de cominuição. Silvas (2014) relata que durante a moagem pode ocorrer a desagregação de partículas finas e leves como a fibra de vidro, as quais são expelidas. A perda de material também se deve ao moinho não ter sido projetado especificamente para moagem desse resíduo, uma vez que o compartimento de moagem possui dimensões bastante elevadas quando comparado ao tamanho das PCIs. Soma-se a isso o fato do equipamento não possuir um recipiente de coleta acoplado e parte do material ficar retido no interior deste. Apesar disso, foi possível a redução do tamanho das PCIs em partículas de diferentes tamanhos, adequadas para a continuação do trabalho experimental. Algumas melhorias para uma possível redução na perda de material seriam: moagem em um moinho de bancada ou mais compacto, redução da grelha de passagem do material interno no moinho para a área externa e recipiente de coleta acoplado ao equipamento.

Após a cominuição no moinho de facas, a granulometria das placas de circuito impresso foi identificada através da distribuição granulométrica (Figura 31), na qual se verificou uma grande variação nos tamanhos das partículas, ficando, no entanto, as maiores quantidades de material concentradas nas granulometrias entre 3,35 e 1,7 mm (44 %) e entre 1,7 mm e 0,85 mm (39 %). Essa variação ocorreu porque as PCIs são compostas por materiais que apresentam diferentes durezas.

Figura 31 – Caracterização granulométrica das PCIs após moagem



Fonte: A Autora (2019).

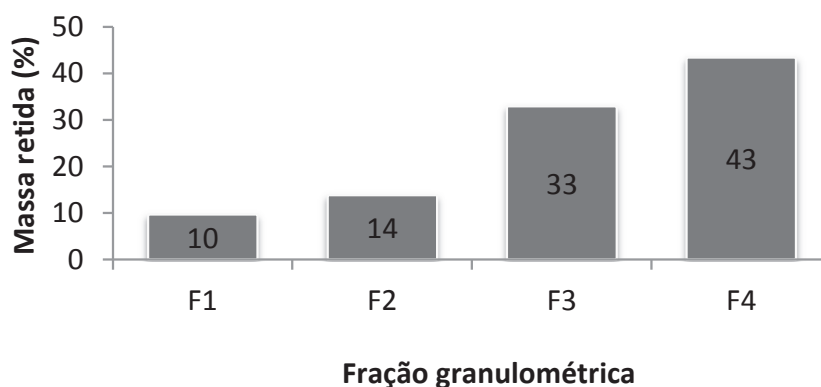
A maior quantidade de PCIs nessas granulometrias foi também identificada por Silveira (2016) ao moer placas de *smartphones*, embora a moagem tenha sido

realizada sem os dispositivos eletrônicos. Isso indica que, nesse aspecto, não existe diferença na moagem com os sem os dispositivos, pois a maior concentração de material fica nas maiores faixas granulométrica para as duas situações. Isso indica a rigidez das PCIs e a dificuldade que a armadura e as trilhas de cobre têm em se deformar.

As granulometrias de 1,7 mm e 0,85 mm – 83 % das PCIs moídas - apresentavam, predominantemente, partes com trilhas de cobre e outros metais aderidos à fibra de vidro. Em granulometrias menores - a partir de 0,6 mm - já foi possível observar visualmente alguns metais livres como o ferro.

Na sequência, a separação do material nas 3 granulometrias estudadas confirmou que as maiores quantidades de PCIs se concentram em frações de maior granulometria, em uma relação diretamente proporcional, ou seja, quanto maior a granulometria, maior a quantidade de PCI retida. A maior parte do material cominuído (43 %) se concentrou em granulometria acima de 2 mm. O restante ficou retido em outros tamanhos com 33 % ($1\text{ mm} < F_3 < 2\text{ mm}$), 14 % ($0,5\text{ mm} < F_2 < 1\text{ mm}$) e 10 % ($F_1 < 0,5\text{ mm}$), conforme pode ser observado na Figura 32.

Figura 32 - PCI retida por fração granulométrica



Fonte: A Autora (2019).

Moraes (2011) também verificou que após moagem as PCIs provenientes de aparelhos celulares têm a tendência de se acumular em maiores granulometrias. O cobre e o ferro, por exemplo, por serem metais dúcteis, são mais difíceis de moer que os polímeros, e por isso requerem um tempo de moagem maior para atingir a

mesma granulometria de plásticos, os quais são liberados mais facilmente e em menor tempo.

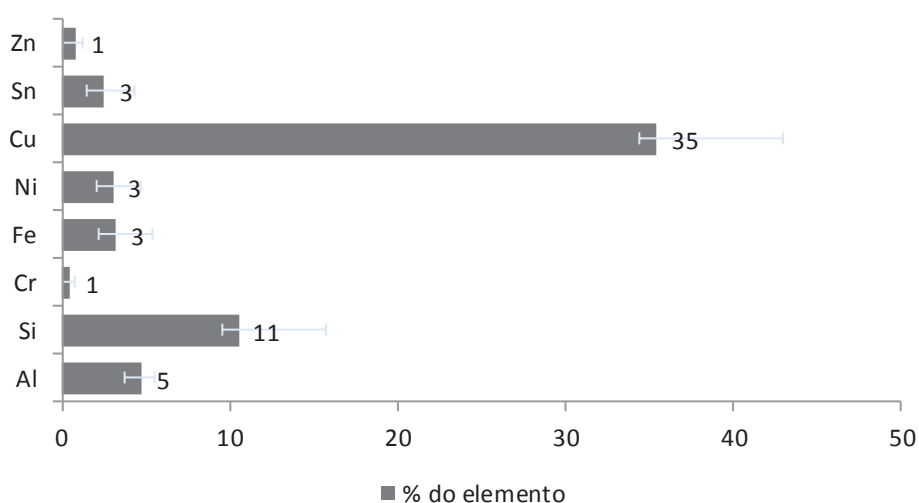
Jesus e Casqueira (2015) afirmam que “as PCIs são materiais de difícil moagem, devido ao seu elevado conteúdo metálico, o que torna difícil a obtenção de maiores quantidades de metais nas menores frações”, esta conclusão dos autores corrobora com o comportamento obtido na classificação granulométrica no presente trabalho.

4.2.1 Caracterização química

A fim de caracterizar as PCIs, foi realizada análise química por Fluorescência de Raios-X nas amostras antes dos processos de separação (magnética e eletrostática), as quais foram denominadas de amostras brutas. Essas amostras passaram somente pela cominuição e separação granulométrica.

Foi detectada a presença de um grande número de elementos. As placas de circuito impresso dos *smartphones* estudados contêm em média 35 % de cobre, 11 % de silício, 5 % de alumínio, 3 % de ferro, 3 % de níquel e 3 % de estanho, como pode ser visto na Figura 33. Este resultado foi obtido em cima das análises feitas nas amostras brutas em todas as frações, através da qual foi calculada a média. O resultado para cada fração individual está inserido na Tabela 7, bem como os resultados de outros elementos encontrados.

Figura 33 – Análise elementar (média) de placas de circuito impresso brutas



Fonte: A Autora (2019).

Tabela 7 – Caracterização química de PCIs de *smartphones* após separação granulométrica

	F₁ Bruto	F₂ Bruto	F₃ Bruto	F₄ Bruto
Cu (%)	24	39	39	39
Ca (%)	8	2	3	3
Si (%)	18	8	8	8
Fe (%)	6	4	2	1
Al (%)	6	5	5	4
Sn (%)	5	3	2	0
Ba (%)	3	4	0	0
Ni (%)	2	5	2	3
Br (%)	2	0	0	ND
P (%)	1	0	1	1
S (%)	1	2	2	2
Cl (%)	0	0	0	0
Mg (%)	1	1	2	1
Ti (%)	1	2	0	0
Cr (%)	1	0	1	0
Mn (%)	0	0	0	ND
Zn (%)	1	1	1	1
Ga (%)	0	ND	ND	ND
As (%)	0	0	0	ND
Sr (%)	0	0	0	ND
Zr (%)	0	0	ND	ND
Nb (%)	0	ND	ND	ND
Eu (%)	0	ND	ND	ND
Pb (%)	0	0	1	ND
Bi (%)	0	0	ND	ND
Ag (%)	ND	ND	ND	ND
Y (%)	ND	ND	ND	ND
Au (%)	ND	ND	0	ND
Hg (%)	ND	ND	ND	ND

Fonte: A Autora (2019).

Conforme esperado, cobre foi o elemento encontrado em maior quantidade. Este é o principal metal utilizado na fabricação das PCIs e sua presença está associada principalmente às trilhas condutoras das placas, pinos de ligação e também devido a sua presença em alguns dispositivos eletrônicos (OLIVEIRA, 2012; GSMA, 2015).

A presença de silício e alumínio está relacionada com a armadura da PCI, pois além da fibra de vidro que é utilizada para reforçar a placa, sílica e hidróxido de alumínio são os principais materiais usados para proporcionar a expansão térmica do material. Alumínio também é utilizado em alguns dispositivos eletrônicos como capacitores. Os materiais cerâmicos das PCIs, sobretudo, são representados por alumina e sílica (SANAPALA et al., 2009; OLIVEIRA, 2012).

Ferro é empregado em alguns componentes magnéticos e em ligações das PCIs ao exterior. Zinco é encontrado principalmente nos resistores e também em soldas Sn-Zn. Cromo e níquel são aplicados em ligas metálicas de componentes eletrônicos, como fios e filmes condutores de resistências. Níquel também possui função antioxidante nos circuitos. Ouro, apesar ter apenas a indicação de sua presença nas PCIs estudadas (<1 %), por sua boa condutividade elétrica e solubilidade em soldas de estanho, bem como sua natureza maleável e dúctil, é utilizado nos revestimentos de pinos de ligação dos microchips e nos circuitos integrados (OLIVEIRA, 2012; GSMA, 2015; RIBEIRO, 2017).

Quanto aos elementos terras raras, a técnica indicou a presença de Európio (Eu) como elemento traço, em concentrações também abaixo de 1 %. Os terras raras são utilizados na fabricação dos dispositivos eletrônicos das PCIs por possuírem a característica de, quando adicionados a um semicondutor, alterar suas propriedades elétricas (OLIVEIRA, 2012; GSMA, 2015; AYRES e PEIRÓ, 2013; LOUREIRO, 2013).

Estanho e chumbo (atualmente proibido na Europa pela diretiva RoHS) são utilizados na solda para fixação dos dispositivos no substrato da placa, no entanto identificou-se uma pequena quantidade de chumbo (1 %) em uma das frações caracterizadas (F₃). Demais elementos encontrados em menor quantidade fazem parte da composição dos dispositivos na PCIs (LEE et al., 2004; RODRIGUES, 2007; UNIÃO EUROPEIA, 2012).

Comparando a caracterização das PCIs dos eletroeletrônicos estudados neste trabalho com outros (Tabela 8), observa-se que a quantidade de cobre

assemelha-se a encontrada por Yamane et al. (2011) e Holgersson et al. (2018) ao caracterizar quimicamente as PCIs de celulares, apresentando baixa variação percentual entre si quando analisados somente esses autores. Em todos os estudos cobre foi o elemento majoritário, como esperado.

