

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de**  
**Materiais**  
**PPGE3M**

**EMPREGO DE PROCESSAMENTO MECÂNICO NA CONCENTRAÇÃO DE**  
**COBRE A PARTIR DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**

**M.Sc. Fernando Hamerski**  
**Orientador: Dr. Hugo Marcelo Veit**

**TESE DE DOUTORADO**

**Porto Alegre, junho de 2018**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Dr. Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Dr<sup>a</sup>. Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Dr<sup>a</sup>. Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Dr. Carlos Pérez Bergmann

Vice-Coordenador: Dr. Afonso Reguly

CIP – Catalogação na Publicação

**Hamerski, Fernando**

**Emprego de Processamento Mecânico na  
Concentração de Cobre a Partir de Placas de Circuito  
Impresso** / Fernando Hamerski. -- 2018.

108 f.

Orientador: Hugo Marcelo Veit.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, BR-RS, 2018.

1. Resíduos eletrônicos. 2. Placas de circuito impresso. 3. Separador magnético. 4. Separador eletrostático. I. Veit, Hugo Marcelo, orient. II. Título.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais PPGE3M

Emprego de Processamento Mecânico na Concentração de Cobre a Partir de  
Placas de Circuito Impresso

M.Sc. Fernando Hamerski

Orientador: Prof. Dr. Hugo Marcelo Veit

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Daniel Assumpção Bertuol  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Andrea Moura Bernardes  
Dr.<sup>a</sup>. Ângela Cristina Kasper

PPGEQ/UFSM  
PPGE3M/UFRGS  
UFRGS

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M –, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre, junho de 2018

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus incentivadores, meus pais, Bertoldo e Elsi, e meus irmãos, Paula e Marcus.

## AGRADECIMENTOS

Esta talvez seja a parte mais difícil de escrever. Um simples abraço ou mesmo um chimarrão ao entardecer do dia à beira do portão da garagem poderiam expressar os agradecimentos da forma mais real possível. As palavras nem sempre conseguem atingir aquilo que é inatingível, corroborando e muito com esta famosa expressão: uma imagem vale mais do que mil palavras. Neste caso, a palavra imagem pode ser trocada por lembrança, amor, saudade, felicidade. Porém, como nem tudo são rosas, seguem as minhas humildes palavras, esforçando-me para que vocês possam sentir, de forma carinhosa, os meus agradecimentos.

Aos meus pais e meus irmãos, que costumamos chamar de família, neste caso não pela hierarquia de uma família constituída pela figura do pai, mãe e irmãos, mas pela relação de amizade, de amor, de parceria, de sonhos compartilhados, a todos esses agradeço imensamente e serei eternamente grato por ser desta família, exatamente como somos.

Um agradecimento mais que especial à Natália Bordin, pelo teto dividido, pela companhia compartilhada e por ser quem é.

Aos meus amigos, de extensa lista, e que, mesmo perdendo um dos nossos neste louco mundo, não perderam os laços de amizade, fraternidade e amor. Aliás, uma de minhas maiores alegrias é saber que vocês estarão sempre ali, independentemente do tempo ou das adversidades.

Aos meus queridos amigos do LACOR (leiam-se colegas, professores e funcionários), com os quais tive o privilégio de compartilhar conhecimentos, histórias, sonhos, risadas, churrascos e tragos, ciente que algumas pessoas se tornam mais próximas que outras, agradeço por toda a amizade durante o período em que estive no LACOR e, com certeza, estarão sempre guardados em minhas lembranças.

Por último, mas não menos importante (juro), um agradecimento especial ao meu orientador, Hugo Marcelo Veit, sempre muito paciente e com um grande senso de humor, com quem tive a oportunidade ímpar de ter feito meus estudos, o qual me dá a certeza de que foi a melhor escolha que fiz para me orientar na arquitetura desta tese.

*“Duas coisas são infinitas: o universo e a estupidez humana. Em relação ao universo, ainda não tenho certeza absoluta.”*

(Albert Einstein)

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo Geral .....	16
2.2	Objetivos Específicos .....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	17
3.1	Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos.....	17
3.1.1	Composição dos equipamentos eletroeletrônicos .....	17
3.1.2	Geração dos REEE .....	21
3.1.3	Placas de circuito impresso .....	23
3.2	Métodos de Beneficiamento .....	25
3.2.1	Processamento mecânico .....	28
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	37
4.1	Estudo Preliminar .....	38
4.1.1	Resíduo real .....	38
4.2	Estudo com Resíduo Sintético .....	45
4.2.1	Experimento com um único fator (ANOVA de uma via).....	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	51
5.1	Estudo Preliminar com Resíduo Real.....	51
5.1.1	Cominuição e separação granulométrica .....	51
5.1.2	Caracterização das PCIs .....	53
5.1.3	Balço de massa para as etapas de separação magnética e eletrostática .....	56
5.1.4	Caracterização das frações obtidas após o separador magnético	59
5.1.5	Caracterização das frações obtidas após o separador eletrostático .....	66
5.2	Separação Eletrostática com Amostras Sintéticas.....	75
5.2.1	Validação das melhores condições com resíduo real.....	84
5.2.2	Análise estatística através do método ANOVA de uma via .....	88
6	CONCLUSÕES.....	97
7	SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.....	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Composição dos REEES conforme classificação da Diretiva N <sup>o</sup> . 19 de 2012/EU – <b>E-GP</b> : eletrodomésticos de grande porte; <b>E-TI</b> : eq. de TI; <b>E-PF</b> : painéis fotovoltaicos; <b>E-PP</b> : eq. de pequeno porte; <b>B</b> : brinquedos; <b>E-MED</b> : eq. médicos; <b>E-IL</b> : eq. de iluminação; <b>I-MO</b> : instrumentos de monitoramento; <b>DIS</b> : dispensers .....	19
<b>Figura 2.</b> Frações dos materiais encontrados nos REEES .....	20
<b>Figura 3.</b> Fluxograma das etapas empregadas na recuperação de metais de REEE .....	26
<b>Figura 4.</b> Desenho esquemático de um rolo magnético .....	33
<b>Figura 5.</b> Representação esquemática de um separador eletrostático.....	34
<b>Figura 6.</b> Fluxograma geral da linha de concentração de metais: (a) resíduo real; (b) resíduo sintético .....	37
<b>Figura 7.</b> Moinhos de facas (a) malha de 8 mm (Rone – SRB 2305 ); (b) malha de 2 – 0,5 mm (Retsch – SM 300).....	39
<b>Figura 8.</b> Agitador de peneiras série Tyler (Retsch – AS 200 Digit) .....	40
<b>Figura 9.</b> Digestão com água-régia .....	41
<b>Figura 10.</b> Separador magnético de rolo a seco (Inbras-Eriez – RE-05/4-1)...	42
<b>Figura 11.</b> Separador eletrostático corona (Inbras-Eriez – ESP-14/01S) .....	44
<b>Figura 12.</b> Amostras do material particulado (A – cobre; B – fibra de vidro reforçada com resina epóxi) entre 1 e 2 mm.....	46
<b>Figura 13.</b> Disposição dos parâmetros em um separador eletrostático corona	47
<b>Figura 14.</b> Diagrama em blocos das perdas e quantidade de material para cada tamanho de partícula.....	51
<b>Figura 15.</b> Massa das frações após moagem e classificação granulométrica .	52
<b>Figura 16.</b> Porcentagem dos metais e polímeros/cerâmicos na caracterização das PCIs.....	53
<b>Figura 17.</b> Diagrama em blocos com o balanço de massas das frações A e B após separação magnética e separação eletrostática .....	56
<b>Figura 18.</b> Acúmulo de pó sobre os eletrodos .....	58

<b>Figura 19.</b> Quantidade de Cu e Fe nas frações magnéticas para as amostras A .....	59
<b>Figura 20.</b> Quantidade de Cu e Fe nas frações não-magnéticas para as amostras A .....	60
<b>Figura 21.</b> Proporção de metais e polímeros/cerâmicos nas frações A após separador magnético.....	61
<b>Figura 22.</b> Quantidade de Cu e Fe nas frações magnéticas para as amostras B .....	62
<b>Figura 23.</b> Quantidade de Cu e Fe nas frações não-magnéticas para as amostras B .....	63
<b>Figura 24.</b> Proporção de metais e polímeros/cerâmicos nas frações B após separador magnético.....	64
<b>Figura 25.</b> Quantidade de Cu e Fe nas frações condutoras para as amostras A .....	67
<b>Figura 26.</b> Quantidade de Cu nas frações mistas para as amostras A.....	68
<b>Figura 27.</b> Proporções de metais e polímeros/cerâmicos nas amostras A após separador eletrostático.....	69
<b>Figura 28.</b> Quantidade de Cu e Fe nas frações condutoras para as amostras B .....	70
<b>Figura 29.</b> Quantidade de Cu nas frações mistas para as amostras B.....	71
<b>Figura 30.</b> Proporção de metais e polímeros/cerâmicos nas frações após separador eletrostático.....	72
<b>Figura 31.</b> Quantidade de Cu para diferentes ângulos de $\alpha$ nas frações condutoras e intermediárias .....	77
<b>Figura 32.</b> Quantidade de Cu para diferentes ângulos de $\Theta$ nas frações condutoras e intermediárias .....	77
<b>Figura 33.</b> Quantidade de Cu para diferentes distâncias do eletrodo corona nas frações condutoras e intermediárias .....	79
<b>Figura 34.</b> Quantidade de Cu para diferentes distâncias do eletrodo eletrostático nas frações condutoras e intermediárias .....	79
<b>Figura 35.</b> Quantidade de Cu para diferentes valores de alta voltagem nas frações condutoras e intermediárias .....	81

<b>Figura 36.</b> Quantidade de Cu para diferentes velocidades do rolo nas frações condutoras e intermediárias .....	83
<b>Figura 37.</b> Diagrama em blocos das frações obtidas após emprego das melhores condições do separador eletrostático .....	84
<b>Figura 38.</b> Percentagem de Cu nas amostras reais usando condições otimizadas com resíduo sintético .....	86
<b>Figura 39.</b> Comparação das proporções de metais e polímeros/cerâmicos entre diferentes amostras após separação eletrostática .....	87
<b>Figura 40.</b> Comparação BoxPlot para os níveis de $\alpha$ .....	89
<b>Figura 41.</b> Distribuição normal e independente para erros do modelo .....	89
<b>Figura 42.</b> Comparação BoxPlot para os níveis de $\Theta$ .....	91
<b>Figura 43.</b> Comparação BoxPlot para os níveis de $d_1$ .....	92
<b>Figura 44.</b> Comparação BoxPlot para os níveis de $d_2$ .....	93
<b>Figura 45.</b> Comparação BoxPlot para os níveis de U .....	94
<b>Figura 46.</b> Comparação BoxPlot para os níveis de n .....	95

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Classificação dos EEE segundo a Diretiva N <sup>o</sup> . 19 de 2012 .....	17
<b>Tabela 2.</b> Composição dos materiais de diferentes tipos PCIs em massa (%)	24
<b>Tabela 3.</b> Processos pirometalúrgicos em escala real para recuperação de metais de sucata eletrônica.....	27
<b>Tabela 4.</b> Líquidos densos empregados em testes de concentração e suas densidades.....	36
<b>Tabela 5.</b> Variáveis empregadas no separador magnético.....	43
<b>Tabela 6.</b> Parâmetros de regulação dos eletrodos no separador eletrostático	44
<b>Tabela 7.</b> Variáveis a serem empregadas no separador eletrostático .....	45
<b>Tabela 8.</b> Variáveis empregadas no separador eletrostático .....	47
<b>Tabela 9.</b> Otimização usando diferentes tensões e rotação do rolo.....	48
<b>Tabela 10.</b> Cálculos para ANOVA de uma via .....	50
<b>Tabela 11.</b> Análise química das duas frações obtidas após separação granulométrica.....	54
<b>Tabela 12.</b> Concentração de metais reportados em diferentes trabalhos .....	55
<b>Tabela 13.</b> Balanço de massa (gramas) das amostras sintéticas após separador eletrostático.....	75
<b>Tabela 14.</b> Balanço de massa com diferentes valores de alta tensão .....	80
<b>Tabela 15.</b> Balanço de massa para diferentes rotações do rolo .....	83
<b>Tabela 16.</b> ANOVA de uma via para $\alpha$ .....	88
<b>Tabela 17.</b> ANOVA de uma via para $\Theta$ .....	89
<b>Tabela 18.</b> ANOVA de uma via para $d_1$ .....	91
<b>Tabela 19.</b> ANOVA de uma via para $d_2$ .....	92
<b>Tabela 20.</b> ANOVA de uma via para U .....	93
<b>Tabela 21.</b> ANOVA de uma via para n.....	94

## SIMBOLOGIA

$\vec{B}$  – Densidade de fluxo magnético

$\vec{H}$  – Campo magnetização

$\vec{J}$  – Magnetização de um material

$\vec{\Psi}$  – Indução magnética

$\mu_0$  – Permeabilidade magnética

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica

ABS – Acrilonitrila butadieno estireno

Ag – Prata

Au – Ouro

Bi – Bismuto

C – Fração condutora

CaCl – Cloreto de cálcio

CES – Corona-electrostatic separator

Co – Cobalto

Cu – Cobre

d1 – Distância eletrodo corona

d2 – Distância eletrodo eletrostático

EAAC – Espectrofotômetro de absorção atômica de chama

EEE – Electrical and electronic equipment

EEE – Equipamentos eletroeletrônicos

Fe – Ferro

FR – Do inglês: *flame resistant*

G – Gauss

g – Grama

H<sub>2</sub>O – Água

HCl – Ácido clorídrico

HIPS – Poliestireno de alto impacto

HNO<sub>3</sub> – Ácido nítrico

Hz – Hertz

ICP-OES – Do inglês: Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry

In – Índio

k – Susceptibilidade magnética  
kV – Quilo volt  
kV – Quilo volts  
M – Fração intermediária  
Mi – Fração mista  
n – Velocidade do rolo  
NaCl – Cloreto de sódio  
NC – Fração não condutora  
Ni – Níquel  
 $\Theta$  – Ângulo eletrodo eletrostático  
PA – Poliamida  
Pb – Chumbo  
PC – Policarbonato  
PCB – Printed circuit board  
PCI – Placa de circuito impresso  
Pd – Paládio  
PMMA – Polimetacrilato de metila  
PP – Polipropileno  
Pt – Platina  
REEE – Resíduos e equipamentos eletroeletrônicos  
rpm – Rotação por minuto  
Se – Selênio  
SEC – Separador eletrostático corona  
TBE – Tetrabromoetano  
TBE – Tetrabromoetano  
Te – Telúrio  
U – Tensão aplicada  
UNEP – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (do inglês: *United Nations Environment Programme*)  
WEEE – Waste electrical and electronic equipment  
Zn – Zinco  
 $\alpha$  – Ângulo eletrodo corona

## RESUMO

O estudo foi dividido em duas etapas: uma com resíduos reais e outra com resíduos sintéticos. A primeira avaliou a concentração de cobre após separação granulométrica (em dois tamanhos de partículas: A <0,5 mm e 0,5<B<1 mm), separação magnética (variando os parâmetros vibração da calha alimentadora e velocidade do rolo), seguido de um separador eletrostático corona (SEC), variando a rotação do rolo e da tensão aplicada. Após a separação magnética, observaram-se as concentrações de Fe entre 12 e 14,1 % para as frações A e de 10,3 a 11,4 % para as frações B. As frações não magnéticas foram submetidas ao separador eletrostático, sendo a melhor condição testada com 100 rpm e tensão de 35 kV para A e B, concentrando para as amostras de fração A 51 % de Cu, e para a fração B, 37,9 %. Na segunda etapa foram avaliados 6 parâmetros no SEC:  $\alpha$  (ângulo corona),  $\Theta$  (ângulo eletrostático), distância dos eletrodos ( $d1$  e  $d2$ ), a tensão ( $U$ ) e a velocidade do rolo ( $n$ ), em três níveis para cada parâmetro, com aplicação de um resíduo sintético (25 % - Cu: 75 % - resina epóxi com fibra de vidro). Os parâmetros otimizados foram aplicados em PCI real. Para  $\alpha$ ,  $\Theta$ ,  $d1$  e  $d2$ , a principal diferença entre os níveis estudados está na quantidade de polímeros presente nas frações condutoras. Quanto menor o  $U$  e maior o  $n$ , observou-se, além da quantidade de materiais poliméricos nas frações condutoras, um aumento significativo de Cu nas frações intermediárias. O melhor nível de cada um dos parâmetros estudados foi aplicado em amostras reais para validar as condições impostas no SEC, e desta forma, na fração condutora, foi possível obter aproximadamente 72 % de Cu. Além disso, empregou-se o método ANOVA de uma via para avaliar separadamente a influência dos parâmetros do SEC. Os resultados obtidos mostram que os parâmetros  $\Theta$ ,  $d1$ ,  $U$  e  $n$  são significativos, pois há diferenças entre as médias dos níveis de cada parâmetro. Concluiu-se que o separador eletrostático é eficaz para a concentração de Cu de placas de PCI de computadores desde que sejam otimizados os parâmetros operacionais a fim de ter a maior quantidade possível de cobre na fração condutora e a menor perda de cobre para as demais frações.

## ABSTRACT

The study was divided into two stages: one with real residues and the other with synthetic residues. The first one evaluated the concentration of copper after comminution, particle size separation (in two sizes: A <0.5 mm and 0.5 <B <1 mm), magnetic separation (varying the vibration parameters of the feed trough and roller speed), followed by a corona-electrostatic separator (CES) varying the rotation of the roller and the applied tension. After the magnetic separation, iron concentrations were observed between 12 and 14.1 % for fractions A and 10.3 to 11.4 % for fractions B. Non-magnetic fractions were subjected to the electrostatic separator, the best condition tested at 100 rpm and 35 kV voltage for both particle sizes, concentrating 51 % Cu and 37.9 % B fractions. In the second step six parameters on the CES:  $\alpha$  (corona electrode angle),  $\Theta$  (electrostatic electrode angle), electrode distance (d1 and d2), applied voltage (U) and roller speed (a) and (b) were used for the determination of the epoxy resin in three different levels for each parameter, with the application of a synthetic resin (25 % - Cu: 75 % - epoxy resin with glass fiber). The higher the U and the higher the number of polymer materials in the conductive fractions, the higher the Cu concentration in the intermediate fractions. One of the studied parameters was applied in real samples to validate the conditions imposed in the SEC, and in this way, in the conducting fraction, it was possible to obtain approximately 72 % of Cu. Also, the one-way ANOVA method to separately evaluate the influence of the CES parameters. The results show that the parameters  $\Theta$ , d1, U, and n are significant, as there are differences between the means of the levels of each of the parameters. From the obtained data, it was concluded that the electrostatic separator is effective for the Cu concentration of PCBs of computers provided that the operational parameters are optimized to have as much copper as possible in the conducting fraction and the lowest loss of copper for the other fractions.

# 1 INTRODUÇÃO

O rápido desenvolvimento de novas tecnologias no setor eletroeletrônico faz com que esses equipamentos se tornem obsoletos em intervalos de tempo cada vez menores, aumentando, assim, inevitavelmente, a geração desses tipos de resíduo. A lista de aparelhos que constituem os equipamentos é vasta, como computadores pessoais, *laptops*, telefones celulares, televisores e eletrodomésticos (AWASTHI; LI, 2017; CESARO et al., 2017; CHAUHAN et al., 2018; CUI; ZHANG, 2008; EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, 2012).

Os resíduos eletroeletrônicos são compostos por diversas substâncias, muitas delas nocivas ao meio ambiente, se descartados incorretamente. De uma forma geral, fazem parte de sua composição polímeros, materiais cerâmicos e metais como cobre, ouro, níquel, estanho, mercúrio, arsênio, cádmio e chumbo (JING-YING; XIU-LI; WEN-QUAN, 2012; MORAES DE, 2011; WIDMER et al., 2005).

Atualmente, a geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos está numa faixa entre 20 e 50 milhões de toneladas por ano, com um acréscimo de 3 a 5 % ao ano. No Brasil, estima-se um acúmulo de aproximadamente 20 milhões de toneladas até 2030 (DIAS et al., 2018; GUIMARÃES; SANTOS; DUTRA, 2014; HAVLIK et al., 2010; ONGONDO; WILLIAMS; CHERRETT, 2011).

Esse acúmulo está associado, por exemplo, ao aumento exponencial nas vendas de telefones celulares e computadores pessoais. O número de computadores – *desktops*, *laptops* e *netbooks* vendidos – passou de 6,3 milhões de unidades em 2005 para 10,3 milhões de unidades em 2014. Para celulares, a venda de aparelhos passou de 47,5 milhões em 2009 para 70,3 milhões de aparelhos em 2014 (ABINEE, 2013, 2015).

O interesse pela reciclagem, bem como pela recuperação de substâncias valiosas como cobre e metais preciosos dos resíduos eletroeletrônicos, vem aumentando ano após ano devido à grande quantidade presente em sua composição, evitando-se, desta forma, que sejam

descartados no meio ambiente, mas também frente à quantidade cada vez menor encontrada em minérios (AWASTHI; LI, 2017; CESARO et al., 2017; VEIT, 2005).

As técnicas mais estudadas para a recuperação ou reciclagem dos metais presentes nesses resíduos incluem os processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos. Os processos hidrometalúrgicos vêm sendo utilizados na recuperação de metais desse tipo de resíduo, porém há um grande consumo de reagentes, o que acaba, em alguns casos, gerando efluentes tóxicos contendo cianeto ou ácidos. Atualmente, o processamento pirometalúrgico tem sido bastante empregado na recuperação de metais não ferrosos e metais preciosos de resíduos eletroeletrônicos, mas o alto custo energético e dos equipamentos necessários desestimula processos de menor escala (CESARO et al., 2017; CHAUHAN et al., 2018; CUI; ZHANG, 2008).

O emprego de processamento mecânico, como separadores granulométricos, separadores magnéticos e eletrostáticos, são alternativas que não geram efluentes tóxicos ácidos, como no caso do processo hidrometalúrgico, bem como altos custos com energia e equipamentos, se comparado ao processo pirometalúrgico, além da liberação de dioxinas e furanos. Porém, na bibliografia atual, há uma carência de estudos que reportam à otimização de cada etapa do processamento mecânico. Os parâmetros dos equipamentos empregados nos trabalhos são definidos empiricamente, uma vez que são adaptados de processos empregados no beneficiamento e concentração de metais oriundos da mineração (AWASTHI; LI, 2017; MORAES DE, 2011; VEIT, 2005; YAMANE, 2012).

Com isso, este trabalho visa contribuir na concentração de cobre com menores quantidades de materiais indesejáveis (polímeros e cerâmicos) a partir de placas de circuito impresso de computadores pessoais como fonte secundária, otimizando e avaliando condições como ângulo e distância dos eletrodos, tensão aplicada e velocidade do rolo de um separador eletrostático corona, diferenciando-se, desta forma, nesses campos, dos trabalhos já existentes.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi avaliar a separação/concentração de cobre de placas de circuito impresso de computadores obsoletos e/ou em desuso através da avaliação de diferentes dinâmicas de operação de processamento mecânico.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ◆ Avaliar parâmetros operacionais de um separador magnético;
- ◆ Avaliar parâmetros operacionais de um separador eletrostático corona;
- ◆ Verificar os rendimentos dos processos em termos de balanço de massa e análise química;
- ◆ Otimizar o processo de separação eletrostática através do emprego de resíduo sintético;
- ◆ Validar a melhor condição otimizada com aplicação em amostra real;
- ◆ Avaliar separadamente as condições ideais dos fatores empregados no separador eletrostático corona com resíduo sintético, em três níveis para cada fator, através do método ANOVA de via única.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

Os equipamentos eletroeletrônicos são aqueles que dependem de campos magnéticos e correntes elétricas para que funcionem corretamente, assim como os equipamentos para geração, transferência e medição dessas correntes e campos. Os resíduos desses equipamentos, comumente chamados pelo acrônimo de REEE, são os equipamentos elétricos e eletrônicos em desuso, obsoletos ou estragados. Isso inclui todos os componentes, subconjuntos descartados, juntamente com os produtos. Terminologias como e-lixo ou e-sucata também são utilizadas (CHANCEREL; ROTTER, 2009; CUI; ZHANG, 2008; DIAS et al., 2018; YAMANE et al., 2011).

##### 3.1.1 Composição dos equipamentos eletroeletrônicos

Os equipamentos eletroeletrônicos abrangem uma extensa lista de produtos oferecidos a nós consumidores. Segundo a Diretiva Europeia Nº. 19, de 2012, esses equipamentos são classificados em 11 categorias (EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, 2012), conforme a Tabela 1.

**Tabela 1.** Classificação dos EEE segundo a Diretiva Nº. 19 de 2012

<b>Categoria</b>	<b>Exemplos</b>
1 Eletrodomésticos de grande porte (E-GP)	Refrigerador, freezer, fogão, máquinas de lavar e secar roupas, micro-ondas, máquinas de lavar louça, condicionador de ar
2 Eletrodomésticos de pequeno porte (E-PP)	Aspirador de pó, ferro de passar, torradeira, fritadeira, faca elétrica, relógios, secador de cabelos
3 Equipamentos de TI e comunicação (E-TI)	Mainframes, impressora, minicomputador, computador, laptop, calculadora, aparelho de fax, netbooks, celular, telefone, tablete
4 Equipamento de consumo e painéis fotovoltaicos (E-PF)	Aparatos para rádio e TV, câmera de vídeo, gravadores wi-fi, amplificadores de áudio, instrumentos musicais, painéis fotovoltaicos
5 Equipamento de iluminação (E-IL)	Lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de vapor de sódio e de halogênio

---

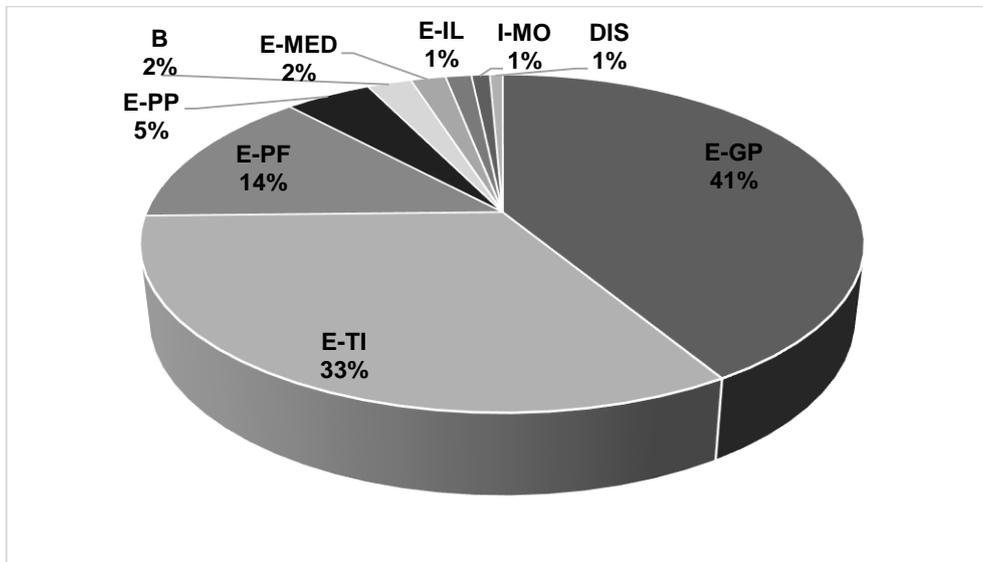
<b>6</b> Ferramentas eletroeletrônicas	Serras, esmeril, furadeiras, máquinas de corte, parafusadeiras, ferramentas de jardinagem
<b>7</b> Equipamentos de lazer, esporte e brinquedos (B)	Trens e carros elétricos, videogame, console de vídeo game, computadores para ciclismo, corridas, etc.
<b>8</b> Equipamentos médicos (E-MED)	Equipamentos de radioterapia, cardiologia, diálise, medicina nuclear, análise de laboratório
<b>9</b> Instrumentos de monitoramento e controle (I-MO)	Detector de fumaça, regulador de aquecimento ou resfriamento, termostatos
<b>10</b> Caixas de autoatendimento (DIS)	Dispensers de bebida, dispensers de alimentos, caixas eletrônicos
<b>11</b> Outros	Outras categorias não consideradas anteriormente

---

Fonte: Adaptado de: (EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, 2012)

Essa classificação facilita a descrição do potencial de risco de cada classe de produtos, em função de especificidades como tempo de vida útil e composição dos materiais. De todas as categorias listadas na Tabela 1, as Categorias 1–4 são os equipamentos que geram aproximadamente 93% em massa de todos os REEEs (EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, 2012; WIDMER et al., 2005), como pode ser visualizado na Figura 1.

