

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

André Vicente Malheiros da Silveira

**APLICAÇÃO DA SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA NA RECICLAGEM  
DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS E BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO**

Santa Maria, RS  
2016



**André Vicente Malheiros da Silveira**

**APLICAÇÃO DA SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA NA RECICLAGEM DE  
RESÍDUOS POLIMÉRICOS E BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Área de Concentração em Desenvolvimento de Processos Industriais e Ambientais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Química**.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Assumpção Bertuol  
Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Hiromitsu Tanabe

Santa Maria, RS  
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Silveira, André Vicente Malheiros da  
APLICAÇÃO DA SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA NA RECICLAGEM DE  
RESÍDUOS POLIMÉRICOS E BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO / André  
Vicente Malheiros da Silveira.-2016.  
137 p. ; 30cm

Orientador: Daniel Assumpção Bertuol  
Coorientador: Eduardo Hiromitsu Tanabe  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Processos, RS, 2016

1. Separação eletrostática 2. Reciclagem de polímeros  
3. Reciclagem de baterias de íon de lítio 4. Caracterização  
de baterias de íon de lítio 5. Processamento mecânico de  
resíduos I. Bertuol, Daniel Assumpção II. Tanabe, Eduardo  
Hiromitsu III. Título.

**André Vicente Malheiros da Silveira**

**APLICAÇÃO DA SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA NA RECICLAGEM DE  
RESÍDUOS POLIMÉRICOS E BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Área de Concentração em Desenvolvimento de Processos Industriais e Ambientais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Química**.

**Aprovado em 23 de março de 2016:**

---

**Daniel Assumpção Bertuol, Dr.**  
(Presidente/Orientador)

---

**Eduardo Hiromitsu Tanabe, Dr.**  
(Coorientador)

---

**Poliana Pollizello Lopes, Dra. (UFSM)**

---

**Hugo Marcelo Veit, Dr. (UFRGS)**

Santa Maria, RS  
2016



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por me possibilitar saúde, força e perseverança permitindo que eu chegasse até aqui, superando todos os obstáculos em meu caminho.

Agradeço a minha família, aos meus pais, Mauro e Lisiane, e minha irmã Isabel. Muito obrigado pelo apoio incondicional, por serem os meus exemplos e estarem sempre presente ao meu lado. Agradeço por sempre incentivarem os meus estudos, me dando suporte para isso.

A minha namorada, Bárbara, que sempre está presente ao meu lado, me apoiando na busca dos meus sonhos, me incentivando e me aguentando nos momentos de cansaço e estresse. Sou muito grato pelo seu apoio, carinho e compreensão em todos os momentos.

Agradeço aos meus orientadores, Daniel Bertuol e Eduardo Tanabe, e ao professor Guilherme Dotto, pela amizade, orientação e suporte nas pesquisas realizadas. Obrigado por compartilharem seus conhecimentos e seu tempo com a minha pessoa, estando sempre disponíveis para trocar uma ideia e fazer aquele churrasco de vez em quando.

Aos demais professores que fizeram parte de minha formação, por compartilharem seus conhecimentos e estarem disponíveis para tirar as dúvidas e compartilharem suas experiências.

Aos alunos de iniciação científica Marianna Santana e Mateus Cella, por me auxiliarem na realização dos experimentos, escrita dos trabalhos e discussão dos resultados. Este trabalho também é de vocês.

Agradeço à técnica de laboratório, Mariana Bassaco, por toda ajuda durante a realização deste trabalho. Ao técnico do Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica (NUPEDEE) da UFSM, o Eng. Fernando Martins, pelo auxílio e disponibilidade na instalação do equipamento. Aos colegas Daliomar Júnior e Angélica Streit, pela pareceria e ajuda na realização das análises e experimentos.

Aos queridos amigos e colegas pela convivência nesses dois anos, pelas risadas, piadas, conversas, estresses, discussões, trocas de conhecimento, etc. O convívio com vocês fez o tempo passar mais rápido e o estudo ficar mais leve.

À FAPERGS pelo incentivo financeiro.