Tabela 8 – Concentração dos principais metais em placas de circuito impresso obtidos e comparação com outros autores

Autor	Origem da PCI	Técnica analítica	Metal (%)						
			Fe	Al	Cu	Sn	Pb	Zn	Ni
Park e Fray (2009)	-	ICP-AES	5	5	16	3	2	1	1
Oliveira et al. (2010)	Computador	AAS	0,08	2,6	28	ND	ND	ND	0,26
Yamane et al. (2011)	Celular	ICP-OES	10,57	0,26	34,49	3,39	1,87	5,92	2,63
Bizzo et al. (2014)	Celular	-	3,08	ND	14,2	4,79	2,5	0,18	0,41
Bachér et al. (2015)	Celular	FRX	1,5	4,8	21	2,4	0,42	0,49	1,6
Holgersson et al. (2018)	Celular	ICP-MS	0,68	1,9	34,27	1,93	0,37	0,55	1,16
	Smartphone	ICP-MS	0,88	1,78	39,5	3,22	0,03	0,67	1,54
Este estudo	Smartphone	FRX	3	5	35	3	0	1	3

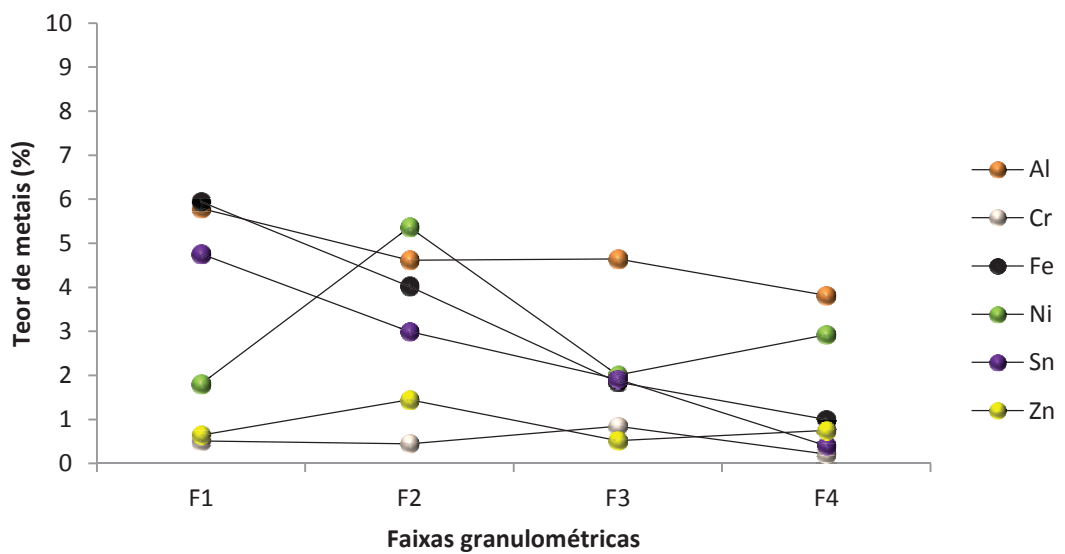
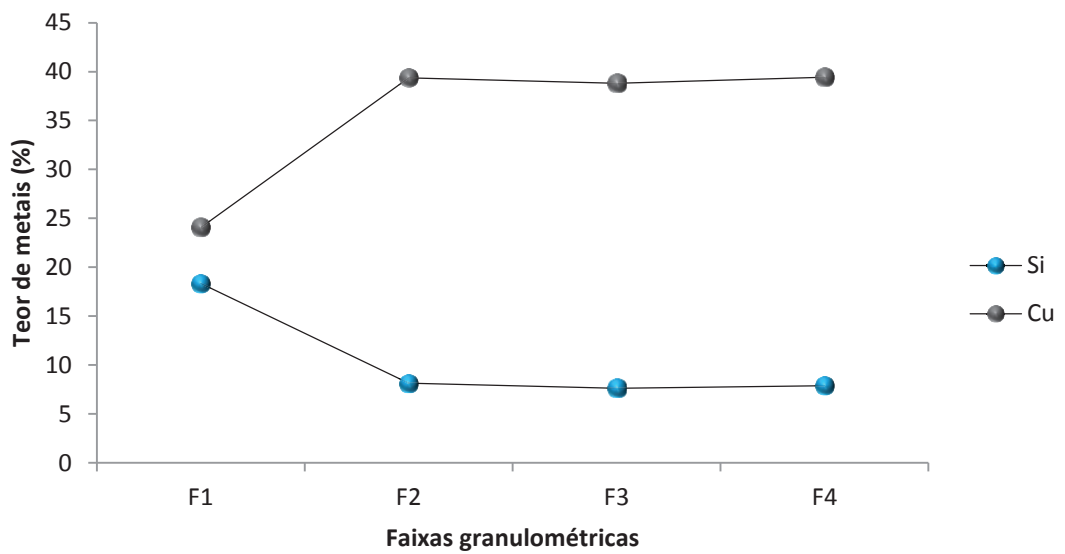
Fonte: Elaborado pela Autora (2019).

Como pode ser visto, há diferença de concentração entre outros elementos (ferro, principalmente) encontrados por diferentes estudos. As PCIs dos celulares estudados por Holgersson et al. (2018) continham 34,27 % de cobre, enquanto que as caracterizadas por Bachér et al. (2015) apresentaram 21 %. Essa diferença foi mais significativa para este elemento e para o Alumínio, enquanto que para os outros elementos a diferença não chegou a variar mais que 1,5 %. A variação da concentração dos metais quantificados pode ocorrer por conta das técnicas distintas empregadas na quantificação (ICP-OES, ICP-MS, FRX, etc.), bem como os diferentes tipos (celular, computador, *smartphone*), anos de fabricação e modelos de PCI (computador, celular convencional, *smartphone*) (HAMERSKI, 2018).

A análise por fração granulométrica (Figura 34) indicou que a maioria dos elementos estão presentes em todas as frações granulométricas, variando apenas seu teor. Alumínio variou entre 6 % a 4 %, decrescendo sua concentração conforme aumentava a granulometria, mesmo comportamento observado no silício (18-8 %),

ferro (6-1 %) e estanho (5-0,5 %). Cobre foi o único elemento que se manteve predominante em todas as faixas granulométricas, tendo sua menor concentração na F₁ (24 %) e atingindo a faixa de 40 % nas outras granulometrias estudadas (F₂, F₃ e F₄). Por ser dúctil, cobre é mais difícil de moer que o silício e o alumínio, por exemplo. Por essa propriedade, a quantidade em faixas granulométricas mais finas é menor.

Figura 34 – Concentração dos principais elementos nas PCIs brutas com diferentes faixas granulométricas – elementos em maior e menor quantidade



F₁<0,5 mm 0,5 mm<F₂<1 mm 1 mm <F₃< 2 mm F₄>2 mm

Fonte: A Autora (2019).

A concentração de cobre apresentou uma relação diretamente proporcional à granulometria, tendo sido identificado 24 % de Cu na F₁, e se mantendo na faixa de 39 % o elemento nas maiores granulometrias (F₂, F₃ e F₄), podendo constatar que conforme aumenta a granulometria da fração da PCI aumenta a quantidade do elemento. Isso ocorre porque o cobre é usado principalmente na superfície da PCI, como trilhas condutoras, dificultando a sua liberação. Em granulometrias maiores o cobre não fica livre, mas sim aderido nos emaranhados da fibra de vidro e da resina, tornando mais difícil sua separação devido a sua ductibilidade (OLIVEIRA, 2012; SILVAS, 2014).

Elementos economicamente importantes como níquel e ouro se concentraram mais nas frações intermediárias - Ni com teor de 5 % na F₂ e <1 % de Au na F₃, a única granulometria em que foi indicada a presença de ouro.

Alumínio teve sua maior concentração na fração de menor granulometria, assim como nas PCIs de computadores estudadas por Ribeiro (p.33, 2013), o qual relata que isso provavelmente “se deve ao fato de que o alumínio se encontra na forma de óxido (alumina), composto duro e frágil”. De acordo com o autor, os materiais cerâmicos são pulverizados, concentrando-se nas menores granulometrias. Saliencia-se que o alumínio também está presente em dispositivos eletrônicos como capacitores (OLIVEIRA, 2012; GSMA, 2015).

Os teores da maioria dos elementos metálicos geralmente são menores nas frações mais finas, segundo afirma Oliveira (2012), porque os metais das sucatas dificilmente são pulverizados na moagem, pois apresentam resistência mecânica superior à do material polimérico. No entanto, observando as PCIs antes dos processos de separação magnética e eletrostática, diversos elementos quantificados apresentaram a sua maior concentração na menor granulometria estudada (Al – 6 %, Si – 18 %, Fe – 6 % e Sn 5 %), indicando que a moagem em moinho de facas foi capaz de causar a liberação desses metais e ou suas ligas ou compostos.

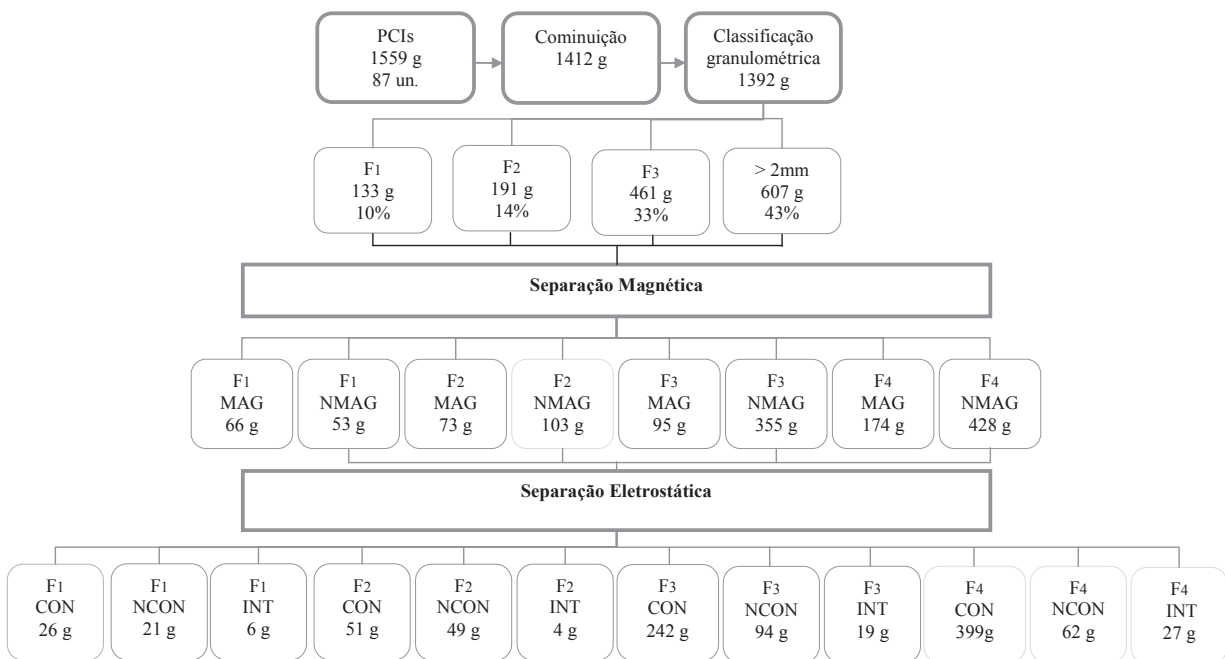
4.2.2 Separação magnética e eletrostática

Aproximadamente 1,5 kg de placas de circuito impresso obtidas de aparelhos *smartphones* foram cominuídas em um moinho de facas. A partir da moagem foram obtidas 4 frações granulométricas, as quais somaram 1412 g. Dessa quantidade, 20 g foram utilizadas para caracterização e o restante foi submetido a separação

magnética. Através dessa separação foram obtidas duas parcelas de material para cada amostra – uma parcela de material magnético e outra de não magnético. O material considerado não magnético passou pela separação eletrostática a fim de concentrar cobre.

