



TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E PROCESSAMENTO MECÂNICO DE RESÍDUOS DE TABLETS

Natália Fernandes Piovezan
Matrícula: 00275676

Orientador: Prof. Dr. Hugo Marcelo Veit

Abril de 2023

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais, Zuleima e Pedro, e ao meu irmão, Enrico, que sempre me incentivaram a seguir os meus objetivos e me apoiaram durante toda a graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Hugo Marcelo Veit, pela confiança depositada em mim desde o início, pela paciência, pelo apoio e extensivo auxílio durante todo o período em que desenvolvi este trabalho.

A todos os colegas do LACOR, pela ajuda e acolhimento durante todo o período de trabalho, em especial Priscila Camargo, Jéssica Pinheiro, Marcelo Cenci, Henrique Amaral, Gustavo da Rosa Cunha, Felipe Kerpen, Lucas Schmidt, Wolmir Duarte Neto e Martin Bischoff, que me ensinaram como utilizar os equipamentos e me ajudaram nos momentos mais complicados durante os experimentos.

A todos os meus amigos, em especial à Letícia de Matos, Fernanda Leal dos Santos e Priscila Camargo por todo o apoio ao longo da graduação.

Aos meus colegas da AEL Sistemas, por toda a parceria e carinho desde que entrei como estagiária na empresa.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para o meu crescimento e trajetória ao longo da graduação, meu mais sincero muito obrigada.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura de um painel LCD. Retirada de Wang et al. ⁽²⁵⁾	19
Figura 2: Esquema de um separador eletrostático do tipo corona. Retirado de Veit, M. H. e de Souza, R. A. ⁽⁴³⁾	27
Figura 3: Fluxograma do processo de caracterização e reciclagem.....	28
Figura 4: Moinhos (a) Rone e (b) Retsch utilizados durante a etapa de cominuição.	30
Figura 5: Peneira de 500 mm utilizada para etapa de separação granulométrica....	31
Figura 6: Etapa de digestão ácida em água-régia.....	32
Figura 7: ICP-OES utilizado na análise das frações digeridas em água-régia, Agilent Technologies, modelo 5110.	33
Figura 8: FRX modelo Niton xL3t, utilizado na análise das frações sólidas.	33
Figura 9: Separador eletrostático modelo Inbras Eriez ESP-14/O1S.	35
Figura 10: Tablet mais antigo coletado - iPad modelo A 1219.	36
Figura 11: Tablet mais atual coletado – Genesis modelo GT7326.....	36
Figura 12: Gráfico representando todas as marcas de Tablets recebidos durante a coleta das sucatas.....	37
Figura 13: Gráfico representando as duas marcas de Tablets mais presentes na coleta realizada.	37
Figura 14: PCI e display de um tablet Samsung.	38
Figura 15: PCI e display de um tablet Apple.	38
Figura 16: Amostras sólidas obtidas no filtro após ensaio de digestão ácida.....	40
Figura 17: Soluções de água régia e alíquotas das amostras após a digestão ácida para (a) PCIs e (b) displays.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Peso e porcentagem das unidades básicas (PCIs e displays) em relação às amostras inteiras.	38
Tabela 2: Peso das unidades básicas após a etapa de cominuição.....	39
Tabela 3: Análise química, por FRX, das amostras sólidas obtidas do filtro após a digestão ácida de PCIs e Displays para os 3 modelos de Tablets e para as 2 frações granulométricas.....	40
Tabela 4: Análise química, por ICP-OES, das amostras líquidas obtidas após a digestão ácida de PCIs para os 3 modelos de Tablets e para as 2 frações granulométricas.....	41
Tabela 5: Peso das amostras de tablet separadas para a rota de reciclagem.	44
Tabela 6: Análise de FRX externa e interna da carcaça de alumínio.	44
Tabela 7: Peso das amostras condutoras (C), mistas (M) e não condutoras (NC)...	45
Tabela 8: Resultados da análise de FRX para as amostras condutora e mista, separadas eletrostaticamente.	46
Tabela 9: Resultados da análise de FRX para a fração não condutora.....	47

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

REEE – Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

NIMS – *National Institute of Materials Science*

NSC – *National Safety Council*

PCBs – Policlorobifenilos

TIC – Tecnologia da Informação e de Comunicação

NFC – *Near Field Communication*

AR – *Augmented Reality*

PCIs – Placas de Circuito Impresso

LCD – *Liquid Crystal Display*

ITO – *Indium Tin Oxide*

PBDEs – Éteres difenílicos polibromados

PBBs – Bifenilos polibromados

Cr VI – Cromo hexavalente

DEHP – Bis(2-Etilhexil)ftalato

BBP – Dibutil ftalato

DIBP – Diisobutil ftalato

TPP – Fosfato de trifenila

PAHs – Hidrocarbonetos aromáticos

PCDs – Dioxinas policlorinadas

HCl – Ácido Clorídrico

HNO₃ – Ácido Nítrico

H₂SO₄ – Ácido Sulfúrico

FRX – Análise por Fluorescência de Raios X

ICP OES - Espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado

F1 – Fração granulométrica com tamanho de grão inferior a 0,5 mm

F2 – Fração granulométrica com tamanho de grão superior a 0,5 mm e inferior a 1 mm

RESUMO

O consumo de equipamentos eletrônicos cresce a cada ano devido às constantes atualizações, seja na aparência, seja na funcionalidade (maior rapidez, espaço, resolução, etc) ou ainda no tipo de equipamento (computadores, celulares, tablets, etc). Apesar disso, o tempo de vida útil desses equipamentos somado ao descarte e reciclagem incorretos não acompanham o crescimento acelerado do seu consumo. Os resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) são os que mais crescem no mundo todo, sendo considerados um fardo para os países que mais os consomem, no lugar de uma opção economicamente viável para a recuperação de metais preciosos ao contrário da extração primária. Isso pode ser observado principalmente no caso de equipamentos mais atuais, como os tablets, que começaram a ser produzidos em meados de 2010 e por esta razão não possuem tantos estudos quanto a sua caracterização, reciclagem e recuperação. O objetivo deste trabalho foi a caracterização dos materiais e o estudo de uma rota de reciclagem para concentração de metais presentes em tablets obsoletos. Foi realizada uma coleta a partir de uma campanha nas redes sociais, em que foram obtidas mais de 30 amostras de tablets obsoletos. Em seguida, foram escolhidos e desmontados três modelos das marcas mais representativas, para que se pudesse seguir com as etapas de caracterização das unidades básicas (PCIs e displays). Foi feita a cominuição das unidades básicas, seguida pela digestão ácida em água régia, com razão sólido:líquido de 1:20, por 2h, a 60°C. Os resultados foram obtidos através da análise em ICP para as soluções e em FRX para a fração sólida. Já para a rota de reciclagem, foram escolhidos seis tablets, que foram desmontados e cominuídos até partículas abaixo de 1 mm, para seguir com a separação eletrostática. Os resultados da caracterização mostram que a digestão ácida foi eficiente para a detecção e quantificação de Al, Ag, Au, Cu, Fe e Ni. Já a análise em FRX das frações não digeridas em ácido apontam grande quantidade de Si e Ca, como era esperado. Para a separação eletrostática, foram obtidas frações condutoras e mistas com uma grande concentração de Al (mais de 95%), visto que a maioria dos tablets possuíam carcaças internas feitas do metal.

Palavras-chave: REEE; Tablets; Caracterização, Processamento Mecânico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS.....	12
	2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
	2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
	3.1 REEE.....	13
	3.2 TABLETS.....	15
	3.2.1 Composição das Placas de Circuito Impresso	17
	3.2.2 Composição dos Displays	18
	3.3 GESTÃO E LEGISLAÇÃO PARA OS REEE	20
	3.4 PROCESSOS DE RECICLAGEM.....	22
	3.4.1 Pirometalurgia	22
	3.4.2 Hidrometalurgia.....	23
	3.4.3 Processamento mecânico	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	27
	4.1 COLETA E SEPARAÇÃO POR MARCA E MODELO	29
	4.2 DESMONTAGEM, PESAGEM E IDENTIFICAÇÃO.....	29
	4.3 CARACTERIZAÇÃO	29
	4.3.1 Cominuição e separação granulométrica	29
	4.3.2 Digestão ácida	31
	4.4 PROCESSAMENTO MECÂNICO.....	34
	4.4.1 Pré-tratamento mecânico	34
	4.4.2 Separação eletrostática.....	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
	5.1 COLETA E SEPARAÇÃO POR MARCA E MODELO	35
	5.2 DESMONTAGEM, PESAGEM E IDENTIFICAÇÃO.....	37
	5.3 CARACTERIZAÇÃO	39
	5.3.1 Cominuição e separação granulométrica	39
	5.3.2 Digestão ácida	39
	5.4 PROCESSAMENTO MECÂNICO.....	44
	5.4.1 Pré-tratamento mecânico	44
	5.4.2 Separação eletrostática.....	45

6	CONCLUSÕES	48
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

A popularização da internet ajudou a impulsionar a venda dos computadores e celulares. Desde a década de 90, equipamentos eletrônicos de uso pessoal estão entre os mais consumidos no mundo, com projeções de aumento a cada ano, devido à produção de novos e mais sofisticados equipamentos, como os celulares que evoluíram para smartphones, e computadores de mesa que foram deixados de lado por notebooks. Entretanto, o descarte correto dos equipamentos antigos não acompanha a produção e consumo acelerados de novos equipamentos. Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) são o tipo de resíduo que mais cresce no mundo.^{(1),(2),(3)}

São toneladas de lixo eletrônico por ano, com estimativa de crescimento em até 70 toneladas métricas no mundo, até o ano de 2024. Alguns dos motivos que levam ao descarte desses equipamentos é a obsolescência programada - isso quando o equipamento consegue chegar ao final de sua vida útil. Outros motivos incluem a aparência, maior rapidez quando comparado a novas tecnologias e menor espaço de armazenamento de dados.^{(2),(3),(4)}

Os REEE possuem uma composição variada de polímeros, cerâmicos, metais nobres e tóxicos, prejudiciais ao meio ambiente e à saúde pública. Por ser muito acelerado, o crescimento do descarte desses equipamentos ajuda a tornar sua reciclagem difícil, não somente devido aos cuidados que devem ser tomados dentre as diferentes técnicas que podem ser empregadas durante a gestão desses resíduos, mas principalmente pelo pouco conhecimento da população a respeito de como deve ser realizado o descarte e a coleta.^{(2),(5),(6)}

A coleta e separação realizada de forma errada pode resultar em problemas ambientais e de saúde pública ao misturar dois materiais diferentes em um processo pirometalúrgico, por exemplo. O meio ambiente e a atmosfera podem ser contaminados com os gases perigosos provenientes da queima de polímeros presentes nesses equipamentos. Além disso, o simples descarte de REEE no solo pode levar à lixiviação de componentes e contaminação das águas através dos lençóis freáticos.^{(7),(8)}

A falta de informação referente ao descarte, à coleta e à reciclagem leva diversos países desenvolvidos a subterfúgios para o descarte desses equipamentos, de forma a não prejudicar ainda mais o ambiente. O tráfico de resíduos eletrônicos de

países com alto Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e Produto Interno Bruto (PIB) para países subdesenvolvidos tornou-se comum, criando vários cemitérios de lixo eletrônico, como em países africanos, do leste asiático e até mesmo no Brasil. Pensando nesse problema, foi realizada a Convenção de Basiléia, que entrou em vigor em 1989, com objetivo de proibir e rastrear resíduos sólidos perigosos ou que prejudiquem o meio ambiente, a saúde pública e animal.^{(9),(10)}

Além de problemas relacionados a resíduos perigosos, a falta de caracterização e gestão para uma reciclagem correta também leva a grandes perdas econômicas, visto que REEE possuem quantidades consideráveis de metais nobres, se comparado aos minérios dos quais tais metais são extraídos. Devido às suas propriedades físicas e químicas, como atividade catalítica, condutividade elétrica ótima e resistência à corrosão, metais preciosos são amplamente utilizados em vários setores da indústria, como eletrônica e catalisadores, consumindo mais de 90% de metais preciosos.^{(5),(6)} Para se ter uma ideia, segundo o National Institute for Materials Science (NIMS) (um dos maiores centros de pesquisa científica em materiais no Japão, com grande ênfase em síntese, caracterização e aplicações de metais), já em 2008, mais de 6800 toneladas de ouro (16% da reserva mundial) e 60000 toneladas de prata (22%), foram encontradas em resíduos urbanos no Japão, no entanto, apenas 20% desses resíduos foram reciclados de forma apropriada. Esses números chegaram a uma escala comparável às reservas naturais de países, como África do Sul quanto ao ouro e Polônia quanto à prata.^{(11),(12)}