*“Viva como se fosse o último dia.  
Aprenda como se fosse viver  
eternamente.”  
(Mahatma Gandhi)*



## RESUMO

### APLICAÇÃO DA SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA NA RECICLAGEM DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS E BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO

AUTOR: André Vicente Malheiros da Silveira

ORIENTADOR: Daniel Assumpção Bertuol

O crescente desenvolvimento industrial acarreta em um grande consumo de produtos e materiais. Entre eles, destacam-se os materiais poliméricos, devido à sua versatilidade e baixo custo, e os equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE), tais como os telefones celulares e suas baterias. Nesse cenário, tecnologias de reciclagem eficientes e ambientalmente aceitáveis tem uma grande importância. Diante disso, o presente trabalho apresenta uma alternativa para a reciclagem mecânica destes diferentes resíduos. A separação das misturas poliméricas foi realizada através do processo de separação triboeletrostática. Já os diferentes componentes das baterias de íon de lítio foram recuperados por um processo de separação eletrostática por efeito corona. No processamento dos resíduos poliméricos, a metodologia empregada consistiu na caracterização, lavagem, cominuição, lavagem e secagem secundária, tribocarregamento e separação eletrostática das diferentes misturas poliméricas (PEAD/PP, PEBD/PP e PET/PVC). As variáveis estudadas foram o mecanismo de tribocarregamento, a umidade relativa do ar, tempo de tribocarregamento, ângulo do defletor, distância do eletrodo de atração, tensão dos eletrodos e a rotação do rolo. No processamento das baterias de íon de lítio, realizaram-se a caracterização das baterias, cominuição, secagem, separação granulométrica e separação eletrostática. Os parâmetros selecionados foram a tensão dos eletrodos, rotação do rolo, distância do eletrodo de atração e o ângulo do defletor do coletor. Para o processamento dos resíduos poliméricos os melhores resultados foram: umidade relativa do ar de  $\pm 42\%$ , tempo de tribocarregamento de 5 minutos, ângulo do defletor de  $2,5^\circ$ , distância do eletrodo de atração de 3 cm, tensão de 30 kV e velocidade de rotação de 10 rpm. Com esses parâmetros, obteve-se a recuperação de 92,8% de PP (pureza de 95,7%) e 95,9% de PEAD (pureza de 93,1%). Na separação de PP e PEBD, obteve-se uma recuperação de PP de 90,2% (pureza de 93,8%), e uma recuperação de PEBD de 94,2% (pureza de 90,8%). Também, conseguiu-se uma recuperação de 96,8% de PET (pureza de 95,9%), e de 95,9% de PVC (pureza de 96,8%). Para a reciclagem de baterias de íon de lítio as melhores condições foram: velocidade de rotação de 20 rpm, tensão de 25 kV, distância do eletrodo de atração de 6 cm e ângulo do defletor de  $0^\circ$ . Através deste processamento, obteve-se uma fração condutora com 98,98% de metais e uma fração não condutora com 99,6% de polímeros. A caracterização das baterias demonstrou uma heterogeneidade desse tipo de resíduo, sendo o processo de separação eletrostática eficiente para os diferentes modelos testados. Sendo assim, a aplicação da separação eletrostática se mostrou um método eficiente e promissor para a reciclagem de resíduos poliméricos e de resíduos de baterias de íon de lítio. O processo estudado possibilitou a obtenção de uma expressiva recuperação dos componentes com uma alta pureza.

**Palavras-chave:** Separação eletrostática. Polímeros. Baterias de íon de lítio. Reciclagem. Processamento mecânico.



## ABSTRACT

### APPLICATION OF ELETROSTATIC SEPARATION IN RECYCLING OF POLYMER WASTE AND LITHIUM ION BATTERIES

AUTHOR: André Vicente Malheiros da Silveira

ADVISOR: Daniel Assumpção Bertuol

The increasing industrial development results in a large consumption of products and materials. Among them, stand out the polymeric materials, due to their versatility and low cost, and electrical and electronic equipment (EEE), such as mobile phones and their batteries. In this scenario, an efficient and environmentally friendly recycling technology has a great importance. Therefore, this study presents an alternative to the mechanical recycling of these wastes. The separation of the polymeric mixtures was performed using the triboelectrostatic separation process. The components of lithium-ion batteries were recovered by a corona electrostatic separation process. In polymeric waste processing, the methodology employed was the characterization, washing, drying, comminution, secondary washing, secondary drying, tribocharging and electrostatic separation of the different polymeric blends (HDPE / PP, LDPE / PP and PET / PVC). The variables studied were the tribocharging mechanism, the relative humidity, the tribocharging residence time, the angle of the deflector, the distance of the static electrode, the electrode voltage and the rotation of the roll. In lithium ion batteries waste processing, the methodology employed was the characterization, comminution, drying, particle size separation and electrostatic separation. The selected parameters were the electrodes voltage, cylinder rotation, the distance of the static electrode and the angle of the deflector of the collector. For the polymeric waste processing the best results were: low relative humidity, tribocharging residence time of 5 minutes, angle of the deflector of 2.5 °, the distance of the static electrode of 3 cm, voltage of 30 kV and speed rotation 10 rpm. With these parameters, was obtained the recovery of 92.8% of PP (purity of 95.7%) and 95.9% of HDPE (purity of 93.1%). In the separation of PP and LDPE, was obtained a PP recovery of 90.2% (purity 93.8%) and a LDPE recovery of 94.2% (purity of 90.8%). Also, was achieved a recovery of 96.8% of PET (purity of 95.9%), and recovery of 95.9% for PVC (purity of 96.8%). For lithium ion batteries waste processing the best conditions were: rotation speed of 20 rpm, voltage of 25 kV, distance of the static electrode 6 cm and angle of the deflector 0 °. Through this process, was obtained a conductive fraction with 98.98% of metals content and a nonconductive fraction with 99.6% of polymer. The characterization of the batteries showed the batteries heterogeneity, being the electrostatic separation efficient to the different models tested. Therefore, the application of electrostatic separation is a promising method and efficient to recycling of polymer waste and lithium ion batteries waste. The studied process enabled a significant recovery of the components with a high purity.