O balanço de massa do processo físico, desde a moagem até as etapas de separação magnética e eletrostática está apresentado no esquema da Figura 35.

Figura 35 – Balanço de massa do processamento físico das PCIs

**Legenda****Perdas**

Cominuição - 147 g (9,42 %),

Classificação granulométrica - 1g (0,08 %)

Separação magnética e eletrostática - F1: 15 g F2: 15 g F3: 11 g F4: 5 g

MAG: magnético

NMAG: não magnético

CON: condutor

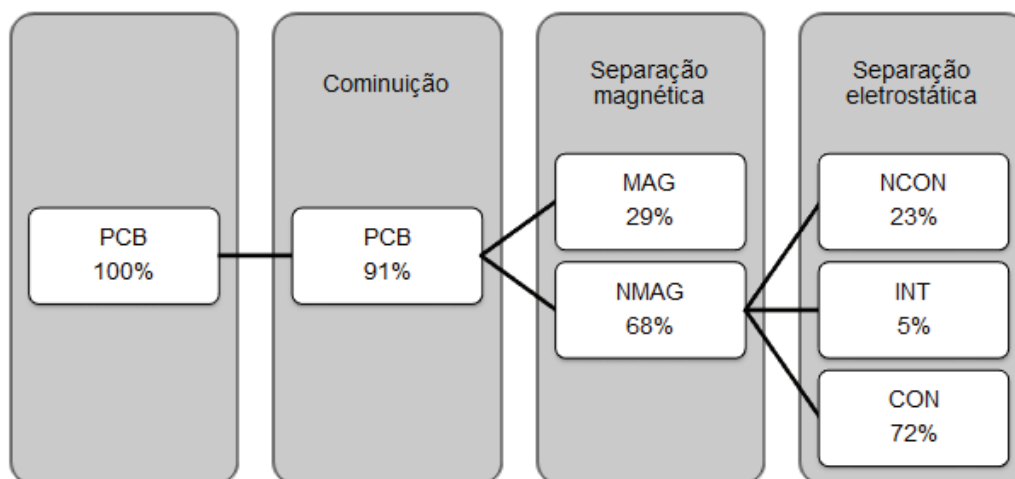
NCON: não condutor

INT: intermediário

F₁ < 0,5 mm0,5 mm < F₂ < 1 mm1 mm < F₃ < 2 mmF₄ > 2 mm

Através do balanço de massa foi possível calcular o percentual de material magnético e não magnético oriundo das separações (Figura 36).

Figura 36 – Esquema da separação magnética e eletrostática das placas de circuito impresso e respectivo balanço de massa (%)



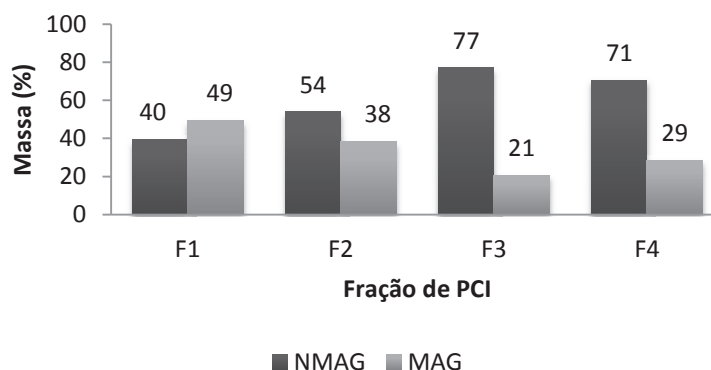
Fonte: A Autora (2019).

Observou-se que 68 % das PCI dos aparelhos são constituídos por uma fração de material não magnético e 29 % magnético. Esse resultado já era esperado, uma vez que o metal mais abundante encontrado nas PCI é o cobre, considerado um condutor - não magnético. Verificando o balanço de massa na saída da separação eletrostática, comprovou-se que o material condutor (72 %) predomina sob o não condutor (23 %) e o intermediário (5 %). A mesma tendência foi observada por Yamane et al. (2011) ao processar computadores e celulares, em que os autores obtiveram material não magnético em quantidade superior e, após a separação eletrostática, material condutor, predominantemente. Para celulares convencionais o autor obteve 82 % de material não magnético. Já a quantidade de material condutor foi inferior (50 %) à encontrada neste trabalho.

A Figura 37 apresenta a quantidade de material magnético e não magnético em função da faixa granulométrica. A partir disto nota-se que, exceto na F_1 , todas as outras frações têm o predomínio de material não magnético sob o magnético, ou seja, a partir somente do balanço de massa já se infere que cobre (elemento não magnético) está em maior quantidade que ferro e níquel, estando concentrado principalmente nas frações F_2 , F_3 e F_4 do que na fração de granulometria mais fina

estudada, o que confirma-se pela análise química apresentada anteriormente, onde cobre, na análise de PCI bruta, teve sua menor concentração na F₁ com 24 %.

Figura 37 – Parcela de material magnético e não magnético por fração de PCI



Fonte: A Autora (2019).

Visivelmente já foi possível identificar, na parcela magnética, o predomínio de ferro em todas as frações analisadas. Embora se tenha obtido na F₄ (> 2 mm) somente 29 % de material magnético, foi a granulometria na qual se notou mais facilmente a liberação desse elemento. Na parcela não magnética observou-se desde cobre livre, em frações de menor à maior granulometria, assim como polímeros.

Cada faixa granulométrica foi submetida à determinação de sua massa específica, bem como caracterização química.

4.2.2.1 Massa específica

Os resultados de massa específica para as faixas granulométricas estudadas apresentaram variações entre si, conforme pode ser visto na Tabela 9.

Tabela 9 – Massa específica (em g/cm³) das amostras após processamento físico

Amostra	Valor (g/cm ³)
F1 MAG	2,71
F1 CON	3,67
F1 NCON	2,20
F2 MAG	5,56
F2 CON	3,99
F2 NCON	2,19
F3 MAG	5,81
F3 CON	3,60
F3 NCON	2,17
F4 MAG	6,61
F4 CON	3,36
F4 NCON	1,94

MAG: Magnético
 NCON: Não condutor
 CON: Condutor
 Fonte: A Autora (2019).

As amostras magnéticas foram as que obtiveram o maior valor quando as comparando com as condutoras e não condutoras, exceto para a F₁, cuja massa específica mais elevada foi para a amostra condutora. Ferro ($\rho=7,8 \text{ g/cm}^3$) predomina nas amostras magnéticas, que contém também níquel ($\rho= 8,9 \text{ g/cm}^3$), sendo esses dois fatores que contribuem para a elevada massa específica nessas amostras. Já o fato da amostra condutora F₁ ter sido a de massa específica mais elevada quando comparada a não condutora, acredita-se ser devido à baixa concentração de ferro comparado às outras três frações granulométricas.

As amostras não condutoras apresentaram menor massa específica, indicando a menor quantidade de metais, como era esperado. Yamane et al. (2011) afirmam que o material não condutor é a fração onde se encontram os plásticos e cerâmicos, ou seja, a separação se mostrou eficiente.

4.2.2.2 Caracterização química

Os resultados obtidos da análise química quantitativa por Fluorescência de Raios-X após as separações magnética e eletrostática estão apresentados na Tabela 10. Nos itens da sequência foram discutidos separadamente os resultados obtidos quanto a cada tipo de separação.

Tabela 10 - Análise química semi quantitativa para amostras brutas, magnéticas, condutoras e não condutoras para as 4 granulometrias estudadas

Elemento (%)	Amostra															
	F1 BRUTO	F1 MAG	F1 CON	F1 NCON	F2 BRUTO	F2 MAG	F2 CON	F2 NCON	F3 BRUTO	F3 MAG	F3 CON	F3 NCON	F4 BRUTO	F4 MAG	F4 CON	F4 NCON
Mg	1	ND	ND	ND	1	ND	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
Al	6	3	3	3	5	5	5	5	5	1	6	5	4	1	2	2
Si	18	11	13	12	8	4	14	16	8	4	4	8	8	1	4	20
P	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1
S	1	0	0	0	2	0	1	2	2	0	1	2	2	0	2	2
Cl	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca	8	10	3	10	2	1	2	7	3	0	1	ND	3	0	1	5
Ti	1	1	0	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Cr	1	1	0	0	0	1	ND	ND	1	3	1	ND	0	ND	ND	ND
Mn	0	0	0	ND	0	0	0	ND	0	0	0	ND		1	ND	ND
Fe	6	9	0	0	4	10	0	0	2	15	2	0	1	34	0	0
Ni	2	3	0	0	5	10	2	0	2	11	5	0	3	7	5	0
Cu	24	18	52	24	39	21	49	27	39	22	44	37	39	16	40	22
Zn	1	1	0	0	1	2	1	0	1	0	3	ND	1	0	3	ND
Ga	0	0	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
As	0	ND	0	ND	0	0	ND	ND	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Br	2	2	1	3	0	0	1	2	0	ND	0	0	ND	ND	0	ND
Sr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ND	ND	0	ND	ND	0	ND
Zr	0	ND	ND	0	0	1	ND	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Nb	0	ND	ND	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	ND
Sn	5	5	5	1	3	6	3	1	2	3	2	1	0	1	2	0
Ba	3	4	1	1	4	7	0	1	0	ND	ND	1	0	ND	0	1
Eu	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0
Pb	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	ND	0	ND	ND	ND	ND
Bi	0	0	ND	0	0	0	0	0	ND	0	ND	ND	ND	0	ND	ND
Ag	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Y	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Au	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	ND	0	ND	ND	ND	0
Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	ND	ND	ND	ND	ND

MAG: Magnético

CON: Condutor

NCON: Não condutor

Fonte: A Autora (2019)

Em todas as amostras, o mais perceptível é a concentração de cobre, exceto na fração magnética de granulometria mais grosseira (F_4), onde o teor de ferro é superior ao de cobre. Na F_1 ($<0,50$ mm) o teor de cobre alcançou 52 % na parcela condutora, decrescendo para 49 %, 44 % e 40% conforme aumenta a granulometria. Para a obtenção do elemento concentrado puro seria necessária a aplicação de técnicas de refino, como a hidrometalurgia ou a biotecnologia, por exemplo. A concentração poderia se dar pela dissolução em meio aquoso utilizando um agente lixiviante (ácido sulfúrico e ácido nítrico, por exemplo), ou ainda pela ação de microorganismos que ajudam na dissolução de metais (RIBEIRO, 2017). No entanto, devido ao tempo necessário para a aplicação das técnicas, não foi possível realizar esta etapa.