Apesar do interesse econômico, apenas alguns países foram capazes de implementar plantas de reciclagem eficazes, como Suíça, Noruega e Suécia, este último se tornando referência mundial em reciclagem de resíduos domésticos, com 99% de aproveitamento. Entretanto, esses resultados são consequência da mudança de hábitos da população, além da implementação de pontos de coleta seletiva próximos às residências e educação a respeito de todo o processo de reciclagem do início ao fim. Por outro lado, países que possuem um alto IDH, mas também uma altíssima geração de resíduos eletrônicos, preferem transferir suas responsabilidades quanto à destinação de resíduos aos países que menos produzem e que possuem baixo IDH, como é o caso de Gana, Nigéria, Costa do Marfim e República do Congo. Os Estados Unidos, por exemplo, foi o único país industrializado com alto IDH a não ratificar a convenção da Basiléia, apesar de ser um dos que mais produzem REEE no mundo.^{(9),(10)}

Dentre os REEE há uma quantidade muito grande de diferentes tipos de equipamentos eletrônicos com aplicações, tecnologias e composições diferentes. A evolução desses equipamentos originou uma série de novas tecnologias, entre elas os tablets eletrônicos, que funcionam como dispositivos que possuem características tanto de computadores como de celulares. Considerado como um dos equipamentos mais inovadores e procurados devido à praticidade, o tablet foi um dos aparelhos eletrônicos mais consumidos há alguns anos.⁽⁴⁾ Apesar disso, diferente da reciclagem de smartphones e computadores, não há tantos estudos a respeito de tablets, seus componentes e como reciclar. Este trabalho será focado nos tablets visto a escassez de informações a respeito deste tipo específico de equipamento em contraponto a grande quantidade de unidades vendidas e posteriormente descartadas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo caracterizar os materiais presentes nos componentes de sucatas de tablets e estudar um pré-processamento mecânico.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as unidades básicas (Placas de Circuito Impresso e Displays) das sucatas de tablets quanto a sua composição;
- Estudar processos mecânicos como pré-tratamento de sucatas de tablets;
- Obter frações concentradas em metais através do processamento mecânico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 REEE

Os REEE são compostos de equipamentos danificados e/ou obsoletos dos mais variados tipos, entre eles, televisores, telefones, computadores, baterias, lâmpadas, entre outros. Nos últimos anos, os REEE (Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos) aumentaram três vezes mais rápido que a população mundial, além de crescerem 13% mais que o Produto Interno Bruto (PIB) mundial.⁽¹⁾

Segundo Franz e Silva (2022)⁽¹⁾ e Martinho et al. (2017)⁽²⁾, o descarte de resíduos eletroeletrônicos atingiu um recorde de 53,6 toneladas métricas, cerca de 5% de todo o lixo produzido pela população mundial, sendo que desse número, apenas 6,5 milhões de toneladas métricas foram corretamente tratadas, representando uma porcentagem de 17,4% do total de equipamentos eletrônicos descartados. Em outras palavras, 44,3 toneladas métricas de REEE foram descartadas de forma incorreta. A expectativa é de que a quantidade global de REEE atinja 74 toneladas métricas até 2030.

O rápido aumento de resíduos eletrônicos se deve à substituição acelerada desses equipamentos, consequência da atualização e criação de novas tecnologias. Computadores, por exemplo, possuem pouco tempo de vida útil, devido à confecção de novos programas criados por companhias de hardware e software, que aumentam a velocidade e a memória desses equipamentos a cada lançamento. Atualmente, é mais fácil e barato para as novas gerações comprar um novo aparelho eletrônico do que atualizar um que já é considerado ultrapassado.⁽¹³⁾

Em 1990, nos Estados Unidos, já existia o problema relacionado ao pouco tempo de vida dos eletrônicos da época, que mais tarde viria a se chamar de obsolescência programada. Tal como hoje, comprar novos eletrônicos é muito mais barato e conveniente para agradar as novas gerações do que aprimorar o que já está velho. Desde o ano de 1999, o National Safety Council (organização de serviço público sem fins lucrativos que promove a saúde e a segurança nos Estados Unidos) já previa uma projeção de um computador obsoleto para cada novo que fosse colocado no mercado.^{(13),(14)}

Em geral, equipamentos como computadores, telefones celulares, tablets são construídos a partir da composição de mais de 1000 materiais diferentes, entre eles

substâncias cloradas, metais, ácidos, polímeros e seus aditivos. No entanto, a maioria dos consumidores não têm noção da quantidade de materiais tóxicos presentes nos produtos que são tão utilizados na rotina, assim como também são encontrados metais nobres, presentes em maior quantidade do que a encontrada em minérios. Substâncias como mercúrio, cádmio, chumbo, cromo hexavalente, policlorobifenilos (PCBs) e substâncias que destroem o ozônio continuarão presentes nos REEE por muitos anos, além de serem parte de uma grande preocupação durante a fase de gestão de resíduos eletrônicos, devido a sua reciclagem não ser efetuada em nível suficiente.^{(13),(15),(16)}

Segundo Martinho et al. (2017)⁽²⁾, o uso de smartphones e tablets também é crescente no mundo todo, tornando-se itens de interesse para reciclagem por possuírem em sua composição matéria-prima crítica e valiosa, além de que seus processos de reciclagem podem ser de natureza nociva para o meio ambiente e a saúde pública. A diretiva da REEE⁽³⁾ constata que a coleta seletiva é necessária para se atingir um nível de proteção da saúde humana e do meio ambiente, além de recuperar materiais economicamente interessantes. Para os resíduos eletrônicos, é necessário que sejam criadas instalações adequadas para sua coleta, além de pontos de coleta públicos e de fácil acesso para a população consumidora entregar seus resíduos eletrônicos. Caso a reciclagem não seja realizada de forma correta e a uma velocidade equivalente ao descarte desses equipamentos, as substâncias presentes neles permanecerão por muitos anos no ambiente.^{(16),(17)}

O mau descarte desses equipamentos eletrônicos pode causar graves riscos ao meio ambiente e à saúde pública, devido a metais tóxicos e perigosos, presentes na composição desses equipamentos, como mercúrio, berílio e chumbo (Nações Unidas, 2021). Além disso, a má gestão dos resíduos também pode causar perda de recursos valiosos, devido a presença de metais nobres nesses equipamentos, como ouro e prata, além dos metais considerados críticos. Matérias-primas críticas, em especial as Terras Raras, são materiais economicamente significativos para a sociedade, que apresentam grande risco de escassez para determinado país/região. Atualmente, esses materiais estão mais presentes em alguns países apenas, entre eles a China, que é o principal fornecedor de terras raras, antimônio, bismuto, magnésio, entre outros.^{(17),(18)}

O desenvolvimento de tecnologias inovadoras faz com que os novos eletroeletrônicos sejam mais funcionais ao utilizar uma quantidade cada vez maior de

metais, especialmente metais críticos ou preciosos. Tanto em países desenvolvidos quanto em países de economia emergente, a adesão a um estilo de vida moderno afeta a demanda por esses tipos de metais para a fabricação de eletrônicos, aumentando a extração primária dos metais na crosta terrestre e, conseqüentemente, a escassez dos mesmos, além de aumentar as restrições geopolíticas entre os países.^{(18),(19)}

Além disso, não há legislação clara e incentivos para recuperação de materiais específicos, como a matéria prima crítica. Um estudo realizado na França, por Horta et al. (2020)⁽²⁰⁾, constatou que telas feitas de tubos de raios catódicos possuíam uma taxa de coleta de 68%, enquanto que displays de tela plana possuíam taxa de coleta de apenas 14%, sendo estes os maiores concentradores de metais críticos entre os dois componentes. Devido aos metais de maior quantidade estarem mais presentes em telas de tubo de raio catódico, como cobre, outros componentes com metais críticos em maior concentração, ainda que em quantidades muito menores, acabam não sendo prioridade durante a coleta de resíduos eletrônicos. Elementos com as maiores taxas de reciclagem são metais base como cobre (28%), seguido de metais preciosos como prata (23%) e ouro (13%).

3.2 Tablets

Os tablets, assim como os celulares e smartphones, são classificados como equipamentos de tecnologia da informação e de comunicação (TIC)⁽³⁾. Há 10 anos atrás, o tablet foi considerado um dos equipamentos eletrônicos mais inovadores e procurados no mercado, principalmente devido ao crescimento acelerado de aplicativos para celulares.⁽⁴⁾

Alguns dos avanços que levaram os tablets a esse patamar na época foram a transferência de energia wireless e a tecnologia de Comunicação por Campo Próximo (Near Field Communication ou NFC), reconhecimento de imagem e realidade aumentada (AR). A partir dessas aplicações, buscou-se uma comunicação a nível de perfeição, com dispositivos e objetos de comunicação externos, de forma a aumentar a produtividade dos usuários. As previsões eram de que tablets seriam dispositivos pequenos, portáteis e práticos, que combinam as funções de um celular e de um computador, fornecendo o melhor dos dois mundos.⁽⁴⁾

Entre todos esses avanços, o mais esperado era a promessa do uso de baterias com ciclo de vida infinito, através da função de transferência wireless. Infelizmente, assim como os computadores e smartphones de hoje, os tablets possuem um tempo de vida curto e programado de fábrica - a chamada obsolescência programada - sendo esse um dos principais motivos para descarte desses dispositivos. Além disso, deve-se levar em conta motivos como estética, novas tecnologias no mercado, além do espaço no dispositivo, que incentivam à troca desses equipamentos por parte dos clientes.⁽⁴⁾

As vendas da área de informática, principalmente de notebooks, cresceram no ano de 2020, em comparação a outros setores que sofreram diminuição nas vendas, devido à pandemia do Covid-19, em que surgiu uma maior necessidade de se atender às demandas de home office e ensino à distância. Esse comportamento se repetiu para o ano de 2021, havendo um aumento de 78% quando observado o crescimento do consumo desses eletrônicos para os dois anos, em relação a 2019. Estima-se que por conta desse aumento acelerado, a tendência é de diminuição no consumo para eletrônicos em geral, com recuo de 6% no mercado de notebooks (6,6 milhões de unidades). No caso dos tablets, as vendas atingiram em torno de 6,7 milhões de unidades para o ano de 2021, havendo uma diminuição em 31% no ano seguinte. O esperado é que a atividade da área de informática diminua o ritmo de vendas entre os anos de 2022 e 2023, de forma a atingir um crescimento mais linear posteriormente.⁽¹⁹⁾

As informações a respeito do comportamento do consumo de eletrônicos de uso pessoal sugerem um tempo de vida em torno de 3 anos para smartphones e tablets, corroborando com os estudos feitos por Yin et al. (2014), que reportou o mesmo tempo médio de vida para celulares, Chi et al. (2014) com 2,8 anos para celulares e 4,7 anos para laptops e Golev et al. (2016), entre 2,0 e 2,6 anos para telefones celulares. A principal razão para a troca de smartphones é a quebra desses dispositivos, segundo os estudos citados, sendo a estética e as funcionalidades desatualizadas a segunda razão principal para a troca. Em um estudo exploratório realizado em Portugal, pode-se observar que a quantidade de smartphones é muito maior do que a quantidade de tablets, com cerca de 3,34 smartphones por pessoa contra 1,06 tablets por pessoa. O comportamento de cidadãos portugueses em relação ao consumo e descarte de smartphones é muito similar ao de tablets, em que muitos preferem deixar os eletrônicos em casa ou doar para conhecidos e amigos, já que não possuem conhecimento a respeito de práticas ou iniciativas de reciclagem.⁽²⁾

Esse crescimento do mercado de tablets e outros eletrônicos portáteis, combinado ao aumento do consumo, preocupa as autoridades ambientais quanto aos impactos que o descarte desses aparelhos pode causar no meio ambiente e na saúde pública. Companhias como a Dell (Stutz, 2011) e Apple têm reportado maior impacto quanto ao consumo dos tablets, já que as emissões provenientes desses aparelhos fazem parte de alguma das etapas do seu processo produtivo, mas sem identificar em qual etapa específica, como produção, transporte, uso e reciclagem.⁽²¹⁾