**Figura 1.** Composição dos REEEs conforme classificação da Diretiva Nº. 19 de 2012/EU – **E-GP**: eletrodomésticos de grande porte; **E-TI**: eq. de TI; **E-PF**: painéis fotovoltaicos; **E-PP**: eq. de pequeno porte; **B**: brinquedos; **E-MED**: eq. médicos; **E-IL**: eq. de iluminação; **I-MO**: instrumentos de monitoramento; **DIS**: dispensers



Fonte: Adaptado de: (EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, 2012; WIDMER et al., 2005)

Dentro dessa ampla gama de equipamentos eletrônicos, os equipamentos de TI e comunicação merecem uma atenção reforçada, pois esses produtos estão em constante modernização, tornando os produtos em uso sempre ultrapassados, o que estimula a troca por equipamentos mais modernos (MORAES DE, 2011).

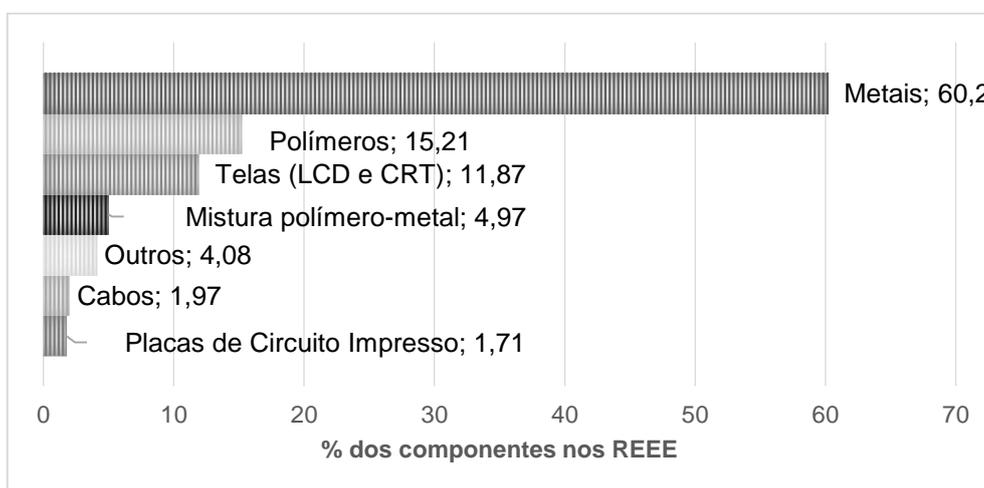
Além disso, equipamentos como pilhas e baterias não estão classificados nessa lista. Esses equipamentos são considerados de fácil acesso. E da mesma forma que são adquiridos, são descartados, sem controle, muitas vezes, no lixo doméstico (MORAES DE, 2011).

Esses REEEs são uma mistura complexa e não homogênea no que diz respeito aos materiais e seus componentes. Muitos dos materiais são altamente tóxicos, como substâncias bromadas e cloradas, metais tóxicos, polímeros, materiais fotoativos e biologicamente ativos, além de aditivos plásticos, como retardantes de chamas (CESARO et al., 2017; CHAUHAN et al., 2018; HE et al., 2006; VEIT, 2005).

Tais resíduos são considerados altamente prejudiciais ao meio ambiente e ao homem. Pode ser encontrado neles uma ampla gama de substâncias com diferentes graus de toxicidade. Destacam-se o chumbo, mercúrio, arsênio, cádmio, selênio, cromo hexavalente, bem como os retardantes de chama, que, quando queimados, geram dioxinas (CHAUHAN et al., 2018; JING-YING; XIU-LI; WEN-QUAN, 2012; MORAES DE, 2011; WIDMER et al., 2005).

De acordo com a *European Topic Centre on Resource and Waste Management* (ETC/RWM, 2003) e Widmer et al. (2005), as frações dos materiais encontradas nos REEEs podem ser divididos de acordo com a Figura 2 (ETC/RWM, 2003; WIDMER et al., 2005).

**Figura 2.** Frações dos materiais encontrados nos REEEs



Fonte: Adaptado de: (ETC/RWM, 2003; WIDMER et al., 2005)

Essas frações de materiais apresentadas na Figura 2 são baseadas em dados obtidos de empresas de reciclagem desses tipos de equipamentos (EMPA, 2005).

Estudos mais aprofundados e direcionados à reciclagem de materiais valiosos mostram, de maneira geral, que a composição dos resíduos eletroeletrônicos possui 40 % de metais, 30 % de polímeros e 30 % de óxidos/cerâmicos (CUI; ZHANG, 2008; GUO; GUO; XU, 2009; YAMANE et al., 2011).

No que diz respeito aos metais, que formam aproximadamente 40% da composição dos resíduos, os maiores teores são de cobre, ferro, alumínio,

níquel, chumbo, estanho e zinco. Além dos metais base, há também, mesmo que em pequenas quantidades, metais preciosos como prata, ouro e paládio. Destes, o ouro é o mais empregado na fabricação dos equipamentos eletroeletrônicos, por razões como (YAMANE, 2012):

- Estabilidade química;
- Propriedades condutoras;
- Resistência à corrosão.

Os polímeros, comumente chamados de plásticos, compõem aproximadamente 21 % da massa dos resíduos eletroeletrônicos, sendo que 5 % contêm retardantes de chama (MORAES DE, 2011). Segundo estudo de Maris et al. (2015), são encontrados em resíduos de equipamentos eletroeletrônicos polímeros como: acrilonitrila butadieno estireno (ABS), poliestireno de alto impacto (HIPS), polipropileno (PP), polimetacrilato de metila (PMMA), policarbonato (PC) e poliamida (PA) (MARIS et al., 2015).

Outros componentes desses tipos de resíduos podem contaminar o meio ambiente, caso sejam descartados incorretamente. É o caso das baterias e capacitores.

### **3.1.2 Geração dos REEE**

A produção de equipamentos eletroeletrônicos é um dos negócios que mais cresce em todo o mundo. Isso porque o mercado desses equipamentos está em constante desenvolvimento, produção e consumo. Devido à modernização dos aparelhos disponíveis no mercado, a taxa de consumo aumentou exponencialmente nos últimos 10 anos (CHANCEREL; ROTTER, 2009; GUIMARÃES; SANTOS; DUTRA, 2014).

Como dito anteriormente, o grande avanço tecnológico acarreta a procura por equipamentos cada vez mais sofisticados, gerando, em contrapartida, uma elevação na geração de resíduos.

Até o ano de 2001, a produção de equipamentos eletroeletrônicos era maior, se comparada com a obsolescência. A partir daquele ano, a

obsolescência passou a ser maior que a produção, confirmando um maior volume de resíduos diante da demanda (CUI; FORSSBERG, 2003).

Na União Europeia, são gerados entre 8,3 – 9,1 milhões de toneladas a cada ano, com um acréscimo de 3 – 5 %, em 2014, o que correspondia a 17 kg.hab<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> (GUIMARÃES; SANTOS; DUTRA, 2014; HAVLIK et al., 2010). Atualmente, a taxa de crescimento da geração de e-lixo está entre 5 e 10 % (JAISWAL et al., 2015), agravando ainda mais a situação do REEE em todo o mundo. Até 2014, aproximadamente 41,8 milhões de toneladas de REEE já foram geradas (AWASTHI; LI, 2017; SURESH et al., 2018). Na Índia, a taxa de crescimento anual da geração de REEE no período entre 2007 e 2011, foi entre 7 e 10% (KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013).

De acordo com Hadi et al. (2015b) e Kiddee; Naidu e Wong (2013), em um período de 10 anos (1997–2007), 500 milhões de computadores pessoais foram descartados nos Estados Unidos. No Japão, o número é ainda mais alarmante, onde 610 milhões de computadores se tornaram obsoletos até o final do ano de 2010 (HADI et al., 2015b; KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013).

A UNEP publicou em 2009 um relatório que prevê um crescimento na geração de REEEs em alguns países em desenvolvimento nos próximos 10 anos, entre eles, o Brasil. O mercado de computadores pessoais no Brasil está em constante crescimento. Este crescimento colocou o Brasil no topo da lista de países em desenvolvimento que mais geram resíduos eletrônicos *per capita* (SCHLUEP et al., 2009).

Estima-se que no Brasil a geração *per capita* média anual projetada entre 2001 e 2030 é de 3,4 kg. Além disso, está previsto um acúmulo de 22,4 milhões de toneladas de REEE até 2030 (ONGONDO; WILLIAMS; CHERRETT, 2011).

Segundo os Panoramas Econômicos divulgados pela Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – ABINEE, a qual divulga dados do setor de equipamentos eletroeletrônicos, entre 2005 e 2014 o número de computadores (desktops, laptops e netbooks) vendidos neste período passou de 6,3 mi em 2005 para 10,3 milhões de unidades em 2014. Porém, de 2014 para 2015, ocorreu uma queda de aproximadamente 40 % nas vendas de

computadores (ABINEE, 2016). Para celulares, a venda de aparelhos passou de 47,5 mi em 2009 para 70,3 milhões de aparelhos em 2014 (ABINEE, 2013, 2015). A produção global de aparelhos celulares em 2013 foi de 700 milhões de unidades, sendo que no Brasil, para o mesmo ano, o mercado de telefonia móvel foi responsável por aproximadamente 5,5 % de toda produção global (ABINEE, 2016; LI; JIANG; XU, 2017).

### **3.1.3 Placas de circuito impresso**

Os equipamentos modernos contêm uma gama muito grande de substâncias, incluindo materiais com valor agregado, bem como perigosos. A maioria dos materiais valiosos presentes nos REEEs se encontra nas placas de circuito impresso, que correspondem até 3 %, em massa, de todo o equipamento eletroeletrônico (FOGARASI et al., 2014; KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013).

As placas de circuito de impresso são plataformas sobre as quais os componentes microeletrônicos como chips semicondutores e capacitores são montados. São usadas para suporte dos componentes eletrônicos, bem como para conectá-los através de caminhos, faixas ou traços condutores gravados nas folhas de cobre laminado (KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013; YAMANE, 2012).

As placas de circuito impresso inicialmente eram feitas com um material chamado fenolite, produto à base de celulose e resina fenólica. Após problemas relacionados com sua característica higroscópica, foi inserido o compósito epóxi/fibra de vidro para que fossem totalmente inertes à água. As placas são classificadas como FR-2 (à base de fenolite) e FR-4 (fibra de vidro) (KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013; MORAES DE, 2011; YAMANE, 2012).

Além da relação do material empregado na sua fabricação, há também a classificação com relação ao número de camadas que as placas de circuito recebem e que são face simples (somente um lado do material suporte é revestido com cobre), face dupla (os dois lados do material suporte são revestidos com cobre) e multicamadas (entre 4 e 16 *layers* de cobre entre camadas do material suporte) (ABRACI, 2015; MORAES DE, 2011).

Para a Associação Brasileira de Circuitos Impressos (ABRACI), além das placas da série FR (do inglês, *flame resistant*), há também as PCIs de teflon (®Du Pont) e *composite epoxy materials* (CEM – 1) (ABRACI, 2015).

Os tipos mais comumente empregados na fabricação de televisores e eletrodomésticos são placas do tipo FR-2 e na fabricação de computadores, as FR-4 (GUO; GUO; XU, 2009; YAMANE et al., 2011; YAMANE, 2012).

Os diferentes tipos de placas, bem como a quantidade de camadas que a placa irá receber no processo de fabricação, influenciam no tipo de aplicação a que serão submetidas, além de apresentar uma ampla faixa de concentração dos materiais que as constituem (HADI et al., 2015b). A faixa de composição geral aproximada das PCIs pode ser visualizada na Tabela 2.

**Tabela 2.** Composição dos materiais de diferentes tipos PCIs em massa (%)

<b>Materiais</b>	<b>Placa 1<sub>a</sub></b>	<b>Placa 2<sub>b</sub></b>	<b>Placa 3<sub>c</sub></b>	<b>Placa 4<sub>d</sub></b>
Cobre	7	27	36	27
Ferro	12	2	10,7	2
Fibra de vidro	24	15	13	15
Polímero	23	5	7	5
Ferrita	5	0	3	0
Epóxi	7	8	0	8
Fenóis	0	0	6	0
Ouro	0,03	0,1	0	0,1
Bismuto	0,005	0,05	-	3,45
Cromo	0,002	0,1	-	0,1
Chumbo	0,3	3	0,2	0
Níquel	2,3	0,2	0,1	0,2
Prata	0,3	0,04	0	0,1
Estanho	0,3	3	0,2	2,5
Zinco	3	0,5	-	0,5
Alumínio	7	1	22	1

Fonte: Adaptado de:(HADI et al., 2015b)

<sup>1</sup> FR-4: fibra de vidro com menos camadas (menor quantidade de Cu);

<sup>b</sup> FR-4: fibra de vidro com mais camadas (maior quantidade de Cu);

<sup>c</sup> FR-2: placa fenólica (televisores, monitores de computadores pessoais);

<sup>d</sup> FR-4: fibra de vidro com mais camadas (maior quantidade de Cu e livre de solda contendo chumbo)

Esses valores, por serem distintos, devem ser considerados com prudência devido à variação dos tipos, idade e origem de cada placa. Essa variedade na concentração dos materiais, principalmente dos metais, mostra quão heterogêneo é esse tipo de resíduo. Devido a essa heterogeneidade dos resíduos eletrônicos, mais especificamente das placas de circuito impresso, o

processo de reciclagem e a recuperação de metais tornam-se uma tarefa desafiadora (GUIMARÃES; SANTOS; DUTRA, 2014; HADI et al., 2015b; MASAHIRO OGUCHI et al., 2011; TUNCUK et al., 2012):

As PCIs representam a porção mais atrativa economicamente quando se trata de resíduos eletrônicos. A maioria dos equipamentos contém placas de circuito impresso, constituindo cerca de 3 % em peso de todos os equipamentos produzidos. Cabe salientar que esse número é apenas uma média. Por exemplo, a porcentagem em peso da PCI em um telefone móvel é maior do que em uma máquina de lavar louças (AWASTHI; LI, 2017; CHAUHAN et al., 2018; HADI et al., 2015a; ZHOU; QIU, 2010).

Como mencionado anteriormente, grande parte dos metais preciosos são encontrados nas placas de circuito impresso. Em uma tonelada de PCI, pode ser encontrado entre 80 e 150 g de Au e entre 160 e 210 kg de Cu. No intuito de contextualizar esses valores, em relação à quantidade de ouro encontrado em minérios, essas concentrações são de 40 a 800 vezes maiores. Para o cobre, a concentração desse metal em placas de circuito impresso está entre 30 e 40 vezes maiores que a dos valores encontrados em minérios (HADI et al., 2015b). Tuncuk et al. (2012) também fizeram essa comparação e mostraram que as placas de circuito impresso podem conter até 20 % de Cu e 250 g.ton.<sup>-1</sup> de ouro, que são significativamente elevados, ou seja, 25 – 250 vezes mais ouro do que na natureza (1 – 10 g.t<sup>-1</sup> Au) e 20 – 40 vezes mais cobre em relação aos minérios de cobre (0,5 – 1% Cu) (CHAUHAN et al., 2018; TUNCUK et al., 2012).

### 3.2 MÉTODOS DE BENEFICIAMENTO

A reciclagem de resíduos eletrônicos é um assunto muito importante, não só do ponto de vista do tratamento propriamente dito, mas também do ponto de vista da recuperação de materiais preciosos. Para isso, há o emprego de processos simples e também de processos complexos. Usualmente são empregados processos mecânicos como forma de pré-tratamento dos resíduos(CUI; ZHANG, 2008; HAVLIK et al., 2010; MORAES DE, 2011; VEIT, 2005). Os principais processos empregados na recuperação de metais a partir

de REEE são os processos mecânicos (pré-tratamento), pirometalúrgico, eletrometalúrgico e hidrometalúrgico. Na Figura 3, está apresentado de maneira genérica um fluxograma com a sequência de operações basicamente empregadas na recuperação de metais a partir de REEE.

**Figura 3.** Fluxograma das etapas empregadas na recuperação de metais de REEE



Fonte: Adaptado de:(YAMANE, 2012)

Com relação à rota pirometalúrgica, os processos de incineração, sinterização, pirólise e fusão, entre outros, compõem o processamento pirometalúrgico e são caracterizados pelo emprego de altas temperaturas. São métodos tradicionalmente empregados na recuperação e reciclagem de metais

não ferrosos, bem como de metais preciosos de resíduos eletrônicos (CUI; FORSSBERG, 2003; CUI; ZHANG, 2008; VEIT, 2005).

O processo pirometalúrgico, de maneira geral, forma dois subprodutos: fase metálica, fase contendo escória, além da emissão de gases tóxicos. Na fase metálica, os metais formam uma liga metálica, e os materiais cerâmicos e ferro presentes nos resíduos formam a escória. Os polímeros, normalmente, são removidos através da degradação térmica.

Algumas empresas que aplicam a pirometalurgia na recuperação de metais de resíduos eletrônicos em escala real estão citadas na Tabela 3, bem como os metais recuperados (CUI; FORSSBERG, 2003; CUI; ZHANG, 2008; MOSKALYK; ALFANTAZI, 2003; YAMANE, 2012).

**Tabela 3.** Processos pirometalúrgicos em escala real para recuperação de metais de sucata eletrônica

<b>Empresa/País</b>	<b>Metais recuperados</b>
Noranda – Canadá	Cu, Au, Pt, Pd, Se, Te, Ni
Boliden Rönnskår – Suécia	Cu, Ag, Au, Pd, Ni, Se, Zn, Pb
Umicore – Bélgica	Metais base, metais do grupo da platina, Se, Te, In

Fonte: Adaptado de:(CUI; ZHANG, 2008)

Na hidrometalurgia, a recuperação de metais é realizada através do emprego de soluções (ácidos e/ou bases). Nos estudos de Cui; Zhang, 2008; Havlik Et Al., 2010; Veit, 2005 diferentes soluções, como ácido sulfúrico, ácido clorídrico, ácido nítrico, iodeto, amônia, cianeto, tioureia e tiosulfato, foram empregados para avaliar o seu potencial na recuperação de metais de placas de circuito impresso de sucatas eletrônicas (KASPER et al., 2011).

A hidrometalurgia, um processo bastante seletivo e normalmente com um modo de operação simplificado, pode ser adequada para aplicações em pequenas escalas. Os maiores problemas nesses processos estão relacionados à grande geração de resíduos líquidos e cinéticas lentas(CUI; ZHANG, 2008).A eletrometalurgia geralmente é empregada como processo de refino para recuperação dos metais com maior alto grau de pureza (HAVLIK et al., 2010; MORAES DE, 2011).

O processo consiste basicamente na aplicação de um potencial entre dois eletrodos imersos em uma solução. Os metais a serem recuperados podem estar na forma de íons dissolvidos na solução, sendo depositados como sólidos cristalinos no cátodo, ou então fazerem parte do ânodo e sofrerem uma dissolução anódica com posterior redução no cátodo (VEIT, 2005; XIU; ZHANG, 2010; YAMANE, 2012).

Em muitos estudos são utilizados diferentes tipos de processamento para recuperação de metais de placas de circuito impresso. Os processos mecânicos, por formarem a base deste trabalho, serão descritos em capítulos próprios.

### **3.2.1 Processamento mecânico**

O processamento mecânico é considerado um pré-tratamento dos resíduos e consiste de processos físicos (BURKE, 2007; CUI; FORSSBERG, 2003; CUI; ZHANG, 2008). Entre eles, destacam-se os processos de cominuição, separação granulométrica, separação magnética, separação eletrostática e separação por densidade, que serão detalhados melhor a seguir.

#### **3.2.1.1 Cominuição**

A moagem (cominuição) é empregada na redução do tamanho das partículas no intuito de liberar e dispor os metais através de mecanismos como abrasão, impacto, corte ou pressão. A ação desses mecanismos promove o desgaste dos resíduos, favorecendo seu fracionamento (KANG; SCHOENUNG, 2005; MORAES DE, 2011; VEIT, 2005). Para cada tipo de equipamento empregado na cominuição, ocorrem diferentes tipos de fratura dos materiais.

Os moinhos de facas (corte) ou de martelos (impacto) são os mais empregados nesse processo. Esses moinhos são equipados com grelhas para maior controle do tamanho de partículas (KANG; SCHOENUNG, 2005). No estudo de Moraes (2011), que trabalhou com resíduos de placas de circuito impresso de celular, a concentração de metais antes do processo de cominuição era de 32 %. Ao reduzir o tamanho das partículas para 6 mm, a concentração de metais aumentou para 48 %. No mesmo estudo, as partículas

foram reduzidas a 2 mm, concentrando ainda mais os metais, com 64 % (MORAES DE, 2011).

No cisalhamento – retalhamento em moinho de facas –, a redução de tamanho ocorre pelo corte do resíduo entre um eixo central com facas e a malha com abertura conhecida. Já no moinho de martelos, o material é fracionado pela colisão dos martelos e com as paredes dos moinhos (KANG; SCHOENUNG, 2005; MOHABUTH; MILES, 2005; WILLIAMS, 1976)

Estudos de Duan et al. (2009) e He et al. (2006) mostram que os resíduos de PCIs, ao serem triturados por moinhos, liberam os metais dos não metais facilmente com granulometrias entre 5 e 3 mm (DUAN et al., 2009; HE et al., 2006). Nos trabalhos de Xue & Xu (2013) e Zhou & Xu (2012), quase todos os metais atingiram liberação completa com tamanhos de partícula de 1 a 0,3 mm, sendo que o grau de liberação de metais aumenta mais quanto menor o tamanho de partícula. No entanto, a capacidade de recuperar os metais de partículas mais finas geralmente diminui (XUE; XU, 2013; ZHOU; XU, 2012).

### 3.2.1.2 Classificação granulométrica

A classificação granulométrica é empregada para a classificação do resíduo previamente moído em diferentes granulometrias. Esse tipo de resíduo, quando reduzido a tamanho de grãos mais finos, consiste em partículas não uniformes e com diferentes propriedades, tais como tamanho, densidade e forma. Essas diferenças nas propriedades das partículas são usadas para propagar a separação em um sistema de vibração. Quando materiais granulares são submetidos à vibração, é evidente a ocorrência de segregação (KANG; SCHOENUNG, 2005; NESBITT; BREYTENBACH; VAN DER PLAS, 2005).

Basicamente, o peneiramento de materiais após a redução de tamanho com emprego de moinhos é realizado em peneiras fixas, peneiras vibratórias inclinadas e peneiras vibratórias horizontais, como também através do uso de grelhas. No entanto, alguns fatores podem estar diretamente relacionados com a eficiência durante o peneiramento, em função do material e do equipamento,

como, por exemplo, material (densidade, forma das partículas, superfície granular) e equipamento (alimentação da peneira, área superficial, tamanho e forma das aberturas, amplitude, frequência e direção do movimento das peneiras) (MORAES DE, 2011; VEIT, 2005). Em peneiras vibratórias horizontais, a segregação é definida como a migração de pequenas partículas através dos espaços das aberturas das malhas, uma vez que as partículas maiores ficam nas malhas superiores (KANG; SCHOENUNG, 2005; MURAGAN et al., 2008; NESBITT; BREYTENBACH; VAN DER PLAS, 2005; WILLIAMS, 1976; ZHIHAI et al., 2011).

O tipo de material submetido à moagem também tem influência no processo de separação granulométrica. Metais dúcteis, como o cobre, são mais difíceis de moer. Já o ferro que é um metal bem menos dúctil à moagem é facilitada, e, portanto, terá menor tamanho de partículas em relação ao cobre, por exemplo (CALLISTER JR., 2002). Após identificação de metais como ferro e cobre em placas de circuito impresso de celulares, relatou-se que em partículas mais finas (2 mm) o ferro é predominante. Já nas partículas mais grossas (6 mm), o cobre foi predominante (MORAES DE, 2011).

Para Zhihai et al. (2011) e Murugan et al. (2008), fatores como tipo de equipamento (fluxo horizontal, horizontal inclinado, peneiras fixas), composição, taxa de alimentação, tamanho das partículas e velocidade de vibração, podem influenciar na distribuição granulométrica (MURAGAN et al., 2008; ZHIHAI et al., 2011).

### 3.2.1.3 Separação magnética

Neste capítulo, primeiramente é necessário explicar a diferença entre dois termos bastante empregados nas indústrias que utilizam separadores magnéticos: separação magnética e concentração magnética. O termo separação magnética é empregado para aplicações em que se deseja retirar um rejeito magnético, onde o fluxo não magnético é o principal produto de interesse. Diferente da concentração magnética, pois nesta se aproveita a fração em que os materiais são atraídos pela ação do campo magnético (SAMPAIO; LUZ, 2010).

Susceptibilidade magnética é a propriedade que um determinado material responde quando submetido a um campo magnético (MORAES DE, 2011; VEIT, 2005; YAMANE, 2012). Baseado nessa propriedade, os materiais presentes nos resíduos eletrônicos são classificados nestas três categorias:

- ✚ Materiais ferromagnéticos: atraídos fortemente pelo campo magnético – os dipolos elementares são permanentes, alinhando-se na mesma direção do campo magnético, resultando em elevados níveis de magnetização (Co, Fe, Ni);
- ✚ Materiais paramagnéticos: atraídos fracamente pelo campo magnético – elétrons desemparelhados, quando submetidos a um campo magnético, alinham-se, provocando leve aumento na intensidade do campo (Al e Mg);
- ✚ Materiais diamagnéticos: não atraídos pelo campo magnético – se submetidos a um campo magnético, têm seus elétrons orientados no sentido contrário ao sentido do campo (Ag, Bi, Cu, Pb) (CALLISTER JR., 2002).

Ao descrever um campo magnético, usualmente refere-se a duas grandezas: densidade de fluxo magnético ( $\vec{B}$  – refere-se ao número de linhas de indução que passam através da partícula) e intensidade de campo ( $\vec{H}$  – força de magnetização que induz a passagem das linhas de indução através das partículas) (SAMPAIO; LUZ, 2010). Tal intensidade é dada pela expressão:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad [1]$$

Onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética no vácuo.

A susceptibilidade magnética de um material ferromagnético é variável, depende do campo de magnetização, da natureza e do manuseio da amostra.

Quando um material fracamente magnético é submetido a um campo magnético  $\vec{H}$ , o fluxo magnético  $\vec{B}$  é acrescido do valor  $\vec{\Psi}$ , de modo que:

$$\vec{B} = \vec{H} + \vec{\Psi} \quad [2]$$

Onde  $\vec{\Psi}$  é a indução magnética do material.

O seu valor no ar é muito baixo, portanto  $\vec{B} = \vec{H}$ . Além disso, comumente refere-se tão só ao termo magnetização ( $\vec{J}$ ) de um material, que nada mais é que a ação de criar linhas de indução magnética em um material ou em determinada região, portanto, a relação entre indução magnética e magnetização é dada assim:

$$\vec{\Psi} = 4\pi\vec{J} \quad [3]$$

Sendo possível descrever a Equação [1] como sendo

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{J} \quad [4]$$

A susceptibilidade magnética ( $k$ ) é a razão adimensional entre a magnetização e a intensidade de campo, ou seja,

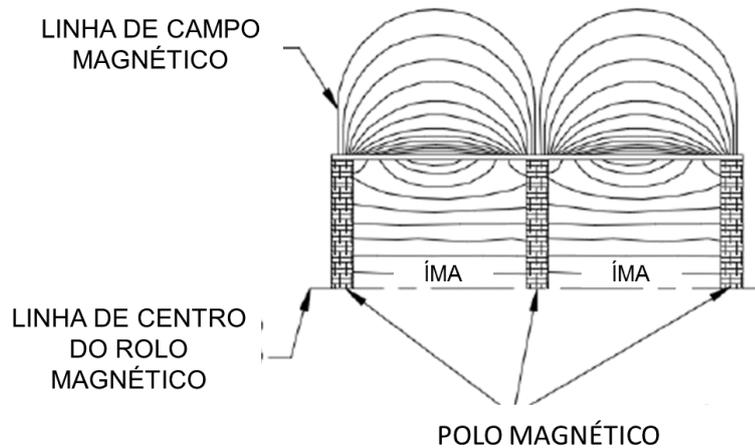
$$k = \vec{J} / \vec{H} \quad [5]$$

No caso dos materiais paramagnéticos,  $k$  é uma constante positiva e de baixo valor, com valores máximos de  $10^{-3}$ . Para os diamagnéticos,  $k$  é uma constante negativa. Os materiais ferromagnéticos, em sua maioria, são referenciados em termos de permeabilidade magnética, onde

$$\mu = \vec{B} / \vec{H} \quad [6]$$

No processo que emprega separador magnético, é possível separar partículas magnéticas (materiais ferromagnéticos), as quais aderem ao rolo-ímã devido à atração pelo campo magnético. Em contrapartida, as partículas não magnéticas (materiais paramagnéticos e diamagnéticos) não são atraídas pelo campo magnético, movendo-se para posições com baixa intensidade de campo (CALLISTER JR., 2002; LAGE, 2010; SAMPAIO; LUZ, 2010; VEIT, 2005). Na Figura 4, está representado o desenho esquemático de um rolo magnético e suas linhas de indução.