Analisando a concentração de ferro e níquel após a separação magnética, cujo objetivo do processo é justamente separar esses dois metais do restante, observa-se que o processo possibilitou a concentração, na fração magnética, de 9-34 % de ferro, 0-1,5 % na fração condutora e 0-0,5 % na fração não condutora. Quanto ao níquel, os maiores teores também se concentraram na parcela magnética quando comparando as condutoras e não condutoras. No entanto, a quantidade desse elemento é muito inferior à do ferro, com teores entre 3 e 11 %.

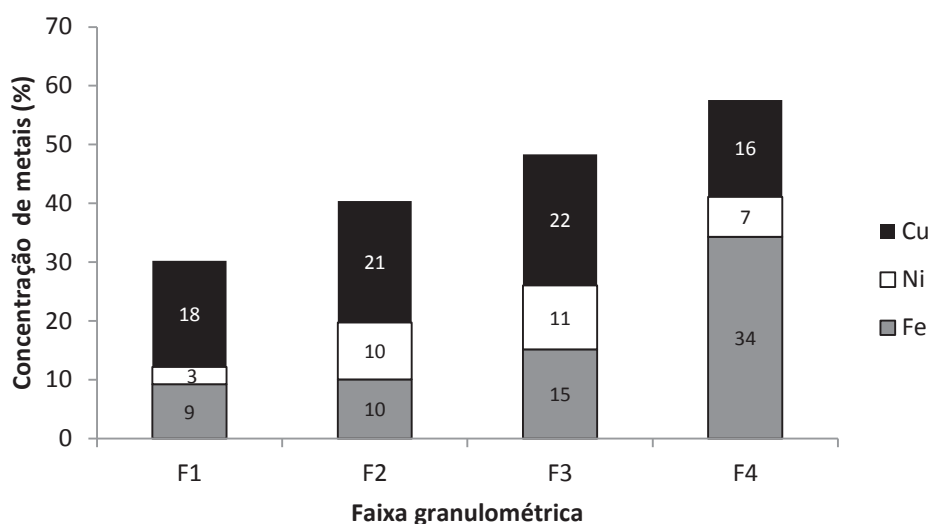
Referente à separação eletrostática, cujo objetivo maior é a concentração de cobre, observou-se nas frações condutoras teores de 40-52 % do elemento. As parcelas de material não condutor, no entanto, apresentaram teores consideráveis deste elemento (22-37 %), revelando que o processo de separação eletrostática não foi tão eficaz, permanecendo quantidades elevadas de cobre na parcela de material não condutor.

Foi constatada a presença de metais como cromo (utilizado na fabricação dos componentes eletrônicos) e chumbo (usado nas soldas, o mais tóxico dos elementos e acumulativo). Segundo Almeida et al. (2013), no Brasil a produção de soldas livres de chumbo ainda é pequena, sendo as ligas que têm o maior potencial de utilização pelas indústrias brasileiras compostas por Sn-Ag-Cu. Soldas à base de chumbo são utilizadas para fixação de componentes eletrônicos nas PCIs, sendo a liga de estanho e chumbo a mais utilizada devido a características que conferem um bom acabamento final no produto, como o grau de molhagem, dentre outras propriedades (ALMEIDA et al., 2013).

4.2.2.2.1 Caracterização química das amostras após a separação magnética

Os resultados obtidos para a análise química das frações de PCIs podem ser vistos na Figura 38.

Figura 38 – Quantidade de Fe, Ni e Cu nas frações granulométricas magnéticas



Fonte: A Autora (2019).

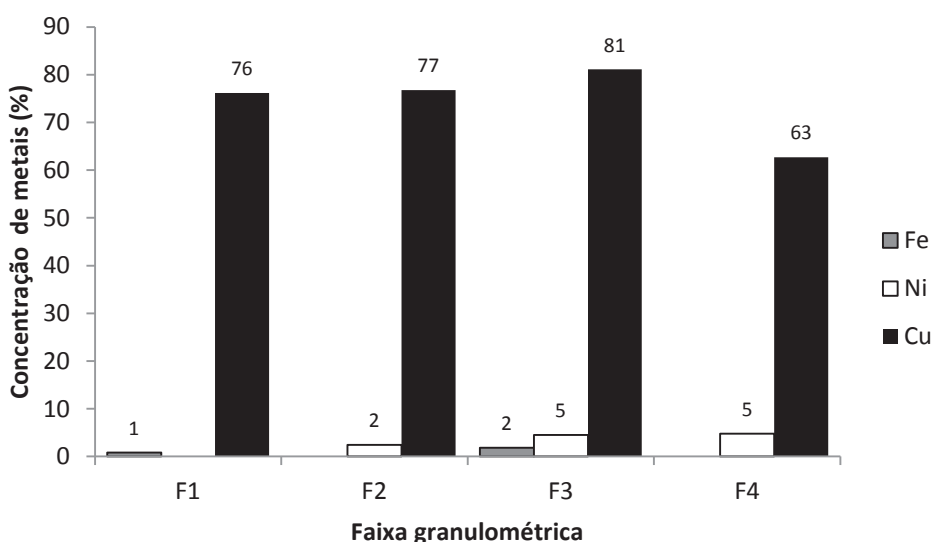
Pode ser observada uma elevada quantidade de ferro, que cresce conforme aumenta a granulometria do material, como segue: 9 %; 10 %; 15 % e 34 %. De acordo com Santana et al. (2013), nos celulares o ferro é usado em suportes, blindagens, e parafusos, por isso geralmente não se encontram outros elementos significativos, pois muitos destes componentes são aço baixo carbono, se concentrando, então, nas frações mais grossas devido suas propriedades mecânicas (resistência e ductilidade).

Cobre é o elemento predominante em PCIs e, apesar de não ser magnético, sua presença nessa parcela de material se dá devido ao arraste que sofre junto às partículas de ferro e níquel atraídas pelo magneto (VEIT, 2005).

O objetivo principal dessa etapa do processo é justamente separar o ferro, além do níquel, considerados materiais magnéticos, para possibilitar uma maior concentração de cobre na separação eletrostática. Sendo assim, é mais interessante que as maiores concentrações de cobre sejam encontradas na porção de material não magnético, como pode ser visto na Figura 39. Esses motivos determinaram a

seleção desses três elementos para quantificação neste tópico: ferro e níquel por serem os principais elementos magnéticos, e cobre por ser o elemento em maior quantidade e o de maior interesse nas PCIs.

Figura 39 - Quantidade de Fe, Ni e Cu nas frações granulométricas não magnéticas



Fonte: A Autora (2019).

Na parcela de material não magnético (Figura 39) foram obtidas as seguintes concentrações de cobre para as faixas granulométricas estudadas: 76 % na F₁, 77 % na F₂, 81 % na F₃ e 63 % na F₄. Comparando-se com as quantidades encontradas na parcela magnética (18 %; 21 %; 22 % e 16 %) fica evidente a concentração de cobre, e também a alta quantidade desse elemento em todas granulometrias. Esse resultado corrobora com o estudo de Veit (2005), que constatou que os metais tendem a se concentrar em granulometrias intermediárias.

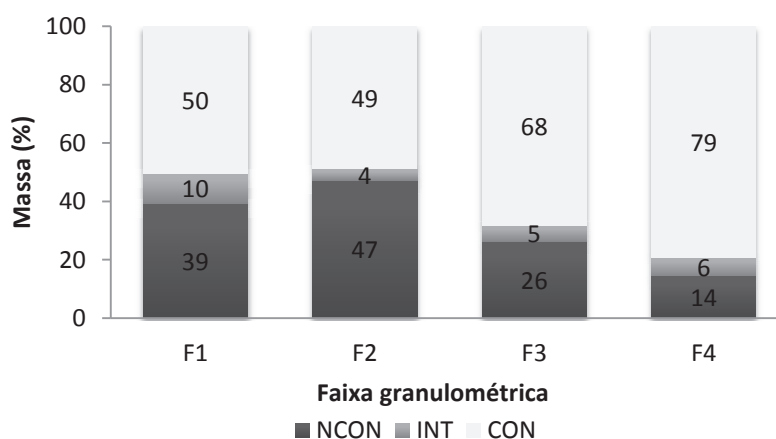
Ferro foi detectado somente em duas faixas granulométricas (F₁ e F₃), e níquel em três (F₂, F₃ e F₄), em baixas concentrações (1-5 %), indicando que o objetivo do processo de separação magnética foi atingido – separar ferro, principalmente, e níquel, da parcela não magnética, mantendo majoritariamente o cobre (63-81 %) para a próxima etapa do processo (separação eletrostática).

4.2.2.2.2 Caracterização química das amostras após a separação eletrostática

Após a cominuição das PCI, separação em diferentes faixas granulométricas e separação magnética, a parcela de material não magnético foi submetida à separação eletrostática, gerando três saídas diferentes de materiais do processo: condutora, mista e não condutora.

A partir do balanço de massa das saídas de PCI do processo eletrostático (Figura 40) nota-se, em todas as frações, o predomínio de material condutor sob o não condutor, restando uma menor parcela de material misto, que corresponde a materiais que conduzem momentaneamente. Na F₄ (> 2 mm) foi observada a maior quantidade de material condutor, com 79 % de massa.