É de suma importância entender o impacto ambiental desses dispositivos para o setor de Tecnologia da Informação e da Comunicação (TIC) a nível global. Os componentes presentes em tablets que mais apresentam incertezas em relação às emissões de gases do efeito estufa são o display e os impactos do processo de manufatura dos circuitos integrados, seguidos pela produção das carcaças dos dispositivos e das baterias. Além disso, as duas principais unidades básicas citadas possuem uma grande quantidade de metais de interesse, como terras raras no caso dos displays, e metais nobres (ouro, prata, cobre etc.) no caso de placas de circuito impresso.⁽²²⁾

3.2.1 Composição das Placas de Circuito Impresso

Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) normalmente contêm elementos valiosos e que podem ser recuperados, incluindo aqueles que possuem maior valor de mercado, como cobre e ouro. Geralmente, as placas de circuito impresso (PCI) recebem grande parte desses metais nobres. Fabricadas em larga escala em todo o mundo, concentram 10 vezes mais metais preciosos do que os minérios de maior concentração encontrados na natureza. Por esta razão, placas de circuito impresso (PCIs) já foram referidas como um “recurso mineral urbano”. Segundo Z. Xu e Y. He (2015), a PCI de um computador pessoal pode chegar a conter 80 g/t de Au, uma quantidade muito maior do que as encontradas em algumas minas de ouro.⁽²²⁾ Por conta da quantidade de metais preciosos contida nas PCIs de equipamentos já obsoletos, elas se tornam importantes do ponto de vista estratégico e econômico, sendo classificadas como um dos componentes mais importantes dentro dos REEE.^{(11),(18)}

A composição exata das PCIs depende da localização, do ano e do tipo de aplicação nas quais serão utilizadas, mas a sua composição média é de 30 a 40% de metais,

sendo a composição restante de não metais (cerâmicos, vidros e polímeros). A fração metálica normalmente possui metais como cobre (20%), ferro (8%), estanho (4%), níquel (2%), chumbo (2%), zinco (1%), prata (0,2%), ouro (0,1%) e paládio (0,005%).⁵
(23)

Além da recuperação de metais nobres, ao serem reutilizadas as PCIs também podem servir como cargas em materiais compósitos. Portanto, sua reciclagem vai além da recuperação de metais nobres. Além disso, pode facilitar o desenvolvimento econômico quanto à escassez de recursos naturais.⁽⁵⁾

3.2.2 Composição dos Displays

Outro importante componente dos equipamentos eletrônicos são os displays de cristal líquido (Liquid Crystal Display ou LCD), que podem ser encontrados em televisores, computadores, telefones celulares, tablets, smartphones, entre outros equipamentos elétricos e eletrônicos. Displays de cristal líquido contribuem para o baixo consumo de energia e exibição eficaz de cores nos equipamentos em geral.⁽²⁴⁾

O LCD, assim como os eletrônicos em geral, possui uma curta vida útil, podendo durar de 3 a 5 anos se for parte de um computador pessoal e 1 a 3 anos para telefones celulares, em média. Assim, projeta-se que uma grande quantidade de produtos LCD ainda será descartada no futuro.⁽²⁵⁾

A composição dos painéis de LCD consiste em um substrato de vidro recoberto com um óxido de estanho e índio (Indium Tin Oxide ou ITO), e materiais orgânicos como filme polarizador e cristal líquido como pode ser visto na figura 1.^{(25),(26)}

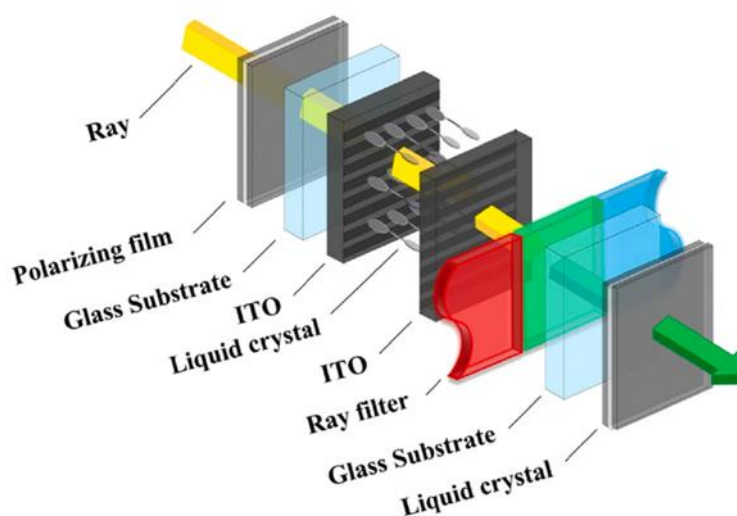


Figura 1: Estrutura de um painel LCD. Retirada de Wang et al.⁽²⁵⁾

A separação e recuperação de cada parte é difícil e problemas ambientais podem ser causados caso o tratamento adequado não seja realizado da forma correta, devido à presença de metais tóxicos, retardantes de chama e até mesmo o cristal líquido, que deve ser removido antes de qualquer tratamento. De acordo com a diretiva ROHS 2002/95/EC, telas LCD são classificadas como componentes com elementos de alto risco devido às várias substâncias tóxicas que elas contêm, como éteres difenílicos polibromados (PBDEs), bifenilos polibromados (PBBs), bem como metais tóxicos (arsênico, chumbo, cádmio, cromo, mercúrio, antimônio, bário, berílio, cobalto), além de metais economicamente interessantes (cobre, níquel, selênio, vanádio, zinco, prata e índio)^{(16),(25),(26)}. A baixa concentração de índio em LCD (em torno de 160 ppm de acordo com Amato et al.) torna sua recuperação desvantajosa do ponto de vista econômico e ambiental, sendo necessário combinar sua reciclagem com a de outras frações presentes em REEE. Apesar do grande interesse no índio, ainda há pouca informação a respeito das tecnologias que podem ser envolvidas em sua recuperação. De forma a aumentar a eficiência de extração do metal, pode ser feita a desmontagem e a classificação das telas de LCD, seguidas pelas etapas de cominuição em moinho, até a etapa hidrometalúrgica de digestão ácida, utilizando uma combinação de ácidos.⁽²⁴⁾

Atualmente a maior parte das telas LCD são recicladas com foco apenas na recuperação do índio, ignorando os materiais orgânicos, que são enviados para plantas de incineração, sendo tratados de forma ineficiente em termos econômicos.

Métodos mais eficientes são os processos hidrotérmicos e de pirólise, mas que funcionam melhor para a reciclagem do material orgânico.⁽²⁶⁾

3.3 Gestão e Legislação para os REEE

A gestão dos resíduos eletrônicos é adequada quando consegue assegurar reaproveitamento e reciclagem dos resíduos de forma máxima, bem como diminuição dos materiais que não podem mais ser reciclados (rejeitos). O lixo eletrônico, quando descartado de forma incorreta, pode gerar inúmeros problemas que já foram citados, além de não ser facilmente eliminado, já que a simples queima pode liberar toxinas extremamente perigosas para a saúde humana na atmosfera.⁽¹⁷⁾ Ainda assim, a falta de um sistema de descarte, monitoramento e gestão destes resíduos tem contribuído para a manutenção de outro problema, como o tráfico de resíduos eletrônicos entre países. É necessário que exista uma regulamentação sobre o descarte de resíduos eletrônicos nos países, de forma que possam ser colocadas em prática ações para seu tratamento adequado. ^{(9),(10)}

Segundo Lourenço e Schmitt (2019)⁽⁹⁾, países subdesenvolvidos, como Gana, Haiti e até mesmo o Brasil, mantêm milhares de lixões que aceitam o depósito de resíduos, tidos como fertilizantes, mas que na realidade são cinzas de resíduos eletrônicos. A região que mais possui documentação referente aos resíduos eletrônicos descartados e que se preocupa em regulamentar estas questões é a Europa, já na África e no Centro da Ásia a legislação é inexistente. No entanto, quando a análise é feita a respeito da quantidade total de lixo eletrônico por habitante, na comparação entre países desenvolvidos e subdesenvolvidos é possível perceber maior geração de resíduos eletrônicos em países com maior IDH e PIB, enquanto que países com menor IDH e PIB geram muito menos lixo eletrônico.⁽²⁷⁾

As Américas, por exemplo, geraram 13,3 kg/habitante (13,1 Mt) de lixo eletrônico em 2022, enquanto o continente europeu gerou 16,2 kg/habitante (12 Mt). A menor quantidade de lixo eletrônico gerada foi pelo continente africano, com apenas 2,5 kg por habitante. Além disso, apesar da quantidade de lixo eletrônico gerado por habitante ser maior para a Europa, a quantidade de REEE tratados de forma adequada foi de 5,1 Mt (42% do total), enquanto que nas Américas a quantidade documentada foi muito menor, com 1,2 Mt (9% do total). Ainda assim, o continente africano hospeda grandes quantidades de lixo eletrônico e isso acontece devido à

importação transfronteiriça de equipamentos novos e usados, em sua maioria ilegal, advindos da China e de países das América do Norte e Europa.^{(9),(27)}

Entre os documentos criados para regulamentar resíduos eletrônicos em geral, está a diretiva ROHS (Restriction of Hazardous Substances), que regula a fabricação, importação e distribuição de REEE na União Européia. O documento original foi criado em 2002, restringindo o uso de seis substâncias tóxicas que podem ser encontradas nos eletrônicos em geral, havendo um aumento dessa lista para onze substâncias, com a atualização do documento para ROHS 3, que foi colocado em vigor em 22 de Julho de 2019. As substâncias presentes são cádmio, mercúrio, chumbo, cromo hexavalente (Cr VI), bifenilas polibromadas (PBBs e PBDEs) e ftalatos (DEHP, BBP, DBP e DIBP). Quaisquer negócios provenientes da União Européia que envolvam a venda de produtos elétricos e eletrônicos é impactado por essa diretiva caso utilize qualquer uma das substâncias citadas.⁽¹⁶⁾

Relacionada à diretiva ROHS, está a diretiva WEEE 2002/96, que descreve medidas estratégicas para coleta, reutilização segura, reciclagem ou recuperação de equipamentos elétricos e eletrônicos que estejam no final de seu ciclo de vida, considerando que mais de 90% acabam em aterros sanitários.^{(3),(28)}

Tendo entrado em vigor no ano de 2003, a diretiva europeia WEEE foi criada com objetivo de reduzir os riscos para a saúde humana e o meio ambiente, evitando contaminações causadas pela destinação inadequada de REEE. Todo e qualquer produto eletrônico do mercado europeu deve passar pela conformidade com as diretivas WEEE e ROHS de forma a adquirir o adesivo Wheelie Bin. Esse símbolo indica que o produto em questão não deve ser descartado como resíduo não classificado, devendo ser enviado para separação, recuperação e descarte apropriado em instalações de coleta seletiva.^{(3),(16),(28)}

No Brasil, existe a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), criada em 2010 de forma a estabelecer normas para a prevenção na geração de resíduos, propondo práticas de hábitos de consumo sustentável e maneiras de contribuir com a reciclagem e reutilização dos resíduos sólidos, de forma a aproveitar tudo o que tem valor econômico e pode ser reciclado ou reutilizado, além da destinação correta de rejeitos. Fabricantes e distribuidores de produtos elétricos e eletrônicos são obrigados por lei a implementar sistemas de logística reversa a partir de produtos recuperados após o uso dos consumidores.⁽²⁹⁾

Além das leis, existem as normas e diretrizes nacionais de caráter técnico que têm por objetivo padronizar os processos de classificação, caracterização e reciclagem de resíduos sólidos. A NBR10004⁽³⁰⁾, por exemplo, classifica os resíduos em perigosos, não perigosos não inertes e não perigosos inertes, levando em consideração uma série de critérios como toxicidade, reatividade, risco à saúde pública ou meio ambiente. De forma a complementar esta norma, foi criada a NBR10005⁽³¹⁾, que trata dos métodos utilizados para realizar a lixiviação de resíduos, a NBR10006⁽³²⁾, que dispõe sobre os requisitos necessários para solubilização de resíduos sólidos e a NBR10007⁽³³⁾ que fala os requisitos para a amostragem de resíduos sólidos. Essas três normas visam classificar resíduos que não estão previstos em nenhuma das classes descritas na NBR10004.