**Figura 4.** Desenho esquemático de um rolo magnético



Fonte: (INBRAS-ERIEZ, 2015)

Os separadores magnéticos, em particular os de tambores de baixa intensidade, são amplamente empregados na recuperação de metais ferromagnéticos de resíduos com materiais não magnéticos e não ferrosos. Além disso, têm havido muitos avanços na concepção e operação de separadores magnéticos de alta intensidade, principalmente como resultado da introdução de ímãs permanentes com ligas de terras raras capazes de proporcionar forças e gradientes de campo muito elevados (CUI; FORSSBERG, 2003).

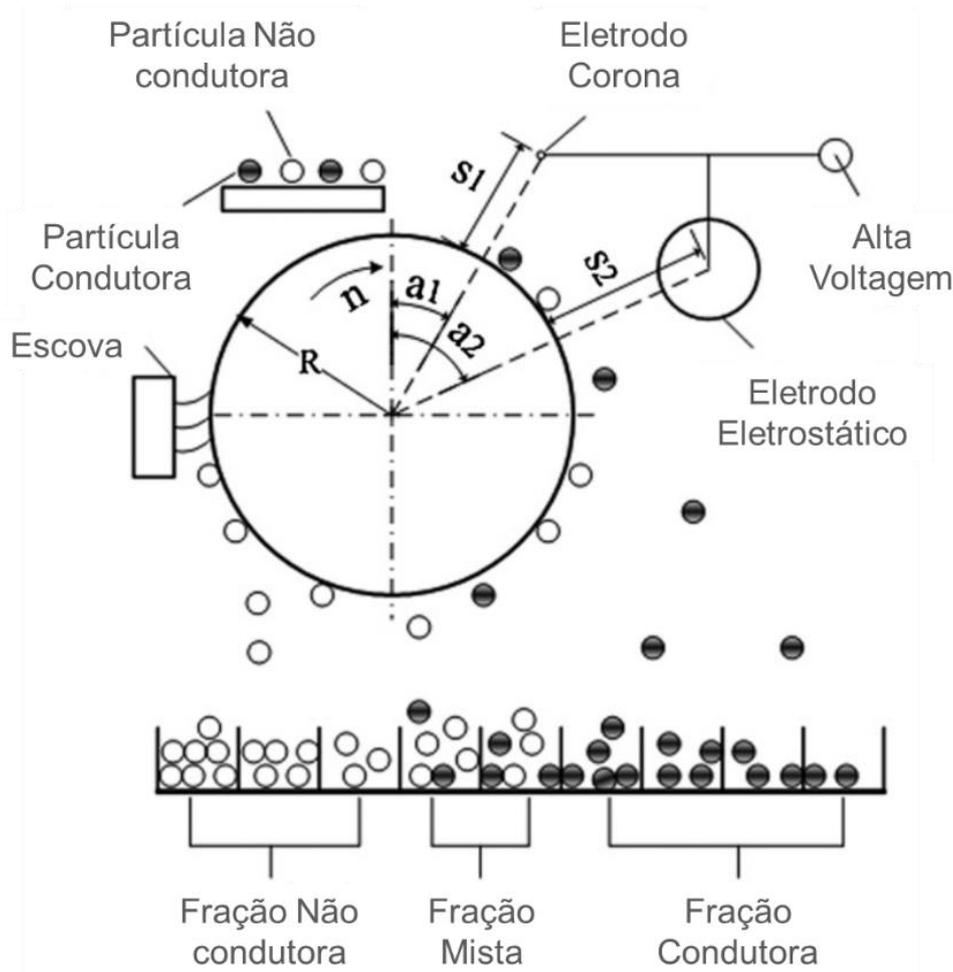
#### 3.2.1.4 Separação eletrostática

As aplicações de tecnologias de separação eletrostática são amplas, sendo empregadas desde recuperação de metais e isolamento de materiais condutores de resíduos industriais a beneficiamento mineral. Esse processo se beneficia das forças exercidas pelo campo elétrico de materiais diferentemente carregados ou polarizados (INCULET; CASTLE; BROWN, 1998; MURAGAN et al., 2008; WU; CASTLE; INCULET, 2005; WU et al., 2003).

Basicamente, o mecanismo por indução de carga é o mais empregado para compreender a aquisição de carga superficial pelas partículas de resíduos. Um campo elétrico de alta intensidade é gerado entre um eletrodo

estático e o rolo, além de possuir um ou mais eletrodos ligados a uma fonte de alta tensão, conforme pode ser visualizado na Figura 5.

**Figura 5.** Representação esquemática de um separador eletrostático



Fonte: Adaptado de (JIANG; JIA; ZHEN-MING, 2009)

As partículas a serem classificadas são introduzidas sobre a superfície do rolo que as leva a uma zona de intenso campo elétrico. O eletrodo de alta tensão cria uma descarga de modo que todas as partículas são carregadas por bombardeamento iônico. As partículas de materiais isolantes aderem ao rolo e seguem até o compartimento de recolhimento. As partículas de materiais condutoras, à medida que são submetidas ao campo elétrico, são carregadas por indução eletrostática e projetadas em direção ao eletrodo estático de polaridade oposta (DASCALESCU et al., 1998a; INCULET; CASTLE; BROWN, 1998; JIANG; JIA; ZHEN-MING, 2009; YOUNES et al., 2013).

Os estudos de Dascalescu et al. (1995, 1998a, 1998b, 2005), Wu et al. (2003), Richard et al., (2017a, 2017b, 2017c) e Zeghloul et al., (2017), têm contribuído significativamente para o desenvolvimento teórico do carregamento por indução em campos eletrostáticos. Alguns aspectos que afetam o comportamento de partículas foram estudados, tais como, por exemplo, tamanho de partículas, efeito de auto descarga das partículas e campo elétrico.

Acredita-se que a forma das partículas pode influenciar na pureza das frações condutoras e não condutoras (DASCALESCU et al., 1995, 1998b, 1998a, 2005; WU et al., 2003).

### 3.2.1.5 Separação por densidade

Embora não tenha sido utilizada neste trabalho a separação por densidade faz parte dos processos mecânicos. A separação por densidade é um processo bastante empregado na separação e na concentração de minérios, bem como na limpeza de carvões (VEIT, 2005). Sua principal aplicação consiste na separação dos materiais mais leves (polímeros e cerâmicos), pré-concentrando os metais de interesse que, devido ao seu peso, afundam e reduzem os custos do tratamento posterior (AQUINO,; OLIVEIRA; BRAGA, 2007; DAS; ARI; MEHROTRA, 2009).

Basicamente, a separação ocorre pela diferença específica da densidade entre o líquido (líquido denso) e os materiais presentes no resíduo. Em seu estudo, Veit (2001) empregou o uso de tetrabromoetano (TBE) com o intuito de separar os metais dos polímeros e cerâmicos. Porém, como desvantagem, o processo implica o emprego de substâncias tóxicas. Na Tabela 4, estão apresentados alguns líquidos densos empregados em testes de concentração de metais (VEIT, 2001).

**Tabela 4.** Líquidos densos empregados em testes de concentração e suas densidades

<b>Líquido Denso</b>	<b>Densidade</b>
H <sub>2</sub> O	1,0
NaCl + H <sub>2</sub> O	1,0 – 2,0
CaCl <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	1,5
Acetona : TBE = 4 : 5	2,0
Acetona : TBE = 0,27 : 1	2,5
TBE	2,96

Fonte: Adaptado de (VEIT, 2001)

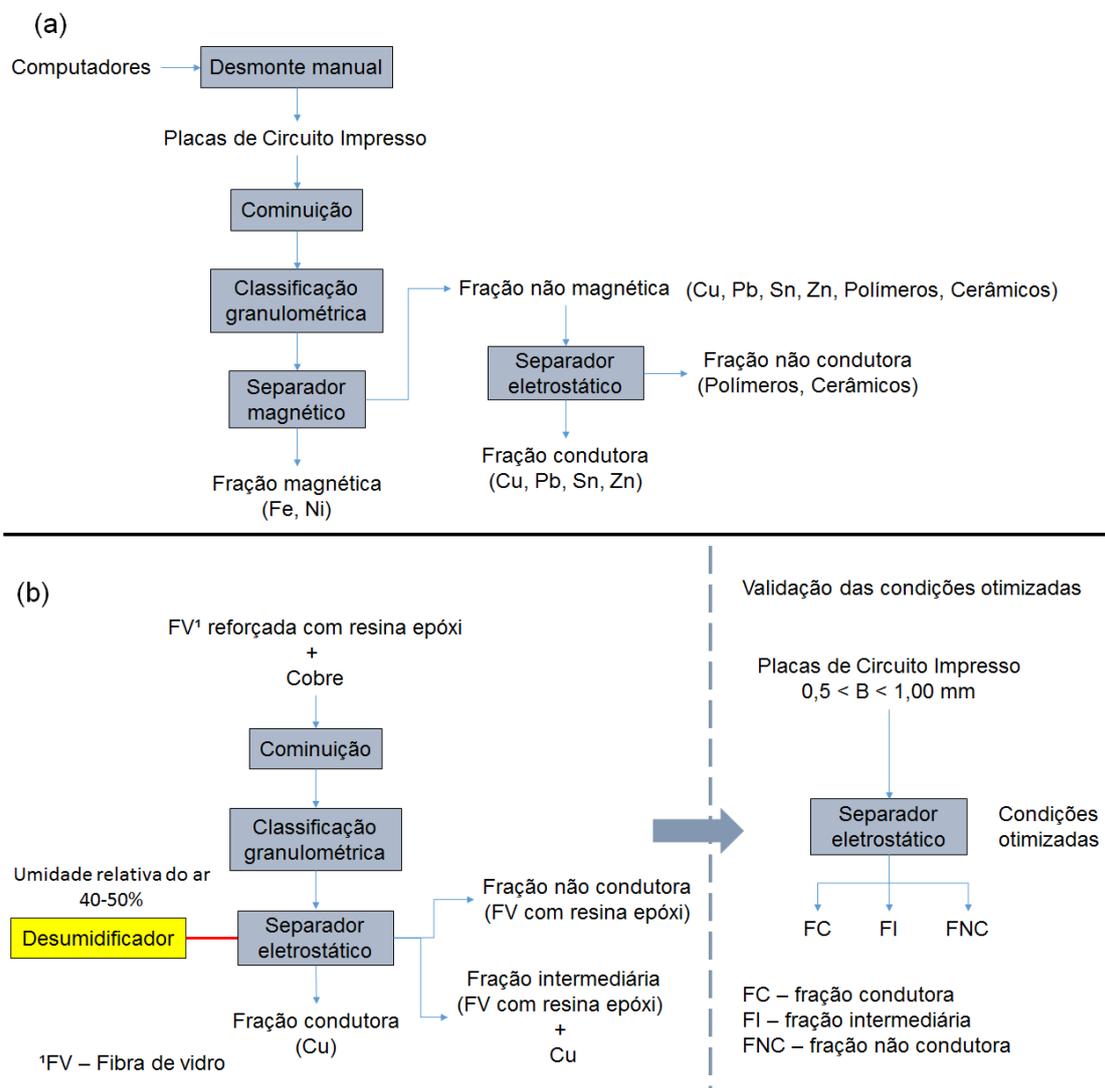
Um dos tipos de separadores por densidade, a título de exemplo, é o separador por densidade do tipo *teetered bed separator*, o qual emprega uma operação com fluxo de contracorrente, na qual o líquido de fluidização é introduzido na parte inferior, enquanto o material sólido é alimentado na parte superior. Essa alimentação decorre tangencialmente do fluxo do líquido, ocorrendo uma mistura axial devido à turbulência (AQUINO,; OLIVEIRA; BRAGA, 2007; DAS; ARI; MEHROTRA, 2009).

Assim, em síntese, o tamanho de partícula desempenha um papel importante no processo de separação, uma vez que existe um limite de tamanho máximo que uma partícula possa ser arrastada para o transbordamento a uma dada taxa de oscilação do fluido (AQUINO,; OLIVEIRA; BRAGA, 2007; DAS; ARI; MEHROTRA, 2009; VEIT, 2001).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia foi dividida em duas partes e pode ser melhor compreendida na Figura 6, a qual apresenta os dois fluxogramas básicos empregados neste estudo, primeiramente um estudo preliminar com resíduo real e o outro com resíduo sintético.

**Figura 6.** Fluxograma geral da linha de concentração de metais: (a) resíduo real; (b) resíduo sintético



Fonte: Autor

No fluxograma (a), foram empregadas placas de circuito impresso de computadores de mesa e *laptops*, defeituosos ou obsoletos, obtidos em lojas de assistência técnica e por doações pessoais.

Não foi feita a distinção das placas por modelo ou ano de fabricação dos computadores devido à dificuldade em se obter quantidades expressivas de um mesmo aparelho. Por outro lado, a dificuldade na distinção das placas pode representar uma condição mais próxima de uma coleta real de resíduos eletroeletrônicos. Foram obtidos aproximadamente 12 kg de placas de circuito impresso de computadores.

Já no fluxograma (b), apresentado na Fig. 6, foi utilizado resíduo sintético composto por resina epóxi reforçada com fibra de vidro e cobre. A proporção dos materiais foi realizada conforme estudo de Jiang & Zhen-Ming (2009), sendo 75 % de não metais (fibra de vidro reforçada com resina) e 25 % de metais (Cu) (JIANG; JIA; ZHEN-MING, 2009). A resina epóxi foi gentilmente cedida pelo CEITEC *Semiconductors S.A.*

A seguir, serão detalhadas as principais etapas realizadas de cada um dos fluxogramas acima apresentados (Fig. 6).

#### 4.1 ESTUDO PRELIMINAR

##### 4.1.1 Resíduo Real

###### 4.1.1.1 Redução do tamanho e cominuição dos materiais

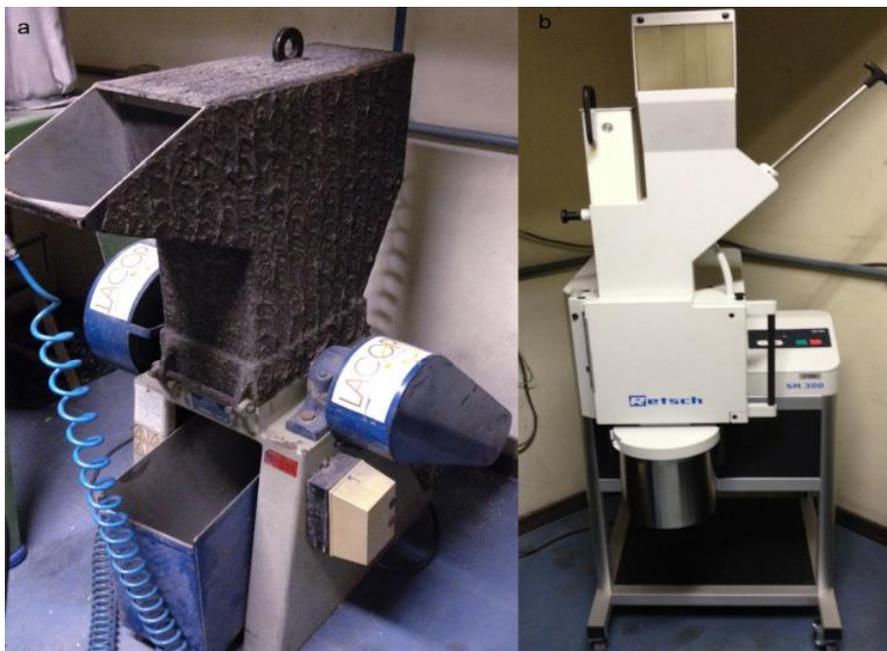
As placas de circuito impresso foram retiradas manualmente dos aparelhos e submetidas a uma redução de tamanho, também manual. Essa redução foi necessária, pois a entrada da alimentação dos moinhos é menor em relação ao tamanho das placas. Além disso, os capacitores também foram retirados previamente à moagem.

Após a quebra manual, as placas foram submetidas primeiramente a um moinho de facas da marca Rone, modelo SRB 2305, com malha de 8 mm, seguido de moagem com outro moinho de facas da marca Retsch, modelo SM 300, partindo de uma malha de 2 mm, até a malha de 0,5 mm. Os dois moinhos podem ser visualizados na Figura 7.

Nesta segunda moagem foram utilizadas malhas com diferentes tamanhos de abertura (2 mm, 1 mm e 0,5 mm), para que a cominuição das

placas fosse feita gradativamente e não interferisse no rendimento do equipamento.

**Figura 7.** Moinhos de facas (a) malha de 8 mm (Rone – SRB 2305); (b) malha de 2 – 0,5 mm (Retsch – SM 300)



Fonte: Autor

#### 4.1.1.2 Classificação granulométrica

A fração obtida no processo de cominuição foi submetida à classificação granulométrica via seca por meio de um agitador de peneiras série Tyler, da marca Retsch, modelo AS200 Digit, conforme Figura 8.

A etapa de classificação granulométrica foi realizada em peneiras vibratórias com conjunto de 3 peneiras, com 16, 32 e 60 *mesh*, gerando assim três frações. As frações A (< 0,5 mm) e B, entre 0,5 mm e 1 mm, foram separadas e pesadas. A fração de materiais que ficaram com tamanho de partículas > 1mm foi novamente moída no intuito de minimizar as perdas e garantir que todo o material tivesse um tamanho de partícula inferior a 1mm.

**Figura 8.** Agitador de peneiras série Tyler (Retsch – AS 200 Digit)



Fonte: Autor

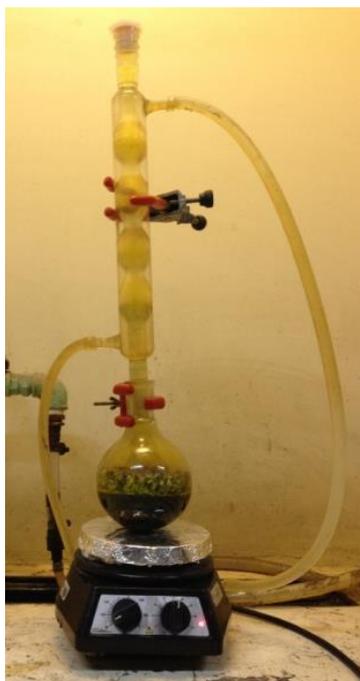
As aberturas utilizadas foram 16 mesh (1 mm) e 32 mesh (0,5 mm). Desta forma, foram obtidas três frações: A < 0,5 mm; 1,0 mm > B > 0,5 mm; e C > 1 mm. A fração C retornava ao moinho no intuito de diminuir a granulometria para valores inferiores a 1 mm e assim utilizar nas etapas seguintes apenas as frações A e B.

#### 4.1.1.3 Caracterização e análise química das PCIs

As caracterizações das PCIs foram realizadas em ambas as frações com o fim de identificar qualitativamente e quantitativamente os metais constituintes.

Para este procedimento, foi realizada digestão das amostras com água-régia (25 % HNO<sub>3</sub> : 75 % HCl) em um sistema com refluxo para evitar perdas durante o processo, conforme se pode observar na Figura 9.

**Figura 9.** Digestão com água-régia



Fonte: Autor

A digestão foi realizada utilizando uma relação sólido/líquido de 1:10 a uma temperatura de 100°C, sob agitação, durante uma hora (Patrícia – dissertação).

Após a reação, o líquido da digestão foi filtrado em papel filtro quantitativo. A fração retida no filtro foi lavada com água deionizada, com posterior secagem em estufa microprocessada de secagem (Quimis, Q317M-22) a 75 °C, durante 4 horas.

Foi realizado o cálculo para obter a quantidade de metais (Equação 7) e de materiais cerâmicos e poliméricos (Equação 8).

$$\%_{\text{metais}} = \frac{M_{\text{lix}} \times 100\%}{M_i} \quad [7]$$

$$\%_{\text{pol/cer}} = \frac{M_{\text{seco}} \times 100\%}{M_i} \quad [8]$$

Onde:

$M_i$  = Massa inicial de amostra (20 g);

$M_{\text{lix}}$  = Massa de material lixiviada (g);

$M_{\text{seco}}$  = Massa de material retido após filtração (g)

$\%_{\text{metais}}$  = fração correspondente aos metais lixiviados (g)

$\%_{\text{pol/cer}}$  = fração correspondente ao material não lixiviado (g)

A cada etapa do processo, alíquotas das frações obtidas foram digeridas no mesmo sistema, com o intuito de analisar os metais para avaliação das concentrações obtidas.

Os metais analisados foram Cu, Fe, Ni, Pb e Zn. Para análise, foi utilizado um espectrofotômetro de absorção atômica de chama (EAAC – SpectrAA 110, marca Varian) no laboratório de Ecotoxicologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

#### 4.1.1.4 Separador magnético de rolo a seco

Neste trabalho, um separador magnético de rolo a seco da marca Inbras-Eriez, modelo RE-05/4-1 (Figura 10), foi empregado para cada fração granulométrica. O campo foi de 1300 G.

**Figura 10.** Separador magnético de rolo a seco (Inbras-Eriez – RE-05/4-1)



Fonte: Autor

O processo consiste na aplicação de um campo magnético às partículas das PCIs, separando a parte suscetível a esse campo dos demais materiais.

As frações A e B obtidas no processo de separação granulométrica foram quarteadas e divididas em quatro partes cada com o objetivo de avaliar de forma mais concisa os parâmetros de velocidade da esteira e da vibração

do alimentador do separador magnético. As condições em que as amostras foram submetidas estão apresentadas na Tabela 5:

**Tabela 5.** Variáveis empregadas no separador magnético

<b>Amostra</b>	<b>Quantidade (g)</b>	<b>Amostra</b>	<b>Quantidade (g)</b>	<b>Velocidade (rpm)</b>	<b>Vibração (Hz)</b>
A1	1000	B1	1001	150	50
A2	1000	B2	1000	150	100
A3	1000	B3	1000	175	50
A4	1000	B4	1009	175	100

Os parâmetros aplicados foram assim escolhidos visando a produção em escala industrial.

Após o emprego do separador magnético, obtiveram-se as frações consideradas magnéticas ( $A_M - B_M$ ) e não magnéticas ( $A_{NM} - B_{NM}$ ). As frações não magnéticas das amostras foram submetidas ao separador eletrostático.

#### 4.1.1.5 Separador eletrostático corona

A separação eletrostática apresenta-se como uma forma eficaz para a recuperação de metais de resíduos eletroeletrônicos, em especial das placas de circuito impresso. É tida como separação seletiva de materiais condutores e não condutores em um campo elétrico (INCULET; CASTLE; BROWN, 1998; VEIT, 2005).

Neste trabalho, usou-se um separador eletrostático de rolo de alta tensão da marca Inbras-Eriez, modelo ESP-14/01S, mostrado na Figura 11.

**Figura 11.** Separador eletrostático corona (Inbras-Eriez – ESP-14/01S)



Fonte: Autor

O separador eletrostático foi ajustado conforme a Tabela 6 (VEIT, 2005).

**Tabela 6.** Parâmetros de regulagem dos eletrodos no separador eletrostático

<b>Itens</b>	<b>Parâmetros</b>
<b>Eletrodo Ionizante</b>	
Ângulo	80°
Distância do rotor	25 cm
<b>Eletrodo Estático</b>	
Ângulo	52,5°
Distância do rotor	25 cm
<b>Sliper</b>	
Condutor	45°
Não condutor	45°
Vibração da Calha	50 Hz

Fonte: Veit, (2005)

As frações não magnéticas que provêm do separador magnético foram submetidas ao separador eletrostático, conforme as variáveis de operação apresentadas na Tabela 7.

**Tabela 7.** Variáveis a serem empregadas no separador eletrostático

<b>Amostra</b>	<b>Tensão (kV)</b>	<b>Velocidade do Rolo (rpm)</b>	<b>Amostra</b>
A1 <sub>NM</sub>	20	100	B1 <sub>NM</sub>
A2 <sub>NM</sub>	20	175	B2 <sub>NM</sub>
A3 <sub>NM</sub>	35	100	B3 <sub>NM</sub>
A4 <sub>NM</sub>	35	175	B4 <sub>NM</sub>

Posto isso, convém que se diga que após a separação eletrostática obtém-se duas frações: condutora e não condutora. A fração condutora é onde está contido, teoricamente, o cobre, metal de alto valor agregado, cujo ponto foi avaliar a capacidade de produção visando alta produção em escala industrial.

#### 4.2 ESTUDO COM RESÍDUO SINTÉTICO

Foi utilizado um resíduo sintético composto por resina epóxi reforçada com fibra de vidro e cobre. A proporção dos materiais foi realizada conforme estudo de Jiang & Zhen-Ming (2009), sendo 75 % de não metais (fibra de vidro reforçada com resina) e 25 % de metais (cobre) (JIANG; JIA; ZHEN-MING, 2009).

As placas de fibra de vidro e o cobre foram moídos separadamente em um moinho de facas com peneiras de 4 e 2 mm (Fig. 7).

O material particulado foi submetido a um agitador de peneiras série Tyler, previamente apresentado na Figura 8, com aberturas das malhas de 16 mesh (1 mm), onde o tamanho de partículas usadas neste estudo foi entre 1 e 2mm. Os materiais moídos podem ser visualizados na Figura 12.

**Figura 12.** Amostras do material particulado (A – cobre; B – fibra de vidro reforçada com resina epóxi) entre 1 e 2 mm



Fonte: Autor

Após a moagem e separação granulométrica, foi usado o mesmo separador eletrostático (Inbras-Eriez, ESP-14/01S), apresentado na Figura 11, para a otimização dos melhores parâmetros para separação de cobre de uma mistura sintética, com proporções próximas às encontradas em PCIs de computadores.

Na Figura 13, está apresentado o desenho esquemático do separador eletrostático com os parâmetros estudados neste trabalho, onde:

$d_1$  = distância do eletrodo corona ao rolo

$d_2$  = distância do eletrodo eletrostático ao rolo

$\alpha$  = ângulo do eletrodo corona ao centro do rolo

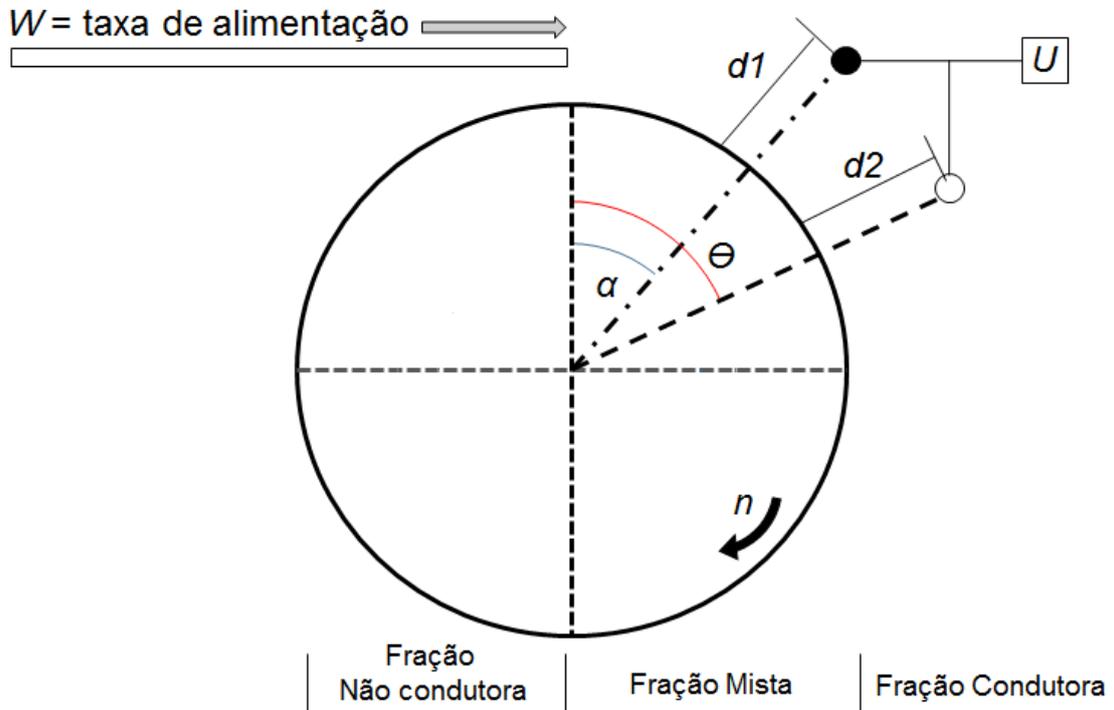
$\theta$  = ângulo do eletrodo eletrostático ao centro do rolo

$n$  = velocidade do rolo

$U$  = fonte de alta voltagem

$W$  = taxa de alimentação

**Figura 13.** Disposição dos parâmetros em um separador eletrostático corona



Fonte: Adaptado de: (JIANG; JIA; ZHEN-MING, 2009)

Na Tabela 8, estão as variáveis empregadas para cada parâmetro para a otimização da concentração do cobre através do emprego de um separador eletrostático. Para cada grupo de amostras variou-se apenas um parâmetro. Nesta etapa do trabalho, a tensão e taxa de alimentação foram mantidas constantes em 30 kV e 30 g.min<sup>-1</sup>, respectivamente. Foi utilizado um desumidificador para manter a umidade relativa do ar entre 40-50 %.