Figura 40– Quantidade de PCI condutora, não condutora e intermediária após a separação eletrostática



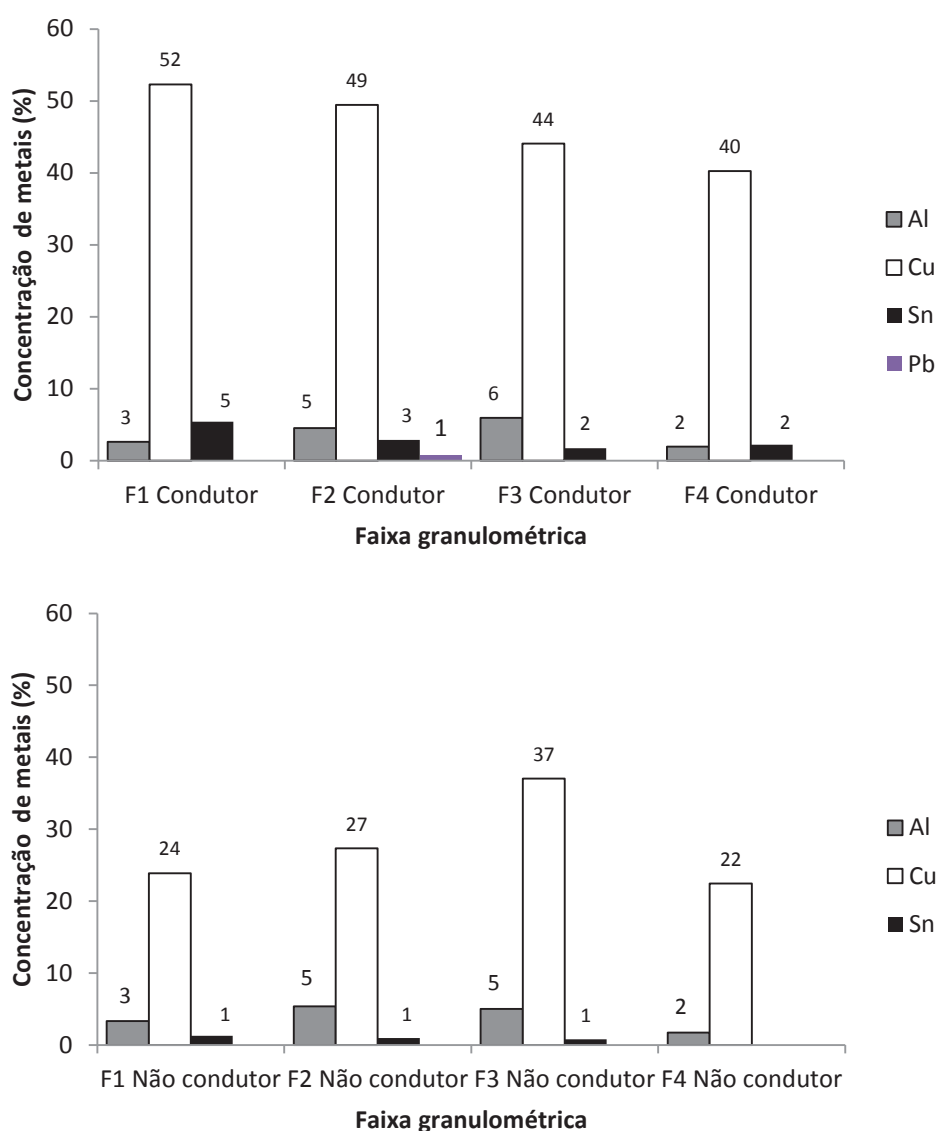
Fonte: A Autora (2019).

Somente pelo balanço de massa, através do qual foram obtidas as porcentagens apresentadas na Figura 40, já se infere o predomínio de cobre, por se tratar de um metal condutor, sob outros materiais que compõem as PCI dos *smartphones*.

Em cada fração granulométrica foram quantificados os elementos tanto para a fração condutora quanto para a não condutora, desconsiderando-se a parcela intermediária devido a sua baixa representatividade em massa (4-10 %) quando

comparada com as duas outras parcelas. Os resultados dos principais elementos encontrados para cada amostra estão apresentados na Figura 41.

Figura 41 - Quantidade de Cu, Al, Sn e Pb nas amostras condutoras e não condutoras de diferentes granulometrias



Fonte: A Autora (2019).

Cobre foi o elemento encontrado em maior quantidade, tanto nas amostras condutoras (F₁ teve o valor mais elevado com 52 %), quanto nas não condutoras. No entanto, a variação do teor deste elemento entre as faixas granulométricas estudadas ficou entre 40-52%, decrescendo conforme aumentava a faixa

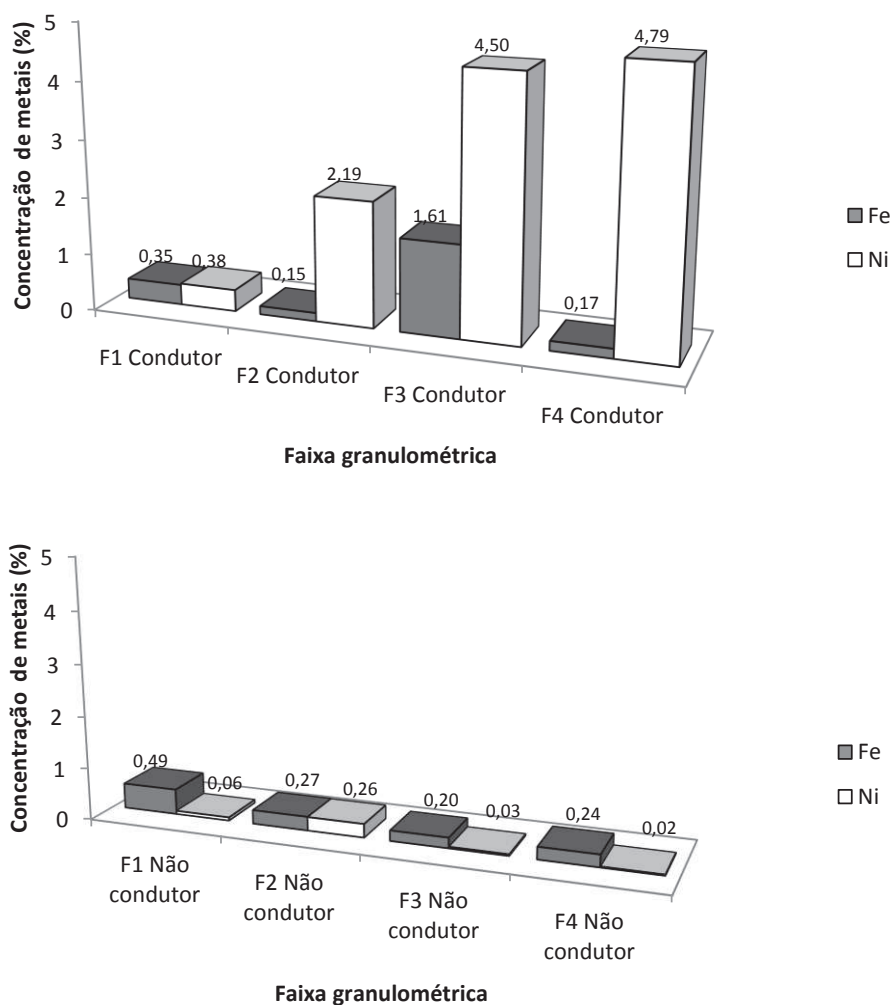
granulométrica. Nas amostras não condutoras, a variação identificada ficou entre 22 % a 37 %.

Alguns metais, como o cobre, são encontrados tanto na fração magnética quanto na não magnética, pois como é um metal com elevada quantidade nas PCIs de REEE, esse elemento acaba sendo arrastado junto com as partículas de ferro e níquel atraídas (VEIT, 2005). Isso também é resultado da aglomeração de partículas que resulta na atração de alguns não ferrosos sendo carregados pela fração ferrosa.

Além do cobre, metais com características condutoras como alumínio (2-6 %), estanho (2-5 %) e chumbo (1 % na F₂ condutora) foram identificados em baixas concentrações.

Ferro e níquel, elementos magnéticos, também foram quantificados e sua concentração pode ser observada na Figura 42.

Figura 42 - Quantidade de Fe e Ni nas amostras condutoras e não condutoras



Fonte: A Autora (2019).

Ferro (0-2 %) e níquel (0-5 %), apesar de serem magnéticos, também estão presentes na parcela condutora em quantidades menores que 5 %. Já nas amostras não condutoras, essa quantidade é mínima, estando esses elementos em concentrações de 0,02 e 0,49 %. Isso indica que o processo magnético foi suficiente para concentrar ambos elementos, majoritariamente, na fração magnética.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho é possível concluir:

- Os *smartphones* são compostos por carcaça (31 %), *display* (30 %), bateria (20 %), PCI (16 %) e outros (3 %);
- A moagem de PCI em moinho de facas acarreta em uma perda de 9 % do material, gerando fragmentos de PCI com granulometria maior que 2 mm (44 %), decrescendo para 33 % (1-2 mm), 14 % (0,5-1 mm) e 10 % (<0,5 mm);
- As placas de circuito impresso de *smartphones* são compostas em média por, principalmente, cobre (35 %), silício (11 %), alumínio (5 %), ferro (3 %) níquel (3 %), estanho (3 %), zinco (1 %) e cromo (1 %), além de polímeros e cerâmicos;
- A partir da análise química por fração granulométrica verificou-se que os elementos estão presentes em todas as frações granulométricas, especialmente cobre, que atingiu teores de 39 % nas frações F₂, F₃ e F₄ das PCIs;
- Cobre é o elemento em maior quantidade nas PCI de *smartphones*, tendo sido encontrados teores de 81 % na F₃ e 77 % na F₂ na parcela de material não magnético. A variação na parcela de material condutor ficou entre 52-40 %, da menor para maior fração granulométrica estudada. Isso indica a eficiência da separação eletrostática, concentrando majoritariamente este elemento, bem como a moagem das PCI proporcionando a liberação deste metal;
- Para fins de obtenção de cobre puro seria necessária a adoção de técnicas complementares de refino, as quais poderiam ser aplicadas nas frações condutoras, especialmente na F₄ Poderiam ser utilizadas técnicas de hidrometalurgia ou biotecnologia, por exemplo;
- Quanto à influência da granulometria na concentração dos metais nas PCI brutas/antes dos processos de separação: cobre se concentra nas granulometrias intermediárias. A menor concentração (24 %) foi na menor granulometria (F₁). Alumínio e Ferro aumentam a quantidade conforme diminui a granulometria. Já a relação entre granulometria e concentração de metais após os processos de separação foi a

seguinte: na parcela condutora, quanto maior a granulometria da PCI, menor a quantidade de cobre. Na fração magnética, quanto maior a fração granulométrica da PCI, maior a quantidade de ferro;

- O emprego da separação magnética se mostrou eficiente, pois possibilitou o acúmulo de ferro nas frações magnéticas (9-34 %), retendo pouco deste elemento nas frações não magnéticas (<5 %);
- Embora a caracterização química tenha sido realizada por uma técnica semi-quantitativa, os resultados em termos da presença de elementos corresponderam aos encontrados na literatura estudada sobre PCIs;
- A presença em altas concentrações dos metais, especialmente o cobre, conforme caracterização realizada, torna os *smartphones* uma fonte interessante de materiais.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Caracterizar quimicamente as PCIs através de outras técnicas (ICP-MS, ICP-OES, etc.) de forma complementar aos resultados obtidos neste trabalho;
- Identificar elementos terras raras em cada fração granulométrica estudada, após os processos mecânicos aplicados;
- Aplicar técnicas de hidrometalurgia para a recuperação de metais.

REFERÊNCIAS

ABDI. AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos – Análise de Viabilidade Técnica e Econômica**. 2013.

ABIFA – Associação Brasileira de Fundição. Norma CEMP (Comissão de Estudos de Matérias Primas) 081 – **Materiais para fundição – Determinação da distribuição granulométrica, módulo de finura e teor de finos em materiais granulares**. 2015.

ABINEE. **A indústria elétrica e eletrônica em 2020 – Uma estratégia de desenvolvimento**. 2009.

