



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

FILIPY RAMOS SILVA

**Recuperação de Metais em Placas de Circuitos Impressos
pelo Método de Carbonização**

Palmas/TO
2021

FILIPY RAMOS SILVA

**Recuperação de Metais em Placas de Circuitos Impressos
pelo Método de Carbonização**

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Ambiental para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Juan Carlos Valdés Serra

Palmas/TO
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

S586r Silva, Filipy.
Recuperação de Metais em Placas de Circuitos Impressos pelo Método de Carbonização. / Filipy Silva. – Palmas, TO, 2021.
42 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Ambiental, 2021.
Orientador: Juan Carlos Valdés Serra

1. Ciência exatas e da terra. 2. Engenharia. 3. Reciclagem De Resíduos Eletroeletrônicos. 4. Placas de Circuito de Impresso. I. Título

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

FILIPY RAMOS SILVA

Recuperação de Metais em Placas de Circuitos Impressos pelo Método de Carbonização

Monografia foi avaliada com nota de 9,5 (nove e meio) e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Ambiental para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 14/ 04/ 2021

Banca Examinadora



Prof. Dr. Juan Carlos Valdes Serra
Engenharia Ambiental
Mat. 0 92504
do Tocantins, UFT

Prof. Dr. Juan Carlos Valdes Serra- UFT
Presidente da Banca



Prof. Dr. Joel Carlos Zukowski Junior-UFT
Membro da Banca



Prof. Dr. Emerson Adriano Guarda-UFT
Membro da Banca

Palmas - TO, 2021

RESUMO

Os volumes de lixo eletrônico continuam a crescer rapidamente na maioria países sem sinais de desaceleração devido a atualizações rápidas, mudanças tecnológicas, aumento da acessibilidade, produtos com obsolescência programada e aumento do consumo de bens eletrônicos, o baixo percentual de reciclagem juntamente com a alta capacidade de poluição que esses resíduos possuem tornam a situação preocupante. Esse trabalho tem o intuito de buscar formas de recuperar os metais presentes nas Placas de Circuito Impresso utilizando a carbonização para tal, variáveis como temperatura, tempo de permanência e lixiviação foram estudadas. Os resultados mostraram que a carbonização a 700° C seguida de um banho químico em solução básica pode ser usada para concentrar os metais para posteriormente serem refinados e voltarem a cadeia produtiva.

Palavras Chave: Reciclagem, Placas de Circuito Impresso, Carbonização, Lixiviação.

ABSTRACT

Volumes of electronic waste continue to grow rapidly in most countries with no signs of slowing down due to rapid updates, technological changes, increased accessibility, products with scheduled obsolescence and increased consumption of electronic goods, the low percentage of recycling coupled with high capacity of pollution that these residues have make the situation worrying. This work aims to find ways to recover the metals present in the Printed Circuit Boards using carbonization, variables such as temperature, residence time and leaching were studied. The results showed that carbonization at 700° C followed by a chemical bath in basic solution can be used to concentrate the metals to be further refined and returned to the production chain.

Keywords: Recycling, Printed Circuit Boards, Carbonization, Leaching.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus por sempre está à frente das minhas batalhas e vitórias, muito obrigado meu Senhor. Minha família, meus pais, Djan José Silva, o homem com princípios mais sólidos do que rocha, e Valcireny Moreira Ramos, a mulher mais parceira e apoiadora que veio ao mundo, para vocês dois deixo tal agradecimento: maior legado que carrego e honrar seus respectivos nomes. Ao corpo docente da minha querida Universidade, que por muitas vezes com paciência e um empenho que só os melhores conseguem ter para continuar batalhando ano após ano. Professor Emerson que apesar de não estar na banca sempre me ajudou em tudo, professora Patrícia que me deu a oportunidade de trabalhar no LAPEQ, Fabrício e Larissa por sempre estarem dispostos, Alexandre, que de colega de laboratório se tornou um amigo, e finalmente o Professor Juan, já foi meu professor, mentor, colega de conversas e de Silvicultura no jardim do laboratório. Admiro todos vocês e serei eternamente grato pelo conhecimento repassado. Que Deus possa sempre iluminar o caminho de vocês pelo que fizeram. E pra finalizar minha banca de avaliação de conclusão, professores Moisés, o homem mais ponderado que já vi na UFT, professor Emerson, por sempre se fazer disposto para ajudar seus alunos e professor Joel, que está sempre de bom humor.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	11
2-REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1-O Lixo Eletrônico	12
2.2-Legislação Brasileira	12
2.3-Placas de Circuito Impresso	15
2.4-Estrutura da Reciclagem do Lixo Eletrônico.....	16
3-OBJETIVOS.....	18
3.1-Objetivo Geral	18
3.2-Objetivos Específicos	18
4-METODOLOGIA	19
4.1-Local da Pesquisa	19
4.2-Desmontagem.....	19
4.3-Corte	20
4.4Carbonização.....	21
4.5-Banho Químico.....	23
4.6-Characterização Química	24
5-RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1-Processamento Mecânico.....	26
5.2-Carbonização.....	27
5.3-Determinação da Temperatura ideal de carbonização.....	28
5.4-Determinação do melhor tempo de carbonização.....	31
5.5-Banho Químico.....	33
5.5.1 Em Meio Ácido	35
5.5.2 Em Meio Alcalino	37
6-CONCLUSÃO	41
7-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma do processo de reciclagem do lixo eletroeletrônico.....	19
Figura 2 - Placas utilizadas no experimento	20
Figura 3 - Recorte das amostras	20
Figura 4 - Tamanho dos recortes	21
Figura 5 - SIVOMO 250.....	22
Figura 6 - Espectrômetro por Energia Dispersiva (EDX)	25
Figura 7 - Aparelhos celulares utilizados	26
Figura 8: Reator do SIVOMO 250	28
Figura 9: Amostra 1 fotografada através de uma lupa após a carbonização.....	28
Figura 10: Amostra 2 fotografada através de uma lupa após a carbonização.....	29
Figura 11: Amostra 3 fotografada através de uma lupa após a carbonização.....	30
Figura 12: Resina restante após a carbonização da amostra 2.....	31
Figura 13: Comparação das amostras com diferentes tempos de permanência, observado com lupa	32
Figura 14: Amostras 5, 7 e 9 após o banho ácido, observado com uma lupa.....	34
Figura 15: Amostras 6, 8 e 10 após o banho químico básico	35
Figura 16: Amostras 6, 8 e 10 após o banho alcalino, observado com uma lupa.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condicionantes para implantação de tecnologias de reciclagem	13
Tabela 2 - Consumo de energia na produção primária e secundária de metais	14
Tabela 3 - Preços dos metais na bolsa de valores	15
Tabela 5 - Temperatura e tempo de permanência em trabalhos já realizados	23
Tabela 6 - Temperaturas das amostras que irão para lixiviação	23
Tabela 7: Perda de Peso pós processamento mecânico	27
Tabela 8: Comparação do peso pós carbonização	30
Tabela 9: Caracterização metálica das amostras 2 e 4.....	33
Tabela 10: Comparação peso antes e depois da lixiviação ácida	36
Tabela 11: Resultado da Lixiviação Ácida.....	36
Tabela 12: Comparação peso antes e depois da lixiviação alcalina	37
Tabela 13: Resultado lixiviação em meio básico	38

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Massa dos polímeros.....	23
Equação 2: Reação química do cobre com o ácido nítrico.....	36
Equação 3: Reação Química do níquel com o ácido nítrico.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EEE Equipamentos eletroeletrônicos

LME London Metal Exchange

PCI Placa de Circuito Impresso

PNRS Política Nacional de Resíduos Sólidos

PPGCom Programa de Pós-Graduação em Comunicação e Sociedade

REEE Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos

UFT Universidade Federal do Tocantins

1 - INTRODUÇÃO

O presente trabalho se justifica pelo crescimento da geração de resíduos eletroeletrônicos, não só no Brasil, mas no mundo. Os volumes de lixo eletrônico continuam a crescer rapidamente na maioria dos países sem sinais de desaceleração devido a atualizações rápidas, mudanças tecnológicas, aumento da acessibilidade, produtos com obsolescência programada e aumento do consumo de bens eletrônicos. Aproximadamente 44,7 milhões de toneladas de lixo eletrônico foram geradas globalmente em 2016, e estima-se um aumento para 55,2 milhões de toneladas até 2021 (BALDÉ *et al.*, 2017).

O Brasil está na segunda colocação como gerador de lixo eletrônico nas Américas. Em 2016 foi gerado um total de 1,5 milhão de toneladas de lixo eletrônico enquanto que os Estados Unidos produziram 6,3 milhões de toneladas de lixo eletrônico no mesmo período. Os dados foram relatados, tomando como base o do Global E-wasteMonitor (2017). Desta forma, este assunto ganhou uma grande importância para o país, tornando-se importante pesquisar novas maneiras de melhorar a duração e recuperação desses materiais após o descarte.