**Tabela 8.** Variáveis empregadas no separador eletrostático

Grupo*	Variáveis
1	$\alpha = 20^\circ; \Theta = 65^\circ; d1 = 50; d2 = 60$
	$\alpha = 30^\circ; \Theta = 65^\circ; d1 = 50; d2 = 60$
	$\alpha = 40^\circ; \Theta = 65^\circ; d1 = 50; d2 = 60$
2	$\alpha = 30^\circ; \Theta = 55^\circ; d1 = 50; d2 = 60$
	$\alpha = 30^\circ; \Theta = 65^\circ; d1 = 50; d2 = 60$
	$\alpha = 30^\circ; \Theta = 75^\circ; d1 = 50; d2 = 60$
3	$\alpha = 30^\circ; \Theta = 65^\circ; d1 = 40; d2 = 60$
	$\alpha = 30^\circ; \Theta = 65^\circ; d1 = 50; d2 = 60$
	$\alpha = 30^\circ; \Theta = 65^\circ; d1 = 60; d2 = 60$
4	$\alpha = 30^\circ; \Theta = 65^\circ; d1 = 40; d2 = 50$
	$\alpha = 30^\circ; \Theta = 65^\circ; d1 = 40; d2 = 60$
	$\alpha = 30^\circ; \Theta = 65^\circ; d1 = 40; d2 = 70$

\*  $U = 30$  kV;  $W = 30$  g/min

Cada grupo de amostras foi submetido a testes em triplicata. Após a passagem pelo separador eletrostático as amostras foram analisadas visualmente, visto que eram compostas por apenas dois materiais (cobre e fibra de vidro) de fácil diferenciação visual. Para esta análise foi empregada uma lupa com aumento de 4 vezes e uma pinça. Cada material separado foi pesado em balança analítica com precisão de 0,1 g.

Após obter as melhores condições empregadas no SEC, baseando-se no balanço de massas, uma segunda etapa foi realizada, levando em consideração os parâmetros mantidos como fixos anteriormente, conforme Tabela 9.

**Tabela 9.** Otimização usando diferentes tensões e rotação do rolo

Parâmetros avaliados	Parâmetros otimizados na etapa anterior
U = 20 kV U = 25 kV n = 70 rpm n = 80 rpm	$\alpha = 30^\circ$ ; $\Theta = 65^\circ$ ; $d1 = 40$ ; $d2 = 50$ U = 30 kV; n = 50 rpm
W = 30 g/min	

Depois de obtidas as melhores condições de operação aplicadas ao separador eletrostático corona, fizeram-se novos testes com placas de circuito impresso reais no intuito de avaliar se as condições consideradas boas para resíduo sintético teriam também resultados satisfatórios no resíduo real.

Para estes ensaios reais, três alíquotas de 150 g de PCIs previamente moídas ( $0,5 < B < 1,00$  mm), conforme *Itens 4.1.1 e 4.1.2*, e separadas magneticamente conforme *Item 4.1.4 – Amostra B3* para separação de materiais (Fe e Ni), foram usadas a fim de ter frações mais concentradas em cobre para serem submetidas ao separador eletrostático. As frações condutoras obtidas foram digeridas em água-régia, conforme *Item 4.1.3* e analisadas em ICP-OES (marca Agilent Technologies, modelo 5110) no Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais – LACOR/UFRGS.

#### **4.2.1 Experimento com um único fator (ANOVA de uma via)**

Visto que o separador eletrostático possui muitos parâmetros operacionais que podem influenciar nos resultados, uma análise destes parâmetros e variáveis pode ser muito interessante a fim de verificar o que mais importante e quanto isto pode interferir nos resultados da separação dos materiais. Existem diferentes abordagens para fazer isso, porém umas das mais usuais é a metodologia conhecida como análise de variância ANOVA com um único fator.

A metodologia conhecida como planejamento de experimentos (DOE) leva a uma sequência estruturada de testes em que são feitas mudanças proposítas com fatores controláveis para verificar o efeito sobre a variável de resposta e o fenômeno também é influenciado pelos fatores de ruído responsáveis pela variabilidade da resposta.

Uma das técnicas DOE é a análise de variância ANOVA com um único fator. A ANOVA é usada para comparar meios quando há mais de dois níveis em um único fator, no qual o experimento deve ser completamente randomizado. Existe premissas básicas para validar a ANOVA (MONTGOMERY, 1997, 2009):

- Distribuição normal de dados;
- Homogeneidade de variâncias (em cada grupo), aleatoriedade de erros;
- Efeitos aditivos, quando não há interação entre fatores, o valor esperado de cada combinação de níveis do fator é a soma dos valores esperados de cada nível separadamente;
- Independência estatística dos valores observados, ou seja, os dados não têm correlação.

Se os pressupostos de normalidade e homogeneidade não forem satisfeitos, a ANOVA não é precisa e será aproximada. Em situações raras, a suposição de aditividade de efeitos não é satisfeita. A independência estatística dos valores observados é obtida com o uso da randomização, isto é, a ordem de execução dos testes.

O modelo estatístico de ANOVA de uma via é:

$$y_{ij} = \mu + \tau_j + \varepsilon_{ij} \quad [9]$$

Onde  $\mu$ : é a média da população,  $\tau_j$ : é o efeito do grupo  $j$ ,  $\varepsilon_{ij}$ : é o erro aleatório, com  $i = 1, a$  e  $j = 1, b$ . Assumindo:  $\varepsilon_{ij} \rightarrow N(\mu=0, \sigma)$ .

Assim, há dois testes de hipóteses a serem realizados:

- Hipótese nula,  $H_0$ :  $\tau_j = 0$ .
- Hipótese alternativa,  $H_1$ :  $\tau_j \neq 0$  para  $j, j = 1, a$ .

Para cada teste de hipóteses, foi calculado o F tabulado da distribuição de Fisher (distribuição F) e comparou-se com  $F_{calc}$ . Se  $F_{calc} > F_{tab}$  ou  $p$ -valor  $< 0,05$ , a hipótese nula ( $H_0$ ) é rejeitada e, portanto, a alteração nos níveis do fator analisado tem um efeito significativo na resposta média.

O valor de  $F_{calc}$  é obtido pela Eq. [10] e  $F_{tab}$  é calculado pela Eq. [11].

$$F_{CALC} = \frac{\text{Variância entre os grupos}}{\text{Variância sem os grupos}} = \frac{MQG}{MQR} \quad [10]$$

$$F_{TAB} = F_{\alpha; GL_{numerador}; GL_{denominador}} \quad [11]$$

Se  $F_{calc} > F_{tab}$ , ou  $p$ -valor  $< 0,05$  ( $\alpha = 5\%$ ), o efeito estudado é significativo para um nível de confiança de 95%. A Tabela 10 apresenta os cálculos da ANOVA de forma estruturada.

**Tabela 10.** Cálculos para ANOVA de uma via

Fator	Soma dos Quadrados	GDL	Média dos Quadrados	Fcalc	Ftab
	SSA	a - 1	$\frac{MS_A}{SS_A}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$	$F_{\alpha; GDL_A; GDL_E}$
Erro	SSE	N - a	$\frac{MS_E}{SS_E}$		
Total	SST	N - 1			

Fonte: Adaptado de: (MONTGOMERY, 1997, 2009)

Onde  $SS_{fator}$  é a soma do quadrado de cada fator,  $MS_{fator}$  é o cálculo do quadrado médio ou variância,  $GDL_{fator}$  são os graus de liberdade de cada fator,  $a$  é o número de níveis,  $n$  é o número de repetições e  $N = na$  é o número total de observações.

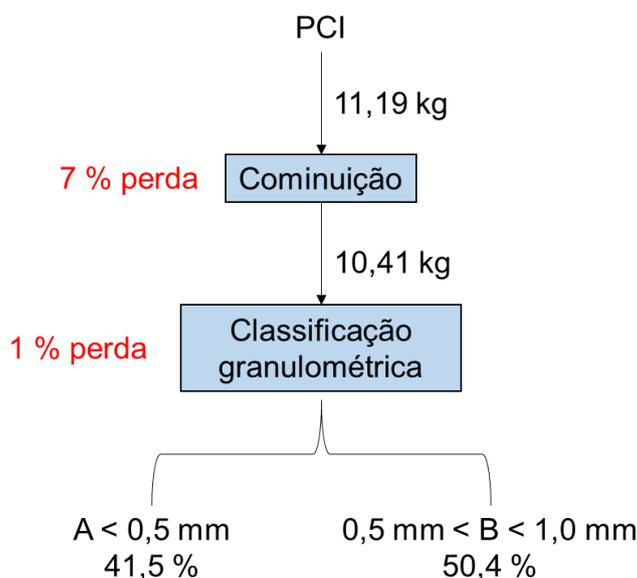
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ESTUDO PRELIMINAR COM RESÍDUO REAL

#### 5.1.1 Cominuição e separação granulométrica

A etapa de cominuição visa liberar os diferentes componentes das placas de circuito impresso. Primeiramente, foi realizado moagem em moinho de facas com malha de 8 mm. Neste primeiro equipamento, foram moídos 11,19 kg de placas. Na Figura 14 estão apresentados em forma de diagrama em blocos, as perdas durante os processos de cominuição e separação granulométrica.

**Figura 14.** Diagrama em blocos das perdas e quantidade de material para cada tamanho de partícula



A perda durante a moagem com o moinho Rone foi de 5 % e está relacionada ao fato de o moinho não possuir um compartimento vedado.

Após a primeira moagem, as partículas foram submetidas à peneira com abertura de 16 mesh, sendo que o material retido na peneira (acima de 1mm) foi submetido à cominuição em um moinho de escala laboratorial da marca Retsch, modelo SM-300, a fim de aumentar a eficiência do processo.

Após o emprego do moinho Retsch na moagem, ocorreu um acréscimo de 2 % na perda de placas de circuito impresso, passando de 5 % para 7 %.

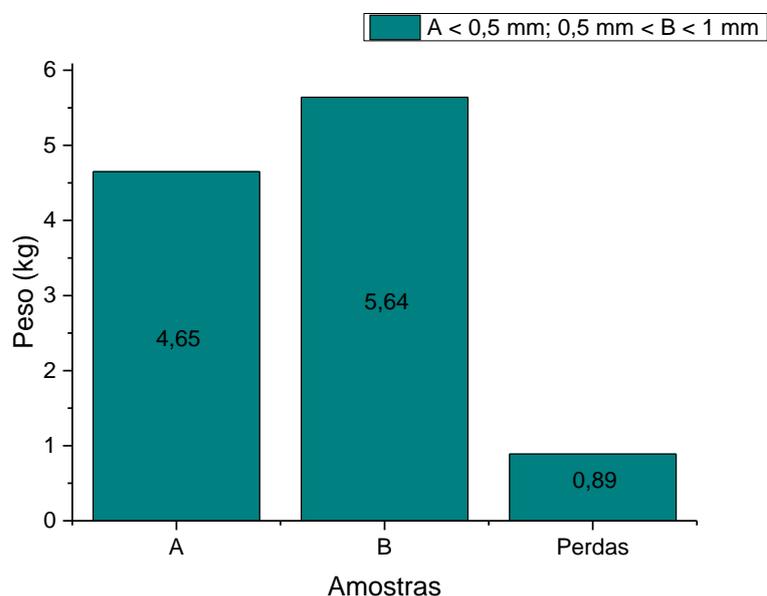
Essa diminuição da perda provavelmente está relacionada à melhor vedação do compartimento de moagem presente nesse equipamento.

No processo de classificação granulométrica, a perda foi de 1 %, totalizando uma perda de 8 % em relação ao peso das placas de circuito impresso inteiras. Além disso, essa perda foi reduzida pelo fato de que a fração (> 1 mm) retornava ao processo de moagem.

Yamane (2012) observou uma perda de 29 % no processo de moagem em moinho de martelos pelo fato de que as partículas mais leves e finas são expelidas pelo moinho como poeira. Para Veit (2005), mesmo relatando perdas, os processos de liberação de metais com emprego de moinhos de impacto são justificados devido a sua eficiência (VEIT, 2005; YAMANE, 2012).

Os valores (kg) das frações após moagem e classificação granulométrica estão apresentados na Figura 15, na qual se observa a distribuição mássica entre as frações A e B.

**Figura 15.** Massa das frações após moagem e classificação granulométrica



Na Figura 15, observa-se uma diferença de aproximadamente 1kg entre as frações A e B. Essa diferença corresponde a 6,8 % do total da amostra moída.

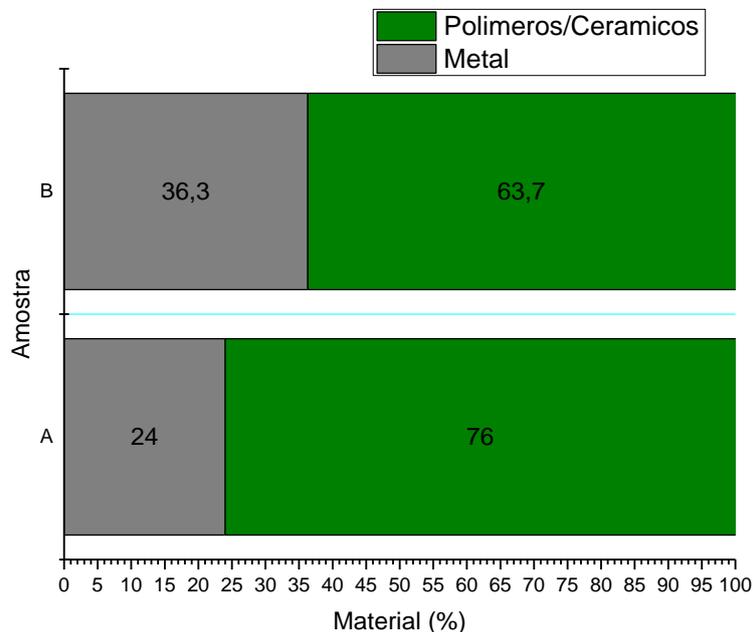
Em seus estudos, Veit (2001) e Veit et al. (2006) observaram o mesmo comportamento com relação à massa obtida nas frações após moagem e

separação granulométrica, sendo que a maior massa ficou concentrada na fração com granulometria maior (VEIT, 2001; VEIT et al., 2006).

### 5.1.2 Caracterização das PCIs

Durante o processo de caracterização, obtiveram-se as porcentagens mássicas de metais e de polímeros/cerâmicos das frações A e B, conforme Figura 16.

**Figura 16.** Porcentagem dos metais e polímeros/cerâmicos na caracterização das PCIs



Na Figura 16, para a fração A ( $A < 0,5$  mm), a quantidade de metais que constituem a placa de circuito impresso é de 24 %, sendo os 76 % restantes constituídos por polímeros e cerâmicos, que por serem materiais mais frágeis, são mais facilmente moídos. Já para a fração B ( $0,5 < B < 1,0$  mm), observa-se uma maior quantidade de metais que foram lixiviados (36,3 %) com relação à fração A e a quantidade de polímeros e cerâmicos foi inferior, com 63,7 %, valores próximos aos encontrados na literatura. Essa diferença na quantidade dos metais se dá pela ductilidade dos metais, tornando-os mais difíceis de moer (CALLISTER JR., 2002).

Segundo Ghosh et al., (2015), de modo geral, as placas de circuito impresso de computadores possuem aproximadamente 28 % de metais, 23 % de polímeros e o restante de materiais como fibra de vidro e cerâmicos.

Após a digestão em água-régia, das frações separadas por tamanho de partículas (frações A e B), foram feitas análises químicas no intuito de caracterizar quantitativamente os metais presentes nas placas de circuito impresso. Os resultados estão apresentados na Tabela 11, considerando 1 tonelada de placa de circuito impresso.

**Tabela 11.** Análise química das duas frações obtidas após separação granulométrica

<b>Metal</b>	<b>A (kg.ton-1)</b>	<b>% A</b>	<b>B (kg.ton-1)</b>	<b>% B</b>
Cobre	133	13,3	196	19,6
Ferro	58,5	5,85	14,5	1,45
Níquel	3,75	0,37	2,62	0,26
Chumbo	5,5	0,55	5	0,5
Zinco	11,8	1,2	17,9	1,8

Através da análise química, pôde-se observar uma diferença nas quantidades dos metais para as duas granulometrias (Tabela 11). Na fração com menor tamanho de partícula (A), a quantidade de ferro é maior, ao ser comparado com a fração B (58,5 kg.ton<sup>-1</sup> contra 14,5 kg.ton<sup>-1</sup>). Porém, para o cobre, a fração B apresenta maior quantidade (196 kg.ton<sup>-1</sup>) em relação à fração A (133 kg.ton<sup>-1</sup>). A escolha pela análise destes metais se dá pelo fato de serem os metais em maior quantidade presentes nas PCIs.

O cobre aparece com concentração elevada nos resíduos com maior tamanho de partícula em função de ser um metal com maior dificuldade de ser moído, devido a sua ductilidade (CALLISTER JR., 2002). Além disso, é válido salientar que as concentrações desses metais devem ser levadas em consideração, não só do ponto de vista econômico, mas também pelo efeito nocivo que estes metais podem ter caso descartados incorretamente no meio ambiente, em especial o chumbo (LAWS, 2000).

Uma comparação dos valores encontrados neste trabalho com dados de outros autores pode ser visualizada na Tabela 12 que apresenta a

concentração dos principais metais, incluindo o ouro, reportados em diferentes trabalhos.

**Tabela 12.** Concentração de metais reportados em diferentes trabalhos

<b>Metal (%)</b>	(HADI et al., 2015a)	(DE MARCO et al., 2008)	(VEIT, 2005)
Alumínio	-	8,7	1,79
Ferro	3	3,9	1,31
Cobre	16	36,4	21,19
Chumbo		3,8	1,20
Ouro	0,03	-	10 ppm
Zinco	-	3,5	0,17
Prata	0,05	-	-
Níquel	2	-	0,17

De uma forma geral, é possível observar que os valores encontrados neste estudo são diferentes dos encontrados na Tabela 12 e em outros estudos, o que mostra uma grande heterogeneidade entre PCIs. Independente disto, os valores para o cobre nas granulometrias A e B, respectivamente (13,3 e 19,6 %), estão próximos dos valores encontrados nos trabalhos de Hadi et al., (2015a), 16 %, de Veit et al., (2006) (valor médio de 18,05 %) e Veit, (2005) 21,19 %.

Para o ferro, a diferença na porcentagem entre as frações A e B é considerável, onde para A foi de 5,85 % e para B, 1,45 %. Valores esses bastante próximos dos valores apresentados na Tabela 9, com valor médio, de todos os autores, de 2,74 %. Para o níquel, os valores para ambas as granulometrias (A – 0,37; B – 0,26 %) foram próximos aos encontrados por Veit, com 0,17 %. Em relação ao chumbo, os valores encontrados, 0,55 e 0,5 % das frações A e B, respectivamente, estão abaixo dos valores encontrados pelos autores citados na Tabela 9 (3,8 e 1,2 %).

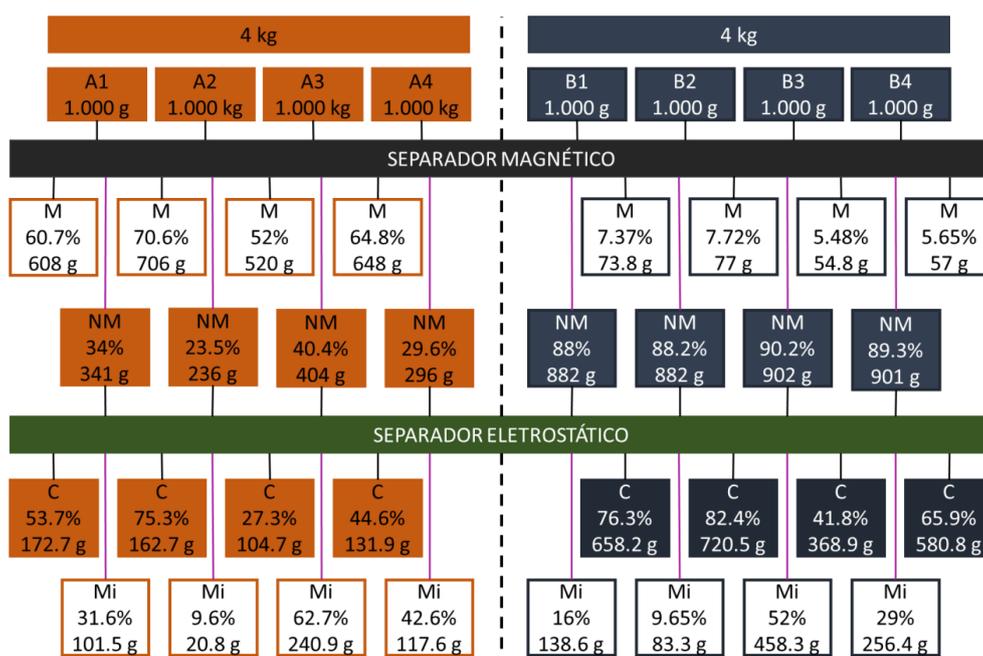
Essa diferença nas concentrações dos metais é atribuída às diferentes metodologias aplicadas para a quantificação. Além disso, a composição das placas de circuito impresso tem variado de forma significativa, juntamente com a inovação tecnológica (GUO; GUO; XU, 2009; PARK; FRAY, 2009; VEIT, 2005).

### 5.1.3 Balanço de massa para as etapas de separação magnética e eletrostática

Para esta etapa, 4 kg de cada uma das frações correspondentes de placas A ( $A < 0,5$  mm) e B ( $1,0 > B > 0,5$  mm) foram quarteadas e divididas em 4 partes cada uma, no intuito de analisar a melhor condição de operação do processo que emprega o uso de separação magnética e eletrostática. As massas obtidas foram pesadas logo após o emprego de cada um dos equipamentos deste estudo.

Na Figura 17, está apresentado um fluxograma com as frações das amostras após o emprego dos separadores.

**Figura 17.** Diagrama em blocos com o balanço de massas das frações A e B após separação magnética e separação eletrostática



M – Magnético; NM – Não magnético; C – Condutor; Mi – Misto  
A –  $A < 0,5$  mm; B –  $0,5 < B < 1,0$  mm

Os percentuais do material magnético das amostras A variaram entre 52 e 70,6 %. Já para os não magnéticos do mesmo tamanho de partícula, os percentuais foram de 23,5 a 40,4 %. Para as amostras B, os percentuais do magnético variaram entre 5,48 e 7,72 %. Para o material não magnético, a variação do percentual foi mínima entre as amostras, ficando entre 88 e 90,2 %.

Em todas as amostras A (A1, A2, A3 e A4), a maior parte do material ficou retido na fração magnética, sendo que a quantidade de material magnético presente nas placas de circuito impresso é menor que os demais materiais, o que indica a ocorrência de algum(a) problema/interferência durante o processo. Nas amostras B, a maior parte do material submetido ao separador magnético ficou retida na fração não magnética. Sendo assim, as condições de operação aplicadas se mostraram melhores para as amostras B, e nada satisfatórias para as amostras A.

Isso pode ser explicado pela susceptibilidade que as partículas pequenas sofrem ao entrar em contato com um campo magnético, sendo carregadas juntamente com o material magnético. Além disso, a alta velocidade do rolo e o tipo de equipamento também pode ter influenciado de forma negativa na separação dos materiais magnéticos para as amostras A.

Os resultados apresentados no balanço de massa das frações magnéticas são maiores do que os encontrados em outros estudos e inferiores aos obtidos por Yamane, (2012) que, em seu estudo, obteve alíquotas de 85 % de material não magnético e 15 % de material magnético. (Veit, 2005; Veit et al., 2006) avaliaram o emprego de um separador magnético com diferentes granulometrias ( $F < 0,25$  mm;  $0,25 < F < 0,50$  mm;  $0,50$  mm  $< F < 1,00$  mm) de PCIs. As frações magnéticas obtidas foram de 0,7; 2 e 2,7 %, e as frações não magnéticas foram 86,6; 92,4 e 82,7 %, respectivamente.

As frações obtidas nos estudos citados são diferentes dos encontrados neste estudo para a fração A. Esta discrepância nos resultados pode estar relacionada com o tipo de equipamento, pois neste estudo foi empregado um separador magnético de rolos, com campo magnético do rolo sendo de 1300G, enquanto que nos estudos de Yamane, (2012) e Veit, (2005) foi empregado um separador magnético de correias cruzadas, com campo magnético de 6500G.

Em relação ao separador eletrostático, as amostras A (A1c; A2c; A3c; A4c) apresentaram as seguintes quantidades de material retido na fração condutora: 53,7; 75,3; 27,3 e 44,6 %, respectivamente. Já para as amostras B (B1c; B2c; B3c; B4c), as quantidades foram 76,3; 82,4; 41,8 e 65,9 %.

Para as frações mistas (Mi), observa-se uma grande diferença entre as amostras e também entre os tamanhos de partículas. Para as amostras B1-4Mi essa diferença pode estar relacionada as condições de operação aplicadas.

Nas amostras A1-4Mi, um outro problema foi observado durante o processo com o separador eletrostático: a acumulação de pó nos eletrodos e nas paredes do equipamento, conforme pode ser observado na Figura 18.

Figura 18. Acúmulo de pó sobre os eletrodos



Fonte: Autor

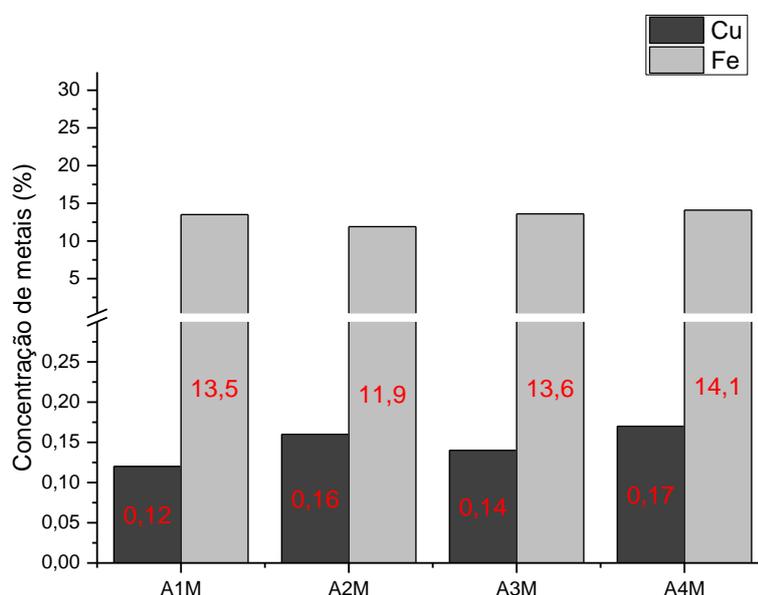
Esse acúmulo interfere no processo de concentração do cobre de pós finos de PCI, sendo necessária manutenção durante e após o uso do separador eletrostático. Mesmo ocorrendo esse acúmulo, deve-se avaliar a pureza das amostras para avaliar de forma mais concisa o quão prejudicial esse acúmulo pode ser, em relação à qualidade das frações obtidas.