3.4 Processos de Reciclagem

Existem diferentes rotas possíveis para a reciclagem de REEE, que incluem diversos processos/etapas como desmontagem, tratamentos mecânicos (como britagem e moagem), separação física (magnética, eletrostática e gravimétrica), lixiviação, biolixiviação, precipitação, extração (líquido-líquido ou líquido-sólido), pirólise, incineração, fundição, entre outros. Entre todos os citados, as rotas tradicionais, pirometalúrgica, hidrometalúrgica e de processamento mecânico costumam ser as mais implementadas.⁽²³⁾ Nos capítulos a seguir será feita uma breve revisão de cada uma.

3.4.1 Pirometalurgia

Atualmente, a rota pirometalúrgica é a escolha mais comum para recuperação de metais presentes em resíduos eletrônicos⁽²³⁾, principalmente com objetivo de recuperar metais não-ferrosos, bem como metais preciosos presentes em componentes eletrônicos em geral. Processos pirometalúrgicos podem incluir incineração, fundição em forno de arco a plasma ou alto-forno, pirólise, sinterização, fusão e reações em fase gasosa a altas temperaturas. Em geral, além da rota pirometalúrgica é realizado um pré-tratamento mecânico nas amostras, de forma a melhorar os resultados^{(5),(34)}.

Um estudo realizado por Khanna, et al. (2020)⁽³⁵⁾ comparou os efeitos do processo de tratamento térmico em forno horizontal a 850°C em atmosfera inerte, por

15 minutos, e posterior caracterização dos resíduos da pirólise em dissolução por água régia entre duas frações de amostras de PCI presentes em vários resíduos eletrônicos (telefones celulares, placas-mãe, fontes de alimentação, entre outros). Na primeira fração, as amostras foram cominuídas em moinhos e na segunda fração foram cortadas em pedaços pequenos. Os resultados foram parecidos entre as duas frações para recuperação de cobre (F1: 27,6% em peso; F2: 26,3% em peso), já para metais preciosos, a recuperação foi mais eficiente para ouro e titânio na primeira fração, enquanto que na segunda fração a prata, o paládio e a platina foram recuperados de forma mais eficiente.

O processo de pirólise também pode ser utilizado para a remoção e reciclagem do cristal líquido e do fosfato de trifênila (TPP – utilizado como retardante de chama) presente nas telas de LCD, como forma de evitar problemas durante o processo de recuperação do metal índio, além de ser um processo ambientalmente amigável. A questão é que os materiais orgânicos, incluindo os filmes polarizadores e o cristal líquido estão colados juntos ao filme de ITO, tornando complicado o processo de separação entre eles e interferindo na recuperação de índio. Resíduos de painéis de LCD são normalmente incinerados diretamente para reciclagem de metais, sendo esse um processo perigoso para o meio ambiente devido à emissão dos hidrocarbonetos aromáticos (PAHs), bifenilas policlorinadas (PCBs) e dioxinas policlorinadas (PCDs), que podem ser encontradas nos resíduos de cinzas.⁽²⁷⁾

Wang et al. (2021)⁽³⁶⁾ utilizou resíduo de carbono pirolítico como agente redutor em painéis de LCD descartados durante o processo de pirólise em forno a vácuo. O processo para gerar resíduo de carbono chegou a 26,42% em peso a uma temperatura de 350°C, com taxa de aquecimento de 2°C/min, vazão de nitrogênio a 0,05 L/min e tempo de 120 min. Durante o processo a taxa de redução do índio chegou a 99,92% sem adição de agente redutor.

3.4.2 Hidrometalurgia

A hidrometalurgia é outra rota muito utilizada na recuperação de metais preciosos a partir de REEE, sendo suas etapas principais uma série de lixiviações ácidas e cáusticas dos materiais sólidos analisados. Nas etapas subsequentes, as soluções obtidas podem passar por processos de separação e purificação, como precipitação das impurezas ou do metal de interesse, extração por solvente, adsorção

e troca iônica para isolar e concentrar os metais de interesse. As soluções então podem ser tratadas através de redução química ou cristalização para recuperação de metais⁽⁵⁾ ou ainda serem enviadas para uma rota eletrometalúrgica.

A rota hidrometalúrgica possui vários parâmetros ao longo de seu processo, como tamanho de partícula, tipo de solução lixiviante, concentração da solução, temperatura, pH, razão sólido:líquido, agitação e potencial redox, que controlam a cinética do processo. No caso de metais considerados críticos, vários estudos foram publicados (Li, et al. (2011); Dodbiba, et al. (2012); Silveira, et al. (2015); Savvilotidou, et al. (2015))⁽³⁷⁾ a respeito de diferentes soluções como ácidos individualmente (HCl, HNO₃ e H₂SO₄) na lixiviação de índio presente em telas de LCD, por exemplo. Os resultados apontam que HCl teve maior poder de lixiviação de índio do que H₂SO₄ e HNO₃ para baixas quantidades de amostra sólida.

Por outro lado, Li, et al. (2011) verificou que tanto HCl quanto H₂SO₄ são capazes de lixiviar em torno de 99% de In, apesar de não haver informações a respeito da realização de um pré-tratamento. Também foi investigado o poder de solubilização do In utilizando misturas entre as soluções, em que a mistura entre HCl e HNO₃ mostrou maior capacidade de digerir a amostra quando comparado à mistura de HCl e H₂SO₄.⁽³⁷⁾

Já no caso de metais preciosos, a literatura descreve o processo hidrometalúrgico para recuperação desses metais principalmente em PCIs. Segundo Montero, et al. (2012) e Camelino, et al. (2015)⁽³⁷⁾, o consumo dos reagentes durante o processo se torna maior devido à grande quantidade de cobre presente nessas placas, o que dificulta a recuperação de metais preciosos, como prata, ouro e paládio, que aparecem em quantidades muito menores. O que fica evidente é que quanto menor o tamanho de partícula, melhor é o poder de recuperação dos reagentes para com metais preciosos, devido à superfície de contato das partículas. Além disso, é importante escolher uma solução lixiviante adequada para recuperação dos metais preciosos, já que cada solução (como cianetos, tiouréia, ácidos minerais, etc) apresenta mecanismos de digestão diferentes.

Entre as soluções possíveis, Joda e Rashchi (2012) estudaram o potencial de dissolução do HNO₃ para a prata, atingindo uma eficiência de 82,7%, utilizando 4 M de HNO₃, a 65°C durante 72 minutos. Por outro lado, Neto, et al. (2016) também obtiveram uma dissolução de 97% de prata, junto com menos de 2% de ouro utilizando apenas 2 M de HNO₃, a 50°C por durante 210 minutos.⁽³⁷⁾

Uma solução tradicionalmente utilizada para digestão de ouro é a água-régia, que consiste em uma mistura de três partes de HCl concentrado e para uma parte de HNO₃ concentrado. É uma mistura muito utilizada para lixiviação de ouro devido a sua rapidez e poder de dissolução. O ácido nítrico atua como um forte agente oxidante para formar íons Au (III), enquanto que o ácido clorídrico forma íons Cl⁻ em excesso para formação do complexo H[AuCl₄]. Assim, a solução de água régia pode extrair ouro de REEE de forma efetiva em apenas algumas horas, bem como outros metais, por exemplo rutênio, platina e ródio. Wang et al (2019) (45) realizou uma etapa de lixiviação com HNO₃ e água antes de conseguir dissolver o ouro presente em PCIs de computadores com água régia, em uma razão sólido:líquido de 1:8, a temperatura ambiente, por 8 horas. Já Park, et al. (2009) teve eficiência de 100% da recuperação de ouro utilizando uma razão sólido:líquido de 1:20, a 20°C por 3 horas.⁽³⁸⁾

3.4.3 Processamento mecânico

O Processamento mecânico também é chamado de pré-tratamento, pois na grande maioria das vezes, ele é utilizado com o objetivo de concentrar determinado material em uma fração específica, a qual será posteriormente tratada via hidrometalurgia, pirometalurgia ou eletrometalurgia. Esse pré-processamento pode incluir processos simples, como a desmontagem manual de equipamentos e/ou a trituração/cominuição destes equipamentos ou componentes. Também envolve diversos processos físicos, como separação granulométrica, por densidade, por propriedades magnéticas e condutividade elétrica.⁽³⁹⁾

O processamento mecânico pode trazer vantagens para a reciclagem de REEE, como a recuperação quase que total dos materiais que compõem os eletrônicos, incluindo polímeros e vidros. Dentre todas as possibilidades, este trabalho utilizou os processos de cominuição, separação granulométrica e separação eletrostática, que serão mais detalhados na sequência.

O processo de cominuição envolve o uso de trituradores, seguido por diferentes tipos de moinhos, a fim de reduzir o tamanho das partículas. No entanto, antes da etapa de cominuição, o mais adequado é a realização da desmontagem dos componentes eletrônicos. Um estudo realizado por Bächer, J. et al. (2015)⁽³⁹⁾, analisou o efeito do tratamento mecânico em comparação à desmontagem manual dos componentes que integram PCIs em telefones celulares. O processo, que envolveu

cominuição, separação granulométrica, magnética e eletrostática foi capaz de separar plásticos, metais ferrosos, entre outros, com uma eficiência de 85%. Ainda assim, o processo que apresentou maior qualidade quanto à separação entre os diferentes materiais foi a separação manual, pois a etapa de cominuição dos celulares, pode resultar na perda de uma grande quantidade da fração de metais preciosos dos revestimentos conectores e em componentes montados na superfície. Entretanto, o método manual sozinho não pode ser utilizado devido ao tempo e custo que devem ser investidos durante o processo de reciclagem, sendo mais adequado como uma etapa antes da cominuição.⁽⁴⁰⁾

Após desmontagem manual e cominuição, o processo mais indicado é a separação granulométrica para melhor caracterizar as amostras de interesse e obter frações concentradas em determinado material. Em um estudo realizado por Konatè et al.(2022)⁽⁴⁰⁾, foi constatado que quanto menor o tamanho das partículas cominuídas, mais eficiente seria a caracterização (partículas menores do que 1,5 mm, mais especificamente). Por exemplo, para as partículas de tamanho menor do que 0,71 mm, a caracterização dos metais presentes em componentes de PCIs se tornou mais eficiente, podendo ser melhor identificados metais preciosos como Ag, Au e Pd, bem como outros tipos de metais como Cu, Pb, Ni, Co, etc. É devido a essa caracterização que resíduos eletrônicos podem ser considerados como minas urbanas.⁽³⁹⁾ Após o procedimento de cominuição e separação granulométrica, uma alternativa é o uso da separação eletrostática.

A separação eletrostática pode ser definida como a triagem seletiva de corpos carregados ou polarizados em um campo elétrico e é considerada uma maneira eficaz e ecológica de separar metais e não-metais de REEE^{(41),(42)}, devido a grande diferença de condutividade entre eles. Tradicionalmente, usa-se o separador eletrostático corona do tipo rolo, por possuir algumas vantagens de operação como: uso em temperatura ambiente, sem geração de efluentes ou vapores e sem a necessidade de pré-tratamentos químicos ou térmicos. A figura 2 tem um desenho esquemático do funcionamento de um separador eletrostático do tipo Corona.

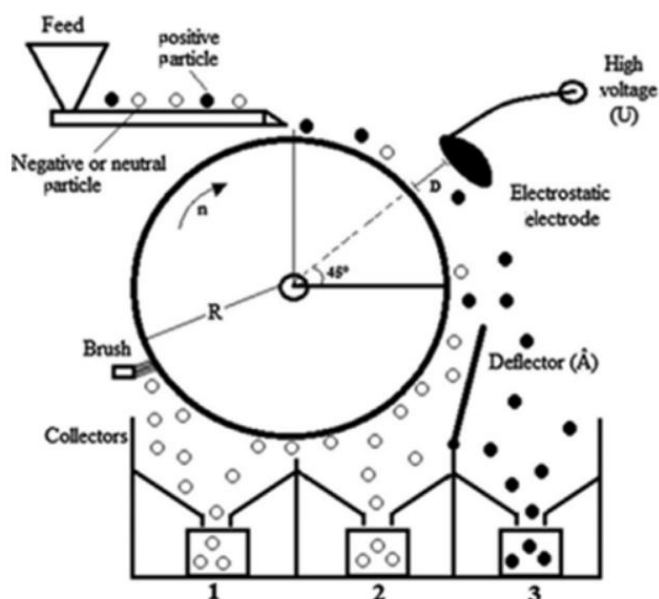


Figura 2: Esquema de um separador eletrostático do tipo corona. Retirado de Veit, M. H. e de Souza, R. A.⁽⁴³⁾

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma abaixo (Figura 3) possui, de forma resumida, as principais etapas seguidas ao longo da pesquisa. Como podemos verificar no fluxograma, após a coleta, pesagem e identificação dos tablets, houve um estudo de caracterização dos materiais e outra etapa de pré-tratamento mecânico dos resíduos visando a sua reciclagem. Todas as etapas realizadas e equipamentos utilizados foram no Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais – LACOR, do Departamento de Engenharia de Materiais.