ABINEE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA. **Panorama Econômico e Desenvolvimento Setorial, 2017**. Disponível em: < < <http://www.abinee.org.br/programas/50anos/public/panorama/index.htm#22> > Acesso em: 22 ago. de 2017.

ABINEE. Comportamento da Indústria Elétrica e Eletrônica – 2016 – projeções para 2017. Disponível em: < <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/dados.pdf> > Acesso em: 03 jul de 2017.

ABINEE. Desempenho setorial. Disponível em: < <http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon15.htm> >. Acesso em 11 out. de 2017.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004. Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16156: Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos – Requisitos para atividade de manufatura reversa**. Rio de Janeiro, 2013.

ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil, 2015**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>> Acesso em: 15 jun. de 2017.

ALMEIDA, C.M.V.B de.; MADUREIRA, M.A.; GIANETTI, B.F.; BONILLA, S.H. **Substituição das soldas estanho-chumbo na manufatura: efeitos na saúde do trabalhador e no desempenho ambiental**. Gest. Prod., São Carlos, v. 20, n. 1, p. 46-58, 2013.

ANATEL. AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Telefonia Móvel – Acessos**. Disponível em: <www.anatel.gov.br/dados/destaque-1/283-movel-acessos-maio>. Acesso em: 14 jan. de 2018.

ARAÚJO, M.G. **Modelo de avaliação do ciclo de vida para a gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos no Brasil**. Tese (doutorado). Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

ARAÚJO, M.G.; MAGRINI, A.; MAHLER, C.F.; BILITEWSKI, B. **A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil.** Waste management 32 (2012) 335-342.

AYRES, R.U.; PEIRÓ, L.T. 2013. **Material efficiency: rare and critical metals.** Phil Trans R Soc A 371:2011.0563

BACHÉR, J.; MROTZEK, A.; WAHLSTROM, M. **Mechanical pre-treatment of mobile phones and its effect on the Printed Circuit Assemblies (PCAs).** Waste management 45 (2015) 235-245.

BIZZO, W.A.; FIGUEIREDO, R.A.; ANDRADE, V.F. **Characterization of printed circuit boards for metal and energy recovery after milling and mechanical separation.** Materials. 2014, 7, 4555-4566. ISSN 1996-1944.

BOLLINGER, L. A. **Growing cradle-to-cradle metal flow systems – An application of agent-based modeling and system dynamics to the study of global flows of metals in mobile phones.** Thesis. Leiden University, 2010.

BORGES, G. da R.; PETRY, J.F.; MACHADO, D. N.; RASIA, I.C.R.B. **Um estudo preliminar dos fatores perceptivos subjacentes da preferência dos brasileiros por aparelhos celulares.** Perspectivas em Gestão & Conhecimento. 2016, v.6, n.1, p.255-269.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em 09 set. de 2017.

BLAZSÓ, M.; CZÉGÉNY, ZS.; CSOMA, CS. **Pyrolysis and debromination of flame retarded polymers of electronic scrap studied by analytical pyrolysis.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. v. 64, p.249-261, 2002.

BURKE, M. **The gadget scrap heap.** ChemWord. v.4, p.45-48, 2007.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 5a ed. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2002.

CAREVAROLO JR, S.V. **Ciência dos Polímeros.** São Paulo, Artliber. 2004, 466 pg.

CEMPRE – Compromisso empresarial para reciclagem. **Recicladores de resíduos eletroeletrônicos.** Disponível em: <<http://cempre.org.br/servico/recicladores/>>. Acesso em 01 dez. de 2017.

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. **Extração de ouro a partir de placas de circuito impresso por cianetação intensiva.** Série Tecnologia Ambiental – ISSN 0103-7374, 2015.

CETEM – MCT. Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Tratamento de Minérios.** 4ª edição. Rio de Janeiro, 2004.

CHI, X.; STREICHER-PORTE, M.; WANG, M.Y.L.; REUTER, M.A. **Informal electronic waste recycling: A sector review with special focus on China**. 2011.

COBBING, M. **Toxic Tech: Not in Our Backyard. Uncovering the Hidden Flows of e-waste**. Report from Greenpeace International. Disponível em: <<https://www.greenpeace.org/norway/Global/norway/p2/other/report/2008/toxic-tech-not-in-our-backyar.pdf>>. Acesso em 22 jun. de 2018.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; KOH, S.C.L.; ROSA, P. **Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51 (2015) 263- 272.

CUI, J., ZHANG, L., 2008. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review. *Journal of Hazardous Materials* 158, 228–256.

CUI, J.; FORSSBERG, E.; **Mechanical Recycling of Waste Electric and Electronic Equipment: a review**. *Journal of Hazardous Materials*. B99 (2003) 243-263.

DI MARIA, F.; MICALÉ, C.; SORDI, A.; CIRULLI, G.; MARIONNI, M., 2013. **Urban mining: Quality and quantity of recyclable and recoverable material mechanically and physically extractable from residual waste**. *Waste Management* 33(12): 2594–2599.

DORNELES, K.O.; SILVEIRA, T.A.; FIGUEIRÓ, M.F.; MORAES, C.A.M. **Desmontagem e segregação de sucatas de celulares: comparação entre componentes de aparelhos convencionais e smartphones**. *Forum Internacional de Resíduos Sólidos*, 2016, Porto Alegre. *Anais do FIRS*, 2016. v. 1. p. 1-8.

FERNANDES, I.J. **Desenvolvimento e Caracterização de Compósitos de Cinza de Casca de Arroz em Matriz epóxi**. Dissertação (mestrado). São Leopoldo - UNISINOS, 2015.

FILHO, H. R. **Avaliação de compósitos cimentícios com adição de fibras curtas originadas de placas de circuito impresso**. Dissertação (mestrado). UFOP – CETEC – UEMG, 2013.

GERBASE, A.; OLIVEIRA, C. Reciclagem do lixo de informática: Uma nova oportunidade para a Química. *Quimica Nova*. pp 1486–1492. 2012;

GHOSH, B.; GHOSH, M.K.; PARHI, P. MUKHERJEE, P.S.; MISHRA, B.K. **Waste Printed Circuit Boards Recycling: an extensive assessment status**. *Journal of cleaner production* (2015) 5-19.

GOLEV, A.; CORDER, G.D. Quantifying metal values in e-waste in Australia: The value chain perspective. *Minerals Engineering* 107 (2017) 81-87.

GOUVEIA, A. R. **Recuperação de metais de placas de circuito impresso por via hidrometalúrgica**. Lisboa, 94 p. 2014, Dissertação (mestrado) – Universidade do Porto

GREENPEACE. **Metais pesados: contaminando a vida.** – Disponível em: <http://www.greenpeace.org.br/toxicos/?conteudo_id=818&sub_campanha=0&img=15>. Acesso em 08 jul. de 2017.

GSM Association (GSMA). **eWaste in Latin America: Statistical analysis and policy recommendations.** November 21, 2015.

GUO, J.; GUO, J.; XU, Z. **Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review**, Journal of Hazardous Materials, 168 (2009) 567-590.

HAMERSKI, F. **Emprego de Processamento Mecânico na Concentração de Cobre a partir de Placas de Circuito Impresso.** Tese (Doutorado). Porto Alegre – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

HAMERSKI, F.; BERNARDES, D.P.; VEIT, H.M. **Operational conditions of an electrostatic separator for concentrate copper from electronic waste.** REM, 71 (3) 431-436, 2018.

HAYES, P.C. **Process principles in minerals and materials production.** Hayes Publishing CO. p.29. Brisbane, Austrália, 1992.

HOLGERSSON, S.; STEENARI, B.; BJORKMAN, M.; CULLBRAND, K. **Analysis of the metal content of small-size Waste Electric and Electronic Equipment (WEEE) printed circuit boards- part 1: Internet routers, mobile phones and smartphones.** Res. Conserv. Recycling 133 (2018), 300-308.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTÁTISTICA. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 2001.** Rio de Janeiro, 2002.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTÁTISTICA. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 2008.** Rio de Janeiro, 2009.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTÁTISTICA. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 2015.** Rio de Janeiro, 2015.

IDC Brasil. Notícia. <http://br.idclatin.com/releases/news.aspx?id=2182>

IPMI. Internacional Precious Metals Institute. **Environmentally Sound Management Used Mobile Phones**, 2003. Disponível em: <http://ipmi.org/pdf/IPMI_Guidance_Used_Mobile_Phones.pdf> Acesso em 09 set. de 2017.

ITU International Telecommunication Union. **Measuring the Information Society – The ICT Development Index 2009 ed.** Disponível em:< www.itu.int>. Acesso em 10 nov. de 2017.

KASPER, A.C. **Caracterização e Reciclagem de Materiais Presentes em Sucatas de Telefones Celulares.** Dissertação (mestrado). Porto Alegre – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

KAYA, M. **Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes.** Waste Management 57 (2016) 64-90.

KIRCHNER, J.; TIMMEL, G.; SCHUBERT, G. **Comminution of metals in shredders with horizontally and vertically mounted rotors** – Microprocesses and parameters, Power Technology 105 (1999) 274-281.

KNOTH, R.; BRANDSTOTTER, M.; KOPACEK, B.; KOPACEK, P. **Automated disassembly of electr(on)ic equipment**. Conference Record 2002 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment,

KOYANAKA, S.; ENDOH, S.; OHYA, H. **Effect of impact velocity control on selective grinding of waste printed circuit boards**, Advanced Power Technol., 17 (1) (2006) 113-126.

KROOK, J.; BAAS, L., 2013. **Getting serious about mining the technosphere: A review of recent landfill mining and urban mining research**. Journal of Cleaner Production 55: 1–9.

KROWINKEL, J.M., DALMIJN, W.L., 2000. **Processing of televisions by mechanical separation techniques: implications for future work in product design and recycling**. Fourth International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials 22–25, 47–59.

LAYDING, W.; DONG, X.; PENG, M.; GUANGHONG, D. **Disassembling approaches and quality assurance of electronic components mounted on PCBs**, Electronics and the environment, Proceedings of the 2005 IEEE International symposium, (2005) 116-120.

LEE, et al. **An overview of recycling and treatment of scrap computers**. Journal of Hazardous Materials (114) 2004 93-100.

LEAF – LEACHING ENVIRONMENTAL ASSESSMENT FRAMEWORK/VANDERBILT UNIVERSITY. **Leaching Process**. Disponível em: <<http://www.vanderbilt.edu/leaching/leaching-process/>> Acesso em: 12 jul. de 2017.

LI, X. et al. **Smartphone Evolution and Reuse: Establishing a more sustainable model**. 39th International Conference on parallel Processing Workshops, 2010.

LOUREIRO, L.F.E. **O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras**. CETEM/MCTI. Rio de Janeiro, 2013.