## 5.1.4 Caracterização das frações obtidas após o separador magnético

### 5.1.4.1 Separação magnética para as amostras com granulometria A (A<0,5mm)

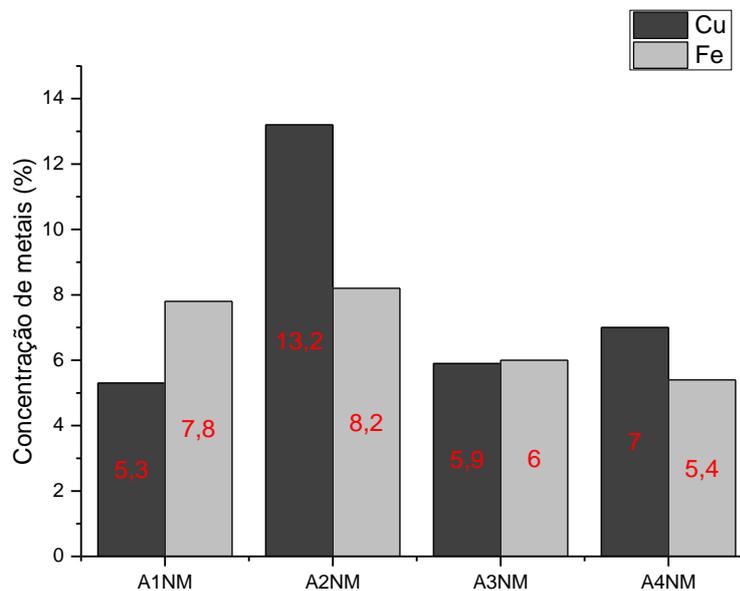
Para cada fração obtida no separador magnético, foi feita digestão com água-régia e analisadas posteriormente em EAAC. Os resultados obtidos para as amostras com granulometria A (A<0,5 mm) estão apresentados nas Figuras 19 e 20.

**Figura 19.** Quantidade de Cu e Fe nas frações magnéticas para as amostras A



Na Figura 19, observa-se uma quantidade muito baixa de cobre retido nas frações magnéticas. É importante que o cobre não fique retido na fração magnética, pois o intuito de empregar o separador magnético é justamente para remover o ferro e deixar a fração não magnética mais concentrada em cobre para posterior recuperação. Para o cobre, as percentagens foram: 0,12; 0,16; 0,14 e 0,17 %. Também é possível observar a percentagem de ferro nas amostras magnéticas, onde os valores variaram entre 11,9 (A3M) e 14,1 % (A4M). As diferenças entre as quantidades de cobre e ferro eram esperadas, uma vez que o cobre não possui propriedades magnéticas como o ferro.

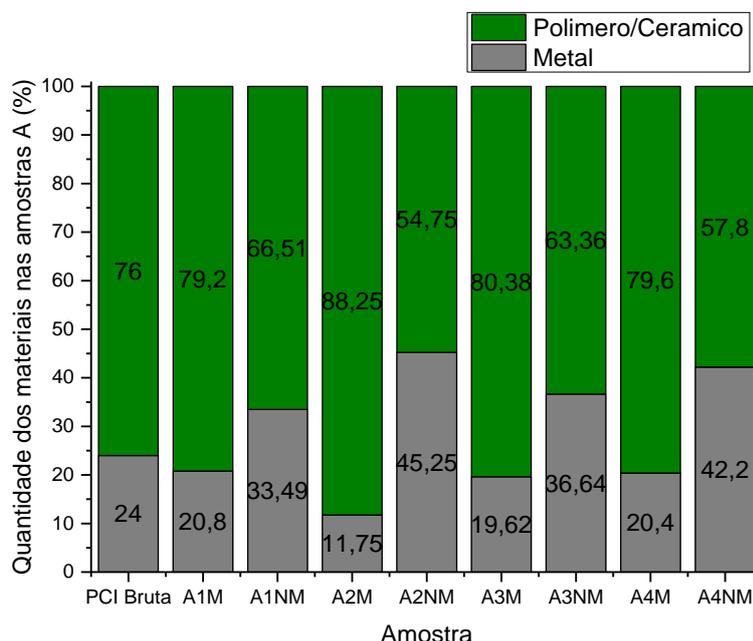
**Figura 20.** Quantidade de Cu e Fe nas frações não-magnéticas para as amostras A



Na Figura 20, estão apresentados os resultados para as amostras não magnéticas da fração A (A1<sub>NM</sub>, A2<sub>NM</sub>, A3<sub>NM</sub> e A4<sub>NM</sub>). O cobre apresentou valores interessantes, visto que este metal ficou pouco retido na fração magnética, ou seja, a maior parte do cobre ficou na fração não magnética. As quantidades de cobre nas amostras foram 7,8; 13,2; 5,9 e 7 % respectivamente. Porém, fica evidente que uma quantidade considerável de ferro ainda passou para a parte não magnética. Para o ferro, as quantidades variaram entre 5,4 (A4<sub>NM</sub>) e 8,2 % (A2<sub>NM</sub>). Uma explicação para a presença de ferro nas frações não magnéticas finas (A) estaria relacionada com o arraste em conjunto com as partículas não magnéticas (outros metais, polímeros e cerâmicos) na esteira de alimentação do equipamento.

A Figura 21 apresenta os resultados da quantidade de metais juntamente com a quantidade de não metais (polímeros/cerâmicos) para as amostras magnéticas e não magnéticas da fração A. A primeira coluna (PCI Bruta) representa a quantidade dos materiais após os processos de moagem e separação granulométrica e pode servir como referência para avaliação da separação magnética.

**Figura 21.** Proporção de metais e polímeros/cerâmicos nas frações A após separador magnético

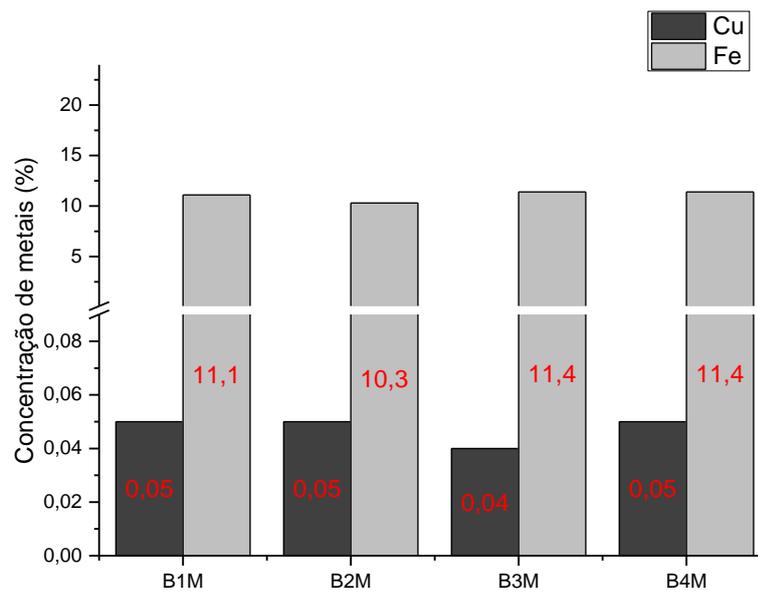


Pela Figura 21, é possível observar a diferença na quantidade de metais em cada uma das amostras. As amostras magnéticas apresentaram um teor de metais variando entre 11,75 a 20,8 %. Já para as não magnéticas, os valores variaram entre 33,49 e 45,25 %. Teoricamente, somente os materiais que sofrem interferência ao serem submetidos a um campo magnético deveriam ficar retidos na fração magnética. As frações não magnéticas apresentaram maior concentração de metais com quantidades inferiores de material polimérico e cerâmico, em comparação com as frações magnéticas(LAGE, 2010).

#### 5.1.4.2 Separação magnética para as amostras com granulometria B (0,5<B<1,00 mm)

As amostras com granulometria B (0,5<B<1,00 mm) também foram analisadas em EAAC. Nas Figuras 22 e 23, estão apresentados os resultados das amostras magnéticas e não magnéticas, respectivamente.

**Figura 22.**Quantidade de Cu e Fe nas frações magnéticas para as amostras B

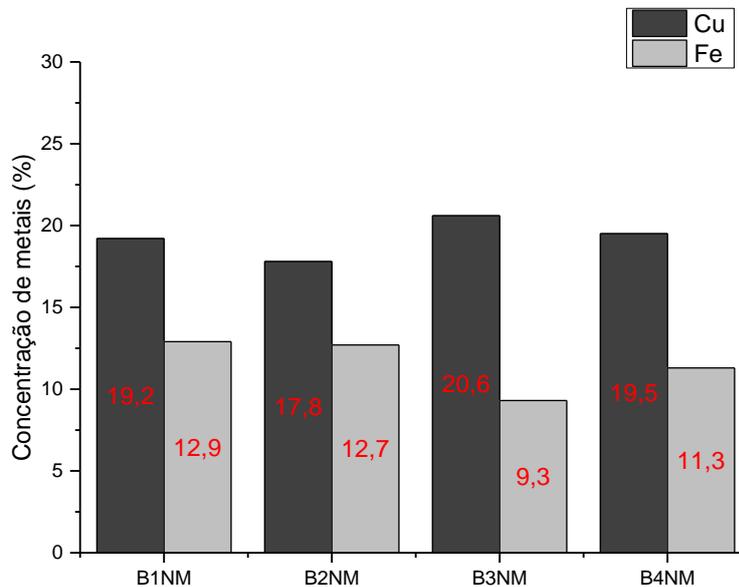


Diferentes dos resultados encontrados na Figura 18, as amostras com granulometria B apresentaram uma quantidade de ferro inferior (Figura 22). As percentagens ficaram entre 10,3 (B2<sub>M</sub>) e 11,4 % (B3<sub>M</sub> e B4<sub>M</sub>). A quantidade de material retido na fração magnética para as amostras B chega a ser 10 vezes menor (média entre as amostras). Em relação ao cobre, os valores retidos também foram inferiores, com valores variando entre 0,04 e 0,05 %. É importante que não ocorra a retenção de cobre na fração magnética, maximizando sua recuperação.

Especificamente, a respeito dos metais analisados, o ferro é o metal que possui propriedade fortemente magnética, e geralmente é encontrado em componentes acoplados à superfície, sendo o restante considerado não magnético (VEIT, 2005; YAMANE, 2012).

Nas frações não magnéticas, aconteceu o oposto: muito ferro ficou retido nesta fração.

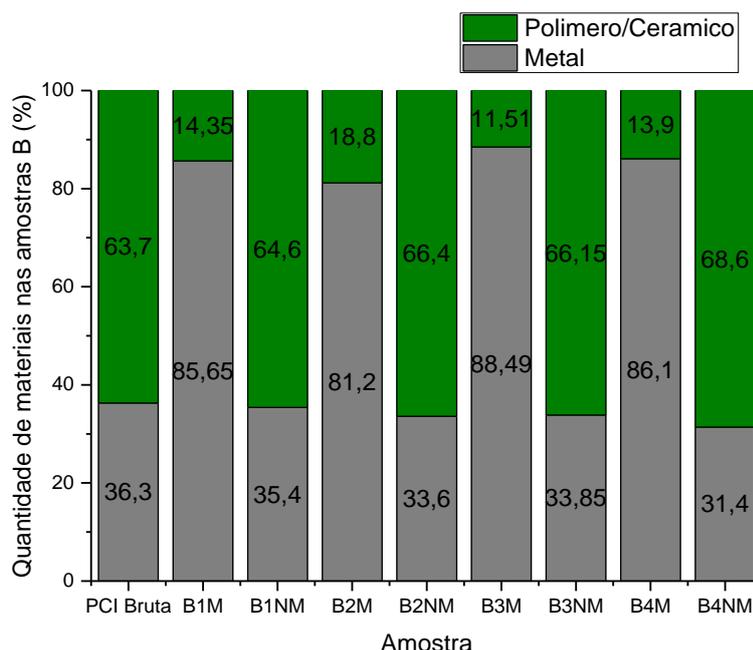
**Figura 23.** Quantidade de Cu e Fe nas frações não-magnéticas para as amostras B



Cabe salientar que assim como o ferro, o cobre apresentou valores superiores aos encontrados nas placas com granulometria menor ( $A < 0,5$  mm), apresentados na Figura 20. As percentagens de cobre entre as amostras variaram entre 17,8 e 20,6 % das amostras, enquanto para o ferro a variação ficou entre 9,3 e 12,9 %. Neste caso, o emprego do separador magnético se justifica para obtenção de frações condutoras mais puras. Como podem ser vistas na Figura 23, as amostras apresentam entre si valores elevados de cobre. Ao mesmo tempo, a quantidade de ferro também é elevada, sendo que a amostra B3<sub>NM</sub> possui o menor valor de ferro e o maior de cobre.

Na Figura 24, estão apresentadas as proporções entre metal e não metal (polímeros/cerâmicos) das amostras magnéticas e não magnéticas para a fração B. A primeira coluna (PCI Bruta) representa a quantidade dos materiais após os processos de moagem e separação granulométrica e pode servir como referência para avaliação da separação magnética.

**Figura 24.** Proporção de metais e polímeros/cerâmicos nas frações B após separador magnético



Nos resultados apresentados na Figura 24, fica evidente o comportamento do separador magnético para o material com granulometria B. As amostras magnéticas apresentam, em termos percentuais, acima de 80 % de metais, sendo o restante dividido entre polímeros e cerâmicos. A amostra B3<sub>M</sub> apresentou a maior quantidade de metal retido, seguida das amostras B4<sub>M</sub>, B1<sub>M</sub> e B2<sub>M</sub>, respectivamente. A baixa concentração de polímeros e cerâmicos nessas amostras é justificada pela característica não magnética desses materiais, os quais acabam, em sua maioria, nas amostras não magnéticas.

Para as amostras não magnéticas, ao contrário do relatado para as frações magnéticas, observa-se maior concentração de polímeros e cerâmicos, com menores valores, portanto, para os metais.

#### 5.1.4.3 Avaliação das Condições empregadas no separador magnético

Cada uma das amostras foi submetida a uma diferente condição de operação do separador magnético, conforme apresentado na Tabela 5. Como as amostras tinham a mesma massa inicial, essa diferença nos valores, tanto

para o ferro quanto para o cobre, deve estar associada às condições aplicadas para cada amostra. Para as frações de menor granulometria (A), as amostras A2 e A4 foram submetidas a uma vibração de calha maior que às demais (100 Hz), o que interfere diretamente na taxa de alimentação do material que chega ao rolo. O que essas duas amostras entre si diferem é a velocidade do rolo magnético. Na Amostra A2, usou-se uma velocidade de 150 rpm, enquanto a A4, 175 rpm.

Mesmo que ainda tenha uma quantidade expressiva de ferro, a melhor condição aplicada foi velocidade do rolo magnético de 175 rpm, com vibração da calha em 50 Hz. A alta rotação aliada à baixa taxa de alimentação do resíduo implica uma menor quantidade do material que é submetido ao campo magnético. Essas condições foram adotadas no intuito de avaliar a diferença entre velocidade do rolo e quantidade de material introduzido ao campo magnético.

Avaliando agora as frações de maior granulometria (B) e considerando somente as frações magnéticas, as amostras com maior retenção de ferro, B1<sub>M</sub> e B2<sub>M</sub>, seriam as melhores condições de operação do separador magnético, sendo que ambas as amostras foram submetidas a uma velocidade do rolo de 150 rpm, com diferença na vibração da calha alimentadora, sendo para a amostra B1<sub>M</sub>, 50 Hz, e para a amostra B2<sub>M</sub>, 100 Hz.

Ao observar as frações não magnéticas, as 4 amostras (B) apresentam valores próximos para o cobre, enfatizando as amostras B3<sub>NM</sub> e B4<sub>NM</sub>. Para obtenção de uma fração mais pura, ou com menos interferentes, a amostra B3<sub>NM</sub> se sobressai das demais por apresentar 2,2 vezes mais cobre retido frente ao ferro. Com isso, a melhor condição para o material com granulometria maior (B) é a que segue: vibração da calha (taxa de alimentação) 50 Hz com rotação do rolo de 175 rpm.

Outros autores também relataram problemas semelhantes em seus trabalhos. Para Hadi et al. (2015a, 2015b) o principal problema associado à separação magnética está na aglomeração das partículas do resíduo que podem resultar na atração/arraste de frações não ferrosas juntamente com a fração ferrosa, e também de frações ferrosas junto da fração não ferrosa (HADI et al., 2015a, 2015b). Guo et al., (2011), Guo; Xu, (2009) observaram retenção

de ferro na fração não magnética de 5 %. Yoo et al., (2009) empregaram um processo de separação magnética de dois estágios. No primeiro estágio, um baixo campo magnético (700 G) foi aplicado, no qual obtiveram 92 % de cobre na fração não magnética. No segundo estágio, o campo magnético aplicado foi de 3000 G, resultando na redução da concentração de Fe e aumentando a concentração de cobre na fração magnética.

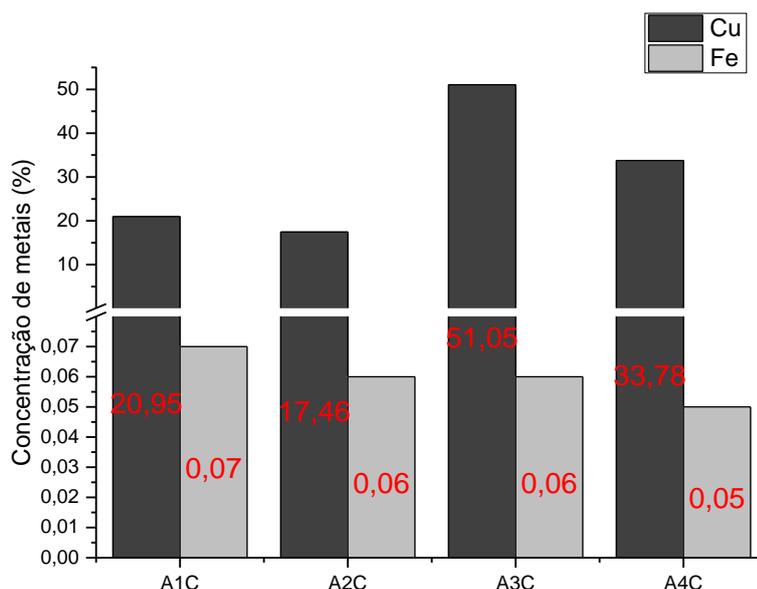
Com isso, deve-se averiguar com cautela a intensidade do campo magnético, pois deve ser forte o suficiente para separar os materiais magnéticos (especialmente os ferrosos) sem que ocorra o carregamento de metais não magnéticos para a fração magnética e, ao mesmo tempo, não deve ser tão fraco a ponto de passar materiais magnéticos junto aos não magnéticos.

### **5.1.5 Caracterização das frações obtidas após o separador eletrostático**

#### **5.1.5.1 Separação eletrostática para as amostras não magnéticas com granulometria A ( $A < 0,5$ mm)**

As amostras não magnéticas obtidas após o separador magnético foram submetidas ao separador eletrostático, gerando duas frações nomeadas como condutoras (C) e mistas (Mi). As frações mistas foram assim denominadas, pois são as massas do que seriam as frações não condutoras, juntamente com as frações intermediárias. Os resultados da quantidade dos metais para cada uma das amostras são encontrados nas Figuras 25 e 26.

**Figura 25.**Quantidade de Cu e Fe nas frações condutoras para as amostras A

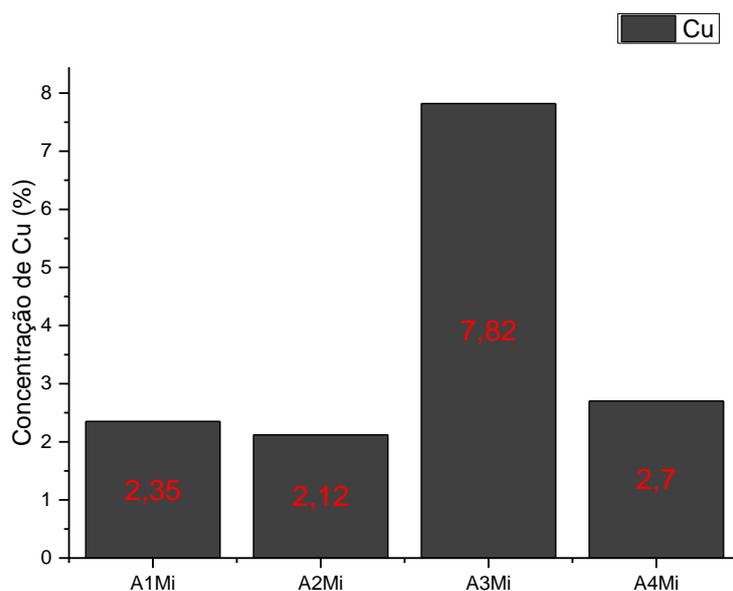


Nas frações condutoras (Figura 25), as quantidades de cobre encontradas em cada uma das amostras são diferentes entre si. A amostra que apresenta valor para cobre abaixo das demais é a A2<sub>C</sub>, com 17,46 %. As demais (A1<sub>C</sub>, A3<sub>C</sub> e A4<sub>C</sub>), a retenção foi, respectivamente, 20,95; 51,05 e 33,78 %. Para o ferro, as concentrações variaram entre 0,05 (A4<sub>C</sub>) até 0,07 % (A1<sub>C</sub>).

Além do cobre e ferro, outros metais têm características condutoras, como alumínio e ligas de chumbo-estanho (soldas), porém esses não foram avaliados (VEIT, 2005; VEIT et al., 2006).

Na Figura 26, observa-se a quantidade de cobre que não sofreu indução eletrostática.

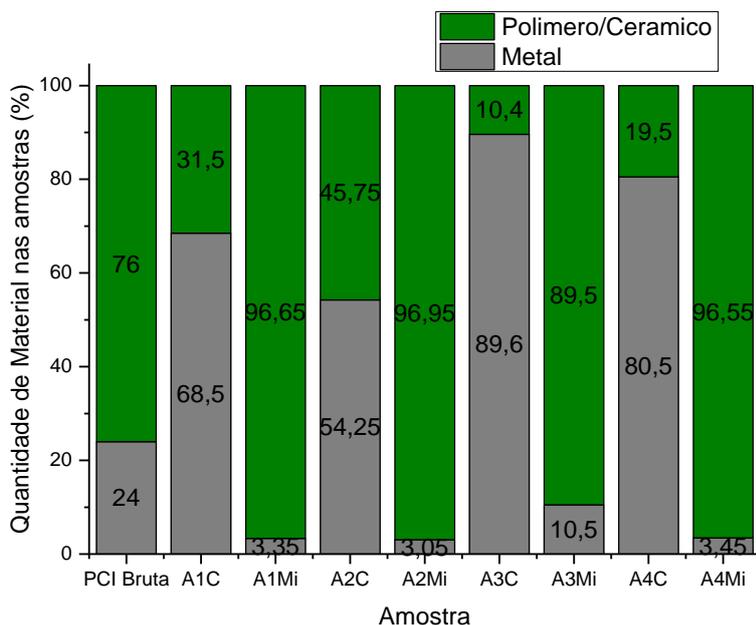
**Figura 26.** Quantidade de Cu nas frações mistas para as amostras A



Essas amostras receberam a denominação de mista (Mi) em função de conter as frações consideradas intermediárias e não condutora do equipamento. Optou-se por trabalhar somente com duas frações no intuito de reduzir consumo de ácidos (HCl e HNO<sub>3</sub>) na digestão e análise dos metais presentes nas amostras. As amostras mistas contêm 2,35; 2,12; 7,82 e 2,70 % de cobre.

As proporções entre metais e não metais (polímeros/cerâmicos) estão apresentados na Figura 27, abaixo. A primeira coluna (PCI Bruta) representa a quantidade dos materiais após os processos de moagem e separação granulométrica e pode servir como referência para avaliação da separação eletrostática.

**Figura 27.** Proporções de metais e polímeros/cerâmicos nas amostras A após separador eletrostático



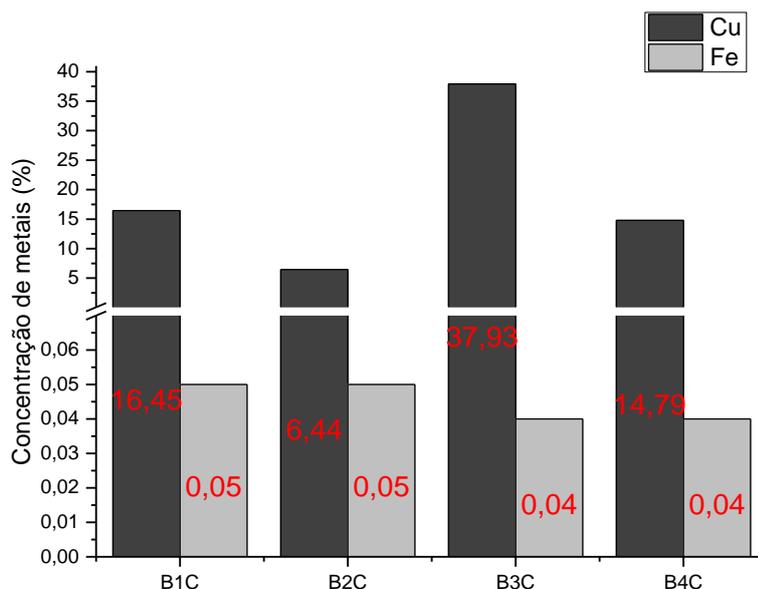
Nas amostras condutoras, os metais são predominantes, com valores entre 54,25 até 89,60 %. Os materiais poliméricos e cerâmicos correspondem à diferença da quantidade de metal em cada uma das amostras. Isso também vale para as amostras mistas. Salienta-se que não foi feita distinção entre polímeros e cerâmicos, considerando somente a amostra total. No entanto, as quantidades de não metais que ficaram retidas na fração condutora podem estar relacionadas com: (I) não liberação dos metais da estrutura polimérica/cerâmica; (II) serem amostras muito finas, cuja dispersão do “pó” acarretou no seu carregamento para a fração condutora; e (III) as partículas “descarregaram” rapidamente, não aderindo ao rolo aterrado, fazendo com que fossem induzidas eletrostaticamente (DASCALESCU et al., 2005; JIANG; JIA; ZHEN-MING, 2009; WU; LI; XU, 2008).

Nas amostras mistas, observa-se justamente o oposto. Grandes quantidades de material polimérico e cerâmico e pouca quantidade de metal. As frações de polímeros e cerâmicos foram 96,65; 96,95; 89,5 e 96,55 %, respectivamente, indicando que pequenas parcelas de metais não foram induzidas pelo campo eletrostático.

### 5.1.5.2 Separação eletrostática para as amostras não magnéticas com granulometria B ( $0,5 < B < 1,00$ mm)

A quantidade de cobre e ferro nas amostras B separadas através do separador eletrostático está apresentada nas Figuras 28 e 29.

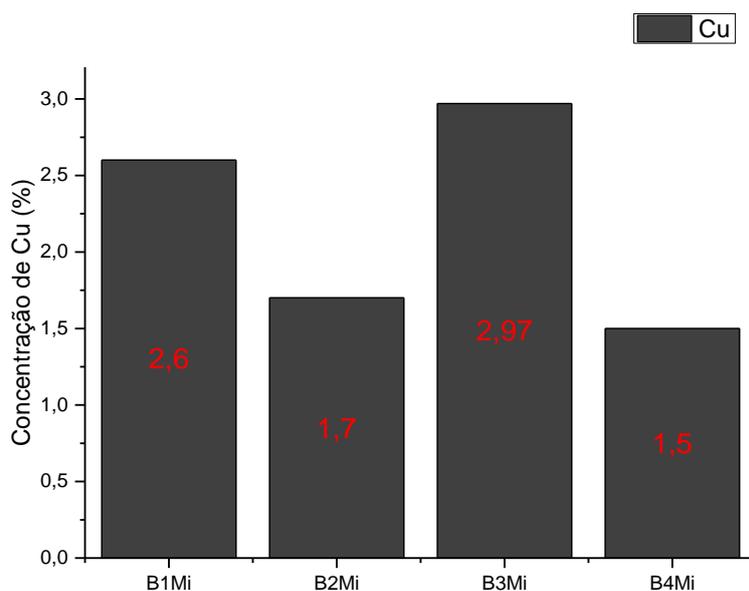
**Figura 28.** Quantidade de Cu e Fe nas frações condutoras para as amostras B



As amostras apresentaram valores distintos entre si. A amostra B3<sub>c</sub> apresentou a maior quantidade de metal, com 37,93 %. A amostra que apresentou a menor quantidade de cobre foi a B2<sub>c</sub>, com 6,44 %. Para o ferro, as percentagens ficaram entre 0,04 e 0,05 %.

Nas amostras mistas com tamanho de partícula B (Figura 29), o mesmo comportamento relatado nas amostras com menor tamanho de partícula foi observado.