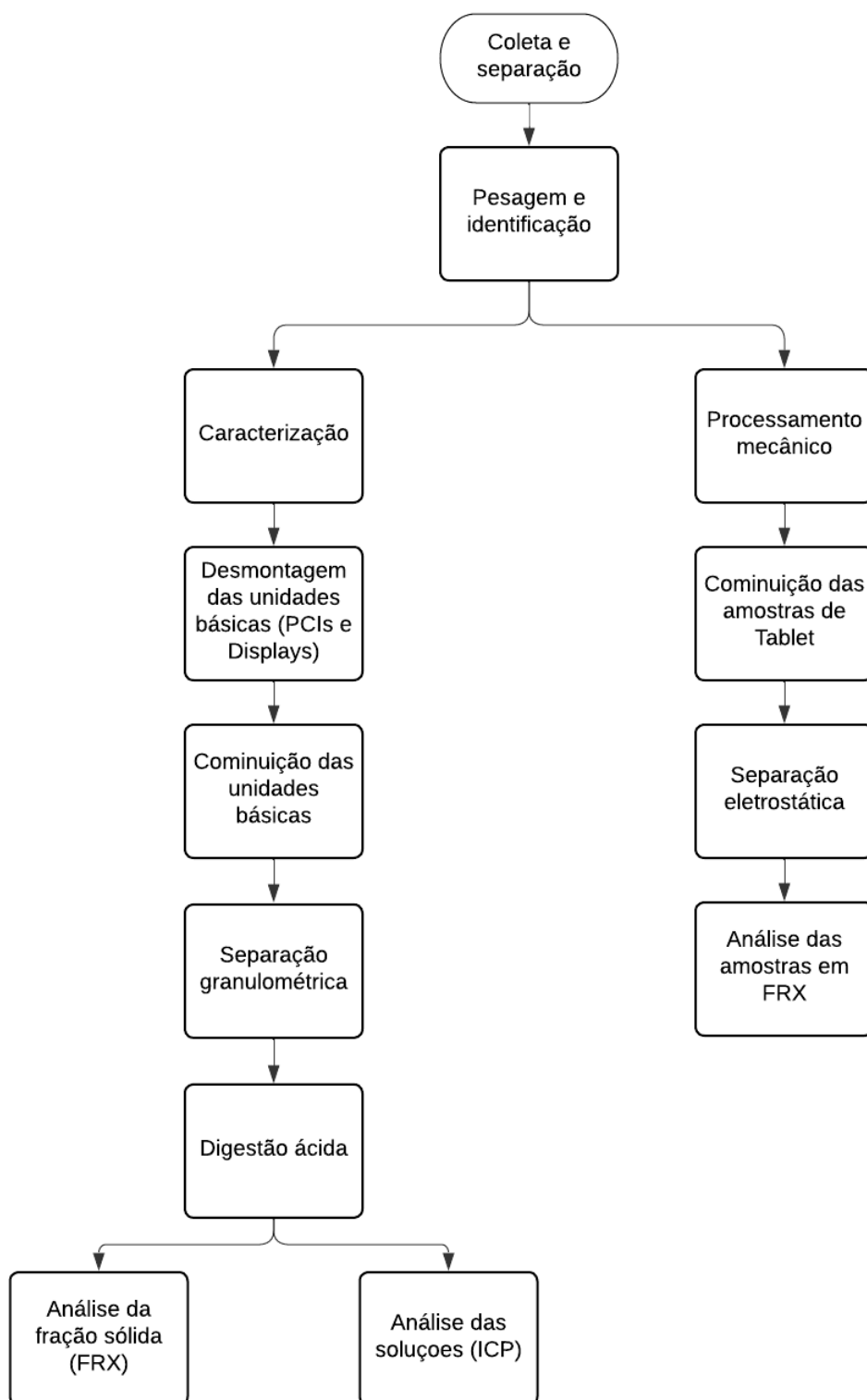


Figura 3: Fluxograma do processo de caracterização e reciclagem

4.1 Coleta e separação por marca e modelo

As sucatas de tablets foram coletadas a partir de uma campanha de doação nas redes sociais e em lojas de assistência técnica de Porto Alegre - RS. Essas sucatas pertenciam a várias marcas, modelos e anos de fabricação. Após a coleta, as sucatas foram separadas por marca e modelo e cada unidade foi pesada, antes de qualquer desmontagem.

4.2 Desmontagem, pesagem e identificação

Antes da desmontagem foram escolhidos os três modelos mais presentes no universo de tablets coletados. As sucatas escolhidas foram desmontadas manualmente e separadas em 5 componentes principais: carcaça polimérica, baterias, placas de circuito impresso, displays e outros (parafusos, alto falantes, carcaças metálicas, etc.). Após a desmontagem, foi realizada a pesagem individual de cada um dos componentes.

4.3 Caracterização

Para a etapa de caracterização, foram utilizadas apenas as placas de circuito impresso e os displays dos três modelos escolhidos. As baterias foram separadas e armazenadas no laboratório, não fazendo parte deste estudo, assim como os componentes do grupo denominado “outros” (parafusos, alto falantes, carcaças metálicas, etc.). Além disso, a caracterização focou apenas nos materiais metálicos presentes nas PCs e nos Displays.

4.3.1 Cominuição e separação granulométrica

Para que se pudesse atingir granulometrias inferiores a 1mm, foram utilizados dois moinhos de facas (como mostrado na Figura 4), como descrito abaixo:

- Moinho de facas marca Rone - moagem grosseira (partículas < 9 mm),
- Moinho de facas Retsch - moagem fina (partículas < 1 mm), realizada no moinho de facas modelo SM300.



Figura 4: Moinhos (a) Rone e (b) Retsch utilizados durante a etapa de cominuição.

Este processo de cominuição foi realizado de forma separada para as PCIs e para os displays. Foi utilizado o moinho de facas Rone para se obter as primeiras frações com granulometrias inferiores a 9 mm. Após foi utilizado o moinho de facas Retsch (Figura 4), com as peneiras de 4 mm, 2 mm e, por fim, 1 mm. Os resultados obtidos durante esta etapa, após a separação por marca e modelo, possibilitaram que o material moído fosse misturado e homogeneizado para prosseguimento da digestão ácida dos componentes moídos, na etapa de caracterização.

Após a moagem, as amostras cominuídas passaram por uma etapa de classificação granulométrica. Foram utilizados os conjuntos de peneiras do separador granulométrico da marca Bertel (Figura 5).



Figura 5: Peneira de 500 μm utilizada para etapa de separação granulométrica.

Para os componentes da etapa de caracterização, foi utilizada a peneira de 500 μm , de forma a separar o material em duas frações:

- F1 (partículas < 0,5 mm);
- F2 (partículas iguais ou > 0,5 mm e < 1,0 mm).

O procedimento consistiu em colocar todo o material moído de cada uma das amostras de PCIs e Displays, separadamente, na peneira escolhida, sob agitação manual. Essa separação pode ser útil para, após a digestão ácida, verificar em qual das duas frações os metais de interesse estariam presentes.

4.3.2 Digestão ácida

Cada uma das frações F1 e F2 de cada sucata de tablet foram separadas em três partes (triplicatas), de acordo com a unidade básica (PCI ou Display). As digestões ácidas foram feitas da seguinte forma:

- Pesagem e separação das amostras cominuídas em três frações de 5 g ou 2 g;
- Mistura de ácido clorídrico concentrado (HCl) e ácido nítrico concentrado (HNO₃), razão igual a 3:1 para formar água régia;
- Digestão das amostras em água régia (Figura 6), utilizando proporção sólido:líquido igual a 1:20, temperatura de 60°C, por 2 horas, conforme descrito por Kasper, A. (2011)⁽⁸⁾;

- Filtração para separação da fase líquida da sólida;
- Diluição das alíquotas da fase líquida e caracterização por espectroscopia de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente, utilizando ICP-OES, marca Agilent Technologies, modelo 5110 (Figura 7).
- Análise da fase sólida (o que não foi digerido) por fluorescência de raio X (FRX) (Figura 8);
- Para as análises das frações líquidas foram escolhidos os metais de maior representatividade ou maior interesse econômico.
- Os metais quantificados para PCIs foram Au, Ag, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn e Sn. Para os displays, foram Al, Ca, In, Pb, Si e Sn.



Figura 6: Etapa de digestão ácida em água-régia.



Figura 7: ICP-OES utilizado na análise das frações digeridas em água-régia, Agilent Technologies, modelo 5110.



Figura 8: FRX modelo Niton xL3t, utilizado na análise das frações sólidas.

4.4 Processamento Mecânico

4.4.1 Pré-tratamento mecânico

Após a caracterização, foram escolhidos seis tablets, três sendo da marca Apple e outros três da marca Samsung. As amostras escolhidas foram desmontadas para retirada das baterias, que não podem passar pelo mesmo processo de reciclagem do restante das unidades das amostras (carcaça, polimérica, carcaças metálicas, displays, PCIs, etc).

Os tablets foram pesados e, em seguida, cominuídos por inteiro no moinho de facas Rone e no moinho Retsch para diminuição do tamanho das partículas até granulometrias inferiores a 1 mm. As amostras moídas foram recolhidas sem distinção para a etapa seguinte de separação eletrostática.

4.4.2 Separação eletrostática

Para a etapa de separação eletrostática, foi utilizado equipamento de modelo Inbras Eriez ESP-14/O1S (Figura 9). Os parâmetros utilizados para o separador foram retirados do estudo realizado por Veit, M. H. e de Souza, R. A. (2023)⁽⁴³⁾, que encontraram os parâmetros ótimos de separação para o processamento de painéis fotovoltaicos. Considerando que há uma certa similaridade entre as sucatas de tablets e painéis, decidiu-se usar os mesmos parâmetros:

- Diferença de potencial elétrico: 38 kV e 40 kV;
- Umidade do ar: abaixo de 50%;
- Vazão de alimentação: 20%;
- Velocidade de rotação do rotor: 65 rpm e 75 rpm;



Figura 9: Separador eletrostático modelo Inbras Eriez ESP-14/O1S.

As amostras moídas foram homogeneizadas, pesadas novamente e colocadas na estufa a 60°C por 15h para retirada da umidade antes da utilização do separador eletrostático. Para o experimento, foram escolhidas duas velocidades de rotação (65 rpm e 75 rpm) e duas diferenças de potencial (38 kV e 40 kV), sendo necessário separar os tablets moídos em duplicatas de quatro amostras, o que resultou em amostras de 235 g cada, totalizando oito alíquotas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Coleta e separação por marca e modelo

Após a coleta foi obtido um total de 34 unidades de sucatas de tablets, que foram separadas por marcas e modelos para que fossem pesadas e selecionadas para desmontagem. Devido à coleta ter sido realizada através de uma campanha de doação nas redes sociais, foi possível observar uma grande variedade de marcas. Ainda assim, a maior concentração de aparelhos ficou entre as marcas Samsung e Apple. Quanto aos modelos, foi coletada uma grande quantidade de aparelhos de todas as épocas, desde o ano de 2010 até o ano de 2014 (Figuras 10 e 11).



Figura 10: Tablet mais antigo coletado - iPad modelo A 1219.



Figura 11: Tablet mais atual coletado – Genesis modelo GT7326.

Os modelos mais antigos coletados entre as marcas Apple e Samsung foram o iPad A1219, lançado em 3 de Abril de 2010. Quanto ao modelo mais recente entre os coletados, foi o tablet da Genesis, modelo GT7326, lançado em 1 de Abril de 2014.

Verificou-se que, após a separação dos aparelhos por marca e modelo, foram coletadas mais de 14 marcas e 29 modelos diferentes, conforme figura 12. Observou-se ainda que, do total de sucatas coletadas, 45,5% pertenciam às marcas Samsung e Apple, conforme mostra a Figura 13.