Essa pesquisa irá buscar a recuperação dos metais presentes nas placas de circuito impresso (PCI) presentes em resíduos eletroeletrônicos de aparelhos celulares. As técnicas utilizadas para tal serão a carbonização, com o objetivo de isolar os metais e remover as resinas e termoplásticos, e a lixiviação, a qual servirá para segregar os metais após o processo de carbonização. (NUNES, ZIM (2017)

O intuito deste trabalho parte de dois critérios, o primeiro seria a busca pela mineração urbana, ou seja, usar a economia circular para recuperar metais que já passaram por todos os processos de mineração e refinamento, dessa forma economizando energia e dinheiro, haja vista que a produção primária desses metais podem consumir até 95% mais energia do que a secundária conforme mostrado na tabela 2. O segundo critério seria a redução dos resíduos eletroeletrônicos, já que esse tipo de passivo tem um enorme potencial de poluição, de forma a reutilizar os materiais que compõem os mesmos. Dessa forma, a pesquisa visa maneiras de recuperar e reaproveitar os metais presentes nas placas de circuito impresso (PCI) e reaproveitar matérias primas de grande valor evitando assim o consumo de recursos naturais finitos do meio ambiente.

2-REVISÃO DE LITERATURA

2.1-O Lixo Eletrônico

O lixo eletrônico advém dos equipamentos eletroeletrônicos (EEE), dispositivos que utilizam, armazenam, geram, transmitem ou medem corrente elétrica ou campo magnético enquanto estão em funcionamento. Televisores, geladeiras, computadores, celulares, lâmpadas, pilhas e baterias são alguns exemplos de EEE. (ABINEE, 2016)

Os computadores comuns possuem, além do plástico, vidro, ferro, aço, madeira, e metais não ferrosos em sua composição. Assim, caso não seja feito o descarte adequado, pode haver consequências drásticas ao homem e ao ambiente. Estima-se que 70% da poluição de mercúrio e cádmio e 40% da poluição de chumbo em aterros nos EUA são provocados por vazamento dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos. (TOZZI, 2017)

Segundo Santos (2016) mesmo em um aterro, o simples toque de metais pesados na água provoca imediata contaminação, penetrando no solo, esse material pode contaminar as águas subterrâneas ou acumular-se organismos vivos, com consequências negativas para o ambiente como um todo. As substâncias presentes nos equipamentos eletroeletrônicos, consideradas de maior impacto a saúde humana e ao meio ambiente são os metais pesados tóxicos e gases de efeito estufa, dentre eles podemos citar alguns elementos químicos que se caracterizam por conter substâncias potencialmente tóxicas, como chumbo, mercúrio, cádmio e retardantes de chama, assim como materiais de valor econômico, entre os quais, cobre, ouro, prata e alumínio. (RIBEIRO, 2017)

2.2-Legislação Brasileira

A PNRS (2010) estabeleceu a logística reversa como um dos instrumentos de implementação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, por meio da logística reversa. Na logística reversa, os sistemas de devolução são implementados principalmente por meio de acordos setoriais firmados com a indústria. Os produtos e respectivos resíduos compreendidos pela obrigatoriedade da PNRS são: os agrotóxicos, seus resíduos e embalagens; pilhas e baterias; pneus; óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens; lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista; produtos eletroeletrônicos e seus componentes (PNRS, 2010).

A PNRS (2010) declara que os fabricantes, comerciantes, importadores e distribuidores devem:

- investir no desenvolvimento de produtos potencialmente reutilizáveis, recicláveis, que gerem menor quantidade de resíduos e que apresentam uma forma de destinação ambientalmente correta;
- divulgar informações sobre como proceder com os resíduos associados aos seus produtos;
- assegurar que o sistema de logística reversa está sendo implementado e posto em prática.

Contudo para a implantação de uma tecnologia de reciclagem, com base na logística reversa, são necessários cumprir alguns requisitos para que o projeto seja viável, as quais são listadas na tabela 1.

Tabela 1 - Condicionantes para implantação de tecnologias de reciclagem

Característica	Descrição e vantagens	Benefícios para a empresa
1) Flexibilidade para tratar diferentes materiais	A tecnologia deve permitir ajustes operacionais, mantendo a qualidade do produto numa faixa pré-determinada.	Economicidade do processo, operação ajustável às características da alimentação
2) Elevada taxa de reação	Deve apresentar recursos para intensificar a reação dos reagentes, facilitar a homogeneização da mistura, permitindo o baixo consumo de insumos.	Baixo custo operacional, cinética de reação mais acelerada, menor consumo de energia e de insumos.
3) Design compacto, fácil montagem e adaptação	Deve ocupar menores espaços, permitir adaptações no circuito de modo que possa tratar diferentes materiais, gerando diferentes produtos mediante a adoção de ajustes relativamente simples.	Sistema versátil que pode ser rearranjado e apresentando baixo custo operacional
4) Baixo consumo de energia e de insumos	O sistema deve ser, preferencialmente, dotado de sistema inteligente que maximiza o uso de diferentes combustíveis, permitindo a sua combinação para otimizar a eficiência da operação.	Versatilidade quanto ao uso de matérias-primas e de combustíveis.
5) Controle do processo	Deve apresentar e ter fácil controle a separação dos produtos sem comprometer a qualidade.	Obtenção de produtos dentro de sua especificação.
6) Facilidade de start up	Equipamentos com comprovada eficiência de operação, permitindo fácil manutenção.	Tempo mínimo de parada para manutenção e revisão.

Fonte - SANTOS, 2014

Ainda segundo Santos (2014) a reciclagem de resíduos pode gerar inúmeros benefícios, sendo alguns deles citados a seguir:

- i) redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, quando substituídos por resíduos que são reciclados
- ii) redução de áreas necessárias para aterro, pela minimização da geração do volume de resíduos, a partir das atividades de reciclagem;
- iii) redução do consumo de energia durante o processo de produção, destacando, como caso particular

Um impulsionador da reciclagem de REEE é a extração de metais preciosos como ouro, prata e platina das PCI; índio das telas de cristal líquido, cobalto e níquel das baterias. Uma tonelada de PCI produz a mesma quantidade de ouro tanto quanto 110 toneladas de minério de ouro, estima-se que a cada 38 PCIs está presente 1g de ouro. (GSMA, 2016).

Uma tonelada de PCI produz cerca de 330Kg de cobre, pois esse metal encontrado nas PCI pode chegar até 33% em massa (RIBEIRO, 2017).

A Tabela 2 apresenta uma comparação do consumo de energia para extração primária e secundária dos principais metais explorados economicamente

Tabela 2 - Consumo de energia na produção primária e secundária de metais

Material	Produção Primária (GJ/Ton)	Produção Secundária (GJ/Ton)	Economia de Energia (%)
Alumínio	253	13	95
Níquel	150	16	89
Cobre	116	19	83
aço	33	14	57
Chumbo	28	10	64
Zinco	68	19	62

Fonte - VEIT, 2005

- iv) redução da poluição; tal como na indústria cimenteira, que reduz a emissão de gás carbônico.

Dessa forma pode-se dizer que as vantagens desse tipo reciclagem são: proteção ambiental com relação a riscos de poluição atmosférica, segregação dos componentes presentes nos REEE, redução dos custos de processo como baixo consumo de energia e reciclagem dos reagentes químicos. A principal desvantagem é a dificuldade em processar sucatas eletrônicas mais complexas

2.3-Placas de Circuito Impresso

A tecnologia das PCIs, placas utilizadas em todos os computadores, smartphones e tablets atualmente, foi inventada pelo austríaco Dr. Paul Eisner em 1936. Essas placas constituem um componente essencial e típico para quase todos produtos eletrônicos. Atualmente as placas de circuito impresso (PCI) são parte integrante da maioria dos EEE e correspondem em média a cerca de 6% em peso do REEE (GUO et al., 2015).

De acordo com HUANG et al. (2015), os metais normalmente presentes são o cobre, em maior percentual; níquel, zinco, ferro, estanho, chumbo, prata, ouro. A pureza de metais preciosos contidos nas PCI descartadas é cerca de 10 vezes maior que nos minérios mais ricos, de modo que as PCI estão sendo chamadas de recursos minerais urbanos e são negociados em bolsa de valores como mostrado na tabela 3.

Tabela 3 - Preços dos metais na bolsa de valores

Elemento	Valor (USD/Ton)
Sucata de aço	290,00
Níquel	12.360,00
Titânio	9.050,00
Cobre	5.657,50
Zinco	2.039,00
Silício	2.568,38
Paládio	2281,00
Ouro*	53,70
Prata*	0,59

*: USD/g

Fonte - LME, 2020

Os materiais utilizados na fabricação de PCI são divididos em três sistemas: um sistema de resina, um sistema de reforço e um sistema condutor. A base da PCI é chamada de laminado, formado por camadas de plástico e materiais fibrosos que podem ter diferentes composições, por exemplo: fenolito, fibra de vidro, fibra de poliéster e filme, entre outros polímeros. o

laminado é coberto com uma fina película de metal substâncias (cobre, prata, ouro ou níquel) nas quais componentes eletrônicos são montados.

As conexões entre os componentes ocorrem no lado revestido com cobre por caminhos de condutor. O sistema de resina para placas de circuito impresso mais comumente utilizado é o de resina epóxi. (SANTOS et al., 2016)

De acordo com Melo (2017) por apresentar em sua composição substâncias perigosas as PCI devem receber tratamento e destinação adequados para evitar contaminar o ar, os solos e as águas. Além disso, elas também apresentam em sua composição substâncias valiosas que poderiam ser recicladas, entre elas o ouro, prata, e o cobre, evitando assim o desperdício de recursos naturais preciosos que se encontram em processo de esgotamento e que poderiam ser reinseridos na cadeia produtiva gerando lucros consideráveis.

2.4-Estrutura da Reciclagem do Lixo Eletrônico

A composição, excessivamente heterogênea como mostrado, acaba dificultando o processo de reciclagem. Segundo Tuncuk (2012) para agregar valor aos REEE necessita-se de quatro etapas fundamentais, representadas pela triagem e desmantelamento, cominuição, processos metalúrgicos como a pirólise e lixiviação e por último refinação dos metais.