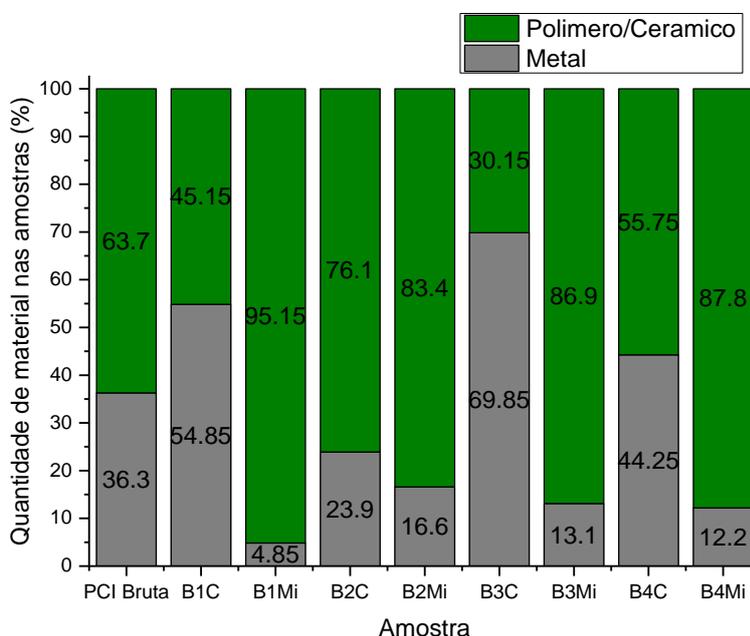
**Figura 29.** Quantidade de Cu nas frações mistas para as amostras B



A amostra B3<sub>Mi</sub>, que foi submetida ao separador eletrostático com dinâmica de operação igual à amostra A3<sub>Mi</sub>, apresentou maior quantidade de cobre por massa de amostra retida, 2,97 %. Já a amostra B4<sub>Mi</sub> reteve a menor quantidade de cobre, 1,5 %. Isso indica que a simples submissão do material a um campo eletrostático não garante uma separação eficiente, mas sim que as condições operacionais podem influenciar fortemente o resultado (LI; XU; ZHOU, 2007).

Para as amostras B, também foi avaliada a proporção entre metais e polímeros/cerâmicos nas amostras após o separador eletrostático, conforme a Figura 30. A primeira coluna (PCI Bruta) representa a quantidade dos materiais após os processos de moagem e separação granulométrica e pode servir como referência para avaliação da separação eletrostática.

**Figura 30.** Proporção de metais e polímeros/cerâmicos nas frações após separador eletrostático



Para as amostras B, não se obteve um padrão como o visto para as amostras A na Figura 27. Nas frações condutoras, as concentrações de metais são 54,85; 23,9; 69,85 e 44,25 %. Os materiais poliméricos e cerâmicos nas mesmas amostras constituem entre 30,15 (B3C) e 76,1 % (B2C), representando, assim, uma grande “contaminação”. Nas amostras mistas, a quantidade de polímeros e cerâmicos continua alta, com média de 88,4%, sendo o maior valor para a amostra B1Mi, com 95,15 %, e a menor, B2Mi, com 83,4 %.

### 5.1.5.3 Avaliação das condições empregadas no separador eletrostático

Da mesma forma que foi apresentada na separação magnética, cada uma das amostras foi submetida a uma dinâmica de operação diferente, conforme Tabela 7. Neste caso, para todas as amostras, a vibração da calha foi igual em 50 Hz. A diferença foi na velocidade do rolo, bem como na tensão aplicada.

As amostras A3c e A4c foram submetidas à mesma tensão (35 kV), diferenciando-se somente na velocidade do rolo, 100 e 175 rpm,

respectivamente. Quanto mais rápido o rolo gira, tanto menor o tempo que as partículas finas recebem a carga eletrostática, o que justifica, pois, a diferença das concentrações entre cada amostra. Já as amostras com menor concentração de cobre (A1c; A2c) foram submetidas à tensão menor (20 kV), com as mesmas rotações das demais amostras. No entanto, conforme apresentado nas amostras anteriores, a velocidade do rolo tem relevância no processo. Evidente que a tensão aplicada é o fator que mais apresentou influência na concentração do cobre entre as amostras.

Ao observar as amostras A3c e A1c, com mesma rotação do rolo, a diferença na concentração é de 30 % para 20 kV. Já entre as amostras com tensão de 35 kV, a diferença cai para 16 %. Por esse fato, justifica-se, portanto, o emprego de maior tensão.

Em relação às amostras com granulometria maior (B), a concentração de cobre também se mostrou eficiente, porém com variações percentuais maiores. As condições do separador eletrostático foram as mesmas que as das amostras anteriormente citadas.

A concentração de cobre nas amostras variou entre 6,44 % (B2c) até 37,93 % (B3c). Para as amostras mistas, observam-se valores próximos uns dos outros.

As amostras B3c e B4c foram submetidas à mesma tensão aplicada (35 kV), variando, porém, a rotação do rolo (100 – 175 rpm), e o melhor resultado foi obtido para a menor rotação. O mesmo comportamento tem-se para as amostras com menor tensão, B1c e B2c, nas quais o melhor resultado também foi obtido para a amostra com menor velocidade de rotação (B1c).

Diferente de outros estudos, onde a maior retenção percentual de cobre ficou em amostras com granulometria maior, neste caso se observa uma maior concentração nas amostras com granulometria menor ( $A < 0,5$  mm).

Para (Li et al., 2008) é de extrema importância estudar os aspectos fundamentais e práticos do separador eletrostático. Condições como tensão aplicada e velocidade de rotação do rolo, mesmo que sejam de condições simples e de fáceis ajustes, mostram grandes diferenças na concentração de cobre a partir de fontes secundárias, como as placas de circuito impresso. Um

bom exemplo disso é observar que a melhor condição para ambas granulometrias aplicadas neste trabalho é a condição 3, ou seja, tensão aplicada de 35 kV, com rotação do rolo em 100 rpm. Para (Jiang; Jia; Zhen-Ming, 2009)e (Wu; Li; Xu, 2008), quanto maior for a tensão aplicada, tanto melhor será a concentração. Além disso, deve-se levar em consideração materiais com granulometrias conhecidas, pois cada tamanho de partícula reage de uma maneira às tensões aplicadas.

A separação eletrostática é um excelente método de concentração de metais de materiais com tamanho de partícula entre 0,6 e 1,2 mm. Diferentes trabalhos reportam que o melhor tamanho de partícula a ser empregado na concentração de metais como cobre é entre 0,1 e 0,6 mm(JIANG; JIA; ZHEN-MING, 2009; LI et al., 2008; LI; XU; ZHOU, 2007; WU; LI; XU, 2008).

Conforme foi apresentado anteriormente, para ambos os tamanhos de partícula (A e B), consideramos como a melhor condição para o separador magnético as amostras 3 (175 rpm – 50 Hz). No separador eletrostático, a melhor condição considerada também foi a 3 (100 rpm – 35 kV). Essa melhor condição para cada um dos equipamentos está diretamente associada a valores de porcentagem de metal por amostra submetida ao processo de concentração de metais.

No entanto, ao considerar a massa inicial das frações A e B (4 kg) como sendo uma amostra inteira, ou seja, usando-se somente as porcentagens apresentadas no balanço de massa (Figura 16), tem-se uma linha de raciocínio diferente das considerações anteriormente apresentadas.

Com relação à amostra A, em 4 kg de placas, há 531 g de Cu. Já na amostra B, em 4 kg, a quantidade de Cu é de 780 g, conforme valores encontrados na caracterização das placas (Tabela 8). Considerando os valores da caracterização juntamente com o valor total das placas moídas, observa-se que para ambas as granulometrias a melhor condição aplicada no separador eletrostático foi a 1 (20 kV e 100 rpm). Na amostra A, partindo de 4kg de placas e usando a condição 1, a quantidade de cobre obtida seria de 152,9 g, correspondendo a 28,8 % do cobre inicial. Para a amostra B, a quantidade de cobre seria de 441,7 g, o que equivale a 56,5 % de todo o cobre para este

tamanho de partícula. Esses valores são considerados baixos, sendo necessário, portanto, aprimorar mais o processo de concentração do cobre.

## 5.2 SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA COM AMOSTRAS SINTÉTICAS

Nesta etapa utilizou-se um resíduo sintético (simulando uma proporção média encontrada em resíduos reais de PCI – 75 % de polímeros e 25 % de cobre) a fim de melhor estudar os parâmetros operacionais do separador eletrostático. Os resultados obtidos após emprego do separador eletrostático para as amostras sintéticas estão apresentados na Tabela 13 na forma de balanço de massa. Para cada grupo avaliou-se um parâmetro com testes em triplicata.

**Tabela 13.** Balanço de massa (gramas) das amostras sintéticas após separador eletrostático

Teste	$\alpha = 20^\circ$			$\alpha = 30^\circ$			$\alpha = 40^\circ$			
	C	M	NC	C	M	NC	C	M	NC	
Grupo 1	1	30,47	3,13	82,93	29,95	1,45	87,50	29,50	2,03	87,58
	2	29,91	1,54	85,26	29,94	1,39	87,20	29,95	1,75	86,41
	3	30,13	1,04	87,03	29,90	1,30	87,19	30,00	1,54	85,53
<b>Média</b>	30,17	1,90	85,07	29,93	1,38	84,30	29,82	1,77	86,51	
<b>D.P.</b>	0,28	1,09	2,06	0,03	0,08	5,29	0,28	0,25	1,03	
	$\Theta = 55^\circ$			$\Theta = 65^\circ$			$\Theta = 75^\circ$			
Grupo 2	1	30,17	1,69	85,43	30,09	1,74	86,10	30,03	1,66	85,80
	2	30,31	1,70	86,15	29,96	1,65	87,17	30,10	1,95	86,41
	3	30,13	1,80	86,44	30,49	2,21	85,71	30,11	2,22	81,89
<b>Média</b>	30,20	1,73	86,01	30,18	1,87	86,33	30,08	1,94	84,70	
<b>D.P.</b>	0,09	0,06	0,52	0,28	0,30	0,76	0,04	0,28	2,45	
	d1 = 40 mm			d1 = 50 mm			d1 = 60mm			
Grupo 3	1	30,00	0,99	87,50	30,17	2,21	85,23	30,24	4,63	81,81
	2	29,94	1,19	84,43	30,15	2,20	87,29	30,43	4,74	84,18
	3	30,18	1,12	87,15	30,19	1,99	86,06	30,37	4,65	84,60
<b>Média</b>	30,04	1,10	86,36	30,17	2,13	86,19	30,35	4,67	83,53	
<b>D.P.</b>	0,12	0,10	1,68	0,02	0,12	1,04	0,10	0,06	1,50	
	d2 = 50 mm			d2 = 60 mm			d2 = 70 mm			
Grupo 4	1	30,04	1,08	85,59	30,34	1,21	88,32	30,22	0,96	87,69
	2	30,18	1,12	86,08	30,15	1,07	88,62	30,12	0,99	86,34
	3	30,20	1,07	87,89	30,21	1,06	86,69	30,37	1,14	87,95
<b>Média</b>	30,14	1,09	86,52	30,23	1,11	87,88	30,24	1,03	87,33	
<b>D.P.</b>	0,09	0,03	1,21	0,10	0,08	1,04	0,13	0,10	0,86	

C – Condutor; M – Intermediário; NC – Não condutor

O "Grupo 1" é sobre o ângulo entre o centro do rolo e o eletrodo corona. A média das frações condutoras entre os níveis ( $\alpha = 20^\circ$ ;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $\alpha = 40^\circ$ ) foi de 29,82 a 30,17 g. Para as frações intermediárias (M), os resultados variaram entre 1,38 e 1,90 g. As frações não condutoras (NC) constituem a maior parte dos resíduos de PCI e, por esse fator, a quantidade desses materiais é maior do que as frações condutoras e intermediárias.

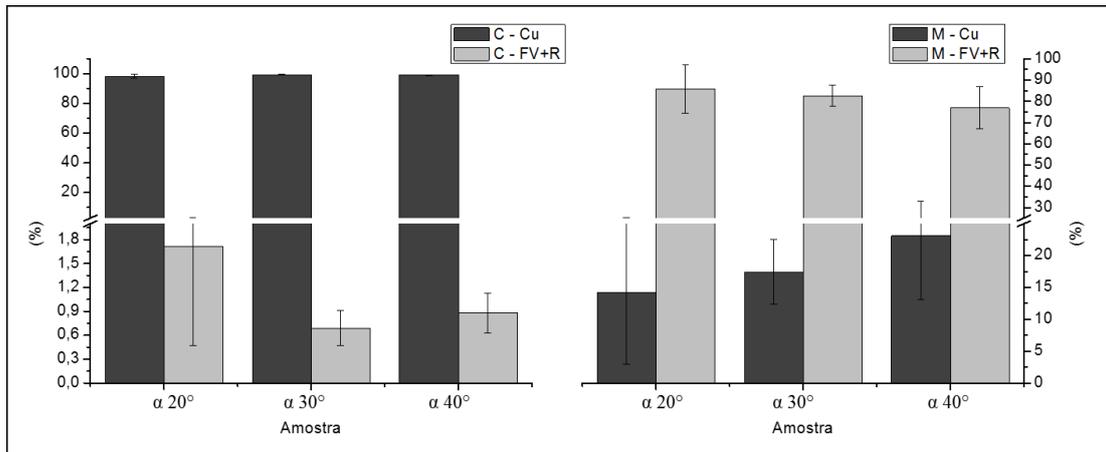
O "Grupo2" diz respeito ao ângulo entre o centro do rolo e o eletrodo eletrostático ( $\Theta = 55^\circ$ ;  $\Theta = 65^\circ$ ;  $\Theta = 75^\circ$ ). As médias das frações condutoras foram 30,20, 30,18 e 30,08 g, respectivamente. Do mesmo modo que para os valores do Fator 1, as maiores quantidades de material retido foram nas frações não condutoras.

Os "Grupos3 e 4" estão relacionados com a distância dos eletrodos, corona e eletrostático (Fator 3:  $d1$ ; Fator 4:  $d2$ ) em relação à superfície do rolo. A média das frações condutoras para  $d1$  (40, 50 e 60 mm) está entre 30,04 e 30,35 g. As frações intermediárias apresentaram valores variando entre 1,10 e 4,67 g. Nota-se que à medida que a distância do eletrodo corona aumenta, há maior quantidade de produtos intermediários (M). Isso se deve ao fato de que quanto mais distante o eletrodo estiver, menor a influência da tensão sobre as partículas.

As frações condutoras para  $d2$  mostram pequena diferença das massas obtidas entre cada uma das distâncias, com médias variando entre 30,14 e 30,24 g. Nas frações intermediárias, as massas obtidas variaram entre 1,03 e 1,11 g.

Baseando-se no balanço de massa apresentado na Tabela 13, as percentagens de cobre em cada uma das amostras, bem como em cada um dos parâmetros aplicados no separador eletrostático de corona, nas frações condutoras (C) e intermediárias (M), estão apresentadas nas Figuras 31, 32, 33 e 34.

**Figura 31.** Quantidade de Cu para diferentes ângulos de  $\alpha$  nas frações condutoras e intermediárias

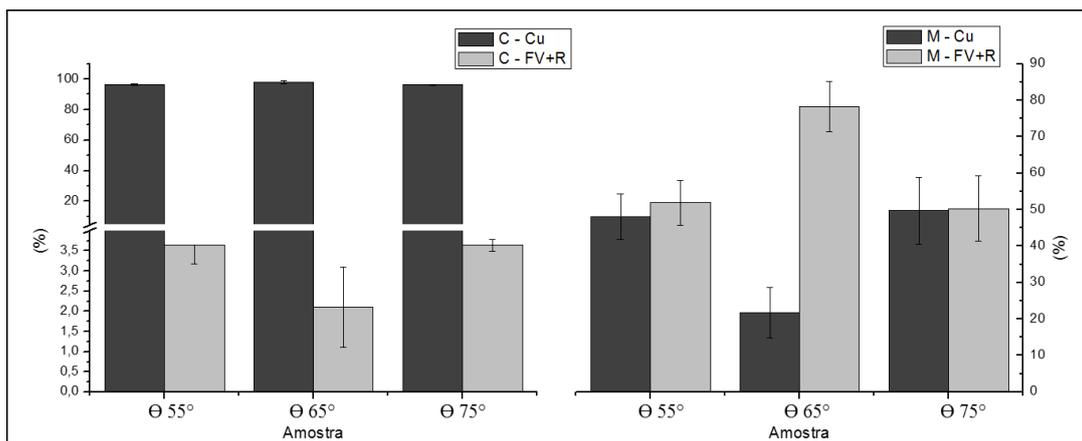


Na Figura 31, observam-se as quantidades de cobre nas frações condutoras e intermediárias, bem como a quantidade de resina reforçada com fibra de vidro. Nas frações condutoras, nota-se que as quantidades de cobre são bem próximas umas das outras. A principal diferença entre os três ângulos ( $\alpha = 20^\circ, 30^\circ$  e  $40^\circ$ ) está na quantidade de polímeros juntamente com o cobre, bem como as quantidades de cobre encontradas nas frações intermediárias. A maior quantidade de polímero encontrada nas frações condutoras foi observada para  $\alpha = 20^\circ$ .

Em um estudo teórico foi simulado um modelo computacional para prever a separação de Cu e Al a partir de PCIs. Segundo este estudo, a variação de  $\alpha$  altera a distribuição da força do campo elétrico na zona ativa. Quando  $\alpha < 33^\circ$ , a zona de influência do campo elétrico é menor sobre as partículas. Por outro lado, se  $\alpha > 33^\circ$ , o eletrodo eletrostático sofrerá influência do campo gerado pelo eletrodo corona, diminuindo o efeito sobre a partícula (Li et al., 2008).

Para os demais ângulos, a diferença nas quantidades de polímeros foi muito pequena, mas, mesmo assim, a menor quantidade encontrada foi em  $\alpha = 30^\circ$ . Já nas frações intermediárias, à medida que o ângulo aumenta, aumenta também a quantidade de cobre nas frações.

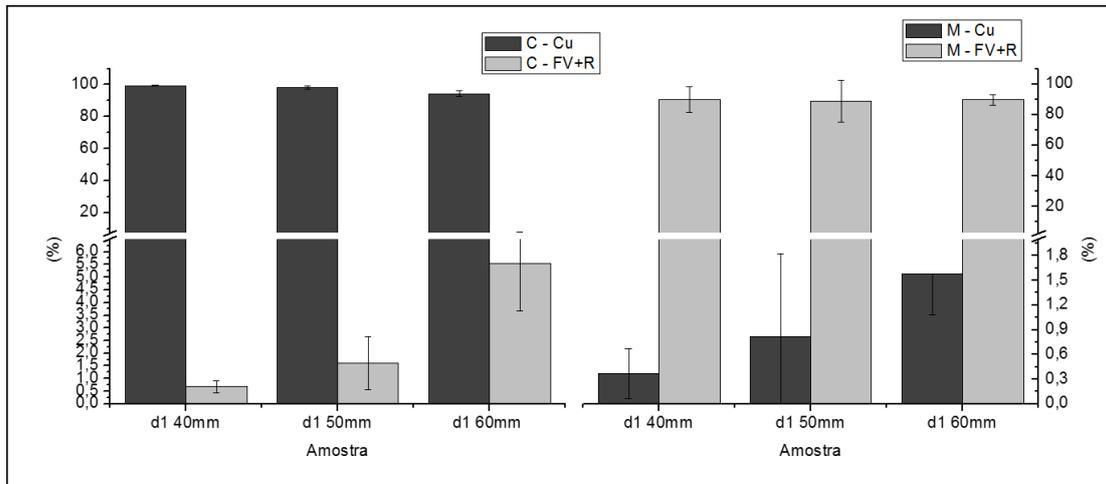
**Figura 32.** Quantidade de Cu para diferentes ângulos de  $\Theta$  nas frações condutoras e intermediárias



Na Figura 32, para as frações condutoras, as quantidades de cobre são bem próximas umas das outras. Salienta-se que os valores apresentados são correspondentes às percentagens de cada uma das amostras. Nessas frações, os valores para Cu são: 96,35, 97,89 e 96,3 %, respectivamente. Esses valores correspondem em termos de massa a 28,98 g para  $\Theta = 75^\circ$  e 29,54 g para  $\Theta = 65^\circ$ . Essa diferença é de apenas 0,56 g. Cabe analisar, no entanto, a quantidade de polímeros nessas frações, bem como a quantidade de cobre nas frações intermediárias obtidas para cada um dos ângulos aplicados. Assim como há menor quantidade de polímeros em  $\Theta = 65^\circ$ , para este mesmo ângulo foi encontrado uma menor quantidade de cobre na fração intermediária. Comparando a quantidade de cobre nas frações intermediárias, observa-se uma diferença de aproximadamente 28 % entre  $\Theta = 65^\circ$  para os demais ângulos.

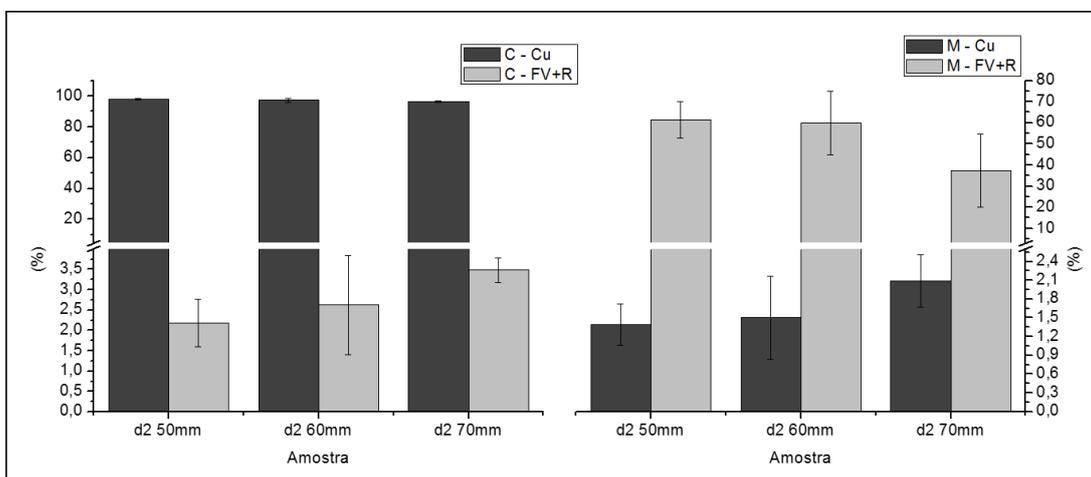
Existem diversos fatores de influência sobre as trajetórias das partículas, bem como os pontos de queda (ex.: condutor, intermediário e não condutor), como tamanho das partículas, densidade de material, efeito de auto descarga em altos campos, por exemplo, o estado de posição da partícula de metal. Conforme a partícula estiver na hora que entra na zona de intenso campo elétrico gerado pelos eletrodos as trajetórias das partículas, pode mudar (LI et al., 2008; LI; XU; ZHOU, 2007; LU et al., 2008).

**Figura 33.** Quantidade de Cu para diferentes distâncias do eletrodo corona nas frações condutoras e intermediárias



Na Figura 33, estão as percentagens de cobre e polímeros, levando em consideração a distância do eletrodo corona. Observa-se que à medida que o eletrodo corona fica mais distante da zona de entrada dos materiais a serem separados, maior a quantidade de polímeros nas frações condutoras e, por conseguinte, menor a quantidade de cobre nessas frações. Em ordem crescente de distância, as percentagens de cobre nas frações condutoras encontradas foram 99,32, 98,39 e 94,44 %. Já para os polímeros, observa-se uma diferença que variou de 0,68 % ( $d1 = 40$  mm) para 5,56 % ( $d1 = 60$  mm). Nas frações intermediárias, observa-se justamente o contrário, o que é excelente. Quanto mais distante o eletrodo está, maior será a quantidade de cobre nas frações intermediárias.

**Figura 34.** Quantidade de Cu para diferentes distâncias do eletrodo eletrostático nas frações condutoras e intermediárias



Os resultados apresentados na Figura 34 estão relacionados com a distância do eletrodo eletrostático em relação à superfície do rolo. O mesmo comportamento apresentado para  $d1$  (Figura 33) foi observado para  $d2$ . Quanto mais distante o eletrodo for configurado, tanto maior a quantidade de polímeros nas frações condutoras, bem como maior a quantidade de cobre nas frações intermediárias.

Até então, observando as Figuras 31, 32, 33 e 34, bem como a Tabela 13, que mostra o balanço de massa após o separador eletrostático das amostras sintéticas, têm-se como melhores condições:  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\Theta = 65^\circ$ ,  $d1 = 40$  mm,  $ed2 = 50$  mm. Uma série de considerações foi levada em conta na escolha do melhor parâmetro, como, por exemplo, a quantidade de cobre nas frações condutoras e intermediárias, além da quantidade de polímeros nas frações condutoras.

Os resultados até então obtidos tinham a alta tensão como condição fixa ( $U = 30$  kV). As melhores condições obtidas foram submetidas a novos testes no intuito de comparar os resultados entre outros dois valores de alta tensão ( $U = 20$  e  $25$  kV). Os resultados para essas condições, bem como os melhores resultados obtidos para 30 kV, estão na Tabela 14.

**Tabela 14.** Balanço de massa com diferentes valores de alta tensão

Teste	U = 20 kV			U = 25 kV			U = 30 kV		
	C	M	NC	C	M	NC	C	M	NC
1	31,35	17,71	70,01	30,06	2,23	86,82	30,04	1,08	85,59
2	30,92	16,74	72,20	31,22	7,04	78,28	30,18	1,12	86,08
3	30,99	17,52	69,99	30,39	1,82	85,86	30,20	1,07	87,89
<b>Média</b>	<b>31,09</b>	<b>17,32</b>	<b>70,73</b>	<b>30,56</b>	<b>3,70</b>	<b>83,65</b>	<b>30,14</b>	<b>1,09</b>	<b>86,52</b>
<b>D.P.</b>	<b>0,23</b>	<b>0,51</b>	<b>1,27</b>	<b>0,60</b>	<b>2,90</b>	<b>4,68</b>	<b>0,09</b>	<b>0,03</b>	<b>1,21</b>

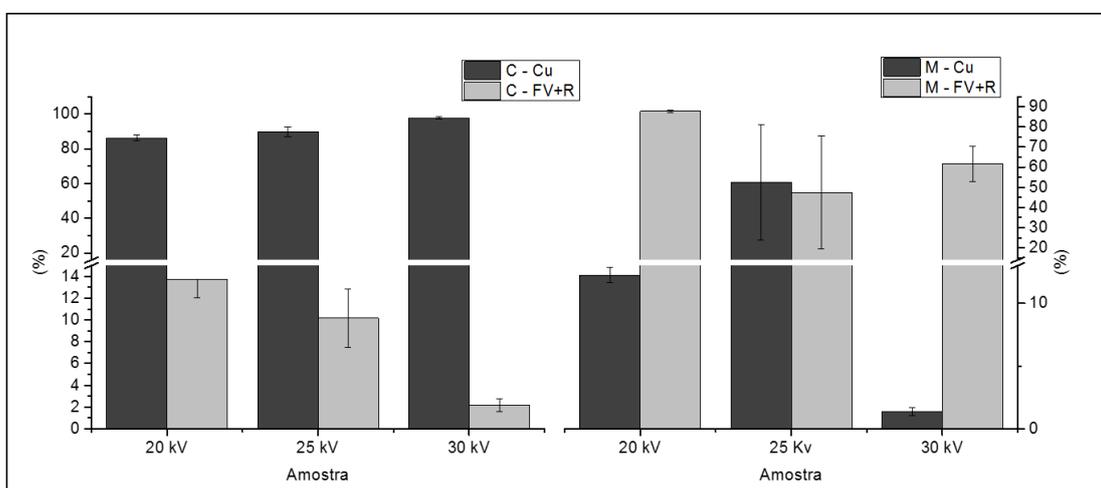
C – Condutor; M – Intermediário; NC – Não condutor

Os resultados apresentados na Tabela 14 apresentam grandes variações entre os parâmetros analisados, principalmente nas frações intermediárias e não condutoras. Observam-se diferenças significativas na quantidade de material presente nas frações intermediárias em 20 kV em relação aos demais valores de tensão aplicados. Considerando as médias

obtidas, a diferença de massa entre 20 kV e 25 kV é de 13,62 g, cuja diferença aumenta para 16,23 g, se comparada com 30 kV.