**Keywords:** Electrostatic separation. Polymer. Lithium ion batteries. Recycling. Mechanical processing.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Aplicação das diferentes resinas termoplásticas no Brasil. ....	31
Figura 2 - Produção e rotas de destinação de polímeros. ....	33
Figura 3 - Simbologia utilizada para a identificação de plásticos recicláveis. ....	36
Figura 4- Avanços no desempenho das baterias para aplicação em portáteis. ....	41
Figura 5 - Composição química de uma típica bateria secundária de íon de lítio. ....	42
Figura 6 - Funcionamento do moinho de martelos. ....	46
Figura 7 - Mecanismo de eletrificação por contato. ....	50
Figura 8 - Separador eletrostático por efeito corona. ....	52
Figura 9 - Tribocarregador por vibração. ....	57
Figura 10 - Mecanismo de contato das partículas em tribocarregador de leito fluidizado. ....	58
Figura 11 - Separador eletrostático tipo queda livre. ....	59
Figura 12 - Separador eletrostático tipo rolo. ....	60
Figura 13 - Polímeros utilizados no desenvolvimento do trabalho (a) PEAD, (b) PP, (c) PEBD, (d) PET e (e) PVC. ....	62
Figura 14 - Baterias utilizadas no desenvolvimento do processo geral do processamento mecânico (a) Nokia BP-4L, (b) Motorola BR 50 e (c) Samsung BN. ....	63
Figura 15 – Fluxograma da rota proposta para a separação dos resíduos poliméricos. ....	64
Figura 16 - Moinho de facas utilizado na cominuição dos materiais poliméricos. ....	66
Figura 17 - Peneiras vibratórias utilizadas na etapa de separação granulométrica. ....	67
Figura 18 - Separador eletrostático tipo rolo configurado apenas com o eletrodo de atração. ....	69
Figura 19 - Esquema prático do funcionamento do separador eletrostático tipo rolo aplicado na separação de materiais poliméricos. ....	70
Figura 20 - Sistemas de tribocarregamento utilizados (a) caixa de PP para vibração (b) leito fluidizado de PP. ....	71
Figura 21 – Fluxograma da rota proposta para a reciclagem de LIBs. ....	74
Figura 22 - Moinho de martelos utilizado na cominuição das baterias de íon de lítio. ....	75
Figura 23 - Peneira vibratória utilizada na etapa de separação granulométrica. ....	76
Figura 24 - Separador eletrostático tipo rolo configurado com eletrodo de ionização e eletrodo de atração. ....	77
Figura 25 - Esquema prático do funcionamento do separador eletrostático tipo rolo aplicado na separação dos componentes de bateria de íon de lítio. ....	78
Figura 26 - Parâmetros que podem ser variados na separação eletrostática por efeito corona. ....	80
Figura 27 - Curvas de DSC obtidas na caracterização de PEAD, PEBD e PP. ....	82
Figura 28 - Curvas de DSC obtidas na caracterização de PET e PVC. ....	84
Figura 29 - Partículas poliméricas após processo de lavagem, secagem, cominuição e separação granulométrica, (a) PEAD, (b) PP, (c) PEBD, (d) PET e (e) PVC. ....	84
Figura 30 - Escolha do melhor sistema de tribocarregamento. ....	85
Figura 31 - Estudo do efeito da umidade relativa do ar no tribocarregamento das partículas de PP e PEAD. ....	87
Figura 32 - Estudo do efeito do tempo de residência no tribocarregamento das partículas de PP e PEAD. ....	88
Figura 33 - Estudo do efeito do ângulo do defletor do coletor na separação eletrostática de PP e PEAD. ....	90
Figura 34 - Estudo do efeito da distância do eletrodo de atração na separação eletrostática de PP e PEAD. ....	91
Figura 35 - Descarga elétrica do eletrodo de atração no rolo a uma distância de 2 cm. ....	92
Figura 36 - Estudo do efeito da tensão eletrodo de atração na separação eletrostática de PP e PEAD. ....	93