Conforme Nunes e Zim (2017), a etapa de triagem, processo manual que ocorre após a coleta e dá início a reciclagem, consiste em selecionar e retirar de forma manual as PCIs, além da desmontagem e separação de componentes inseridos nelas. Ocorre geralmente de forma manual e os elementos separados são: baterias, placas de circuito impresso, telas de cristal líquido e carcaças poliméricas. Processos mecânicos seriam inviáveis de se adaptar a esse procedimento devido às diversas formas e tipos de peças contidas nas placas.

Segundo Tuncuk et al. (2012) a cominuição tem como objetivo reduzir, por ação mecânica externa um sólido de determinado tamanho em fragmentos de menor tamanho. A fragmentação de um material heterogêneo visa liberar os materiais valiosos. A moagem é a operação de fragmentação fina obtendo-se um produto adequado à concentração ou a qualquer outro processo industrial como a lixiviação, além de diminuir o volume, este processo aumenta a superfície de contato.

Após a cominuição, ocorre o processo de recuperação dos metais valiosos, por processos metalúrgicos. Conforme Nunes e Zim (2017) técnicas físico-químicas são aplicadas para dissolução e recuperação dos metais de interesse, sendo a hidrometalurgia e a eletrometalurgia processos que trabalham diretamente com soluções químicas específicas, e a pirometalurgia um processo que necessita do uso de altas temperaturas para atingir o objetivo.

Segundo Ribeiro et. al (2015) o método pirometalúrgico envolve processos a altas temperaturas para então recuperar os metais a partir das cinzas residuais. A queima dos REEE volatiliza os materiais poliméricos e disponibiliza escórias ricas em metais, as quais posteriormente podem ser refinadas e separadas.

Conforme Melo (2017) a lixiviação é comumente a mais indicada para dissolver os diferentes metais presentes nas placas de circuito impresso, sendo que, a separação dá-se por diferentes graus de dissolução. Na lixiviação ácida o ácido nítrico possui propriedades oxidantes, dessa forma é capaz de solubilizar os metais mais facilmente. Já os ácidos clorídrico e sulfúrico não solubilizam bem alguns metais e podem gerar cloretos e sulfetos insolúveis, porém para esses casos o processo é otimizado mediante a adição de agentes oxidantes.

Segundo Nunes e Zim (2017) na etapa de refinação – O último processo da reciclagem de resíduos eletroeletrônicos - a purificação das soluções lixiviadas pode ser feita por uma variedade de métodos, tais como: extração com solvente, adsorção com carvão ativado, precipitação e extração eletrolítica.

3-OBJETIVOS

3.1-Objetivo Geral

- Avaliar a recuperação de metais provenientes de resíduos eletroeletrônico (PCIs) pelo método de carbonização em reator com controle de gases.

3.2-Objetivos Específicos

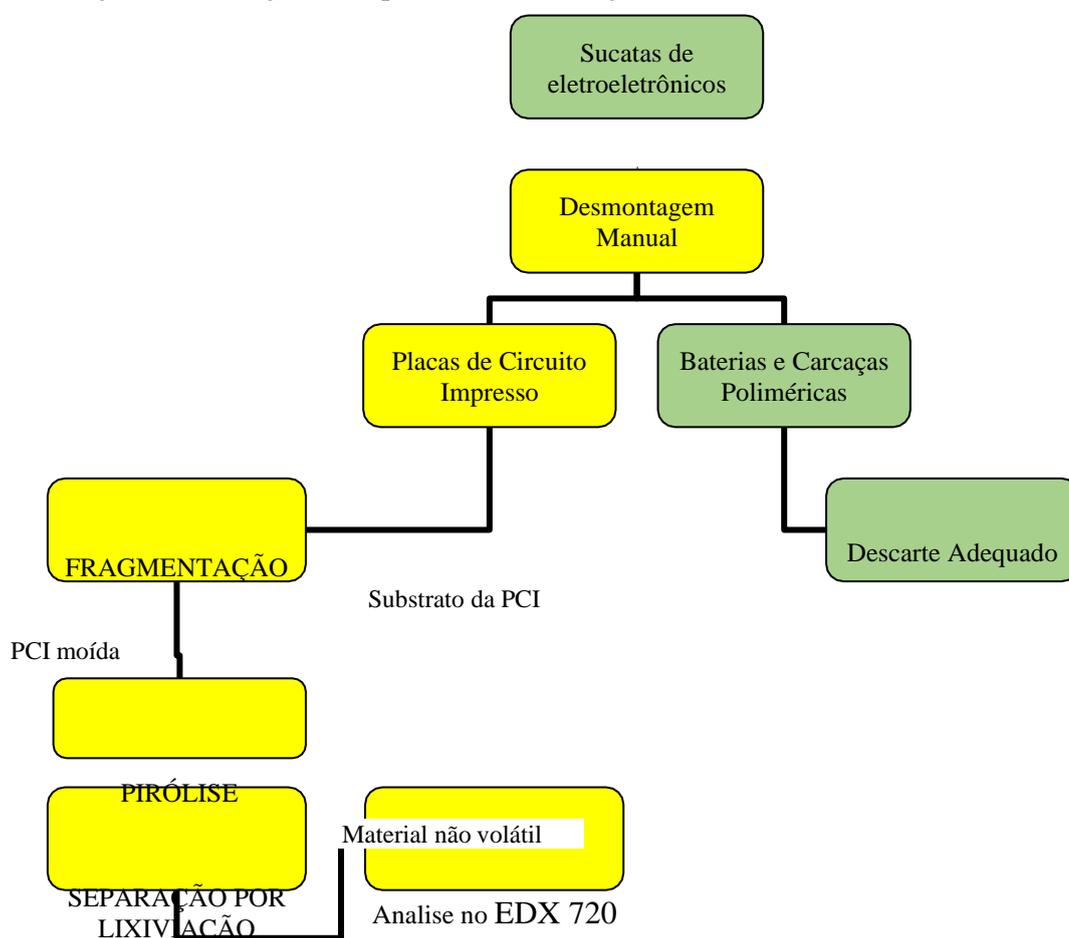
1. Obter as variáveis de tempo de permanência e temperatura do processo de carbonização;
2. Testar métodos de beneficiamentos após a carbonização para permitir a abertura dos corpos de prova e posterior tratamento, para as diferentes temperaturas e tempos experimentados;
3. Avaliar o processo químico por meio das soluções de água régia e hidróxido de sódio para lixiviar e promover a separação dos metais carbonizados.
4. Quantificar os metais das PCIs após o tratamento.

4-METODOLOGIA

4.1-Local da Pesquisa

Para a realização deste trabalho foram utilizadas ao todo 10 (dez) placas de circuito impresso de diferentes marcas, modelos e ano de fabricação de telefones celulares obsoletos, tendo estes sido recolhidos pelo Laboratório de Materiais Compósitos (LMC) da Universidade Federal do Tocantins, que serve como ponto de coleta. Nesta pesquisa foram realizadas as partes em amarelo do fluxograma da figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do processo de reciclagem do lixo eletroeletrônico



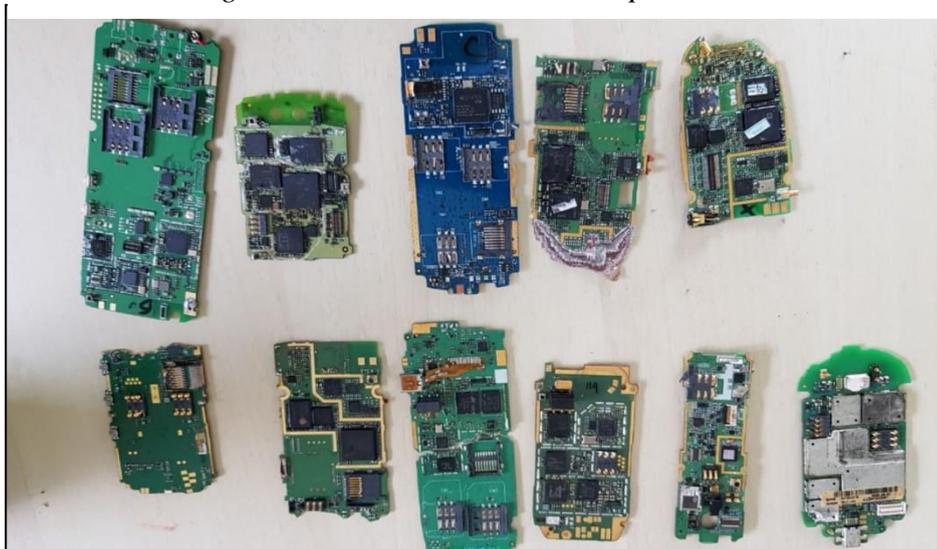
Fonte - Autoria própria

4.2-Desmontagem

Os componentes desejados (PCIs) foram retirados e separados do restante dos materiais como carcaça, bateria e tela de cristal líquido do aparelho celular.