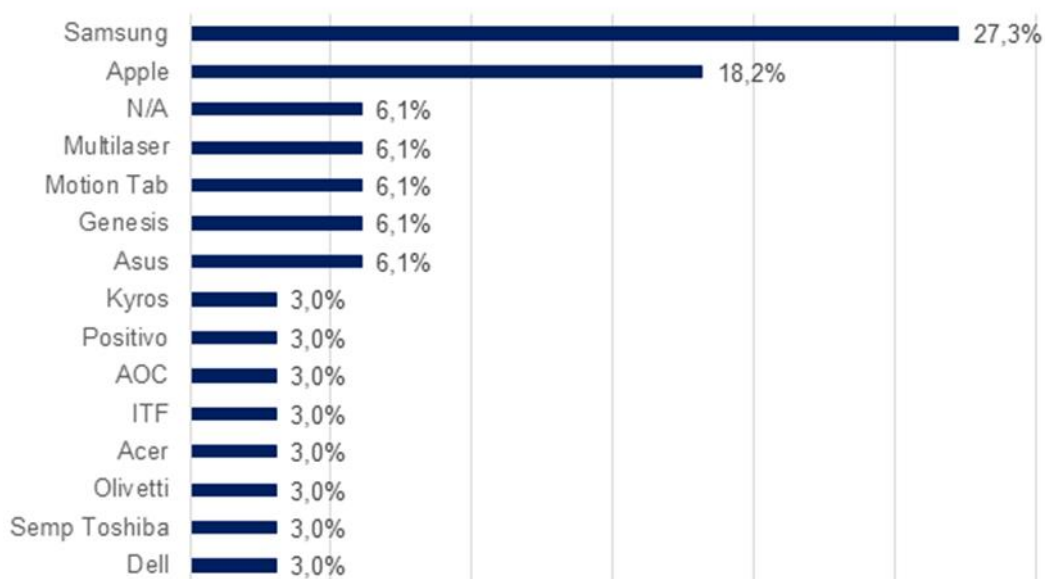


Figura 12: Gráfico representando todas as marcas de Tablets recebidos durante a coleta das sucatas.

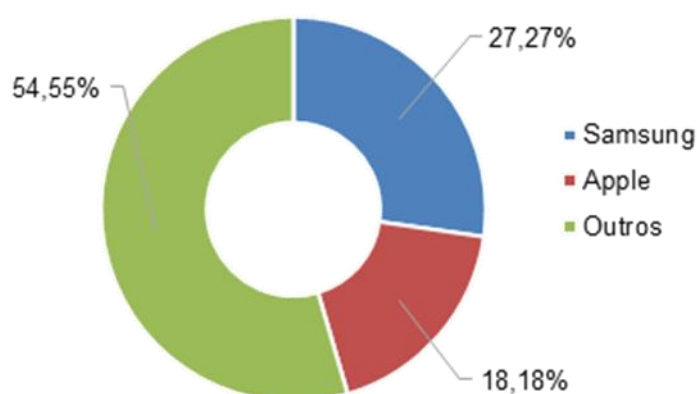


Figura 13: Gráfico representando as duas marcas de Tablets mais presentes na coleta realizada.

5.2 Desmontagem, pesagem e identificação

Para o estudo, foram selecionados 3 modelos das marcas de maior concentração obtidas durante a coleta, sendo 2 da marca Samsung e 1 da marca Apple. Foi realizada a pesagem dos três tablets e, após a desmontagem, foi feita a pesagem das unidades básicas (PCIs e Displays) conforme as figuras 14 e 15, em que as PCIs representaram, em média, 5% do peso total das sucatas e os Displays, 11,62%. As porcentagens exatas podem ser observadas na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Peso e porcentagem das unidades básicas (PCIs e displays) em relação às amostras inteiras.

Tablets		Unidades básicas				
Marca	Modelo	Peso (g)	PCI (g)	PCI (%)	Display (g)	Display (%)
Apple	A1396	605,73	21,631	3,57	60,221	9,94
Samsung	SMV110	309,65	17,693	5,71	43,955	14,20
Samsung	GT-P7510MA	567,41	31,766	5,60	60,801	10,72

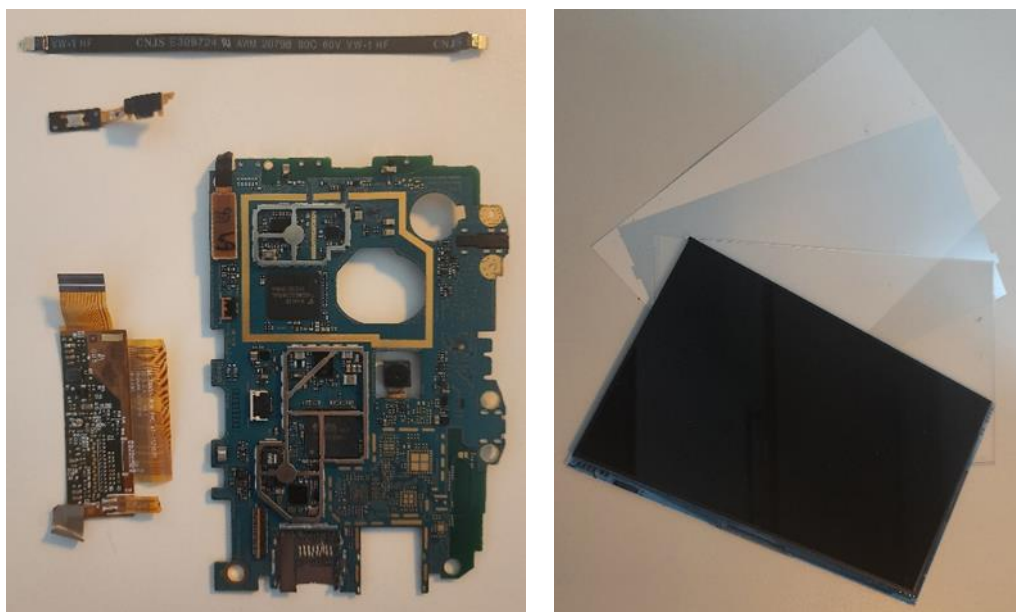


Figura 14: PCI e display de um tablet Samsung.

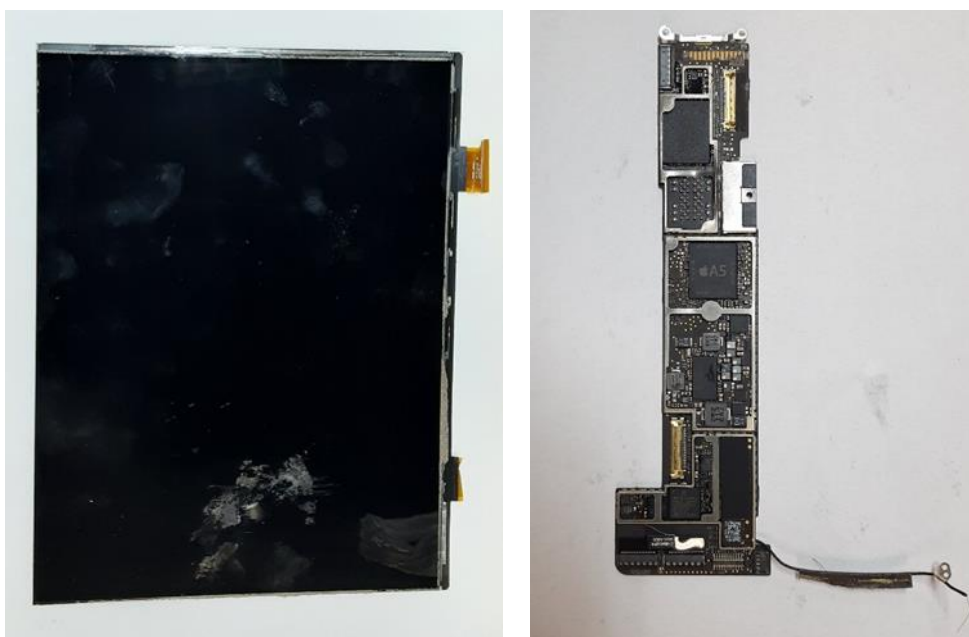


Figura 15: PCI e display de um tablet Apple.

De forma a identificar facilmente as amostras, os tablets utilizados durante a caracterização foram nomeados como Tablet 1 (Apple modelo A1396), Tablet 2 (Samsung modelo SMV110) e Tablet 3 (Samsung modelo GT-P7510MA).

5.3 Caracterização

5.3.1 Cominuição e separação granulométrica

Para a etapa de caracterização das unidades básicas, foram cominuídas aproximadamente 71,09 g em PCIs e 164,98 g em displays, como mostrado na tabela 1 acima, logo após a desmontagem das amostras escolhidas. As amostras cominuídas foram separadas entre as frações F1 e F2, com objetivo de se avaliar uma possível concentração de metais em função da granulometria, conforme a tabela 2.

Tabela 2: Peso das unidades básicas após a etapa de cominuição.

Tablets		PCI		Display	
		F1 (< 0,5mm) (g)	F2 (> 0,5mm) (g)	F1 (< 0,5mm) (g)	F2 (> 0,5mm) (g)
Tablet 1	Apple	8,635	10,346	34,0302	13,568
Tablet 2	Samsung	6,4528	5,7321	27,130	7,201
Tablet 3	Samsung	9,6328	9,091	20,863	8,241

Avaliando o balanço de massa entre o peso inicial das unidades básicas e peso final, é possível perceber uma grande perda de massa principalmente entre os displays do Tablet 1 e do Tablet 3. Essa perda pode ocorrer devido à grande quantidade de vidro presente na composição de displays em geral, ocorrendo a geração de pó de vidro durante o processo de cominuição, além das perdas de material devido às trocas de peneiras nos moinhos.

5.3.2 Digestão ácida

Após a digestão ácida, foram obtidas duas frações das amostras: fração sólida (Figura 16) e fração que foi digerida pela água régia (Figura 17). A parte sólida foi colocada para secar em estufa, para ser pesada e analisada a partir da técnica de fluorescência de raios X (FRX) (Tabela 3). A partir dos resultados da pesagem, obteve-se a fração que foi digerida pelo ácido (fração metálica) (Tabela 4).



Figura 16: Amostras sólidas obtidas no filtro após ensaio de digestão ácida.

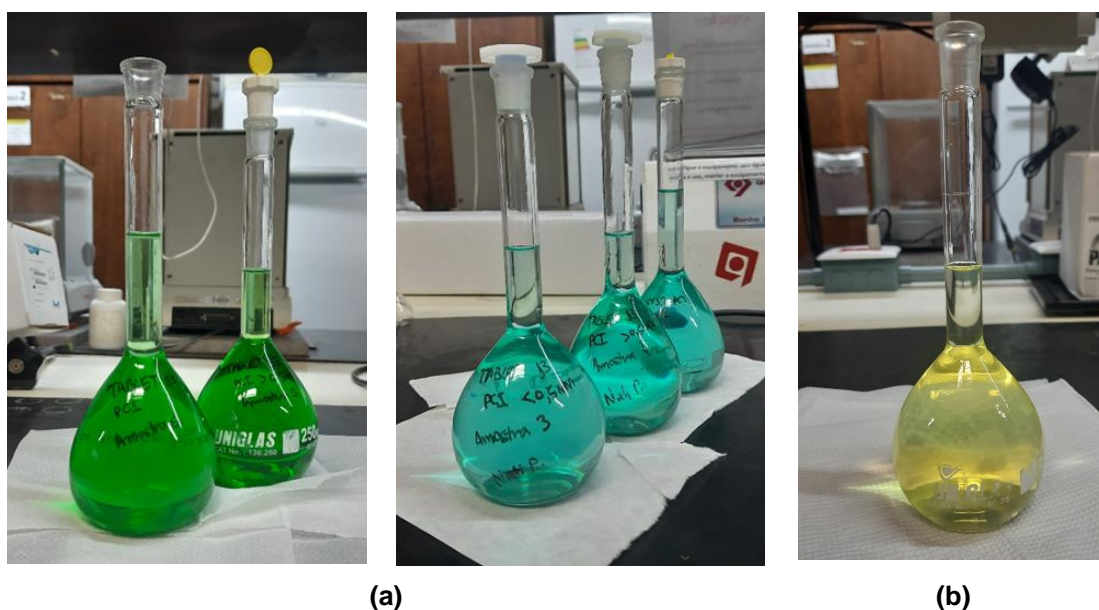


Figura 17: Soluções de água régia e alíquotas das amostras após a digestão ácida para (a) PCIs e (b) displays.