Figura 37 - Estudo do efeito da velocidade de rotação do rolo na separação eletrostática de PP e PEAD.....	94
Figura 38 - Separação das partículas de PP (azul claro e escuro) e PEAD (branca) nas melhores condições estudadas.....	95
Figura 39 - Separação das partículas de PP (azul escuro e claro) e PEBD (vermelha) nas melhores condições estudadas.....	96
Figura 40 - Separação das partículas de PET (verde escuro e claro) e PVC (marrom) nas melhores condições estudadas.....	97
Figura 41 - Separação das partículas de PP (azul claro e escuro) e PEAD (branca), sem tribocarregamento e após o processo de cominuição em moinho de facas com malha de 10 mm. ....	98
Figura 42 - Separação das partículas de PP (azul claro e escuro) e PEAD (branca), sem tribocarregamento e após o processo de cominuição em moinho de facas com malha de 5 mm. ....	98
Figura 43 – Rota proposta para a reciclagem de uma mistura de resíduos poliméricos. ....	99
Figura 44 - Componentes presentes em uma bateria de íon de lítio (Bateria II). ....	100
Figura 45 - Difratograma do material catódico das baterias de íon de lítio.....	102
Figura 46 - Difratograma do material anódico das baterias de íon de lítio.....	103
Figura 47 - Curvas de DSC obtidas na caracterização dos separadores poliméricos presentes nas baterias de íon de lítio. ....	104
Figura 48 - Análise de MEV/EDS do eletrodo de alumínio da bateria 1, a) MEV e b) EDS. ....	105
Figura 49 - Análise de MEV/EDS do eletrodo de cobre da bateria 1, a) MEV e b) EDS. ....	105
Figura 50 - Análise de MEV/EDS do invólucro metálico da bateria 2, a) MEV e b) EDS... ..	106
Figura 51 - Material sintético utilizado no estudo dos parâmetros da separação eletrostática. ....	107
Figura 52 - Estudo da influência da velocidade de rotação do rolo na separação eletrostática dos componentes de baterias de Li-íon, onde: FC = Fração Condutora, FI = Fração Intermediária e FNC = Fração Não Condutora. ....	109
Figura 53 - Estudo da influência da tensão dos eletrodos na separação eletrostática dos componentes de baterias de Li-íon, onde: FC = Fração Condutora, FI = Fração Intermediária e FNC = Fração Não Condutora. ....	110
Figura 54 - Estudo da influência da distância do eletrodo de atração na separação eletrostática dos componentes de baterias de Li-íon, onde: FC = Fração Condutora, FI = Fração Intermediária e FNC = Fração Não Condutora. ....	111
Figura 55 - Estudo da influência do ângulo do defletor do coletor na separação eletrostática dos componentes de baterias de Li-íon, onde: FC = Fração Condutora, FI = Fração Intermediária e FNC = Fração Não Condutora. ....	112
Figura 56 - Separação eletrostática dos componentes das baterias de Li-íon nas melhores condições estudadas, (a) Fração Não Condutora (FNC), (b) Fração Intermediária (FI) e (c) Fração Condutora (FC). ....	113
Figura 57 - Estudo do reprocessamento da fração intermediária na separação eletrostática dos componentes de baterias de Li-íon, onde: FC = Fração Condutora, FI = Fração Intermediária e FNC = Fração Não Condutora. ....	114
Figura 58 - Processo geral aplicado a bateria 1, (a) pó (grafite + LiCoO <sub>2</sub> ), (b) Fração Não Condutora (polímeros), (c) Fração Intermediária (polímeros + metais) e (d) Fração Condutora (metais). ....	115
Figura 59 - Processo geral aplicado a bateria 2, (a) pó (grafite + LiCoO <sub>2</sub> ), (b) Fração Não Condutora (polímeros), (c) Fração Intermediária (polímeros + metais) e (d) Fração Condutora (metais). ....	116