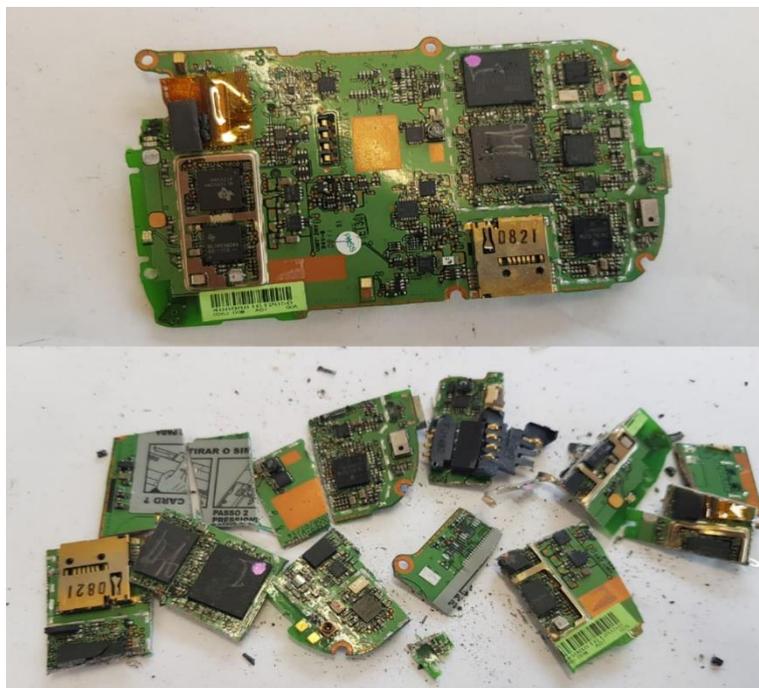
Eles foram separados em dez amostras como mostrado na figura 2, sendo que cada placa corresponde a uma amostra, e numerados para que se determinasse os processos do experimento de recuperação dos metais (a melhor temperatura e o melhor tempo de pirólise).

Figura 2 - Placas utilizadas no experimento



Fonte: Aatoria Própria

Figura 3 - Recorte das amostras



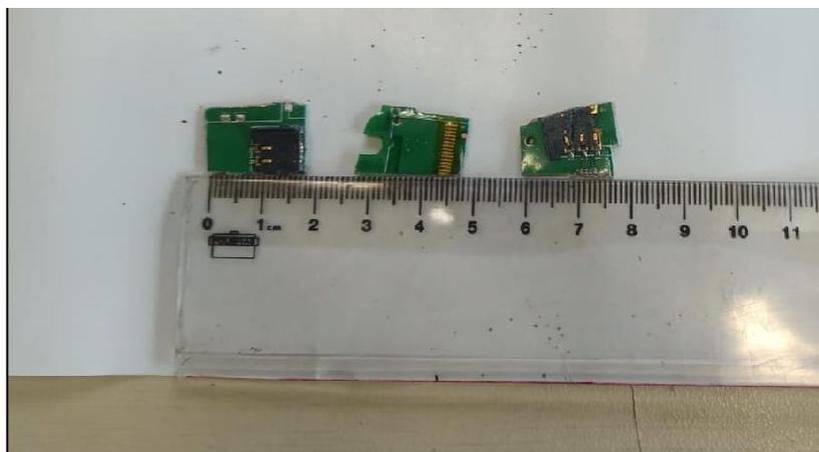
Fonte - Aatoria própria

4.3-Corte

Na sequência, todas as PCIs foram desmontadas e cortadas em partes menores de aproximadamente 4 cm² de área, conforme a figura 4, - sendo este tamanho o mais viável a ser

utilizado pela a falta de um equipamento para a realizar a cominuição - guilhotina tesourão - sendo os fragmentos divididos em amostras de forma a completar um total de 10.

Figura 4 - Tamanho dos recortes



Fonte - Aatoria Própria

Em seguida pesou-se as amostras, tabelando-se os pesos.

As amostras 1, 2, 3 e 4 foram utilizadas para determinar o melhor tempo e a melhor temperatura de pirólise.

4.4 Carbonização

Após o processamento mecânico das amostras, as amostras foram levadas ao interior do reator SIVOMO modelo 250 da Bioware, mostrado na figura 5, para que assim a carbonização tivesse início, o controlador de energia foi configurado para a temperatura desejada (600° C, 700° C e em seguida 1000° C), bem como o grau de aquecimento, pré-definido em 20°C por minuto.

Figura 5 - SIVOMO 250



Fonte - Autoria própria

Com o equipamento devidamente configurado, iniciou-se a verificação para determinar:

- O tempo de permanência mais adequado;
- A temperatura ideal de pirólise;

A determinação da temperatura ideal foi feita com base no nível de carbonização das PCIs observado, com o auxílio de uma lupa e em seguida com um microscópio binocular com a lente de 10x. Um processo eficaz deve remover as resinas e termoplásticos das placas, deixando apenas os metais das amostras.

Após determinada a melhor temperatura de carbonização, foram realizados experimentos usando a mesma temperatura em dois diferentes tempos (30 e 60 min) para assim aumentar a eficiência do processo diminuindo o gasto de energia elétrica.

A análise da temperatura e tempo de permanência foi feita selecionando-se 3 diferentes temperaturas para serem testadas (600°C, 700°C e 1000°C) conforme mostrado em diferentes literaturas, bem como o tempo de permanência. Inicialmente as amostras 1, 2 e 3 passaram 1h no reator.

Definido a temperatura mais adequada, a amostra 4 foi levada ao reator, porém dessa vez com o tempo de permanência reduzido para 30 minutos, e em seguida observadas as diferenças dessa com a amostra 2, mas com tempos diferentes conforme a tabela 5.

Tabela 4 - Temperatura e tempo de permanência em trabalhos já realizados

Técnica	Temperatura	Tempo de permanência	Autor
Reator de leito fixo	700°C	30 min	Quan et al (2010)
Reator fotoquímico	700 e 900 ° C	30 e 60 min	Havlik et al (2011)
Selagem em Câmara	1200°C e resfriamento em 4 segundos para 700°C.	-	Cimelia (2015)

Posteriormente, todas as outras amostras foram carbonizadas uma a uma nele de acordo com a tabela 5, levando-se o tempo de um dia para carbonizar apenas uma amostra devido a temperatura necessária para que o reator esfriasse antes que uma nova amostra pudesse ser inserida.

Tabela 5 - Temperaturas das amostras que irão para lixiviação

Amostra	Temperatura (°C)
5	600
6	600
7	700
8	700
9	1000
10	1000

Após isso, as amostras foram retiradas do reator e deixadas à temperatura ambiente até que esfriassem para que pudessem ser pesadas e verificado o quanto de materiais não metálicos foram segregados de acordo com a equação 1.

$$\text{massa dos polímeros} = \text{massa amostra inicial} - \text{massa amostra final [1]}$$

4.5-Banho Químico

Conforme o objetivo proposto, duas rotas foram consideradas para a finalidade da extração e concentração dos metais. Na primeira, foram utilizados a água régia como processo lixiviador das placas.

Com base na metodologia estudada por Nunes e Zim (2017), nesta rota, utilizou-se o ácido nítrico HNO_3 (65%) e o ácido clorídrico HCl (37%) para formar a água régia, esta tem o papel de oxidar os metais de interesse, convertendo-os em íons metálicos solúveis. O volume total produzido nessa rota foi de 500 mL (166,67 mL de HNO_3 e 333,33 mL de HCl). Essa quantidade foi dividida em 3 béqueres, nos quais foram submersas as amostras 5, 7 e 9 para que fosse feita a digestão. Em seguida, levou-se os béqueres até a múfla a 105 °C durante 1h para iniciar o processo de evaporação dos ácidos e retenção dos metais.

Na segunda rota, com base no estudo de Petter et al (2014), foi utilizado hidróxido de sódio como agente lixiviante para remover a camada de resina que revestia as placas, o autor utilizou também o tiosulfato de sódio, mas obteve baixa eficiência no processo. O preparo da solução consistiu na proporção 1:1 m/v, preparando 500 mL, sendo esta quantidade dividida em 3 béqueres, nos quais foram submersas as amostras 6, 8 e 10, assim sofrendo a digestão em meio básico. Em seguida, levou-se os béqueres até a múfla a 105 °C durante 1h para iniciar o processo de evaporação dos bases e retenção dos metais.

Nas duas rotas, após serem retiradas da múfla, as amostras foram colocadas em temperatura ambiente para que resfriassem.

Após voltarem a temperatura ambiente, todas as amostras foram filtradas em papel filtro, para em seguida serem maceradas de modo a obter os menores fragmentos possíveis para assim aumentar a eficiência de leitura no aparelho de análise quantitativa.

4.6- Caracterização Química

A caracterização realizada foi a análise química elementar semiquantitativa por Fluorescência de Raios-X, técnica de Espectrometria por Energia Dispersiva (EDX), equipamento do Laboratório de Materiais Compósitos da UFT.

Para a quantificação dos metais e análise da eficiência do método, as amostras das duas campanhas foram filtradas para que houvesse a separação do material metálico da escória que

ainda restava no béquer, sendo também secadas, e em seguida levadas para observação em um microscópio de bancada com lente de 10x, bem como observadas com auxílio de uma lupa para análise tanto da carbonização quanto do banho químico de maneira a identificar metais presentes em sua forma concentrada.

Posteriormente, as amostras foram levadas para o Espectrômetro onde cada amostra foi inserida em uma cubeta de aproximadamente 2x2 cm e colocada no interior do aparelho, iniciando-se assim a quantificação conforme a figura 6. Com essa análise, cada metal obtido teve seu percentual mostrado em uma tabela salva no disco interno do computador acoplado ao aparelho.