Tabela 3: Análise química, por FRX, das amostras sólidas obtidas do filtro após a digestão ácida de PCIs e Displays para os 3 modelos de Tablets e para as 2 frações granulométricas.

Elementos	PCIs					
	Tablet 1 (iPad)		Tablet 2 (Samsung)		Tablet 3 (Samsung)	
	< 0,5 mm	> 0,5mm	< 0,5 mm	> 0,5mm	< 0,5 mm	> 0,5 mm
Au	0,042%	0,025%	0,030%	0,014%	0,014%	0,024%
Ag	0,018%	0,011%	0,013%	0,009%	0,011%	0,057%
Cu	2,382%	0,203%	1,033%	0,115%	0,578%	0,256%

Si	2,44%	2,66%	0,46%	2,11%	<LOD	0,42%
Sn	15,91%	12,09%	30,84%	11,59%	29,41%	27,66%

Os resultados de caracterização da fração metálica de PCIs obtidos, observados na Tabela 4, indicam grandes quantidades de cobre, além de quantidades de ferro, níquel e metais nobres (ouro e prata), o que pode tornar a reciclagem destes resíduos economicamente interessante, visto que além do valor agregado, alguns desses metais podem ser amplamente utilizados na indústria.

Não foram encontrados dados a respeito da quantidade de metais em geral utilizados na confecção dos displays de tablets. No entanto, alguns autores como Holgersson et al. (2018)⁽⁴⁴⁾ relatam a porcentagem de fração metálica presente em PCIs de telefones celulares e smartphones, como cobre entre 22 a 40% da massa total do aparelho, o que significa um percentual entre 21% da massa da placa. Os percentuais de cobre encontrados para este trabalho foram muito superiores aos relatados nos estudos citados, o que pode ser fundamentado pelo tamanho e peso consideravelmente maiores dos tablets eletrônicos em relação a telefones celulares e smartphones. As quantidades encontradas de ouro, prata e paládio para as PCIs em smartphones foram de 2773 ppm, 1083 ppm e 55 ppm respectivamente para smartphones. Em relação aos tablets, Charles, et al. (2017)⁽⁴⁵⁾ mostra que o percentual de prata encontrado na literatura é de 0,055%, enquanto que o ouro e o paládio podem ser encontrados em quantidades de 0,044% e 0,008% em tablets, respectivamente.

De forma geral, os resultados obtidos tanto para as amostras sólidas quanto para a caracterização dos elementos presentes após o ensaio realizado no ICP, mostram que a digestão ácida foi eficiente, devido aos altos teores de metais obtidos após o ensaio, enquanto que na fração sólida os resultados obtidos após a análise por FRX apontaram pouca quantidade de metais.

Após o ensaio de ICP, para as PCIs, as frações F1 e F2 apresentaram divisão de massa de quase 50% para cada, enquanto que para os displays se obteve maior quantidade de material na F1 do que na F2 – ainda assim, a F2 não pode ser desprezada visto a quantidade de metais presentes nela. Portanto, ficou decidido que o caminho mais interessante para etapa da rota de reciclagem seria a realização da separação eletrostática logo após a etapa de cominuição das amostras de tablets inteiras.

Quanto à eficiência da digestão dos elementos, nos displays o processo foi eficiente para o alumínio, cálcio e estanho. O silício não apresentou resultados consideráveis, o que significa que grande parte ficou na amostra sólida obtida no filtro. Quanto ao índio, não foi possível detectar valores no FRX, o que significa que a quantidade presente era muito pequena. Entretanto, os resultados apontam valores negativos no ICP, o que significa que o elemento ficou fora da curva de calibração, abaixo do último ponto da curva, obtendo-se assim valores muito baixos. Isso significa que ou a digestão foi bem-sucedida, porém a quantidade presente antes do ensaio já era muito pequena e não pode ser detectada pelo ICP, ou não foi digerido e a quantidade que ficou no filtro era pequena demais para ser detectada pelo FRX. Outro motivo pode ter relação com o pré-tratamento dos displays, comentado na seção 3.3.2 deste trabalho, em que não foi utilizada uma separação minuciosa entre a o cristal líquido, os filmes polarizadores e a camada de ITO, em que se concentra o índio, o que pode ter dificultado a caracterização do elemento. Além disso, a solução de água régia utilizada pode não ser melhor escolha para digestão ácida do índio, considerando o estudo publicado por Yang, et al. (2013)⁽³⁷⁾, que mostrou que o HCl é um ótimo lixiviante para o índio encontrado em telas LCD, quando comparado ao HNO₃ e H₂SO₄. Em contrapartida, um estudo publicado por Li, et al. (2011)⁽³⁷⁾ mostrou que H₂SO₄ e HCl, quando juntos, possuem alto poder de lixiviação do índio, podendo chegar a uma eficiência de 99% de recuperação de índio em ITO. No entanto, o último estudo não apresenta informações a respeito do pré-tratamento mecânico, em relação ao estudo anterior.

O chumbo foi detectado em pequenas quantidades pela análise do ICP, como esperado, além de não ter sido detectado na análise de FRX. Considerando que as amostras caracterizadas datam do ano de 2011 (lançamento dos modelos Apple A1396, Samsung GT-P7510MA e SM-V110), este resultado pode ser explicado pela proibição da utilização da solda chumbo-estanho em equipamentos eletroeletrônicos, após a diretiva ROHS entrar em vigor não apenas na União Européia, mas nos Estados Unidos e na Coreia do Sul.⁽¹⁶⁾

5.4 Processamento Mecânico

5.4.1 Pré-tratamento mecânico

As amostras de tablet foram pesadas antes da cominuição nos moinhos, como pode ser visto na tabela 5.

Tabela 5: Peso das amostras de tablet separadas para a rota de reciclagem.

Marca	Modelo	Peso (g)
Apple	A 1396	579,26
Apple	A 1219	698,73
Apple	A 1395	603,66
Samsung	GT - P1000N	379,43
Samsung	SM - T210	299,73
Samsung	SM - V110	332,10

Os tablets foram cominuídos por inteiro, com exceção das baterias e da carcaça do tablet iPad de modelo A1219, que é feita de alumínio e por ser muito dúctil não pode ser moída, diferente das carcaças dos outros cinco tablets, que são de polímero. Após a cominuição, as amostras foram pesadas novamente, obtendo-se um total de 2,07 kg após o processamento, sendo homogeneizadas e guardadas na estufa para secagem.

A diferença de peso entre as amostras antes e após a cominuição se deu pela falta das baterias e pelas perdas resultantes do processo de cominuição nos moinhos. Outro aspecto a se levar em consideração é que todas as carcaças das amostras de tablet são de polímero, com exceção do modelo de iPad A1219, que possui carcaça de liga de alumínio. Diferente das outras amostras, a carcaça de alumínio foi separada antes da etapa de cominuição, para evitar o aumento da quantidade de alumínio no ensaio de separação eletrostática, não danificar o moinho e também para saber qual a composição da liga utilizada, conforme mostrado na tabela 6.

Tabela 6: Análise de FRX externa e interna da carcaça de alumínio.

	Elementos							
	Al	Mg	Cr	Fe	Si	Ti	Ni	Cu
Interna	95,92%	1,22%	1,11%	0,72%	0,59%	0,12%	0,11%	0,07%
Externa	96,44%	-	1,25%	0,80%	-	0,12%	0,14%	0,08%
NBRISO209	95,30%	1,35%	-	0,80%	0,60%	0,10%	-	0,05%

A análise foi realizada na parte exterior e interior (em contato com os componentes internos do tablet) da carcaça. Os resultados indicam a possibilidade do material da carcaça se tratar da liga de alumínio AA 3104, sendo uma liga muito utilizada também na fabricação de latas para bebidas.⁽⁴⁶⁾ No entanto, a liga padrão apresenta de 0,80 a 1,40% de manganês na composição, enquanto que a amostra analisada apresentou baixíssimo manganês, com 0,035% \pm 0,011. Além disso, a liga padrão não possui cromo em sua composição, diferente do material analisado, que apresenta 1,11% \pm 0,03. A origem deste teor de cromo deve ser investigada, pois sua presença em ligas de alumínio não é usual, segundo a norma NBRISO209.⁽⁴⁷⁾ Uma das possibilidades para a presença de cromo na carcaça seria em virtude do processo de anodização do alumínio.

Além do modelo iPad A1219, também foram coletados outros dois modelos de iPad com carcaça de alumínio, sendo eles o A1395 e o A1396, que foram lançados na mesma data, dia 11 de março de 2011.

5.4.2 Separação eletrostática

Após a separação eletrostática, foram obtidas três frações distintas para cada duplicata: condutora, mista e não condutora. Os pesos obtidos após o ensaio podem ser vistos abaixo na Tabela 7.

Tabela 7: Peso das amostras condutoras (C), mistas (M) e não condutoras (NC).

Amostra	Voltagem (kV)	Rotação (rpm)	C (g)	M (g)	NC (g)
1	38	75	13,340	86,525	120,570
2	38	75	11,224	98,485	108,170
3	40	75	11,863	108,276	124,919
4	40	75	11,533	93,901	120,826
5	38	65	14,221	78,912	135,935
6	38	65	12,648	79,190	139,227
7	40	65	11,959	85,841	114,678
8	40	65	11,362	103,061	116,170

De forma a caracterizar os elementos presentes nestas frações, foi realizada a análise através de FRX (Tabela 8).

Tabela 8: Resultados da análise de FRX para as amostras condutora e mista, separadas eletrostaticamente.

Amostras condutoras								
	75 rpm				65 rpm			
	38 kV		40 kV		38 kV		40 kV	
	1 (g)	2 (g)	3 (g)	4 (g)	5 (g)	6 (g)	7 (g)	8 (g)
Al	71,37%	69,92%	70,56%	72,10%	71,41%	66,32%	70,45%	79,76%
Mg	7,18%	10,40%	9,14%	7,55%	5,78%	8,34%	5,76%	9,19%
Cu	13,72%	11,23%	11,06%	10,67%	13,01%	16,26%	12,33%	6,65%
Si	4,20%	2,57%	3,54%	2,99%	5,31%	4,38%	3,09%	1,34%
Fe	1,04	1,30%	2,52%	1,18%	1,70%	1,79%	1,50%	1,56%
Sn	0,46%	0,49%	0,41%	0,19%	0,48%	0,50%	0,59%	0,23%
Ni	0,38%	0,39%	0,88%	0,26%	0,49%	0,38%	0,44%	0,13%
Ag	0,032%	0,042%	0,020%	0,0097%	0,036%	0,025%	0,021%	0,080%
Au	0,011%	< LOD	0,019%	< LOD	0,013%	0,005%	< LOD	< LOD
BAL	< LOD	20,37%	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD

Amostras mistas								
	75 rpm				65 rpm			
	38 kV		40 kV		38 kV		40 kV	
	1 (g)	2 (g)	3 (g)	4 (g)	5 (g)	6 (g)	7 (g)	8 (g)
Al	51,69%	20,81%	64,69%	48,62%	70,43%	57,35%	60,09%	17,70%
Mg	6,57%	2,85%	8,17%	3,73%	5,20%	7,04%	9,26%	17,40%
Cu	17,74%	5,68%	9,77%	9,22%	10,78%	9,23%	8,30%	5,89%
Si	6,67%	7,55%	7,02%	5,52%	6,66%	4,24%	5,61%	6,22%
Fe	1,63%	1,04%	3,26%	1,51%	2,18%	3,53%	3,18%	12,24%
Sn	1,53%	0,13%	0,64%	0,42%	1,31%	0,30%	0,43%	0,17%
Ni	0,87%	0,16%	0,49%	0,46%	0,69%	0,39%	0,42%	1,71%
Ag	0,058%	0,007%	0,057%	0,018%	0,069%	0,011%	0,016%	0,052%
Au	0,015%	0,002%	< LOD	0,004%	0,012%	0,003%	0,004%	0,006%
BAL	10,29%	59,50%	< LOD	27,86%	< LOD	15,29%	9,63%	31,02%

As amostras não condutoras foram misturadas entre si, pois as frações com materiais de interesse econômico seriam as condutoras e mistas. Portanto, foi realizado análise em duplicata (NC 1 e NC 2) de toda a fração não condutora, como mostrado na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados da análise de FRX para a fração não condutora.