Figura 60 - Processo geral aplicado a bateria 3, (a) pó (grafite + $\text{LiCoO}_2$ ), (b) Fração Não Condutora (polímeros), (c) Fração Intermediária (polímeros + metais) e (d) Fração Condutora (metais). .....	116
Figura 61 - Difratoograma da fração fina das baterias de íon de lítio após processamento mecânico. ....	117
Figura 62 - Balanço de massa do processamento geral para a bateria 1. ....	118
Figura 63 - Balanço de massa do processamento geral para a bateria 2. ....	119
Figura 64 - Balanço de massa do processamento geral para a bateria 3. ....	120



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comportamento de queima dos principais polímeros encontrados nos resíduos sólidos urbanos.....	37
Tabela 2- Aplicações industriais típicas da separação eletrostática. ....	51
Tabela 3 - Séries triboelétricas de polímeros apresentadas na literatura. ....	54
Tabela 4 – Parâmetros estudados na separação triboeletrostática de PP e PEAD.....	73
Tabela 5 – Parâmetros estudados na separação eletrostática dos componentes de LIBs. ....	80
Tabela 6- Descrição das melhores condições do processo de separação triboeletrostática de PP e PEAD. ....	95
Tabela 7 - Quantificação dos componentes presentes nas baterias de íon de lítio estudadas.	101
Tabela 8 - Descrição das melhores condições do processo de separação eletrostática dos componentes das baterias de Li-íon. ....	113
Tabela 9 - Massa inicial das baterias submetidas ao processamento geral. ....	115



## LISTA DE ABRIVIATURAS E SIGLAS

Â – Ângulo do defletor do coletor do separador eletrostático.  
ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica.  
ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico.  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.  
ABS – *Acrylonitrile-Butadiene-Styrene* (Acrilonitrila-Butadieno-Estireno).  
ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária.  
ASMAR – Associação de Seleccionadores de Materiais Recicláveis de Santa Maria.  
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.  
D1 – Distância entre o eletrodo de ionização e o rolo do separador eletrostático.  
D2 – Distância entre o eletrodo de atração e o rolo do separador eletrostático.  
DRX – Difração de Raio-X.  
EEE – Equipamentos Elétricos e Eletrônicos.  
EPA – *Environmental Agency Protection* (Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana).  
ETE – Estação de Tratamento de Efluentes.  
FC – Fração Condutora.  
FI – Fração Intermediária.  
FNC – Fração Não Condutora.  
HIPS – *High-Impact Polystyrene* (Poliestireno de alto impacto).  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.  
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.  
IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.  
LAPAM – Laboratório de Processos Ambientais da UFSM.  
LIBs – *Lithium-ion Batterias* (Baterias de íon de Lítio).  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura.  
n – Velocidade de rotação do rolo [rpm].  
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora.  
Ni-MH – Níquel Metal Hidreto.  
Ni-Cd – Níquel – Cádmiio.  
PC – Policarbonato.  
PCI – Placa de Circuito Impresso.  
PE – Polietileno.  
PEAD – Polietileno de Alta Densidade.  
PEBD – Polietileno de Baixa Densidade.  
PEBDL – Polietileno de Baixa Densidade Linear.  
PET – Polietileno Tereftalado.  
PMMA – Polimetil-Metacrilato.  
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos.  
PP – Polipropileno.  
PS – Poliestireno.  
PTFE – Politetrafluoretileno.  
PU – Poliuretano.  
PVC – Policloreto de Vinila.  
PVDF - Fluoreto de Polivinilideno.  
REEE – Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos.  
RoHS – *Restriction of Certain Hazardous Materials* (Restrição a Certos Materiais Perigosos).  
RSP – Resíduos Sólidos de Plástico.  
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos.

TG – Termogravimétrica.

U – Tensão dos eletrodos.

UR – Umidade Relativa do ar.

WEEE – *Waste Electrical and Electronic Equipment* (Resíduo de Equipamento Elétrico e Eletrônico).

$\Theta_1$  – Ângulo do eletrodo de ionização.