Figura 6 - Espectrômetro por Energia Dispersiva (EDX)



Fonte - Autoria própria

5-RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1-Processamento Mecânico

No processamento mecânico (Desmontagem e corte) optou-se por trabalhar com as PCI sem os componentes eletrônicos (carcaça, tela de cristal líquido), ou seja, fazer o desmantelamento, desta forma evitando a mistura desnecessária de substâncias tóxicas ou valiosas, presentes em baterias que poderiam ser tratados separadamente, otimizando assim a reciclagem deste tipo de REEE. Os chips por serem muito pequenos e possivelmente estarem colados ao substrato, dificultariam a remoção e poderiam provocar grandes danos ao substrato, então não foram retirados.

O conjunto de smartphones dos quais foram retiradas as placas era de diferentes marcas como Samsung, Nokia, BlueBerry e LG, modelos e ano de fabricação variando de 2004 a 2008 de acordo com a figura 7.

Figura 7 - Aparelhos celulares utilizados



Fonte - Autoria Própria

Ao se recortar uma placa, verificou-se a perda de peso comparando o peso do antes e depois da mesma, conforme a tabela 6.

Tabela 6: Perda de Peso pós processamento mecânico

Amostra	Peso antes do recorte (g)	Peso pós recorte (g)	Diferença (g)	Diferença (%)
1	17,9042	17,7304	0,1738	0,97
2	11,5114	11,4339	0,0775	0,67
3	17,4374	17,1604	0,2770	1,59
4	11,6440	11,5977	0,0463	0,40
5	11,5010	11,4510	0,0500	0,43
6	13,2441	12,9940	0,2501	1,89
7	11,3030	11,2184	0,0846	0,75
8	12,0647	11,9882	0,0765	0,63
9	11,6014	11,5255	0,0759	0,65
10	11,7032	11,6240	0,0792	0,68

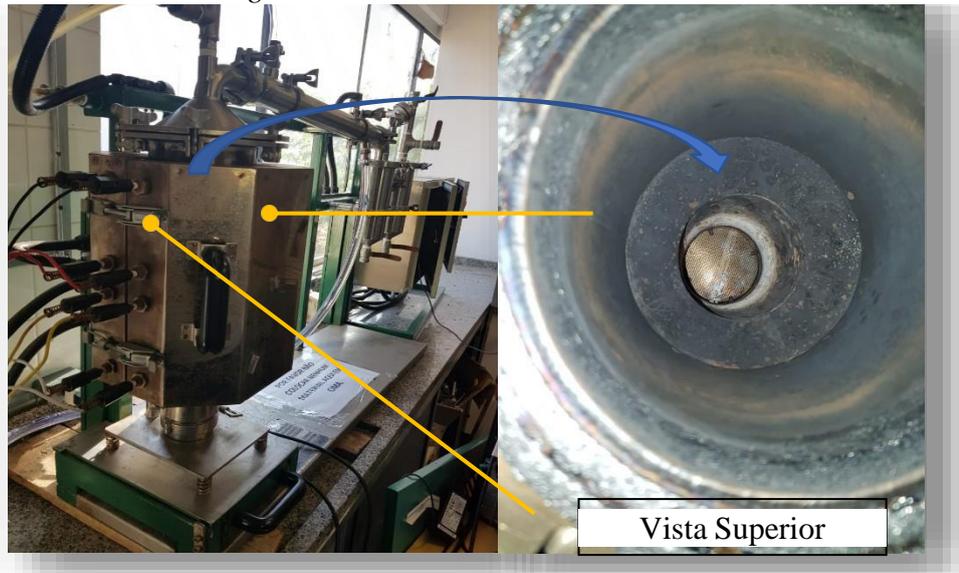
Segundo Ribeiro (2017) a massa perdida advém de polímeros e resinas epóxis que são perdidos durante a fragmentação das PCIs. Assim a diferença entre a massa inicial da amostra da massa final restante, como mostrado na tabela 7 proporciona a massa dos materiais poliméricos.

Pelos dados apresentados percebe-se que a perda de peso acumulada total foi de 1,1908 g, sendo o percentual médio de peso perdido durante o desmantelamento das 10 amostras equivalente a 0,87% do peso total das placas. De maneira geral as perdas de peso registradas durante o processamento mecânico das PCI foram bastante pequenas e, portanto, satisfatórias, já que em alguns tratamentos como demonstrou Melo (2017) as perdas podem chegar a mais de 5%, fato causado principalmente pela perda da PCI na forma de poeira.

5.2-Carbonização

As amostras das três faixas de temperatura foram analisadas por ensaios de pirólise dentro do reator do SIVOMO 250 da Bioware.

Figura 8: Reator do SIVOMO 250



Fonte: Autorial Própria

5.3-Determinação da Temperatura ideal de carbonização

Para determinar a temperatura ideal de carbonização, iniciou-se o processo com a amostra 1 sendo aquecida até 600°C, a uma taxa média de 20°C por minuto. Após atingir a temperatura em questão, a amostra permaneceu por uma hora dentro do reator, por conseguinte o aparelho foi desligado. Após o resfriamento, que levou aproximadamente 4h, a amostra foi retirada, processo que levou aproximadamente 4h. O resultado da carbonização é apresentado na figura 9.

Figura 9: Amostra 1 fotografada através de uma lupa após a carbonização



Fonte: Autorial Própria

Com o auxílio da lupa, percebeu-se que a temperatura de 600°C não foi suficiente para carbonizar as partes não metálicas das placas devido a presença de termoplásticos bem como a camada de resina que cobre a parte metálica.

O mesmo processo foi feito com a amostra 2, porém dessa vez com a temperatura de 700°C, o resultado da carbonização aparece na figura 10. O reator levou cerca de 4,5h para esfriar e permitir que a amostra fosse retirada.

Figura 10: Amostra 2 fotografada através de uma lupa após a carbonização



Fonte: Autoria própria

Observou-se que a carbonização foi mais efetiva, pois a amostra apresentou menos plástico. Observa-se várias partes metálicas à mostra, com cores evidenciando o cobre e o cromo, contudo ainda restou parte da resina, principalmente com o cobre. A temperatura de 700°C é capaz de fazer resinas epóxi se degradarem termicamente, já que, conforme Moraes (2011) elas começam a se degradar justamente nessa temperatura, podendo algumas ainda necessitarem de 750°C para a reação ocorrer por completo.

O procedimento foi refeito com a amostra 3, porém dessa vez com a temperatura de 1000°C, o resultado da carbonização aparece na figura 11. Após o desligamento do equipamento,

esperou-se cerca de 6h para que se pudesse retirar a amostra do reator, tempo que este levou para esfriar.

Figura 11: Amostra 3 fotografada através de uma lupa após a carbonização



Fonte: Autoria própria

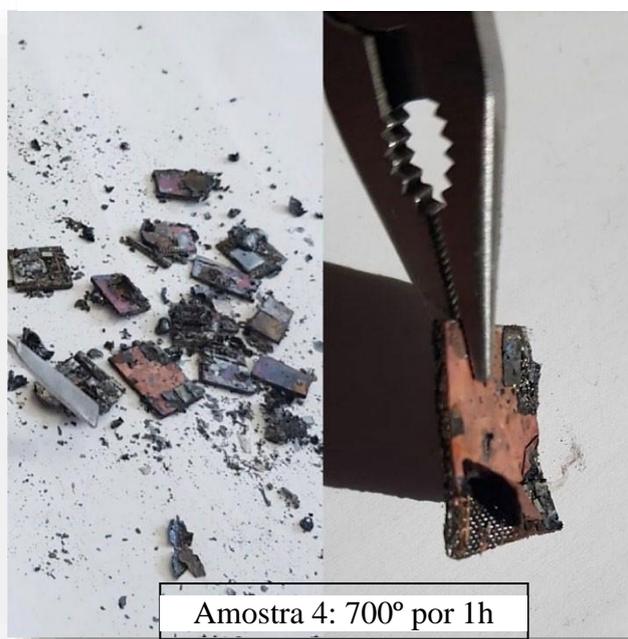
Pôde-se verificar, utilizando-se a lupa, que desta vez que várias partes metálicas estavam a mostra, com cores evidenciando vários metais, dentre eles o cobre. Não foi observada a presença de termoplásticos e nem de resina. Por conseguinte, as amostras foram pesadas para se verificar o percentual de massa perdida como mostrado na tabela 7;

Tabela 7- Comparação do peso pós carbonização

Amostra	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Peso (g)		Diferença (%)
			Anterior à carbonização	Posterior à carbonização	
1	600	60	17,7304	17,4038	2,24
2	700	60	11,4339	8,9389	20,95
3	1000	60	17,1604	14,0084	21,86
4	700	30	11,5977	9,0100	20,59
5	600	30	11,4510	11,1611	2,53
6	600	30	12,9940	12,6928	2,32
7	700	30	11,2184	8,7174	21,46
8	700	30	11,9882	9,6582	19,44
9	1000	30	11,5255	8,7573	24,02
10	1000	30	11,6240	9,0241	22,37

Apesar da temperatura de 1000° C ter conseguido remover mais do que as demais temperaturas testadas, a diferença observada com a amostra carbonizada a 700° C foi pequena, conforme a tabela 8, haja vista que a diminuição da massa foi em média 22,75% na temperatura de 1000°C enquanto na de 700° C foi em média 20,61%. Outro ponto de destaque é ao se tocar no fragmento de placa (amostra 2) utilizando a mão, pôde-se remover a película de resina se facilmente, conforme a figura 12, essa facilidade não ocorreu com a amostra 1, carbonizada a 600° C.