Nas frações não condutoras é possível observar que quanto menor a tensão aplicada, menor é a quantidade de materiais nessas frações. Isso indica que a parte polimérica está sendo depositada nas outras frações, reduzindo, desse modo, a eficiência do processo, cujo intuito é obter um concentrado de Cu mais puro, ou seja, com pouca quantidade de polímero na mesma fração. A Figura 35 apresenta as quantidades de cobre presente nas frações condutoras e mistas, bem como a quantidade de polímeros e cerâmicos.

**Figura 35.** Quantidade de Cu para diferentes valores de alta voltagem nas frações condutoras e intermediárias



Em relação as frações condutoras, à medida em que a tensão aumenta, uma maior quantidade de cobre é observada, bem como uma grande diferença na quantidade de matérias poliméricos, sendo quantidades menores para maiores valores de U. Nas frações intermediárias, diferente do que se espera (levando em consideração o comportamento observado para as frações condutoras, em U = 25 kV há maior quantidade de cobre do que em U = 20 kV.

A diminuição da eficiência de separação quando se usam valores de intensidade de campo menores, por exemplo, 20 kV, podem ser relacionados também com o tamanho de partícula. Tensões menores aplicadas sob as partículas de PCIs podem não ser suficientes para uma separação eficiente para partículas maiores que 0,8 mm. Neste caso as partículas não condutoras poderão se descolar do rolo com maior facilidade em um ângulo de

desprendimento menor e, por consequência, cairão nos recipientes coletores condutores. Esse fato pode ser explicado devido à força elétrica exercida sobre uma partícula não condutora que diminui proporcionalmente com o quadrado do seu raio(JIANG; JIA; ZHEN-MING, 2009; WU; CASTLE; INCULET, 2005; WU; LI; XU, 2008; WU et al., 2003).

Caso os resíduos estejam em diferentes tamanhos de partículas (o que é bem possível após cominuição de PCIs), uma alta intensidade de campo aplicada pode levar a outros problemas durante o processamento dessa mistura com diferentes tamanhos. O primeiro deles é que as partículas condutoras menores são fortemente atraídas para o eletrodo eletrostático e são afetadas pela força do campo elétrico. Então, as trajetórias das partículas podem mudar, e algumas podem cair no coletor intermediário. Em segundo lugar, existem algumas forças atrativas (força de Van der Waals) entre as próprias partículas (especialmente em partículas finas) devido à sua grande área específica e intensa energia livre. Isso pode levar as partículas a permanecer mais tempo aderidas ao rolo e caírem no compartimento de coleta das frações intermediárias(JIANG; JIA; ZHEN-MING, 2009; WU; LI; XU, 2008).

Após avaliar o efeito da variação da tensão aplicada, a velocidade de rotação do rolo também foi estudada. A velocidade do rolo tem uma relação direta com a capacidade de produção em um processo em escala industrial. Na separação eletrostática empregando resíduos de PCI, para se obter maior capacidade de produção, se faz necessário uso de maior velocidade do rolo. Assim, variou-se a velocidade do rolo entre 50 e 80 rpm. Nesta etapa usou-se as melhores condições de  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\Theta = 65^\circ$ ,  $d_1 = 40$  mm, e  $d_2 = 50$  mm, além da tensão de 30 kV.

A tabela 15 apresenta o balanço de massa para as diferentes rotações do rolo.

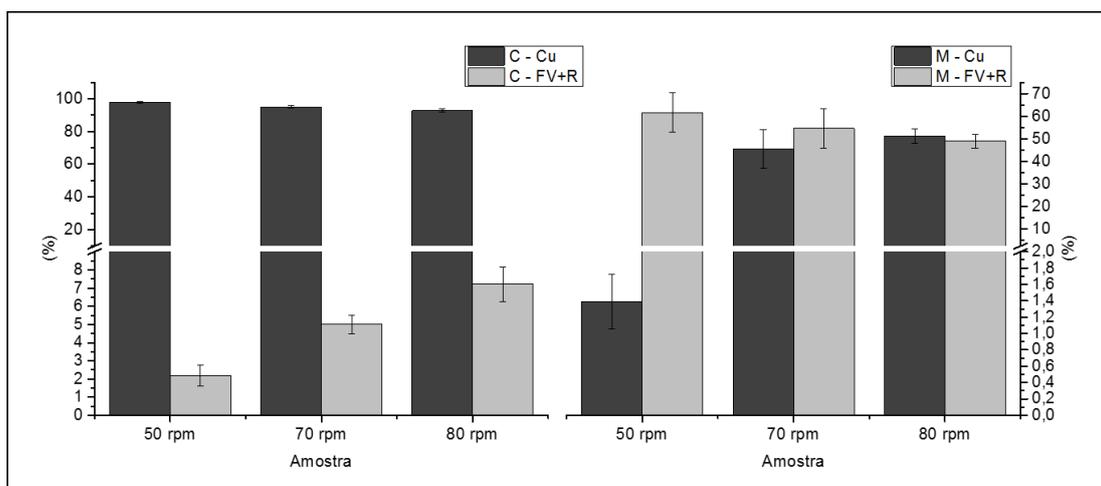
**Tabela 15.** Balanço de massa para diferentes rotações do rolo

Teste	n = 50 rpm			n = 70 rpm			n = 80 rpm		
	C	M	NC	C	M	NC	C	M	NC
1	30,04	1,08	85,59	30,22	1,88	83,76	30,30	2,73	83,54
2	30,18	1,12	86,08	30,10	1,63	86,36	30,42	3,14	82,62
3	30,20	1,07	87,89	30,34	2,22	85,48	30,12	3,10	81,72
<b>Média</b>	30,14	1,09	86,52	30,22	1,91	85,20	30,28	2,99	82,63
<b>D.P.</b>	0,09	0,03	1,21	0,12	0,30	1,32	0,15	0,23	0,91

C – Condutor; M – Intermediário; NC – Não condutor

Observa-se uma mínima diferença nas frações condutoras para as três velocidades aplicadas. A maior diferença está relacionada às frações intermediárias. Para n = 80 rpm também é possível observar que a quantidade de material da fração não condutora diminui em relação as demais. Essa diferença corresponde a 4,49 %.

**Figura 36.** Quantidade de Cu para diferentes velocidades do rolo nas frações condutoras e intermediárias



Os resultados apresentados na Figura 36 indicam que à medida que se aumenta a velocidade do rolo, tem-se um aumento da quantidade de polímeros nas frações condutoras, bem como o aumento da quantidade de cobre nas frações intermediárias, comportamento contrário ao que se deseja(WU et al., 2009; WU; LI; XU, 2008; YOUNES et al., 2013).

Não foi observado a presença de cobre em nenhuma das frações não condutoras. Isso indica que a diferença de 4,5 % a menos de material nas frações NC foram para as demais frações. Assim, a velocidade menor, de 50

rpm, apresentou os melhores resultados para obtenção de uma fração de cobre mais pura.

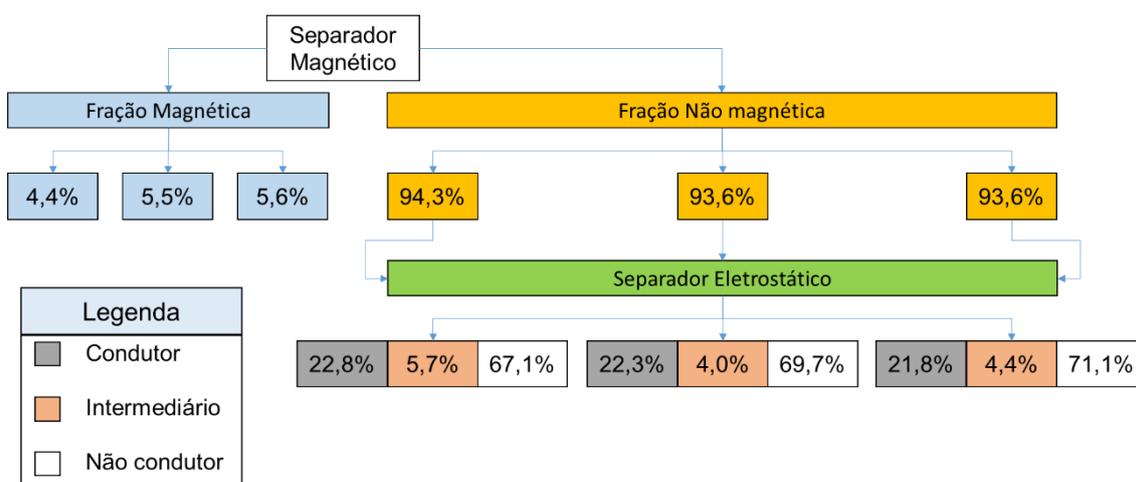
### 5.2.1 Validação das melhores condições com resíduo real

Esse item foi assim denominado porque as melhores condições obtidas no emprego do separador eletrostático corona em resíduo sintético foram aplicadas novamente em amostras reais de PCIs. Além de avaliar se o processo é eficiente na concentração de Cu, a estabilidade do processo é importante, pois quanto mais estável é o processo, tanto mais confiável o mesmo será.

A partir da Figura 38, é possível observar o diagrama em blocos com as percentagens das frações obtidas após separador magnético e separador eletrostático corona. A separação magnética foi realizada no intuito de retirar previamente os metais magnéticos (Fe e Ni), deixando a amostra menos “contaminada” para avaliação das quantidades de cobre presentes nas amostras.

É válido lembrar que os ensaios abaixo foram realizados em triplicata, conforme Figura 37. Cada amostra tinha 150 g de PCIs previamente moídas ( $0,5 < B < 1,00$  mm).

**Figura 37.** Diagrama em blocos das frações obtidas após emprego das melhores condições do separador eletrostático

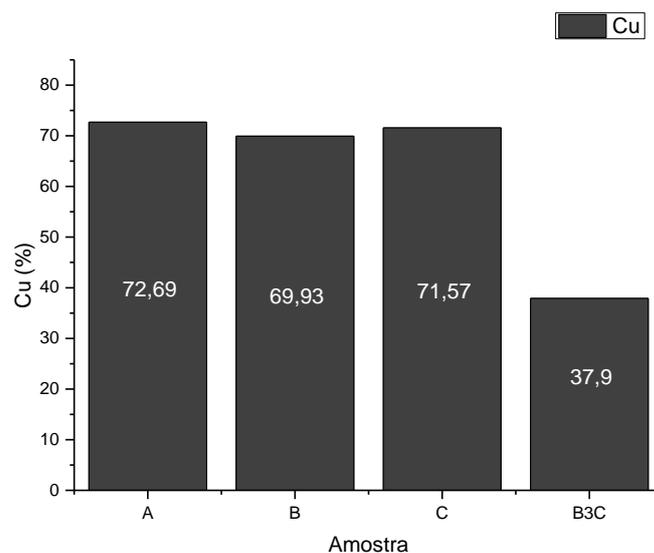


Observa-se pequena diferença entre as frações obtidas para cada uma das amostras. A média para as frações condutoras foi de 22,3 %, 4,7 % para as frações intermediárias e 69,3 % para as frações não condutoras, valores bem próximos (condutor e não condutor) aos obtidos no resíduo sintético (Tabelas 13, 14 e 15). A maior diferença entre as amostras sintéticas e reais está nas frações intermediárias, nas quais a percentagem média obtida nas amostras sintéticas foi de 0,91 %. A principal razão para essa diferença pode estar relacionada com a quantidade de diferentes materiais (metais e cerâmicos) presentes no resíduo real que podem não ter sofrido tanta interferência do campo elétrico, bem como pelos fatores de influência sobre as trajetórias das partículas (já que no resíduo real existe uma distribuição de tamanhos de partículas muito maior que no sintético) e os pontos de queda, já citados anteriormente.

Cabe destacar também a baixa variabilidade do processo, pois passando três amostras nas mesmas condições, os valores são próximos entre cada uma das amostras.

As percentagens de cobre em cada uma das amostras reais submetidas ao separador eletrostático estão apresentadas na Figura 38. Para efeito de comparação, a melhor concentração de Cu do estudo preliminar com resíduo real, apresentado na Figura 30 (amostra B3C), também aparece na Figura 38.

**Figura 38.** Percentagem de Cu nas amostras reais usando condições otimizadas com resíduo sintético

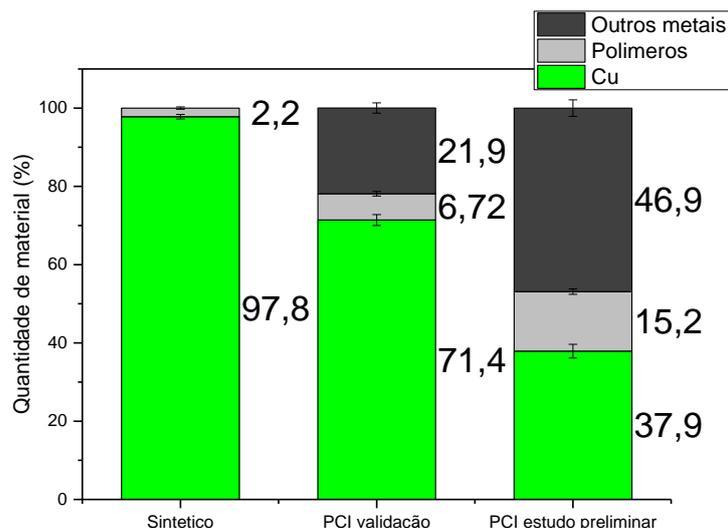


Após a otimização dos parâmetros do separador eletrostático e testes das melhores condições impostas com amostras reais, observa-se um aumento de aproximadamente 33 % entre o estudo preliminar com resíduo real e a otimização realizada com emprego de resíduos sintéticos. As três amostras submetidas tiveram variação entre 69,93 e 72,69 %, tendo como média na percentagem de Cu 71,4 %.

Fica evidente a necessidade de entender os mecanismos de operação do separador eletrostático corona, objetivando-se maximizar a quantidade de cobre na fração condutora. Além disso, é de extrema importância a estabilidade operacional, na qual se podem observar valores sem grandes variações nos subprodutos obtidos.

Na Figura 39, é possível comparar as proporções de metais e polímeros/cerâmicos em amostras após a separação eletrostática para o resíduo sintético, resíduo real (estudo preliminar) e resíduo aplicado na validação das melhores condições encontradas com resíduo sintético, apresentado na Figura 31, na página 74.

**Figura 39.** Comparação das proporções de metais e polímeros/cerâmicos entre diferentes amostras após separação eletrostática



Analisando as amostras com diferentes condições do SEC aplicadas, observa-se que o menor ângulo, tanto do eletrodo corona quanto do eletrodo eletrostático, uma maior quantidade de cobre, bem como menor quantidade de polímeros e cerâmicos nas amostras após otimização com placa real foram encontradas. O mesmo comportamento foi observado entre as distâncias dos eletrodos e da superfície do rolo. Assim, se o SEC for empregado com ângulos e distâncias dos eletrodos corretamente, os resultados tendem a apresentar amostras com maiores quantidades de cobre, e mais puras. Os resultados destacam a importância de estudar os parâmetros operacionais do SEC para a concentração de cobre a partir de resíduos de PCI para maximizar o cobre, e ao mesmo tempo, reduzir a quantidade de materiais interferentes ao produto final.

Os valores obtidos durante o experimento com amostras sintéticas apresentam maior teor de metais em função de que havia somente cobre e resina epóxi reforçada com fibra de vidro em sua composição e, devido aos materiais não conterem interferentes, essa porcentagem é maior que para as amostras reais.

Vale salientar que nas amostras reais, mesmo com diversos metais e cerâmicos presentes em sua composição, foi possível retirar uma grande

quantidade de polímeros e cerâmicos da fração condutora, deixando-a bastante “limpa”. Isso está relacionado com a prévia otimização dos parâmetros de operação do separador eletrostático corona através do emprego de amostras sintéticas.

### 5.2.2 Análise estatística através do método ANOVA de uma via

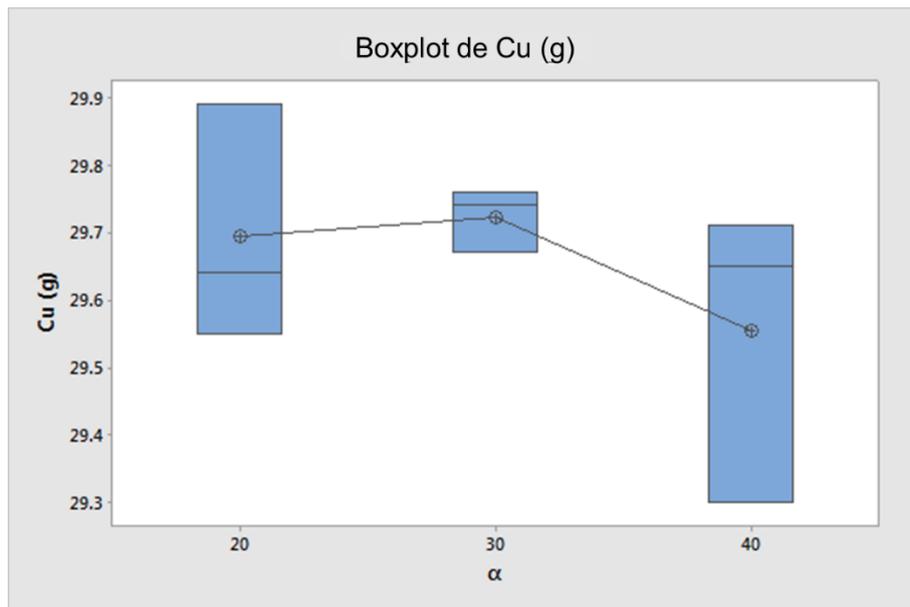
Foi utilizado o método *ANOVA de uma via* para avaliar separadamente as condições ideais (ou as melhores condições) dos seis parâmetros (fator) estudados no separador eletrostático corona com resíduo sintético ( $\alpha$ ,  $\Theta$ ,  $d1$ ,  $d2$ ,  $U$  e  $n$ ), em três níveis para cada fator. Usando os métodos e cálculos para *ANOVA de uma via*, e utilizando a quantidade de cobre das frações condutoras (Tabelas 13, 14 e 15), obtiveram-se as seguintes Tabelas: 16 para  $\alpha$ , 17 para  $\Theta$ , 18 para  $d1$ , 19 para  $d2$ , 20 para  $U$  e 21 para  $n$ .

**Tabela 16.** ANOVA de uma via para  $\alpha$

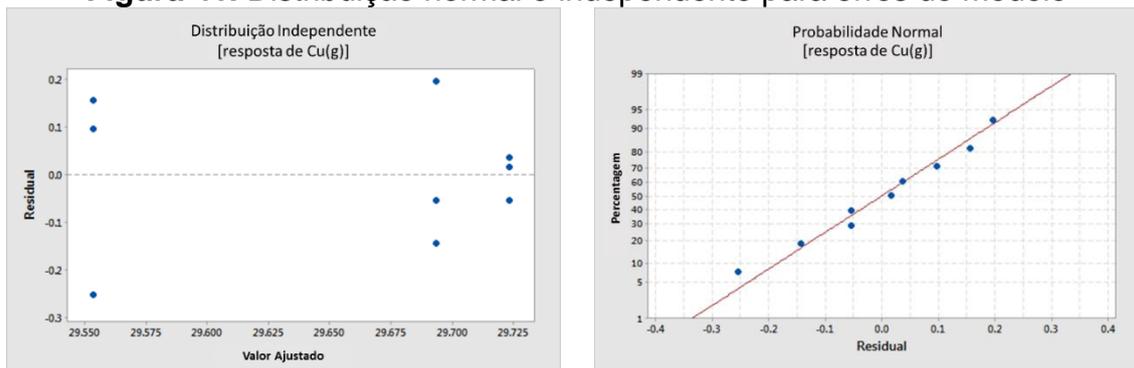
<b>Fator</b>	<b>Soma dos Quadrados</b>	<b>GDL</b>	<b>Média dos Quadrados</b>	<b>Fcalc</b>	<b>Ftab</b>
A	0,0494	2	0,0274	1,0	5,1
Erro	0,1646	6	0,0274		
Total	0,0,214	8			

Como mencionado anteriormente, se  $F_{calc} > F_{tab}$ , o efeito estudado será significativo. Analisando-se a Tabela 16, pode-se verificar que o Fator  $\alpha$  não foi significativo, ou seja, a hipótese nula ( $H_0$ ) é verdadeira e, portanto, a alteração dos níveis desse fator não tem efeito sobre a resposta média (MONTGOMERY, 1997, 2009). A Figura 40 indica que as médias de  $\alpha$  tiveram pequena variação entre os níveis e, portanto, pode-se optar por qualquer um dos ângulos empregados (20°, 30° e 40°). A Figura 41 mostra uma distribuição normal independente para erros do modelo (e como resultado, as observações).

**Figura 40.** Comparação BoxPlot para os níveis de  $\alpha$



**Figura 41.** Distribuição normal e independente para erros do modelo



A suposição de normalidade pode ser verificada construindo uma parcela de probabilidade normal de resíduos em que não há um padrão evidente nessas parcelas. A suposição de independência pode ser verificada ao traçar os resíduos contra o valor ajustado, no qual os resíduos têm um padrão de dispersão aleatória (MONTGOMERY, 1997, 2009).

**Tabela 17.** ANOVA de uma via para  $\Theta$

Fator	Soma dos Quadrados	GDL	Média dos Quadrados	Fcalc	Ftab
$\Theta$	0,5238	2	0,2619	15,1	5,1
Erro	0,1041	6	0,0174		
Total	0,6279	8			

A Tabela 17 mostra que  $F_{calc} > F_{tab}$  e, portanto, o fator  $\Theta$  é significativo, isto é, a hipótese nula ( $H_0$ ) é rejeitada. Assim, há diferenças entre as médias dos níveis, mas não é possível explicar exatamente o que significa. Nesse caso, usaram-se os múltiplos métodos de comparação (MCM). O MCM considera que as médias diferem da média de um nível que está fora da curva da média de outro nível, ou seja, quando a diferença entre dois meios é maior do que a menor diferença significativa (LSD),  $|\bar{y}_i - \bar{y}_j| > LSD$ , LSD é calculado conforme Eq. 12.

$$LSD = t_{\alpha/2, N-a} \sqrt{\frac{2MS_E}{n}} \quad [12]$$

LSD em  $\alpha = 0,05$  é

$$LSD = t_{0,025,6} \sqrt{\frac{2(0,0174)}{3}} = 2,447 \sqrt{0,0116} = 0,26$$

Assim, qualquer par de níveis significa que difere em um valor absoluto em mais de 0,26, o que implicaria que os pares correspondentes de médias populacionais são significativamente diferentes. Os três níveis são

$$\bar{y}_1 = 29,10 (\theta = 55^\circ) \quad \bar{y}_2 = 29,54 (\theta = 65^\circ) \quad \bar{y}_3 = 28,98 (\theta = 75^\circ)$$

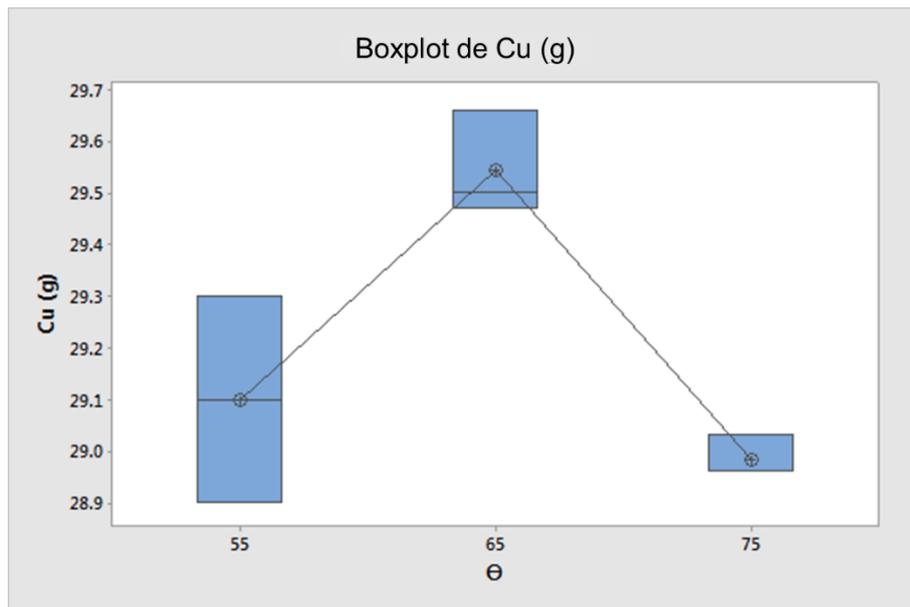
e as diferenças nas médias são

$$|\bar{y}_1 - \bar{y}_2| = 0,44 * \quad |\bar{y}_1 - \bar{y}_3| = 0,12 \quad |\bar{y}_2 - \bar{y}_3| = 0,56 *$$

\* diferença significativa

Os valores destacados indicam pares de médias que são significativamente diferentes. Considerando que o objetivo deste trabalho é maximizar a concentração de Cu,  $\Theta = 65^\circ$  foi o melhor ângulo testado, uma vez que é significativamente diferente do ângulo dos outros dois parâmetros e concentra mais Cu (Fig.42). A distribuição normal independente para erros do modelo é muito semelhante aos gráficos para  $\alpha$  (Fig. 41) e, portanto, não serão apresentados. Este comportamento também aconteceu para os próximos parâmetros analisados.

**Figura 42.** Comparação BoxPlot para os níveis de  $\Theta$



Para  $\Theta$ , a diferença na concentração de Cu é observada aplicando um ângulo de  $65^\circ$  em relação aos demais ângulos. Este comportamento é observado não só pela maior quantidade de Cu, mas também pela menor quantidade de material polimérico.

**Tabela 18.** ANOVA de uma via para d1

Fator	Soma dos Quadrados	GDL	Média dos Quadrados	Fcalc	Ftab
d1	2,4553	2	1,2276	10,2	5.1
Erro	0,7197	6	0,1200		
Total	3,1750	8			

O fator d1 é significativo porque  $F_{calc} > F_{tab}$  (Tabela 18). Portanto, foi realizado o MCM calculando o LSD em  $\alpha = 0,05$  através da Eq. 12.

$$LSD = t_{0,025,6} \sqrt{\frac{2(0,1200)}{3}} = 2,447 \sqrt{0,08} = 0,69$$

As médias dos três níveis são

$$\bar{y}_1 = 29,84 \text{ (d1 = 40 mm)} \quad \bar{y}_2 = 29,68 \text{ (d1 = 50 mm)} \quad \bar{y}_3 = 28,66 \text{ (d1 = 60 mm)}$$

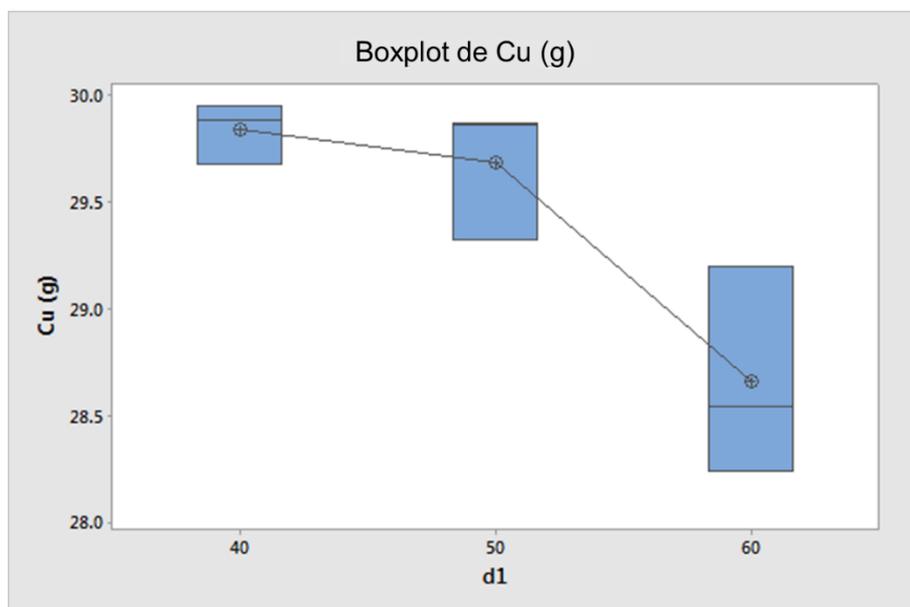
Além disso, as diferenças nas médias são

$$|\bar{y}_1 - \bar{y}_2| = 0,16 \quad |\bar{y}_1 - \bar{y}_3| = 1,18 * \quad |\bar{y}_2 - \bar{y}_3| = 1,02 *$$

\* diferença significativa

No intuito de maximizar a concentração de Cu,  $d1$  pode ser de 40 ou 50 mm (Fig. 43), pois não difere significativamente.