$\Theta_2$  – Ângulo do eletrodo de atração.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	24
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	28
2.1 OBJETIVO GERAL.....	28
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	28
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	30
3.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS.....	30
<b>3.1.1 Reciclagem de resíduos poliméricos</b> .....	31
<b>3.1.2 Reciclagem mecânica de resíduos poliméricos</b> .....	35
<b>3.1.3 Separação de materiais poliméricos</b> .....	36
3.2 EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS .....	39
<b>3.2.1 Baterias de íon de lítio</b> .....	40
<b>3.2.2 Reciclagem de baterias de íon de lítio</b> .....	44
3.2.2.1 <i>Processos mecânicos</i> .....	45
3.2.2.2 <i>Processos hidrometalúrgicos</i> .....	47
3.2.2.3 <i>Processos pirometalúrgicos</i> .....	48
3.3 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL .....	48
3.4 SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA .....	50
3.5 SEPARAÇÃO TRIBOELETROSTÁTICA .....	53
<b>3.5.1 Pré-tratamento</b> .....	55
<b>3.5.2 Tribocarregamento</b> .....	55
<b>3.5.3 Deflexão eletrostática</b> .....	59
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	62
4.1 MATERIAIS .....	62
<b>4.1.1 Polímeros</b> .....	62
<b>4.1.2 Baterias íon de lítio</b> .....	62
<b>4.1.3 Equipamentos</b> .....	63
4.2 MÉTODOS.....	64
<b>4.2.1 Reciclagem de resíduos poliméricos</b> .....	64
4.2.1.1 <i>Caracterização dos polímeros utilizados</i> .....	65
4.2.1.2 <i>Lavagem, secagem e cominuição em moinho de facas</i> .....	65
4.2.1.3 <i>Separação granulométrica</i> .....	66
4.2.1.4 <i>Lavagem e secagem secundária</i> .....	67
4.2.1.5 <i>Polímeros utilizados nos testes de separação</i> .....	68
4.2.1.6 <i>Funcionamento do separador eletrostático e cálculos realizados para os testes de tribocarregamento e separação eletrostática</i> .....	68
4.2.1.7 <i>Estudo do tribocarregamento</i> .....	71
4.2.1.8 <i>Estudo dos parâmetros da separação eletrostática</i> .....	72
4.2.1.9 <i>Aplicação das condições ideais em outras misturas poliméricas</i> .....	73
<b>4.2.2 Reciclagem de baterias de íon de lítio</b> .....	74
4.2.2.1 <i>Caracterização das baterias de íon de lítio</i> .....	74
4.2.2.2 <i>Cominuição</i> .....	75
4.2.2.3 <i>Secagem e separação granulométrica</i> .....	76
4.2.2.4 <i>Estudos dos parâmetros da separação eletrostática</i> .....	76
4.2.2.4.1 <i>Processamento mecânico empregando material sintético</i> .....	79
4.2.2.4.2 <i>Parâmetros estudados na separação eletrostática</i> .....	79
4.2.2.5 <i>Processamento mecânico e balanço global de massa</i> .....	80
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	82

5.1 RECICLAGEM DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS .....	82
<b>5.1.1 Caracterização dos polímeros .....</b>	<b>82</b>
<b>5.1.2 Cominuição e separação granulométrica .....</b>	<b>84</b>
<b>5.1.3 Tribocarregamento .....</b>	<b>85</b>
5.1.3.1 <i>Escolha do mecanismo de tribocarregamento .....</i>	85
5.1.3.2 <i>Estudo do efeito da umidade relativa do ar .....</i>	86
5.1.3.3 <i>Estudo do efeito do tempo de residência do tribocarregamento .....</i>	88
<b>5.1.4 Determinação das variáveis ideais para a realização da separação eletrostática ...</b>	<b>89</b>
5.1.4.1 <i>Efeito do ângulo do defletor do coletor .....</i>	89
5.1.4.2 <i>Efeito da distância do eletrodo de atração .....</i>	90
5.1.4.3 <i>Efeito da tensão do eletrodo de atração .....</i>	92
5.1.4.4 <i>Efeito da velocidade de rotação do rolo .....</i>	93
5.1.4.5 <i>Melhores resultados obtidos .....</i>	94
<b>5.1.5 Aplicação do melhor resultado em outras misturas poliméricas .....</b>	<b>96</b>
5.1.5.1 <i>Separação de PP e PEBD .....</i>	96
5.1.5.2 <i>Separação de PET e PVC .....</i>	97
<b>5.1.6 Aplicação do processo de cominuição seguido de separação eletrostática .....</b>	<b>97</b>
<b>5.1.7 Proposta de reciclagem de resíduos poliméricos .....</b>	<b>99</b>
5.2 RECICLAGEM DE BATERIAIS DE ÍON DE LÍTIO .....	100
<b>5.2.1 Caracterização mássica das baterias de íon de lítio .....</b>	<b>100</b>
<b>5.2.2 Caracterização dos componentes por análises qualitativas .....</b>	<b>102</b>
<b>5.2.3 Processamento mecânico do material sintético .....</b>	<b>106</b>
<b>5.2.4 Separação eletrostática .....</b>	<b>107</b>
5.2.4.1 <i>Estudo do efeito da velocidade de rotação do rolo .....</i>	108
5.2.4.2 <i>Estudo do efeito da tensão dos eletrodos .....</i>	109
5.2.4.3 <i>Estudo do efeito da distância do eletrodo de atração .....</i>	110
5.2.4.4 <i>Estudo do efeito do ângulo do defletor .....</i>	111
5.2.4.5 <i>Triplicata dos melhores resultados .....</i>	112
5.2.4.6 <i>Reprocessamento da fração intermediária (FI) .....</i>	114
<b>5.2.5 Aplicação do processamento mecânico geral .....</b>	<b>115</b>
<b>5.2.6 Balanço de massa .....</b>	<b>117</b>
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>122</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>124</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>126</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A qualidade de vida da população mundial vem melhorando com o passar dos séculos devido ao contínuo desenvolvimento industrial. Entre os diversos materiais que estão ligados a este desenvolvimento, temos um consistente aumento no consumo de materiais poliméricos devido à sua confiabilidade, baixo custo, durabilidade, menor peso quando comparado com materiais concorrentes, além da grande versatilidade e capacidade de adaptação as especificações técnicas necessárias (SIDDIQUE et al., 2008). Em 2012, a produção mundial de plásticos foi de 288 milhões de toneladas, confirmando a tendência ocorrida nos últimos anos, a qual foi de um crescimento da produção de plástico de quase 3% ao ano, enquanto ainda há espaço para mais crescimento (PLASTICS EUROPE, 2013).