Figura 12: Resina restante após a carbonização da amostra 2



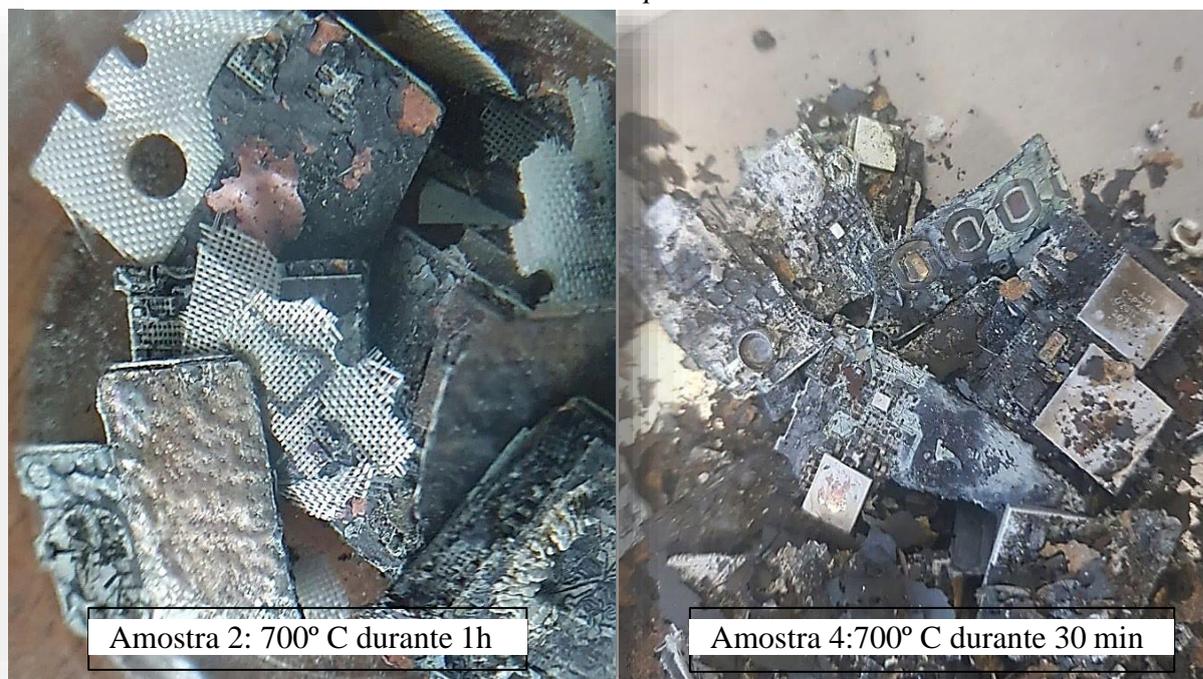
Fonte: Autoria própria

5.4-Determinação do melhor tempo de carbonização

Com a temperatura e 700° C sendo a mais adequada entre as utilizadas, foi feito um novo teste, dessa vez para otimizar a eficiência do processo e verificar se o tempo de 1h realmente era necessário para que as amostras chegassem ao resultado desejado.

A amostra 4 foi levada ao interior do reator e o controlador foi ajustado para 700°C, onde mais uma vez aqueceu a uma temperatura de 20° C/min, e ao chegar a configuração pré-definida permaneceu por 30 minutos conforme Havlik (2011) também fez.

Figura 13: Comparação das amostras com diferentes tempos de permanência, observado com lupa



Fonte: Aatoria própria

Ao observar utilizando uma Lupa e em seguida um microscópio de bancada com lente de 10x, as amostras com diferentes tempos de permanência no reator pareciam estar iguais conforme a figura 13 isso foi comprovado ao realizar a análise do espectrofotômetro Fluorescência de Raios-X. As análises de ambas as amostras apresentaram bastantes semelhanças quanto a composição de íons metálicos conforme mostra a tabela 8.

Tabela 8: Caracterização metálica das amostras 2 e 4

Metal	Quantidade (%)	
	Amostra 2	Amostra 4
Cu	27,593	25,264
Si	16,263	19,032
Br	12,390	12,487
Sn	9,787	9,892
Ba	11,782	14,225
Fe	9,664	3,310
Ni	4,514	3,970
Ca	4,123	4,956
Cr	2,398	0,652
Ag	2,055	0,478
S	1,680	0,720
Zn	1,061	0,642
Ti	0,944	0,442
Pb	0,257	0,336
Sb	0,205	-
Au	0,153	-
Zr	0,025	0,336

Um detalhe importante do Espectrofotômetro é que no recipiente onde a amostra é inserida para análise não cabe a amostra por completo, então foi necessário macerar ambas as amostras com um pistilo de forma a homogeneizar o máximo possível para assim evitar desvios durante a leitura por fluorescência.

Pôde-se verificar com base nos dados apresentados que as amostras estavam bem homogeneizadas, bem como o tempo de 30 minutos foi suficiente para a carbonização da amostra 4, conforme já observado anteriormente, dessa forma podendo-se utilizar o tempo de 30 min nas análises seguintes.

5.5-Banho Químico

Nesta parte do trabalho foi avaliado o efeito do uso de soluções concentradas utilizados no processo de lixiviação das PCIs dos telefones celulares e smartphones:

- ❖ Hidróxido de sódio (NaOH) e;
- ❖ Água régia: composta por ácido clorídrico (HCl), ácido nítrico (HNO₃).

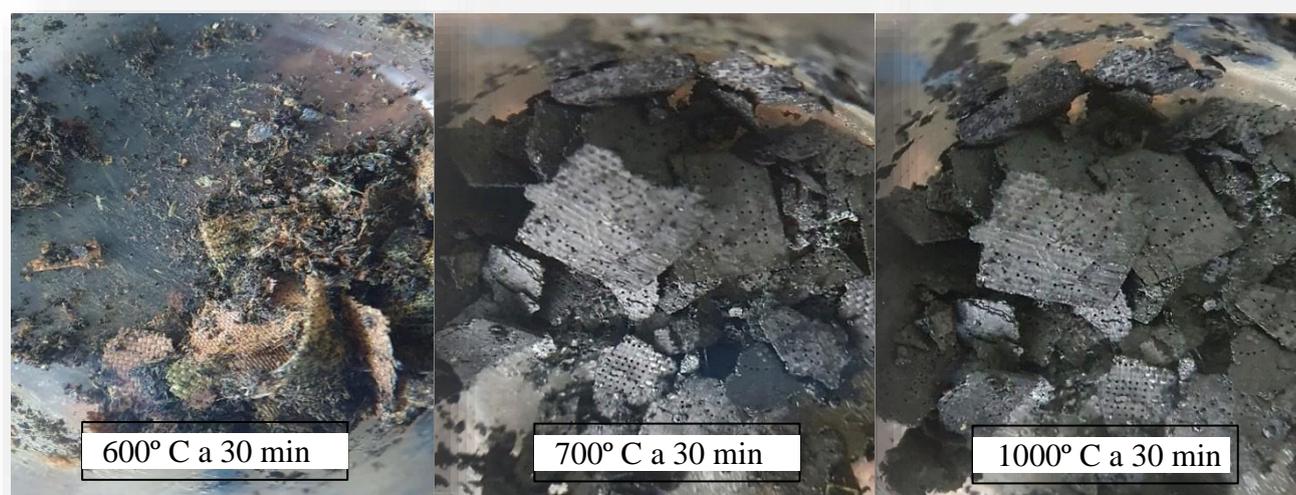
Observou-se que o tratamento com a solução de hidróxido de sódio foi muito eficiente na remoção da resina que é aplicada sobre as placas. A caracterização química da solução concentrada de hidróxido de sódio por Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDX).

Na primeira rota, as amostras 5, 7 e 9 (600, 700 e 1000° C respectivamente) foram levadas ao banho químico na solução ácida, composta por água régia (2:1) enquanto na segunda rota, as amostras 6, 8 e 10 (600, 700 e 1000° C respectivamente) foram levadas à solução básica, composta por hidróxido de sódio (1:1).

Após submersas nos béqueres contendo as soluções, as amostras foram levadas à mufla onde permaneceram em 105°C durante 1h. Logo em seguida foram retiradas do equipamento e observadas, as que foram tratadas com o ácido, ainda continham uma quantidade significativa de solução aquosa, enquanto o restante apesar de aparentar certa umidade sob as PCIs, não continham mais solução aquosa.

Posteriormente, tanto as amostras em solução de hidróxido de sódio quanto em água régia, foram lavadas com água destilada e em seguidas filtradas em papel filtro, de forma a retirar a solução aquosa remanescente e concentrar apenas a parte sólida como aconteceu com as amostras lixiviadas em meio ácido como mostrado na figura 14, evitando assim possíveis interferências dos reagentes utilizados ao se fazer a leitura por espectrofotometria.