LUNDGREEN, K. **The global impact of e-waste: addressing the challenge**. International Labour Office, Programme on Safety and Health at Work and the Environment (SafeWork), Sectoral Activities Department (SECTOR). – Geneva: ILO, 2012

MEJAME, P.P.M.; KIM, Y.M.; LEE, D.S.; L, S.R. **Effect of technology development on potential environmental impacts from heavy metals in waste smartphones**. J Mater Cycles Waste Manag. DOI 10.1007/s10163-016-0548-2

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) - **Convenção de Basiléia**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-perigosos/convencao-de-basileia/>> Acesso em: 18 set. de 2017.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) – **Ecodesign**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/7654-ecodesign>>. Acesso em 06 out. de 2018.

MORAES, V. T de. **Recuperação de metais a partir de processamento mecânico e hidrometalúrgico de placas de circuito impresso de celulares obsoletos**. Tese (doutorado). USP, 2011.

MOREIRA, F.R.; MOREIRA, J.C. **Os efeitos do chumbo sobre o organismo humano e seu significado para a saúde**. Revista Panamericana de Salud Publica. Volume 15, nº 2, Washington, 2004.

NI, H.G.; ZENG, E.Y. **Law enforcement and global collaboration are the keys to containing e-waste tsunami in China**. Environmental Science & Technology, v. 43, No. 11, pp. 3991–3994. 2009.

NICOLAI, F.N.P. **Mineração urbana: avaliação da economicidade da recuperação de componentes ricos em Au a partir de resíduo eletrônico (e-waste)**. Belo horizonte, 329 p.,2016. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto.

O GLOBO – Notícia: **Rota do tráfico de resíduos eletrônicos se amplia no mundo e inclui o Brasil**. 2015. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/sociedade/sustentabilidade/rota-do-trafico-de-residuos-eletronicos-se-amplia-no-mundo-inclui-brasil-17279076>>. Acesso em: 15 ago. de 2017.

OLIVEIRA, P.C. et al. Printed circuit boards recycling: characterization of granulometric fractions from shredding process. **Materials Science Forum**. Vols 636-637, pg 1434-1439, 2010.

OLIVEIRA, P.C.F. **Valorização de Placas de Circuito Impresso por Hidrometalurgia**. Lisboa, 320 p., 2012. Tese (doutorado) – Universidade Técnica de Lisboa.

PALMIERI, R.; BONIFAZI,G.; SERRANTI,S. **Recycling-oriented characterization of plastic frames and printed circuit boards from mobile phones by electronic and chemical imaging**. Waste Management 34 (2014) 2120-2130.

PARAJULY, K.; HABIB, K.; LIU, G. **Waste electrical and electronic equipment (WEEE) in Denmark: Flows, quantities and management**. Resources, conservation and recycling 123 (2017) 85-92

PARIATAMBY, A.; VICTOR, D. **Policy trends of e-waste management in Asia**. J Mater Cycles Waste Manag (2013) 15:411-419.

PARK, Y.J., FRAY, D.J. Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. **Journal of Hazardous Materials** 164, p1152–1158, 2009.

PETTER, P.M.H. **Avaliação da eficiência da lixiviação de metais preciosos das placas de circuito impresso com utilização de lixivantes alternativos ao**

cianeto. Dissertação (Mestrado), 91p., 2012- UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PING, Z.; ZEYUN, F.; JIE, L.; QIANG, L.; GUANGREN, Q.; MING, Z. **Enhancement of leaching copper by electro-oxidation from metals powders of waste printed circuit board**, Journal of Hazardous Materials, 166 (2009) 746-750.

RARE ELEMENT RESOURCES. **Rare Earth Elements**. Littleton, 2016. Disponível em: <<http://www.rareelementresources.com/rare-earth-elements#.Vk9cFnarTIU>> Acesso em: 10 nov. de 2016.

RIBEIRO, P.P.M. **Concentração de metais contidos em placas de circuito impresso de computadores descartados**. Projeto de graduação. 66p., 2013. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

RIBEIRO, S. F. **Desenvolvimento de rotas de reciclagem de placas de circuito impresso de telefones móveis com extração química de cobre, estanho e níquel**. Dissertação (Mestrado) 93p., 2017 – CEFET-MG, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

RICHTER, D. **Uma rota de recuperação de metal a partir de escória secundária da produção de ferroníquel**. Dissertação de Mestrado. USP, São Paulo, 2009.

ROCHA, H.T.R.; GOMES, F.V.B. **Diagnóstico da Geração de Resíduos Eletroeletrônicos no Estado de Minas Gerais**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/4E1B1104/DiagGer_REE_MG_FEAM_EMPA.pdf>. Acesso em: 22 jun. de 2018

RODRIGUES, A.C. **Impactos Socioambientais dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos: estudo da Cadeia Pós-Consumo no Brasil**. Dissertação (mestrado), UNIMEP, 2007.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C.A; BRAGA, P. F. A. Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais - Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) – Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). Rio de Janeiro, 2007. 573 p.

SANAPALA, R.; SOOD, B.; DAS, D.; PECHT, M. **Effect of Lead-Free Soldering on Key Material Properties of FR-4 Printed Circuit Board Laminates**. IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing, vol.32. No.4. October, 2009.

SANT'ANA, H.B.S.; MOURA, F.J.; VEIT, H.M. **Caracterização físico-química de placas de circuito impresso de aparelhos de telefone celular**. Technol.Metal.Miner., São Paulo, v.10, n.3, p.231-238, jul.-set. 2013.

SANTANILLA, A.J.M. **Recuperação de Níquel a partir do Licor de Lixiviação de Placas de Circuito Impresso de Telefones Celulares**. Dissertação (mestrado). São Paulo – USP, 2012.

SANTOS, E. J. et al. **Determination of Trace Metals in Electrolytic Copper by ICP OES and ICP-MS**. Brazilian Archives of Biology and Technology. Vol.48, n.5 681-687, September 2005. ISSN 1516-8913.

SARATH, P.; BONDA, S.; MOHANTY, S.; NAYAK, S.K. **Mobile phone waste management and recycling: View and trends**. Waste management (46) 2015, 536-545

SARVAR, M.; SALARIRAD, M.M.; SHABANI, M.A. **Characterization and mechanical separation of metals from computer printed circuit boards (PCBs) based on mineral processing methods**. Waste management (45) 2015, 246-257

SENA, F.R. **Evolução da Tecnologia Móvel Celular e o Impacto nos Resíduos Eletroeletrônicos**. Dissertação (mestrado). PUC – Rio de Janeiro, 2012.

SHAGUN; KUSH, A.; ARORA, A. **Proposed solution of e-Waste Management**. International Journal of Future Computer and Communication. Vol 2, No. 5, October 2013.

SILVAS, P.C.S. **Utilização de hidrometalurgia e biohidrometalurgia para reciclagem de placas de circuito impresso**. São Paulo, 164 p., 2014. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

SILVEIRA, T.A. **Caracterização de sucatas de smartphones e aplicação de processamento mecânico visando à recuperação de materiais oriundos de placas de circuito impresso**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – São Leopoldo, 2016.

SILVEIRA, T.A. da; DORNELES, K.O.; MORAES, C.A.M.; BREHM, F.A. **Caracterização de placas de circuito impresso de smartphones orientada para reciclagem**. In: 5° InovTec - Seminário de Inovação e Tecnologia do IFSUL, 2016, Sapucaia do Sul. **Anais eletrônicos...** Sapucaia do Sul: Instituto Federal de Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense, 2017.

SILVEIRA, T.A. da; MORAES, C.A.M. **O ecodesign e a geração de resíduos sólidos: uma abordagem sobre os eletroeletrônicos**. In: VI Encontro de Sustentabilidade em Projeto (ENSUS), 2018. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.

SINCTRONICS – Green IT Innovation Center. Relatório de Indicadores, 2016. Disponível em: <http://www.sinctronics.com.br/pdf/Sinc_RelatorioSustentabilidade.pdf>. Acesso em: 02 ago. de 2017.

SONG, Q.; LI, J. **Environmental effects of heavy metals derived from the e-waste recycling activities in China: a systematic review**. Waste Management 34 (2014) 2587-2594.

STEP – Solving the E-Waste Problem – Green Paper. **E-waste Prevention, Take-back System Design and Policy Approaches**. ISSN: 2219-6579 (online). February, 2015.

SUM, E.Y.L. **The Recovery of Metals from Electronic Scrap**, JOM - J. Miner. Met. Mater. Soc. 43 (4) (1991) 53–61.

SURITA, S., TANSEL, B., 2015. **Preliminary investigation to characterize deposits forming during combustion of biogas from anaerobic digesters and landfills**. *Renew. Energy* 80, 674–681

SUN, Z.H.I.; XIAO, Y.; SIETSMA, J.; AGTERHUIS, H.; VISSER, G.; YANG, Y. Characterisation of metals in the electronic waste of complex mixtures of end-of-life ICT products for development of cleaner recovery technology. **Waste Management**, v.35, p.227-235, 2015.

TANSEL, B. **From electronic consumer products to e-waste: Global outlook, waste quantities, recycling challenges**. *Environment International*. 98, 35-45, 2017

TUNCUK, A.; STAZI, V.; AKCIL, A.; YAZICI, E.Y.; DEVECI, H. 2012. **Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: hydrometallurgy in recycling**. *Miner. Eng.* 25, 28-37.

TUNSU, C.; PETRANIKOVA, M.; GERGORIC, M.; EKBERG, C.; RETEGAN, T., 2015. **Reclaiming rare earth elements from end-of-life products: a review of the perspectives for urban mining using hydrometallurgical unit operations**. *Hydrometallurgy* 156 239-258.

UFG – Universidade Federal de Goiás. Material de Curso de Especialização em Tratamento de Minérios do CETEM. Prof. Dr. André Carlos Silva, 2012.

UMICORE BRASIL LTDA. **Processamento de sucata eletrônica**. V Seminário Internacional Sobre Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos – 18 e 19 de agosto de 2016, Recife, Pernambuco, Brasil.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Waste Crime – Waste Risks: Gaps in Meeting the Global Waste Challenge**. 2015. Disponível em: <<http://www.grida.no/publications/rr/waste-crime/>> Acesso em: 02 jul. de 2017.

UNEP. UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Recycling – From E-Waste to Resources**. *Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies*. July, 2009. Disponível em: <http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1192xPA-Recycling%20from%20ewaste%20to%20Resources.pdf>. Acesso em 19 jul de 2018.

UNIÃO EUROPEIA. **Directive 2012/19/UE of the European Parliament and of the Council**. Of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Official Journal L* 197, p.38-71, 2012. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&qid=1409602622577&from=EN>.Acesso> Acesso em: 10 ago. 2017.

VEIT, H.; DIEHL, T.; SALAMI, P.; RODRIGUES, J.; BERNARDES, M.; TENÓRIO, J. **Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap**. *Waste Management*. Pp 67-74. 2005.

VEIT, H.M. **Emprego de Processamento Mecânico na Reciclagem de Sucatas de Placas de Circuito Impresso**. Dissertação (mestrado). Porto Alegre: UFRGS, 2001.

VEIT, H.M. **Reciclagem de Cobre de Sucatas de Placas de Circuito Impresso**. Tese (doutorado). Porto Alegre: UFRGS, 2005.