Vários são os polímeros utilizados no dia-a-dia das pessoas, os quais se pode destacar o PEAD (polietileno de alta densidade), PP (polipropileno), PEBD (polietileno de baixa densidade), PET (politereftalato de etileno) e PVC (policloreto de vinila), entre outros. Os polímeros são amplamente aplicados em embalagem, construção civil, setor automotivo e também em equipamentos elétricos e eletrônicos. Embora os produtos poliméricos geralmente possuam uma excelente durabilidade, mais da metade destes são descartados como resíduos todos os anos. Com o aumento da demanda de polímeros, há um crescimento rápido na produção, e conseqüentemente, no descarte desses materiais. Os resíduos poliméricos tornaram-se uma das maiores categorias nos resíduos sólidos urbanos (RSU), chegando a representar 13,5% dos principais materiais que são descartados no Brasil (ABIPLAST, 2013).

Outro fator diretamente ligado ao aumento da qualidade de vida é o crescimento da produção de equipamentos elétricos e eletrônicos (EEEs). Esse é um dos setores da indústria de manufatura que mais cresce, incentivada pela inovação tecnológica e marketing intenso que estimulam a substituição rápida desses produtos. São gerados, mundialmente, de 20 a 50 milhões de toneladas por ano de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEEs) (HUANG et al., 2009; LEE et al., 2010). Dentre os EEEs portáteis, destacam-se os celulares, que vêm tendo sua vida útil reduzida, sendo substituídos por seus usuários em um tempo inferior a três anos (JING-YING et al., 2012; KASPER et al., 2011). Segundo a Associação Brasileira da Indústria Elétrica Eletrônica (ABINEE, 2014), de janeiro a maio de 2014 as vendas de telefones celulares atingiram 28,2 milhões de unidades, representando um crescimento de 8% em relação ao mesmo período de 2013.

Considerando o total de aparelhos celulares, estima-se que 60% deles são equipados com baterias de íons de lítio (LIBs - *Lithium-ion Batteries*), além de 90% dos laptops e de todos

os aparelhos de MP3 (CARELLI, 2009). Esse tipo de bateria é mais usual uma vez que são ambientalmente aceitáveis e eficientes (ZHANG, X. et al., 2014). A produção mundial de LIBs atingiu quase 4,6 bilhões de unidades em 2010 (UMICORE, 2015). Por conseguinte, os resíduos de LIB's estão se tornando uma grande preocupação ambiental. Além disso, esse tipo de bateria é uma fonte rica de metais de grande interesse comercial. Cerca de 36% do material metálico das baterias é constituído de cobalto, e cerca de 6% corresponde ao lítio (MANTUANO et al., 2006). Além disso, estas baterias contêm de 5 - 9% correspondente ao eletrodo de cobre, 5 - 7% correspondente ao eletrodo de alumínio e 20 - 25% correspondente ao case metálico, que pode ser de alumínio ou de aço (GEORGI-MASCHLER et al., 2012).