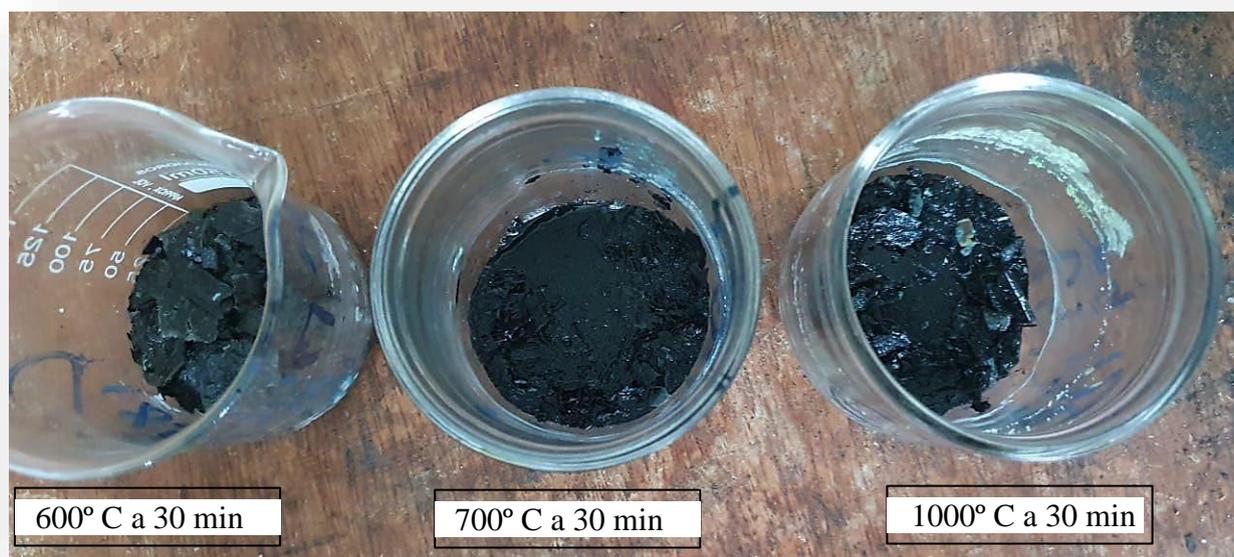
Figura 14: Amostras 5, 7 e 9 após o banho ácido, observado com uma lupa



Fonte: Autoria própria

As amostras do banho ácido tiveram a solução aquosa removida completamente após a filtragem, enquanto as do banho alcalino mantiveram certa umidade conforme a figura 15, que não pôde ser filtrada e nem evaporada, pois os béqueres em que as amostras estavam não suportavam temperaturas acima de 105°C.

Figura 15: Amostras 6, 8 e 10 após o banho químico básico



Fonte: Autoria própria

Por conseguinte, todas as amostras foram pesadas em balança analítica a fim de se comparar os resultados obtidos

5.5.1 Em Meio Ácido

Foi observado um precipitado escuro com um tom esverdeado no fundo dos frascos de vidro que armazenavam a solução concentrada após a lixiviação como mostrado no procedimento de lixiviação descrito anteriormente.

Os resultados descritos na tabela 9 mostraram que as amostras lixiviadas com ácido (5, 7 e 9) perderam uma massa considerável.

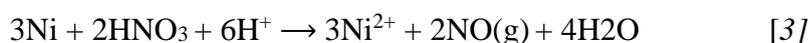
Tabela 9: Comparação peso antes e depois da lixiviação ácida

Amostra	Peso anterior à lixiviação (g)	Peso posterior à lixiviação (g)	Diferença (%)
5	11,1611	6,1888	-44,55
7	8,8114	4,6965	-46,70
9	8,7573	5,1502	-41,19
Média			-44,14

Essa perda de peso explica-se porque a oxidação e solubilização do cobre ocorre em soluções ácidas, em meio oxidante com pH menor que 4 e potencial da reação maior que 0,4V, conforme a equação 2.



Outro ponto a se notar é que o ácido nítrico diluído e concentrado oxida o níquel metálico facilmente a frio, isso explica-se já que, a solução ácida mesmo após ter saído da mufla continuou reagindo, processo que perdurou até a filtração em papel filtro.



A espectrofotometria mostrou a caracterização metálica das amostras 5, 7 e 9 conforme a tabela 10.

Tabela 10: Resultado da Lixiviação Ácida

Amostra 5		Amostra 7		Amostra 9	
Metal	Resultado (%)	Metal	Resultado (%)	Metal	Resultado (%)
Fe	33,266	Cu	35,247	Fe	33,909
Cu	21,165	Si	18,879	Si	19,604
Sn	17,985	Cr	9,523	Cu	17,778
Cr	13,932	Fe	8,643	Cr	15,889
Si	13,533	Sn	5,752	Al	9,705
Ba	2,127	Ba	4,307	Ca	3,977
Ni	1,774	Ca	0,999	Ti	3,277
I	1,494	Ni	0,978	Ni	2,643
Ca	1,457	Br	0,926	Ba	1,585
Mn	0,637	I	0,851	Sn	1,284
S	0,344	Cr	0,469	P	1,083
Ti	0,307	Ag	0,392	S	1,045
Ag	0,209	Sr	0,118	Br	0,297
Zn	0,145	Au	0,095	Au	0,190
Br	0,115	Mn	0,036	Pb	0,184
-	-	-	-	Ag	0,174

Após a lixiviação, o Ferro dissolvido na solução concentrada de água régia em duas das três amostras foi superior ao Cobre, o que era esperado, já que o cobre foi bastante dissolvido e diluído, na amostra 7 o percentual de cobre foi superior ao de ferro, indicando que possivelmente a diluição não foi eficiente. Alguns metais como o ferro, silício e cromo apresentam pouco ou nenhuma diluição em meio ácido como mostrou TOZZI (2017)

Outros metais também foram encontrados minoritariamente, como Níquel, Estanho, Bário, Cálcio e Bromo, indicando que também foram dissolvidos pela solução ácida. Amostras de ouro foram achados nas amostras 7 e 9, correspondendo a 0,095% e 0,190% da composição das PCIs, respectivamente. A diferença desse percentual pode estar relacionada com diferentes percentuais de metais usados em placas variando conforme surgem novas tecnologias.

5.5.2 Em Meio Alcalino

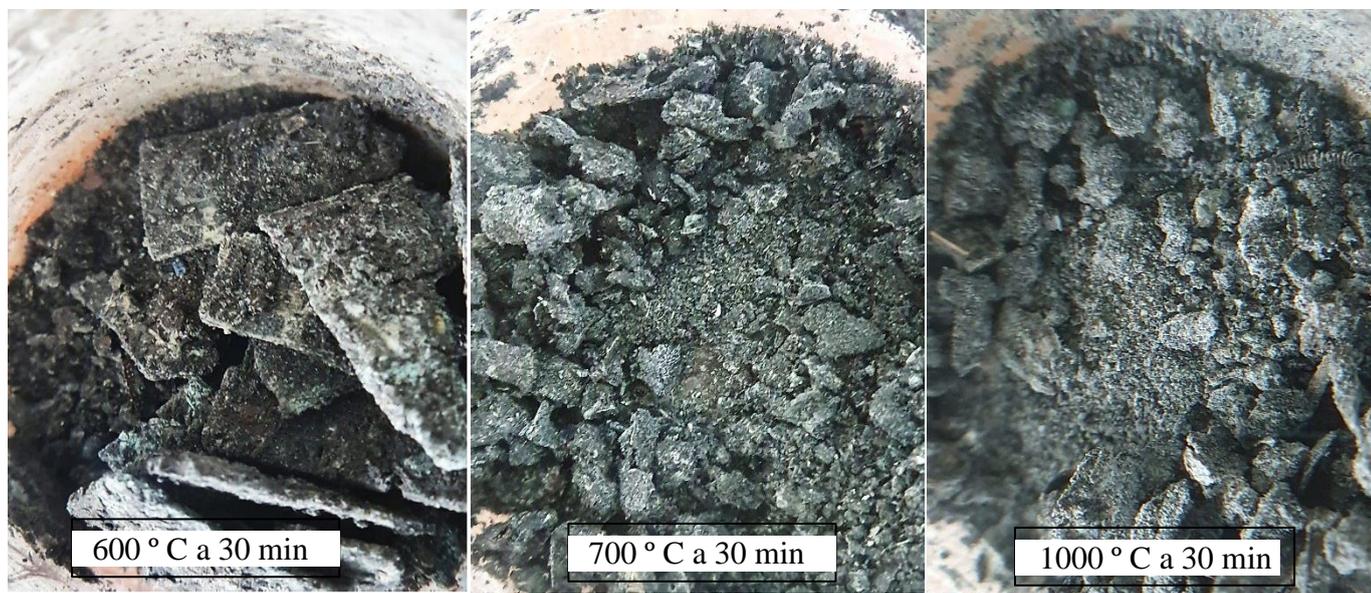
Os resultados da tabela 10 mostraram que as amostras lixiviadas em meio alcalino (6, 8 e 10) ganharam um pequeno percentual peso, uma média de 3,8%.

Tabela 11: Comparação peso antes e depois da lixiviação alcalina:

Amostra	Peso anterior à lixiviação (g)	Peso posterior à lixiviação (g)	Diferença (%)
6	12,6928	13,2132	+4,10
8	9,6582	10,0832	+4,40
10	9,0241	9,2867	+2,91

Ao observar-se as amostras tanto por microscópio quanto por lupa, observou-se que todas elas ficaram bastante fragmentadas, adquirindo uma cor escura e formando um precipitado no fundo do recipiente, indicando que materiais cerâmicos separados durante a carbonização reagiram com o hidróxido de sódio, outro fato causador também pode ser a reação do ferro presente nas PCIs como a hidroxila do hidróxido de ferro conforme mostraram NUNES e ZIM (2017).

Figura 16: Amostras 6, 8 e 10 após o banho alcalino, observado com uma lupa



Fonte: Autoria própria

Analisando a tabela 12 pode-se observar que não há sódio metálico presente, o que indica que provavelmente a massa aumentou em decorrência da umidade, já que a temperatura à qual foi lixiviada não poderia ser superior a 105° C e estando em solução alcalina aumentou o ponto de ebulição da água, que pode ir até 130° C segundo a CETESB (2008).