VENTURA, E.A.C.C. **Estudos de processos físicos para recuperação de metais de placas de circuito impresso**. Dissertação (mestrado). Porto – Universidade do Porto, 2014.

VIVAS, R. de C.; COSTA, F.P. **Tomada de decisão na escolha do processo de reciclagem e recuperação de metais das placas eletrônicas através de análise hierárquica**. IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Salvador/BA, 2013.

WANG, F.; KUEHR, R.; AHLQUIST, D.; LI, J. (2013). **E-waste in China: A Country Report**. Disponível em: <http://collections.unu.edu/eserv/UNU:1624/ewaste-in-china.pdf>

WEN, X.; DUAN, C.; JIAO, H.; ZHAO, Y.; ZHOU, X.; SONG, S. **Study on metals recovery from discarded printed circuit boards by physical methods**. Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, pp 121-128. 2005.

WEN, Z.; ZHANG, C.; JI, X.; XUE, Y., 2015. **Urban Mining's Potential to Relieve China's Coming Resource Crisis**. Journal Of Industrial Ecology 10 (6) 1091-1102.

WILLIAM, J.H.; WILLIAMS, P.T. **Separation and recovery of materials from scrap printed circuit boards**. Resources, Conservation and Recycling 51 (2007) 691-709.

YAMANE, L.H. et al. **Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers**. Waste management 31 (2011) 2553-2558.

YU, J.; WELFORD, R.; HILLS, P. **Industry responses to EU WEEE and ROHS Directives: Perspectives from China**,. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, Vol. 13 (2006), No. 5, pp. 286–299

ZHANG, S., FORSSBERG, E.. Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 21, p. 247-269, 1997.

ZHOU, Y., QIU, K., 2010. **A new technology for recycling materials from waste printed circuit boards**. J. Hazard. Mater. 175, 823-828.

APÊNDICE A – PLANILHA DE CATALOGAÇÃO DOS APARELHOS

Numeração	Fabricante	Cor	Modelo	Massa total do aparelho (g)	PCI		Display/Tela		Bateria		Carcaça		Outros	
					(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
1	Positivo	Preto	YPYS500	176	16	9	96	55	41	23	20	11	2	1
2	Ztc	Preto	I9300	134	11	8	32	24	21	15	57	43	14	10
3	Apple	Preto	A1332	98	15	16	26	27	-----	-----	54	55	2	2
4	Apple	Preto	A1332	142	14	10	32	22	26	18	57	40	12	9
5	Motorola	Preto	A853	170	17	10	91	54	27	16	26	15	8	5
6	Motorola	Preto	EX245	84	22	26	17	20	-----	-----	35	42	10	12
7	Motorola	Preto	RAZRXT910	126	28	22	6	5	31	25	56	44	5	4
8	Motorola	Preto	XT920	125	27	22	26	21	33	27	37	30	1	1
9	Motorola	Preto	EXT1021	141	23	16	58	41	34	24	25	18	1	1
10	Motorola	Preto	XT1028	158	14	9	65	41	43	27	28	18	8	5
11	Motorola	Branco	XT919	125	26	21	47	38	34	27	16	13	2	2
12	Motorola	Preto	EX245	82	21	26	17	21	-----	-----	36	44	7	9
13	Sony	Branco	D2212	145	18	12	52	35	45	31	28	19	4	3
14	Sony	Branco	D2212	145	18	12	51	36	45	31	27	19	4	3
15	Sony	Preto	D2104	121	27	23	16	13	35	29	39	32	3	3
16	Sony	Preto	C2004	121	17	14	39	32	-----	-----	17	14	5	4
17	Sony	Preto	D2304	154	23	15	55	35	45	29	32	20	1	1
18	Nokia	Branco	5230-1D	114	23	20	14	13	27	24	46	41	3	3
19	Nokia	Branco	5230-1D	88	23	26	15	17	-----	-----	47	53	3	4
20	Nokia	Preto	RM-1020	118	12	10	60	51	28	24	14	12	3	3
21	Nokia	Preto	RM-1020	130	12	9	59	45	28	22	27	21	4	3
22	Nokia	Preto	70 I	91	16	17	15	17	-----	-----	59	64	2	2
23	Nokia	Preto	520.2	124	15	12	13	11	29	23	64	52	3	2

APÊNDICE A – PLANILHA DE CATALOGAÇÃO DOS APARELHOS

Numeração	Fabricante	Cor	Modelo	Massa total do aparelho (g)	PCI		Display/Tela		Bateria		Carcaça		Outros	
					(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
24	Nokia	Preto	625	165	17	10	78	47	40	24	29	18	1	1
25	LG	Rosa	LGT310	69	7	10	14	21	-----	-----	32	47	6	9
26	LG	Preto	P350F	110	27	25	25	23	27	24	30	27	0	0
27	LG	Preto	T375	96	13	13	48	50	21	22	12	13	1	2
28	LG	Preto	L3 400	108	15	14	19	18	31	28	39	36	5	4
29	LG	Preto	L4 II	136	17	13	46	34	37	27	34	25	2	1
30	LG	Preto	L4 II	135	16	12	44	33	37	28	35	26	2	1
31	LG	Preto	L7 II	119	12	10	46	39	41	35	18	15	2	2
32	LG	Preto	D618	122	13	11	46	38	41	34	21	17	1	1
33	Samsung	Preto	GT-I 9082	149	17	11	41	27	-----	-----	91	61	1	1
34	Samsung	Branco	GT-I 9082L	135	14	11	35	26	-----	-----	79	59	7	5
35	Samsung	Preto	SM -G3812B	138	11	8	28	21	37	27	53	39	8	6
36	Samsung	Azul	GT-I 9300	132	16	12	54	41	39	29	22	17	1	1
37	Samsung	Azul	GT-I 8190L	112	21	19	42	37	29	26	17	15	3	3
38	Samsung	Preto	GT-I 9000B	124	19	15	49	39	30	24	23	18	3	3
39	Samsung	Branco	GT-S7582L	120	17	14	51	43	29	24	17	14	6	5
40	Samsung	Preto	GT-I5500	104	29	28	13	13	25	24	31	30	6	6
41	Samsung	Preto	GT-I5500	102	29	29	13	13	24	24	30	29	6	6
42	Samsung	Preto	GT-S5360B	101	32	32	15	15	24	24	28	28	1	1
43	Samsung	Preto	GT-C3510	92	25	27	31	34	20	22	15	17	0	0
44	Samsung	Preto	GT-S5367	85	34	41	17	20	-----	-----	31	37	3	3
45	Samsung	Preto	GT-S5300B	73	28	39	14	20	-----	-----	30	41	0	0
46	Samsung	Branco	GT-I9192	107	15	14	37	35	34	32	18	17	3	3

APÊNDICE A – PLANILHA DE CATALOGAÇÃO DOS APARELHOS

Numeração	Fabricante	Cor	Modelo	Massa total do aparelho (g)	PCI		Display		Bateria		Carcaça		Outros	
					(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
47	Samsung	Branco	GT-S5300B	102	15	14	14	14	24	24	44	43	5	5
48	Samsung	Branco	GT-S5230	95	14	15	21	22	22	23	28	30	10	11
49	Samsung	Preto	GT-S5830C	110	19	17	45	41	27	24	19	17	1	1
50	Samsung	Preto	GT-S5830C	110	19	17	44	41	27	24	19	17	1	1
51	Samsung	Preto	SM-G130B	107	21	20	22	21	26	24	33	31	4	4
52	Samsung	Rosa	GT-I35722	105	26	25	17	16	24	23	29	28	8	8
53	Samsung	Preto	GT-S52222	97	14	14	16	16	21	22	43	44	3	3
54	Asus	Preto	A501	145	18	12	62	43	32	22	30	21	3	2
55	Wei	Preto	Y005	110	20	18	20	18	20	18	44	40	6	6
56	Sony	Preto	BA900	122	26	22	15	12	36	29	43	35	1	1
57	Asus	Preto	A501	148	17	11	45	30	36	24	45	30	4	3
58	Booster	Preto	BMP-281C	85	15	18	14	17	12	14	40	47	3	3
59	Apple	Preto	A1288	110	6	5	11	10	15	13	74	68	3	3
60	Apple	Preto	iPhone 4	127	13	10	27	21	25	20	55	43	5	4
61	Nokia	Preto	520.2	84	14	17	57	68	-----	-----	11	13	0	0
62	Nokia	Preto	RM-951	75	15	20	14	19	-----	-----	43	57	1	2
63	Nokia	Preto	RM-1020	102	12	12	59	58	-----	-----	29	28	1	1
64	Samsung	Preto	GT-S3650	95	13	14	34	35	20	21	24	25	3	3
65	Samsung	Branco	GT-S5230	78	11	14	34	43	-----	-----	23	30	8	11
66	Samsung	Preto	GT-I9070	120	12	10	56	46	31	26	19	16	2	2
67	Samsung	Preto	B100AE	118	17	14	48	40	27	23	20	17	5	4
68	Samsung	Branco	SM-G110H	108	20	19	18	17	24	23	42	39	2	2

APÊNDICE A – PLANILHA DE CATALOGAÇÃO DOS APARELHOS

Numeração	Fabricante	Cor	Modelo	Massa total do aparelho (g)	PCI		Display/Tela		Bateria		Carcaça		Outros	
					(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
69	Samsung	Azul escuro	SM-G110BIDS	108	20	19	18	17	24	23	40	37	4	3
70	Samsung	Prata	GT-S5312	101	25	24	16	15	24	24	35	35	0	0
71	Samsung	Branco	SM-G900F	96	13	14	58	61	-----	-----	21	22	2	2
72	Samsung	Azul escuro	GT-19300	96	14	15	57	60	-----	-----	21	22	2	2
73	Samsung	Azul escuro	GT-I9505	130	13	10	52	40	44	33	19	14	2	1
74	Samsung	Branco	A9300	145	13	9	27	18	24	16	78	54	2	2
75	Samsung	Branco	GTS6293T	116	16	14	18	16	26	22	54	46	1	1
76	Samsung	Preto	GT-S5367	110	16	14	17	15	25	22	49	45	3	2
77	Samsung	Preto	GT-S5360B	100	16	16	15	15	24	24	41	41	2	2
78	Motorola	Preto	MOD4D	79	22	28	9	12	-----	-----	46	58	0	0
79	Motorola	Preto	XT1506	147	25	17	22	15	41	28	54	37	4	3
80	Motorola	Preto	XT1068	152	18	12	67	44	35	23	28	18	4	3
81	Motorola	Preto	A853	161	16	10	74	46	46	28	21	13	2	1
82	LG	Vermelho	KP570q	89	16	18	14	15	19	22	38	43	3	4
83	LG	Preto	LG-E450f	102	9	9	38	37	30	30	18	17	5	5
84	LG	Preto	CK0507	107	27	25	44	41	-----	-----	33	31	1	1
85	LG	Branco	BL-54SH	128	11	9	48	38	44	34	24	19	0	0
86	LG	Preto	LG-P920h	167	15	9	93	56	29	17	28	17	1	0
87	LG	Preto	BL-54SH	141	14	10	59	42	41	29	24	17	2	1