**Figura 43.** Comparação BoxPlot para os níveis de  $d1$



Os resultados experimentais para  $d1$  já mostraram essa diferença entre os níveis. Observa-se quanto mais perto do rolo o eletrodo corona estiver, uma maior concentração de Cu foi obtida. No entanto, as quantidades de Cu tanto para  $d1 = 40$  mm e  $d1 = 50$  mm são similares, sendo que neste caso, levou-se em consideração a menor quantidade de material polimérico na fração condutora para otimização das melhores condições de aplicação do SEC.

**Tabela 19.** ANOVA de uma via para  $d2$

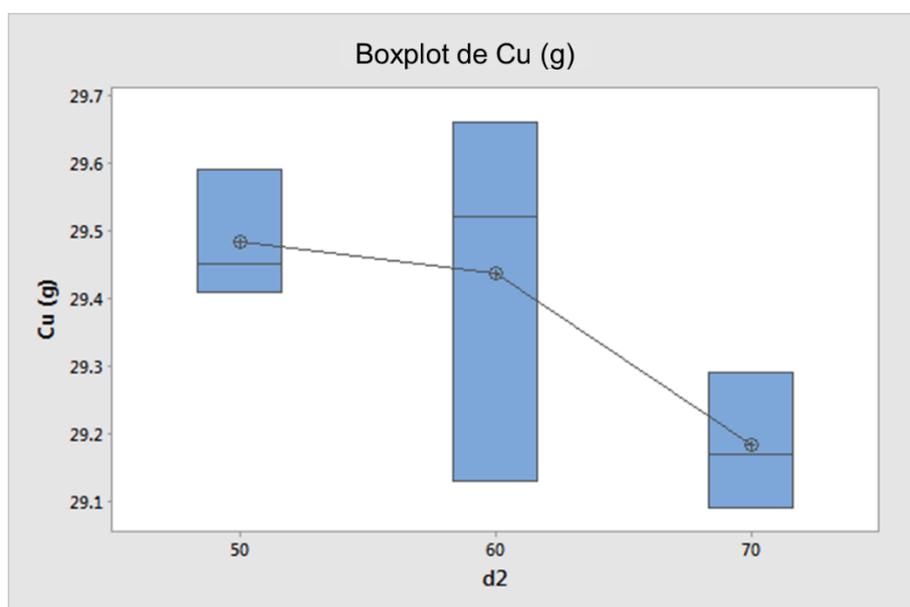
Fator	Soma dos Quadrados	GDL	Média dos Quadrados	Fcalc	Ftab
$d2$	0,1564	2	0,0782	2,5	5,1
Erro	0,1890	6	0,0315		
Total	0,3454	8			

O fator  $d2$  não é significativo porque  $F_{calc} < F_{tab}$  (Tabela 19) e, portanto, as médias não diferem entre os níveis, como pode ser visto na Figura 44.

Se na ANOVA a hipótese nula da igualdade das médias dos níveis não é rejeitada ( $F_{\text{calc}} < F_{\text{tab}}$  ou  $p\text{-valor} > 0,05$ ), não é necessário realizar uma MCM. Portanto, para esse fator, pode-se optar por qualquer uma das distâncias aplicadas (50, 60 ou 70 mm), pois não difere significativamente uma das outras.

Para  $\alpha$  e  $d_2$ , os valores experimentais foram muito próximos entre esses dois parâmetros e, após a análise do método ANOVA de uma via, foi possível verificar que, para ambos os parâmetros, qualquer valor empregado poder ser aplicado sem que ocorra diferença no rendimento do processo.

**Figura 44.** Comparação BoxPlot para os níveis de  $d_2$



**Tabela 20.** ANOVA de uma via para U

Fator	Soma dos Quadrados	GDL	Média dos Quadrados	$F_{\text{calc}}$	$F_{\text{tab}}$
U	11,7188	2	5,8594	46,5	5,1
Erro	0,7563	6	0,1260		
Total	12,4751	8			

O fator  $U$  é significativo porque  $F_{\text{calc}} > F_{\text{tab}}$  (Tabela 20). Portanto, foi realizado o MCM calculando-se o LSD em  $\alpha = 0,05$  através da Eq. 12.

$$LSD = t_{0,025,6} \sqrt{\frac{2(0,1260)}{3}} = 2,447 \sqrt{0,084} = 0,71$$

As médias dos três níveis são

$$\bar{y}_1 = 26,81 (U = 20 \text{ kV}) \quad \bar{y}_2 = 27,44 (U = 25 \text{ kV}) \quad \bar{y}_3 = 29,48 (U = 30 \text{ kV})$$

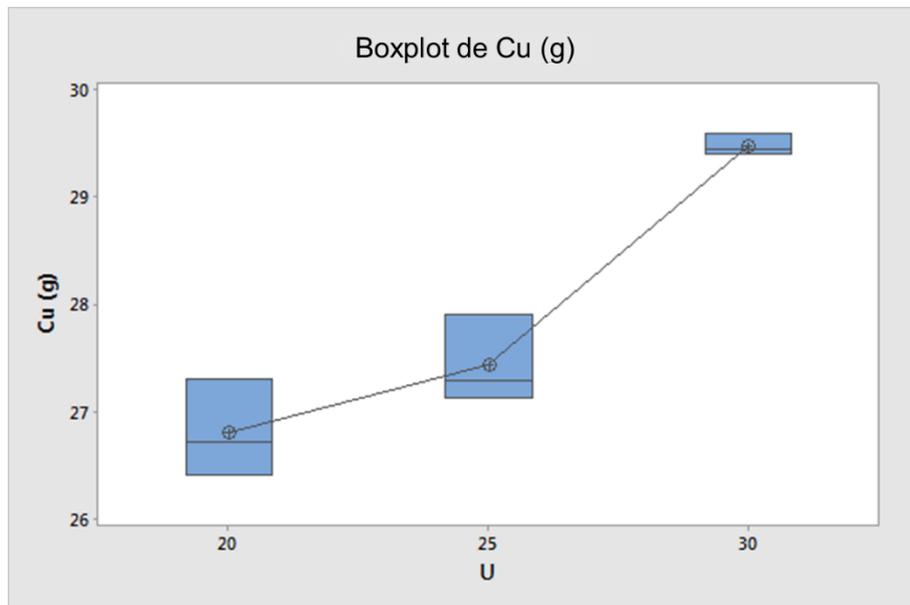
E as diferenças nas médias são

$$|\bar{y}_1 - \bar{y}_2| = 0,63 \quad |\bar{y}_1 - \bar{y}_3| = 2,67 * \quad |\bar{y}_2 - \bar{y}_3| = 2,04 *$$

\* diferença significativa

Para maximizar a concentração de Cu, o  $U$  escolhido é de 30 kV, uma vez que é significativamente diferente dos outros dois parâmetros, concentrando mais Cu (Fig. 45)

**Figura 45.** Comparação BoxPlot para os níveis de  $U$



A medida que a fonte de alta tensão aumenta, maior será a quantidade de Cu encontrada nas frações condutoras. Este comportamento também foi observado pelo método ANOVA de uma via.

**Tabela 21.** ANOVA de uma via para  $n$

Fator	Soma dos Quadrados	GDL	Média dos Quadrados	Fcalc	Ftab
N	2,8971	2	1,4485	33,3	5,1
Erro	0,2611	6	0,0435		
Total	3,1582	8			

O fator  $n$  é significativo porque  $F_{\text{calc}} > F_{\text{tab}}$ , conforme apresentado na Tabela 21 e para fazer o MCM, LSD foi calculado de acordo com a Eq. 12.

$$LSD = t_{0,025,6} \sqrt{\frac{2(0,0435)}{3}} = 2,447 \sqrt{0,029} = 0,42$$

As médias dos três níveis são

$$\bar{y}_1 = 29,48 \text{ (} n = 50 \text{ rpm)} \quad \bar{y}_2 = 28,71 \text{ (} n = 70 \text{ rpm)} \quad \bar{y}_3 = 28,10 \text{ (} n = 80 \text{ rpm)}$$

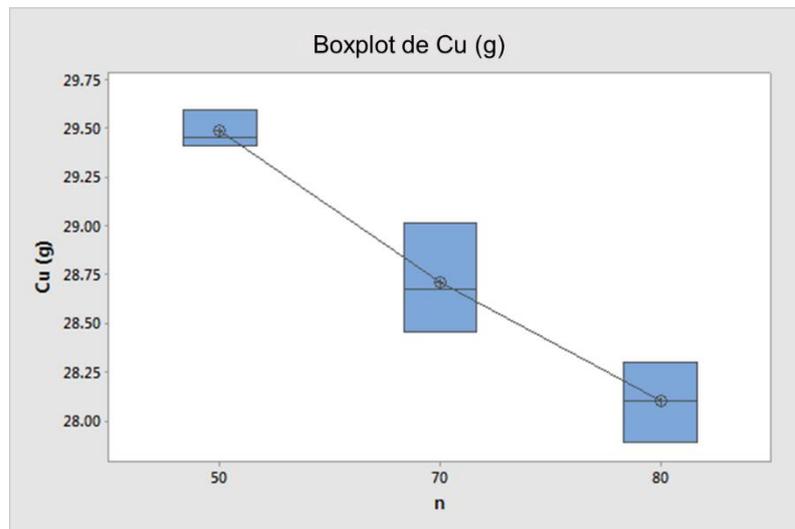
E as diferenças nas médias são

$$|\bar{y}_1 - \bar{y}_2| = 0,77 * \quad |\bar{y}_1 - \bar{y}_3| = 1,38 * \quad |\bar{y}_2 - \bar{y}_3| = 0,61 *$$

\* diferença significativa

Assim, para maximizar a concentração de Cu, o melhor valor de  $n$  é de 50 rpm, uma vez que é significativamente diferente dos outros dois parâmetros e concentra mais cobre, conforme pode ser visto na Figura 46.

**Figura 46.** Comparação BoxPlot para os níveis de  $n$



Para a velocidade do rolo, as quantidades de Cu foram próximas às observadas para os diferentes valores de U. Nota-se que à medida que a velocidade aumenta, uma menor quantidade de cobre nas frações condutoras é observada. Além disso, estas mesmas frações apresentaram maior quantidade de material polimérico.

O uso do método ANOVA de uma via justifica-se pela confiabilidade em avaliar de forma mais concisa os valores obtidos experimentalmente. Como verificou-se, dos seis parâmetros estudados do separador eletrostático, apenas dois não são significativos ( $\alpha$  e  $d_2$ ) nos níveis avaliados. Embora alguns níveis apresentem pequenas diferenças nas quantidades de Cu, o método ANOVA indica que essas pequenas diferenças encontradas podem contribuir de forma positiva na concentração de Cu de resíduos de PCI através do emprego de um SEC.

## 6 CONCLUSÕES

Através do emprego de diferentes processos mecânicos, como separador magnético e eletrostático na concentração de metais como cobre a partir de PCIs, é possível concluir que:

- ◆ Após o processo de cominuição e separação granulométrica, as perdas representam 8 % do total de amostra, ou seja, 0,89 kg, demonstrando ser um método eficiente na liberação dos metais constituintes das placas de circuito impresso e com baixo valor de perda.
- ◆ Na etapa de caracterização, a análise química das frações obtidas (A e B) mostrou que os metais ficam concentrados em granulometrias maiores. Na amostra A ( $A < 0,5$  mm), o cobre alcançou um teor de 13 %, enquanto que para a fração mais grosseira, o teor foi de quase 20 %. Essa diferença pode ser creditada aos polímeros e cerâmicos, que são mais fáceis de moer, e aos metais, que são mais difíceis de moer, concentrando-se na fração de maior granulometria.
- ◆ Após o emprego do separador magnético, foi possível observar comportamentos distintos das amostras com tamanhos de partículas diferentes. Nas amostras A ( $A < 0,5$  mm), a retenção de material considerado magnético variou entre 52 e 70,6 % da massa inicial, com variação na concentração de ferro entre 12 e 14,1 %. Para as amostras B ( $0,5 < B < 1,00$  mm), observou-se o inverso: baixa quantidade de material considerado magnético retido (5,48 – 7,72 %), porém as quantidades de ferro nas frações magnéticas variaram entre 10,3 e 11,4 %. Além disso, observou-se que nas frações não magnéticas ocorreu acúmulo de ferro, variando de 18,6 a 25,8 % entre as amostras, e que, neste caso, ocorreu uma divisão nas quantidades relatadas. Para ambos tamanhos de partículas, a melhor condição empregada no separador magnético foi a 3 (vibração da calha – 50 Hz; velocidade do rolo – 175 rpm).
- ◆ Após a separação magnética, as amostras não magnéticas foram submetidas ao separador eletrostático, no qual foi possível observar a concentração de cobre em ambos tamanhos de partícula. Os resultados

indicam concentração de até 51,1% para as frações A, e 37,93 % para as frações B. Diferentes condições foram empregadas nas amostras, sendo que quanto maior a tensão aplicada juntamente com baixa velocidade do rolo, tanto melhor a eficiência. Assim como o separador magnético, para esta etapa, a condição mais eficiente se mostrou a 3 (tensão aplicada de 35 kV e rotação de 100rpm).

- ◆ O uso de um resíduo sintético mostrou-se muito útil para estudar uma maior quantidade de parâmetros do SEC. Nesta parte do estudo foi possível obter frações concentradas em cobre contendo no máximo 4 % de impurezas, usando  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\Theta = 65^\circ$ ,  $d1=40\text{mm}$ ,  $d2=50\text{mm}$ ,  $U = 30 \text{ kV}$  e  $n = 50 \text{ rpm}$ .
- ◆ Na validação das melhores condições encontradas no SEC, com o uso do resíduo sintético, aplicando isso em um resíduo real, observou-se que a quantidade de material encontrado para as frações condutoras, intermediárias e não condutoras, aproxima-se das encontradas em resíduos sintéticos. A média de cobre concentrado após otimização dos parâmetros de operação do SEC foi de 71,4 %. Ao observar as amostras submetidas ao separador eletrostático previamente, com condições encontradas na literatura, a melhor concentração de cobre obtida foi de 37,93 %, o que confirma a necessidade de estudar de forma mais concisa, os parâmetros de operação do SEC para a concentração de cobre a partir de resíduos de PCI.
- ◆ Através da aplicação do método ANOVA de uma via, foi possível avaliar separadamente as condições ideais empregadas para cada parâmetro após o uso de resíduo sintético no SEC. Os parâmetros  $\Theta$ ,  $d1$ ,  $U$  e  $n$  se mostraram significativos entre as médias de cada nível empregado. Ou seja, há diferença significativa entre usar  $\Theta = 65^\circ$  do que usar os demais ângulos, e isso vale para cada um dos quatro fatores acima mencionados.
- ◆ Assim, pode-se dizer, em síntese, enfim, que a otimização de equipamentos de processos mecânicos, em especial o separador eletrostático que possui diversos parâmetros de regulagem, na concentração de metais de interesse econômico, como o cobre, é

primordial para obter uma melhor eficiência e diminuir as perdas de cobre para as demais frações.

## 7 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Como sugestões para trabalhos futuros, têm-se:

- Otimizar o separador magnético através do emprego de resíduo sintético, visando a melhoria do processo na separação de metais com propriedades magnéticas;
- Validar as condições obtidas na otimização do separador magnético, através do emprego de resíduo real;
- Avaliar a relação da quantidade de material submetido ao campo eletrostático por área da calha de alimentação ( $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ )

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABINEE. **Panorama econômico e desempenho setorial**, 2013. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/panorama.pdf>>. Acesso em: 21 jan. 2016
- ABINEE. **Panorama econômico e desempenho setorial**, 2015. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon40.htm>>. Acesso em: 21 jan. 2016
- ABINEE. **Panorama econômico e desempenho setorial**, 2016. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon40.htm>>. Acesso em: 1 fev. 2018
- ABRACI, A. B. DE C. I. **Ampliando mercado de placa de circuitos impressos através de certificação**, 2015. Disponível em: <<http://www.abraci.org.br/arquivos/ICI.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2015
- AQUINO, J. A.; OLIVEIRA, M. L. M.; BRAGA, P. F. A. Cap. 17. Ensaio em meio denso. In: **Tratamento de minérios - práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.
- AWASTHI, A. K.; LI, J. An overview of the potential of eco-friendly hybrid strategy for metal recycling from WEEE. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 126, p. 228–239, nov. 2017.
- BURKE, M. The Gadget Scrap Heap. v. 4, n. ChemWorld, p. 45–48, 2007.
- CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5ª ed. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2002.
- CESARO, A. et al. Effectiveness of WEEE mechanical treatment: Separation yields and recovered material toxicity. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2656–2662, jan. 2017.
- CHANCEREL, P.; ROTTER, S. Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment. **Waste Management**, v. 29, n. 8, p. 2336–2352, ago. 2009.
- CHAUHAN, G. et al. Novel technologies and conventional processes for recovery of metals from waste electrical and electronic equipment: Challenges & opportunities – A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 1, p. 1288–1304, fev. 2018.
- 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.
- CUI, J.; ZHANG, L. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 158, n. 2–3, p. 228–256, 30 out. 2008.

- DAS, A.; ARI, V.; MEHROTRA, S. P. A Novel Flowsheet for the Recovery of Metal Values from Waste Printed Circuit Boards. v. 53, p. 464–469, 2009.
- DASCALESCU, L. et al. Charges and Forces on Conductive Particles in Roll-type Corona-electrostatic Separators. v. 31(5), 1995.
- DASCALESCU, L. et al. Electrostatic Separation of Insulating and Conductive Particles from Granular Mixes. v. 16, p. 25–42, 1998a.
- DASCALESCU, L. et al. Charging of Insulating Spheres on the Surface of an Electrode Affected by Monopolar Ions. v. 34(1), p. 35–42, 1998b.
- DASCALESCU, L. et al. **Charge-decay Characteristics of Granular Materials Forming Mono-layers at the Surface of Grounded Electrodes.** . In: PROCEEDINGS OF THE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE. 2005
- DE MARCO, I. et al. Pyrolysis of electrical and electronic wastes. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 82, n. 2, p. 179–183, jul. 2008.
- DIAS, P. et al. Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 7–16, fev. 2018.
- DUAN, C. et al. Recovery of metals from waste printed circuit boards by a mechanical method using a water medium. **Journal of Hazardous Materials**, v. 166, n. 1, p. 478–482, jul. 2009.
- EMPA. **The e-waste guide**, 2005. Disponível em: <[http://ewasteguide.info/e\\_waste\\_definition](http://ewasteguide.info/e_waste_definition)>. Acesso em: 12 dez. 2015
- ETC/RWM, E. TOPIC CENTRE ON RESOURCE AND WASTE MANAGEMENT. **(Topic Centre of the European Environment Agency) part of the European Information and Observation Network (EIONET)**, 2003. Disponível em: <<http://waste.eionet.eu.int/waste/6>>. Acesso em: 15 jan. 2016
- EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. **DIRECTIVE 2012/19/EU**, 7 abr. 2012. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/19/oj>>. Acesso em: 20 jul. 2017
- FOGARASI, S. et al. Copper recovery and gold enrichment from waste printed circuit boards by mediated electrochemical oxidation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 273, p. 215–221, maio 2014.
- GHOSH, B. et al. Waste Printed Circuit Boards recycling: an extensive assessment of current status. **Journal of Cleaner Production**, v. 94, p. 5–19, maio 2015.
- GUIMARÃES, Y. F.; SANTOS, I. D.; DUTRA, A. J. B. Direct recovery of copper from printed circuit boards (PCBs) powder concentrate by a simultaneous electroleaching–electrodeposition process. **Hydrometallurgy**, v. 149, p. 63–70, out. 2014.

GUO, C. et al. Liberation characteristic and physical separation of printed circuit board (PCB). **Waste Management**, v. 31, n. 9–10, p. 2161–2166, set. 2011.

GUO, J.; GUO, J.; XU, Z. Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 168, n. 2–3, p. 567–590, set. 2009.

HADI, P. et al. Toward environmentally-benign utilization of nonmetallic fraction of waste printed circuit boards as modifier and precursor. **Waste Management**, v. 35, p. 236–246, jan. 2015a.

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

HAVLIK, T. et al. Leaching of copper and tin from used printed circuit boards after thermal treatment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 183, n. 1–3, p. 866–873, nov. 2010.

HE, W. et al. WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China. **Journal of Hazardous Materials**, v. 136, n. 3, p. 502–512, 25 ago. 2006.

INBRAS-ERIEZ. **IOM - Manual de Instrução, Operação e Manutenção.**, 2015.

INCULET, I. I.; CASTLE, G. S. P.; BROWN, J. D. Electrostatic Separation of Plastics for Recycling. v. 16, p. 91–100, 1998.

JAISWAL, A. et al. Go Green with WEEE: Eco-friendly Approach for Handling E- waste. **Procedia Computer Science**, v. 46, p. 1317–1324, 2015.

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.

JING-YING, L.; XIU-LI, X.; WEN-QUAN, L. Thiourea leaching gold and silver from the printed circuit boards of waste mobile phones. **Waste Management**, v. 32, n. 6, p. 1209–1212, jun. 2012.

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.

KASPER, A. C. et al. Printed Wiring Boards from Mobile Phones: Characterization and Recycling of Copper. v. 31, p. 2536–2545, 2011.

KIDDEE, P.; NAIDU, R.; WONG, M. H. Electronic waste management approaches: An overview. **Waste Management**, v. 33, n. 5, p. 1237–1250, maio 2013.

LAGE, E. A. **Separadores magnéticos: experiência em minério de ferro na Herculano mineração**. Trabalho de Conclusão de Especialização—Ouro Preto-MG: Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

LAWS, E. A. **Aquatic pollution: An introductory text**. 3ª ed. [s.l.] John Wiley & Sons, 2000.

LI, J. et al. Critical rotational speed model of the rotating roll electrode in corona electrostatic separation for recycling waste printed circuit boards. **Journal of Hazardous Materials**, v. 154, n. 1–3, p. 331–336, jun. 2008.

LI, J.; JIANG, Y.; XU, Z. Eddy current separation technology for recycling printed circuit boards from crushed cell phones. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 1316–1323, jan. 2017.

LI, J.; XU, Z.; ZHOU, Y. Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards. **Journal of Electrostatics**, v. 65, n. 4, p. 233–238, abr. 2007.

LU, H. et al. Movement behavior in electrostatic separation: Recycling of metal materials from waste printed circuit board. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 197, n. 1–3, p. 101–108, fev. 2008.

MARIS, E. et al. Characterizing plastics originating from WEEE: A case study in France. v. 76, p. 28–37, 2015.

MASAHIRO OGUCHI et al. A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources. v. 31, p. 2150–2160, 2011.

MOHABUTH, N.; MILES, N. The recovery of recyclable materials from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) by using vertical vibration separation. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 45, n. 1, p. 60–69, set. 2005.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 4th. ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality**. 6th. ed. New York: John Wiley & Sons, 2009.

MORAES DE, V. T. **Recuperação de metais a partir do processamento mecânico e hidrometalúrgico de placas de circuito impresso de celulares obsoletos**. São Paulo: Escola Politécnica de São Paulo, 2011.

MOSKALYK, R. R.; ALFANTAZI, A. M. Review of copper pyrometallurgical practice: today and tomorrow. v. 16, p. 893–919, 2003.

MURAGAN, R. V. et al. Milling and Separation of the Multi-component Printed Circuit Board Materials and the Analysis of Elutriation Based on a Single Particle Model. v. 183, p. 169–176, 2008.

NESBITT, A. B.; BREYTENBACH, W.; VAN DER PLAS, P. J. Characterization of the Pulse Wave of an InLine Pressure Jig in a Near Density Application. v. 18, p. 1–7, 2005.

ONGONDO, F. O.; WILLIAMS, I. D.; CHERRETT, T. J. How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. **Waste Management**, v. 31, n. 4, p. 714–730, abr. 2011.

PARK, Y. J.; FRAY, D. J. Recovery of High Purity Precious Metal from Printed Circuit Boards. v. 164, p. 1152–1158, 2009.

RICHARD, G. et al. Optimization of metals and plastics recovery from electric cable wastes using a plate-type electrostatic separator. **Waste Management**, v. 60, p. 112–122, fev. 2017a.

RICHARD, G. et al. Experimental and numerical evaluation of two electrode systems for plate-type electrostatic separators. **Journal of Electrostatics**, v. 85, p. 1–10, fev. 2017b.

RICHARD, G. et al. Comparative study of three high-voltage electrode configurations for the electrostatic separation of aluminum, copper and PVC from granular WEEE. **Journal of Electrostatics**, v. 88, p. 29–34, ago. 2017c.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B. Cap. 8. Separação Magnética e Eletrostática. In: **Tratamento de Minérios**. 4ª ed. Rio de Janeiro-RJ: Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010.

SCHLUEP, M. et al. **Recycling – From e-waste to resources**. [s.l.] United Nations Environment Programme & United Nations University, 2009.

SURESH, S. S. et al. A review on computer waste with its special insight to toxic elements, segregation and recycling techniques. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 116, p. 477–493, maio 2018.

TUNCUK, A. et al. Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. **Minerals Engineering**, v. 25, n. 1, p. 28–37, jan. 2012.

VEIT, H. M. **Emprego do processamento mecânico na reciclagem de sucata de placas de circuito impresso**. Dissertação de Mestrado—Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

VEIT, H. M. **Reciclagem de cobre de sucatas de placa de circuito impresso**. Porto Alegre: Departamento de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

VEIT, H. M. et al. Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy. **Journal of Hazardous Materials**, v. 137, n. 3, p. 1704–1709, out. 2006.

- WIDMER, R. et al. Global perspectives on e-waste. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 25, n. 5, p. 436–458, jul. 2005.
- WILLIAMS, J. C. The Segregation of Particulate Materials: A review. v. 15, p. 245–251, 1976.
- WU, I.; CASTLE, G. S. P.; INCULET, I. I. Induction Charging of Granular Materials in an Electric Field. v. 41(5), 2005.
- WU, J. et al. Impact of nonconductive powder on electrostatic separation for recycling crushed waste printed circuit board. **Journal of Hazardous Materials**, v. 164, n. 2–3, p. 1352–1358, 30 maio 2009.
- WU, J.; LI, J.; XU, Z. Electrostatic separation for multi-size granule of crushed printed circuit board waste using two-roll separator. **Journal of Hazardous Materials**, v. 159, n. 2–3, p. 230–234, nov. 2008.
- WU, Y. et al. Induction Charge on Freely Levitating Particles. v. 135–136, p. 59–64, 2003.
- XIU, F.-R.; ZHANG, F.-S. Materials recovery from waste printed circuit boards by supercritical methanol. **Journal of Hazardous Materials**, v. 178, n. 1–3, p. 628–634, 15 jun. 2010.
- XUE, M.; XU, Z. Computer Simulation of the Pneumatic Separator in the Pneumatic-Electrostatic Separation System for Recycling Waste Printed Circuit Boards With Electronic Components. v. 47(9), p. 4598–4604, 2013.
- YAMANE, L. H. et al. Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. **Waste Management**, v. 31, n. 12, p. 2553–2558, dez. 2011.
- YAMANE, L. H. **Recuperação de metais de placas de circuito impresso de computadores obsoletos através de processo biohidrometalúrgico**. São Paulo: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Escola Politécnica de São Paulo, 2012.
- YOO, J.-M. et al. Enrichment of the Metallic Components from Waste Printed Circuit Boards by a Mechanical Separation Process using a Stamp Mill. v. 29, p. 1132–1137, 2009.
- YOUNES, A. et al. Effect of Spark Discharges on the Trajectories of Insulating Particles in Roll-type Corona-electrostatic Separators. Experimental and Numerical Study. v. 71, p. 84–91, 2013.
- ZEGHLOUL, T. et al. Effect of particle size on the tribo-aero-electrostatic separation of plastics. **Journal of Electrostatics**, v. 88, p. 24–28, ago. 2017.
- ZHIHAI, T. et al. Size Distribution of Wet Crushed Waste Printed Circuit Boards. v. 21, p. 359–363, 2011.

ZHOU, L.; XU, Z. Response to Waste Electrical and Electronic Equipments in China: Legislation, Recycling System, and Advanced Integrated Process. v. 46(9), p. 4713–4727, 2012.

ZHOU, Y.; QIU, K. A new technology for recycling materials from waste printed circuit boards. **Journal of Hazardous Materials**, v. 175, n. 1–3, p. 823–828, mar. 2010.