Tabela 12: Resultado lixiviação em meio básico

Amostra 6		Amostra 8		Amostra 10	
Metal	Resultado (%)	Metal	Resultado (%)	Metal	Resultado (%)
Cu	45,894	Cu	62,969	Cu	43,909
Si	20,448	Si	9,406	Fe	13,604
Cr	11,676	Ca	3,633	Al	11,778
Fe	8,684	Fe	2,842	Cr	5,889
Sn	4,476	Br	1,948	Si	5,705
Ca	1,399	Ba	1,637	Ca	3,977
Ni	1,341	Cr	1,083	Ti	3,277
Br	0,958	I	0,961	Ni	2,643
Mn	0,786	Pb	0,824	Ba	1,585
Ag	0,723	Zr	0,802	Sn	1,284
I	0,706	Zn	0,783	S	1,045
Ti	0,433	Ni	0,644	Br	0,297
Au	0,082	S	0,376	Mn	0,29
Rb	0,052	Ag	0,337	Pb	0,184
Sr	0,026	Sr	0,287	Ag	0,174
-	-	Ti	0,105	Zn	0,142
-	-	Mn	0,065	Au	0,062

Após a lixiviação, o Cobre das três amostras foi superior ao Ferro, diferentemente do que ocorreu nas amostras lixiviadas em solução ácida, o que pode ser explicado pelo fato do cobre não ter sofrido tanta diluição, e assim ter sua representatividade diminuída.

Outros metais também foram encontrados minoritariamente, assim como nas amostras lixiviadas em meio ácido, como Níquel, Estanho, Bário, Cálcio e Bromo. O bromo, semimetal, teve seu percentual bem alto nas amostras que foram apenas carbonizadas, fato que ocorreu por ele estar ligado aos retardantes de chama poliméricos, que apresentam bromo em sua composição (ZHANG; FORSSBERG, 1999).

Na lixiviação era esperado que o bromo fosse completamente removido, contudo ainda restaram resquícios do mesmo, o que indica que era necessário um tempo de lixiviação maior para que ele fosse removido.

Amostras de ouro foram achadas nas amostras 6 e 10, correspondendo a 0,082% e 0,062% da composição das PCIs, respectivamente.

Pelos valores da tabela 9 e das tabelas 11 e 12 é possível determinar quais elementos apresentaram aumento ou diminuição em relação a composição original das PCIs, após serem lixiviadas, é importante notar que na lixiviação básica o percentual de cobre foi bem maior do que na ácida e da amostra não lixiviada, assim mostrando que toda a escória que restou na pós carbonização foi removida, em outras palavras os metais foram concentrados na lixiviação básica.

Os resultados para a água régia apresentados anteriormente, a exemplo do que ocorreu durante os ensaios de lixiviação utilizando água régia, mais uma vez demonstraram a seletividade desta mistura ácida em dissolver a maior parte dos metais presentes nas PCIs.

Alguns metais não apresentaram uma diminuição percentual, como Ferro e Cromo, mas sim um aumento em relação as suas composições originais o que significa que eles não são susceptíveis a lixiviação pelo hidróxido de sódio. Já na lixiviação por água régia, alguns metais

também se mostraram não susceptíveis a lixiviação devido a seu aumento, sendo eles o Ferro e o Bário.

6-CONCLUSÃO

A temperatura que apresentou melhor custo benefício para carbonização das amostras foi a de 700°C com um tempo de permanência de 30 minutos, essa configuração superou a carbonização a 1000°C principalmente pelo pouco gasto energético comparado a esse, já que a resina a mais que a temperatura mais alta é capaz de remover por completo pode ser facilmente removida, bastando um leve toque para que a película polimérica se desprendesse.

A lixiviação apresentou-se como uma boa forma de concentrar os metais removendo o que não pôde ser carbonizado e também concentrando partes metálicas, já que como visto apenas a carbonização não pôde fazer isso, principalmente em relação ao cobre. O banho químico em solução básica foi mais eficiente frente ao banho ácido por não diluir o cobre, mantendo-o concentrado, diferente do banho ácido. O ferro apresentou dificuldade de se chegar a uma conclusão sobre seu potencial de lixiviação, já que variou bastante na análise quantitativa.

O ouro foi encontrado em 8 das 10 amostras analisadas, inclusive nas não lixiviadas, com seu percentual condizendo com a literatura, onde o ouro presente em 38 PCIs, corresponde ao peso de 1g.

Posteriormente, mais estudos voltados à refinação dos metais podem ser realizados, de forma a unir e neutralizar com as soluções ácidas, após a extração dos metais de interesse. O hidróxido de sódio (NaOH) reage com o ácido nítrico (HNO₃), formando nitrato de sódio, um sal inodoro, incolor, solúvel em água, usado em fertilizantes e carnes enlatadas para preservar a cor.

7-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALDÉ, C. P., FORTI, V., GRAY, V., KUEHR, R., STEGMANN, P. **The Global E-waste Monitor**. 2017. United Nations, University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association. Viena. disponível em: <http://ewastemonitor.info/>. Acesso em: 24 nov. 2020.

Brasil. Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS. **Lei nº 12.305**. 2010. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 14 set. 2020.

BRASIL. Cetesb. Governo de São Paulo. **Ficha de Informação de Produto Químico**. 2010. Disponível em: https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=HIDR%C3%93XIDO%20DE%20S%C3%93DIO,%20SOLU%C3%87%C3%83O. Acesso em: 01 fev. 2021.

CIMELIA. **Reciclagem de Eletroeletrônicos**. Singapura. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.cimelia.com.br/index.asp>. Acesso em: 30 out. 2020.

Cotação dos Metais. London Metal Exchange - LME. 2020 Disponível em: <https://www.lme.com/>. Acesso em: 01 Nov. 2020.

Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – ABINEE. **Desempenho Setorial**. 2018. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon15.htm>. Acesso em: 16 de outubro de 2020.

GUO, Xueyi et al. **Recovery of metal values from waste printed circuit boards using an alkali fusion**. Hydrometallurgy. China, v. 156. Pag. 199-205, 2015.

Havlik, T.; Orac, D.; Petranikova, M. & Miskufova, A. **Treatment of Printed Circuit Boards After Thermal Treatment. Waste Management**. Hydrometallurgical, Suécia, vol.31, p 1542-1546. 2011.

HUANG, J.; CHEN, M.; CHEN, H.; CHEN, S.; SUN, Q. **Leaching behavior of copper from waste printed circuit boards with Bronsted acidic ionic liquid**. Waste Management, v.34, p.483-488, 2014.

MELO, Raffael Andrade. **Estudo da lixiviação de placas de circuito impresso de computadores desktops obsoletos da UFRN**. Dissertação de Mestrado, (Mestrado em Engenharia Química) - UFRN, PPGEQ, Natal, Brasil, 2017.

Groupe Speciale Mobile Association. GSMA. **Mobile Recycling**. 2016. Disponível em: <https://www.gsma.com/publicpolicy/mobile-and-the-environment/mobile-recycling>. Acesso em: 29 Out. 2019.

NUNES, Francisco; ZIM, Alexandre. **Estudo do potencial de reaproveitamento de metais de valor econômico a partir de resíduos eletrônicos**. Monografia, Engenharia Química – UNESC, Extremo Sul Catarinense, Brasil, 2017.

Quan, C., Li A.; Gao, N. & Zhang, Dan. **Characterization of products recycling from PCB waste pyrolysis**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. China, vol. 89, p 102–106. 2010.

RIBEIRO, Luiz Carlos de Santana et al. **Aspectos econômicos e ambientais da reciclagem: um estudo exploratório nas cooperativas de catadores de material reciclável do Estado do Rio de Janeiro**. Nova econ. Belo Horizonte , v. 24, n. 1, p. 191-214, Apr. 2014. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010363512014000100191&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 18 Dez. 2020.

RIBEIRO, Simone Ferreira. **Desenvolvimento de Rotas de Reciclagem de Placas de Circuito Impresso de Telefones Móveis com Extração Química de Cobre, Estanho e Níquel**. Dissertação de Mestrado, (Mestrado em Engenharia de Materiais) – CEFET-MG, Belo Horizonte, Brasil, 2017.

SANTOS, Tássia et al. **Printed circuit boards: its characteristics and its potential for recycling**. Geama, v. 12, n. 4, 2016. Disponível em: <http://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/973/1401>. Acesso em : 18 Nov. 2019.

TOZZI, Lais. **Reciclagem de Placas de Circuito Impresso para Obtenção de Metais Ferrosos**. 2017. 43 f. Monografia. Departamento Acadêmico de Engenharia Química. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa. 2017.

TUNCUK, A; STAZI, V; AKCIL, A; YAZICI, E. Y; DEVECI, H. **Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling**. Minerals Engineering. Turkey , v. 25, n. 1, p. 28–37. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687511003669>. Acesso em: 16 Nov. 2019.

VEIT, Hugo Marcelo et al . **Utilização de processos mecânicos e eletroquímicos para reciclagem de cobre de sucatas eletrônicas**. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto , v. 61, n. 2, p. 159-164, June 2008 . Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672008000200008&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 08 Dez. 2020.

ZHANG, S.; FORSSBERG, E. **Intelligent Liberation and Classification os electronic scrap**. Powder Technology, v. 105, p. 295-301, 1999.