	Al	Cu	Si	Mg	Fe	Sn	Ni	Ag	Au	BAL
NC 1	7,15%	0,52%	10,63%	1,15%	1,10%	0,11%	0,12%	0,011%	< LOD	74,41%
NC 2	9,39%	0,097%	10,72%	1,01%	1,46%	0,13%	0,16%	0,009%	< LOD	71,39%

Os resultados indicam que os parâmetros escolhidos para a separação eletrostática foram eficientes, pois os altos valores de alumínio encontrados para as frações condutora e mista corroboram com a quantidade de carcaça de alumínio presente dentro dos tablets. Além disso, a fração não condutora apresenta de 70 a 75% de BAL, reservada para as carcaças poliméricas, vidros de display, entre outros materiais que não são metais condutores.

6 CONCLUSÕES

Ao longo da realização deste trabalho foi possível chegar nas seguintes conclusões a respeito da caracterização e pré-processamento mecânico de tablets obsoletos:

- A caracterização dos Tablets comprovou a presença de diversos metais, alguns deles interessante economicamente, como Cu (50 – 70%), Al (13 – 33%) e Sn (12 – 31%) e outros nobres/críticos, como o Au (0,014 – 0,042%);
- Os primeiros tablets fabricados possuíam carcaças de alumínio, provavelmente da liga AA 3104, porém, foram sendo substituídos por polímeros nos anos seguintes;
- Quanto às PCIs, o processo de digestão ácida com água régia foi efetivo, visto que, como esperado, os resultados da fração sólida mostram quantidades muito pequenas de metais de interesse, em relação à fração líquida, em que foram solubilizados praticamente toda a fração metálica;
- Os parâmetros utilizados para a separação eletrostática foram efetivos, visto que os resultados demonstram que as frações condutora e mista apresentam alta concentração de metais, em especial alumínio, cobre e magnésio;
- Apesar disso, não há grande variação entre os resultados apresentados para diferentes velocidades de rotação (65 e 75 rpm) e diferentes voltagens (38 e 40 kV) utilizadas;

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma a complementar o estudo realizado durante este trabalho, sugere-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Realizar um estudo quanto ao tamanho de partícula ideal para separação eletrostática de fração condutora, mista e não condutora, de forma a diminuir ao máximo a fração mista;
- Estudar os melhores parâmetros para processamento mecânico de telas de display, além de desmontagem manual para separação das camadas de tela LCD, de forma a se obter alguma quantidade de índio durante a caracterização e recuperação;
- Estudar qual seria o melhor método de caracterização do índio, em relação às possíveis soluções que podem ser utilizadas durante a digestão ácida;
- Estudo da recuperação de alumínio presente nos tablets obsoletos, considerando a grande quantidade encontrada do metal durante o estudo;
- Realizar análise de Difração de Raios X para melhor caracterizar o silício presente em displays de tablets e estudar a possibilidade de reaproveitamento como fundente em processo de obtenção de material cerâmico;

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-
- ¹ FRANZ, N. M.; SILVA, C. L. DA. Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE): global and contemporary challenge to production chains and the urban environment. **Gestão & Produção**, v. 29, 2022.
- ² MARTINHO, G.; MAGALHÃES, D.; PIRES, A. Consumer behavior with respect to the consumption and recycling of smartphones and tablets: An exploratory study in Portugal. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, p. 147–158, 10 jul. 2017.
- ³ EUROPEAN COMMISSION. Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Disponível em: <https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee_en>.
- ⁴ KAUR, S. The Revolution of Tablet Computers and Apps: A Look At Emerging Trends. **IEEE Consumer Electronics Magazine**, v. 2, n. 1, p. 36–41, jan. 2013.
- ⁵ HUANG, K.; GUO, J.; XU, Z. Recycling of waste printed circuit boards: A review of current technologies and treatment status in China. **Journal of Hazardous Materials**, v. 164, n. 2-3, p. 399–408, 30 maio 2009.
- ⁶ CUI, J.; FORSSBERG, E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 99, n. 3, p. 243–263, maio 2003.
- ⁷ FARAJI, F.; GOLMOHAMMADZADEH, R.; PICKLES, C. A. Potential and current practices of recycling waste printed circuit boards: A review of the recent progress in pyrometallurgy. **Journal of Environmental Management**, v. 316, p. 115242, ago. 2022.
- ⁸ CRISTINA KASPER, A. CARACTERIZAÇÃO E RECICLAGEM DE MATERIAIS PRESENTES EM SUCATAS DE TELEFONES CELULARES. Dissertação de mestrado—UFRGS: [s.n.].
- ⁹ BORGES MOREIRA LOURENÇO, B.; SIQUEIRA GARCIA SCHMITT, D. A ADEQUADA REGULAMENTAÇÃO E OS EQUÍVOCOS NO DESCARTE DOS RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS NA ESPANHA: UMA ANÁLISE DE CASO A PARTIR DA REALIDADE MUNDIAL. In: **15o SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE GOVERNANÇA E SUSTENTABILIDADE UNIVERSIDAD DE ALICANTE**. 28 jul. 2020. Disponível em: <<https://periodicos.univali.br/index.php/acts/article/view/16647>>. Acesso em: 18 fev.
- ¹⁰ Basel Convention > The Convention > Overview > Text of the Convention. Disponível em: <<http://www.basel.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/1275/Default.aspx>>.

¹¹ DING, Y. et al. Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 141, p. 284–298, fev. 2019.

¹² Urban Mines. Disponível em: <<https://theolympians.co/tag/urban-mines/>>. Acesso em: 20 mar. 2023.

¹³ BRENNIMAN, Gary; HALLENBECK, William. OTHER SPECIAL WASTES Part 11E Computer and Other Electronic Solid Waste. *In*: KREITH, Frank; TCHOBANOGLOUS, George. **Handbook of Solid Waste Management**. 2^a Edição. Nova Iorque: McGraw Hill, 2002, 11.49 – 11.50.

¹⁴ BLEIWAS, D. I. **Obsolete computers, “gold mine”, or high-tech trash? Resource recovery from recycling** (T. Kelly, Ed.) USGS Index Page (html). [s.l.] **USGS Fact Sheet FS-060-01**, 2021. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/fs/fs060-01/fs060-01.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2023.

¹⁵ CLÉMENT, L.-P. P.-V. .P.; JACQUEMOTTE, Q. E. S.; HILTY, L. M. Sources of variation in life cycle assessments of smartphones and tablet computers. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 84, p. 106416, set. 2020.

¹⁶ 2022 RoHS Compliance Guide: Regulations, 10 Substances, Exemptions. Disponível em: <<https://rohsguide.com/>>.

¹⁷ KANG, H.-Y.; SCHOENUNG, J. M. Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 45, n. 4, p. 368–400, dez. 2005.

¹⁸ ZHANG, S. et al. Supply and demand of some critical metals and present status of their recycling in WEEE. **Waste Management**, v. 65, p. 113–127, jul. 2017.

¹⁹ KASTANAKI, E.; GIANNIS, A. Dynamic estimation of future obsolete laptop flows and embedded critical raw materials: The case study of Greece. **Waste Management**, v. 132, p. 74-85, 1 ago. 2021.

²⁰ HORTA ARDUIN, R. et al. Novel indicators to better monitor the collection and recovery of (critical) raw materials in WEEE: Focus on screens. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 157, p. 104772, jun. 2020.

²¹ ALCARAZ, M. L. et al. Streamlined life cycle assessment: A case study on tablets and integrated circuits. **Journal of Cleaner Production**, v. 200, p. 819–826, nov. 2018.

²² HE, Y.; XU, Z. Recycling gold and copper from waste printed circuit boards using chlorination process. **RSC Advances**, v. 5, n. 12, p. 8957–8964, 2015.

²³ HUBAU, A. et al. Recycling-oriented methodology to sample and characterize the metal composition of waste Printed Circuit Boards. **Waste Management**, v. 91, p. 62–71, maio 2019.

-
- ²⁴ AMATO, A.; BEOLCHINI, F. End of life liquid crystal displays recycling: A patent review. **Journal of Environmental Management**, v. 225, p. 1–9, nov. 2018.
- ²⁵ LI, J. et al. Recovery of valuable materials from waste liquid crystal display panel. **Waste Management**, v. 29, n. 7, p. 2033–2039, 1 jul. 2009.
- ²⁶ WANG, R.; XU, Z. Pyrolysis characteristics and pyrolysis products separation for recycling organic materials from waste liquid crystal display panels. **Journal of Hazardous Materials**, v. 302, p. 45–56, jan. 2016.
- ²⁷ BALDÉ, C. P. et al. Global Transboundary E-waste Flows Monitor 2022E-Waste Monitor. Switzerland: United Nations Institute for Environment and Research, [s.d.]. Disponível em: <https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2022/06/Global-TBM_webversion_june_2_pages.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2023.
- ²⁸ WEEE - what does the label mean, EU requirements. Disponível em: <https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/labels-markings/weee-label/index_en.htm>.
- ²⁹ Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Disponível em: <<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/politica-nacional-de-residuos-solidos-pnrs>>.
- ³⁰ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRISO10004: Resíduos sólidos: Classificação
- ³¹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRISO10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.
- ³² ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRISO10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos
- ³³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRISO10007: Amostragem de resíduos sólidos
- ³⁴ EBIN, B.; ISIK, M. Chapter 5 - Pyrometallurgical Processes for the Recovery of Metals from WEEE. In: CHAGNES, A. et al. (Eds.). **WEEE Recycling: Research, Development, and Policies**. [s.l.] Research, Development, and Policies, 2016. p. 107–137.
- ³⁵ KHANNA, R.; MUKHERJEE, P. S.; PARK, M. A critical assessment on resource recovery from electronic waste: Impact of mechanical pre-treatment. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, p. 122319, set. 2020.
- ³⁶ WANG, Y. et al. Full components recovery of organic matter and indium from discarded liquid crystal display panels. **Journal of Cleaner Production**, v. 299, p. 126862, maio 2021.
- ³⁷ SETHURAJAN, M. et al. Recent advances on hydrometallurgical recovery of critical and precious elements from end of life electronic wastes - a review.

Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 49, n. 3, p. 212–275, 17 jan. 2019.

³⁸ HUY DO, M. et al. Advances in hydrometallurgical approaches for gold recovery from E-waste: A comprehensive review and perspectives. **Minerals Engineering**, v. 191, p. 107977, jan. 2023.

³⁹ BACHÉR, J.; MROTZEK, A.; WAHLSTRÖM, M. Mechanical pre-treatment of mobile phones and its effect on the Printed Circuit Assemblies (PCAs). **Waste Management**, v. 45, p. 235–245, nov. 2015.

⁴⁰ KONATÉ, F. O. et al. Waste electrical and electronic equipments as urban mines in Burkina Faso: Characterization and release of metal particles. **Waste Management**, v. 139, p. 17–24, fev. 2022.

⁴¹ JIANG, W.; JIA, L.; ZHEN-MING, X. A new two-roll electrostatic separator for recycling of metals and nonmetals from waste printed circuit board. **Journal of Hazardous Materials**, v. 161, n. 1, p. 257–262, jan. 2009.

⁴² HADI, P. et al. Waste printed circuit board recycling techniques and product utilization. **Journal of Hazardous Materials**, v. 283, p. 234–243, fev. 2015.

⁴³ DE SOUZA, R. A.; VEIT, H. M. Study of electrostatic separation to concentrate silver, aluminum, and silicon from solar panel scraps. **Circular Economy**, p. 100027, fev. 2023.

⁴⁴ HOLGERSSON, S. et al. 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. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 133, p. 300–308, jun. 2018.

⁴⁵ CHARLES, R. G. et al. An investigation of trends in precious metal and copper content of RAM modules in WEEE: Implications for long term recycling potential. **Waste Management**, v. 60, p. 505–520, fev. 2017.

⁴⁶ MORAES DE OLIVEIRA, F. **CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA LIGA DE ALUMÍNIO AA 3104 H19 UTILIZADA NA FABRICAÇÃO DE RECIPIENTES PARA BEBIDAS**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí: [s.n.].

⁴⁷ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRISO209: Alumínio e suas ligas: Composição química.