A atual preocupação com o meio ambiente e com as futuras consequências que estes resíduos (polímeros e baterias) podem causar ao planeta, fez com que a questão da sua destinação ambientalmente adequada ganhasse uma preocupação pública crescente. A reciclagem e o reaproveitamento desses resíduos pós-consumo devem ser estudados e levados em consideração, não apenas pelos órgãos públicos, mas também pelas empresas privadas. Em agosto de 2010 foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei 12.305, a qual estabelece regras para a destinação do lixo produzido no país, tanto urbano quanto eletrônico. De acordo com a PNRS, a reciclagem deve ser priorizada, a logística reversa deve ser empregada, o lixo não reciclável deve ser levado a aterros sanitários e os lixões deverão ser fechados até 2018 (BRASIL, 2010). Com isso, fica evidente a real necessidade do desenvolvimento de tecnologias mais eficientes, sustentáveis e de baixo custo, para que haja um aumento da taxa de reciclagem, tanto de resíduos poliméricos, quanto de eletrônicos como as baterias de íon de lítio.

A reciclagem mecânica é um método promissor para a reciclagem desses dois tipos de resíduos. Sendo assim, o desafio mais importante para a reciclagem mecânica é a separação eficaz dos diferentes tipos de polímeros e componentes das baterias. A separação dos diferentes materiais poliméricos pode ser realizada de diversas formas, tais como: separação ótica, por densidade e por flotação (ARVANINTOYANNIS e BOSNEA, 2001; DODBIBA et al., 2003; SHENT et al., 1999). Já para as LIBs, o processamento mecânico é aplicado como um pré-tratamento para promover a liberação das diferentes frações, para, no caso dos metais, posterior aplicação de processos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos. Entre os processos mecânicos pode-se citar a cominuição, separação magnética e separação granulométrica, entre outros (AL-THYABAT et al., 2013; LUPI, PASQUALI e DELL'ERA, 2005).

Uma técnica muito promissora empregada na reciclagem mecânica de resíduos é a separação eletrostática. Quando utilizada juntamente com um processo de tribocarregamento

(carregamento por atrito), esta é denominada como separação triboeletrostática, e é aplicada na separação de materiais não condutores, como na reciclagem de polímeros (AL-SALEM, LETTIERI e BAYENS, 2009). Já quando se utiliza o mecanismo de bombardeamento de íons para carregamento das partículas, o processo é conhecido como separação por efeito corona, e é aplicado na separação de materiais condutores de não condutores (reciclagem de LIBs) (GAUDIN, 1971). Esta tecnologia faz com que seja possível separar diferentes materiais baseado nas diferenças de suas propriedades elétricas. Esse processo possui alta eficiência, baixo custo e não tem a preocupação de poluição secundária.

As taxas de recuperação e graus de pureza encontrados na literatura indicam que a separação triboeletrostática é um método eficaz para a separação de resíduos poliméricos. Estudos mostram que quando as propriedades elétricas da superfície dos polímeros são bem distintas se pode separá-los aplicando o tribocarregamento e os submetendo a um campo elétrico, tipo queda livre. Assim, é possível a separação de PVC e PE (TIMALTINE et al., 2009), PVC e PET (IUGA et al., 2005) e PET e PE (DODBIBA et al., 2001). Já a separação eletrostática por efeito corona tem se mostrado eficiente para a separação de materiais condutores de não condutores. A aplicação da separação eletrostática apresenta bons resultados na reciclagem de PCI (Placas de Circuito Impresso) (JIANG, JIA e ZHEN-MING, 2008; WU et al., 2009) e também na separação de uma mistura de alumínio e PVC (DASCALESCU et al., 1994).

Dessa forma, a aplicação de um separador tipo rolo na reciclagem de resíduos poliméricos e baterias de íon de lítio, é um processo a ser estudado, visto que a literatura apresenta dados promissores para este processo de separação. Além disso, na reciclagem de resíduos poliméricos a aplicação de um separador tipo rolo é muito pouco difundida. Também, a utilização de materiais provenientes diretamente dos resíduos sólidos urbanos propõe a aplicação de um processo de acordo com a realidade. A literatura não apresenta estudos da separação triboeletrostática de uma mistura de PEAD e PP, devido à dificuldade da aplicação do processo para esta mistura. Para a reciclagem de baterias de íon de lítio, apesar de muito citada na teoria, não há estudos com aplicação da separação eletrostática dos componentes das baterias, obtendo-se uma fração rica em metais e outra rica em polímeros.



## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo estudar detalhadamente a utilização de um separador eletrostático tipo rolo para a separação de diferentes resíduos poliméricos, e dos diferentes componentes das baterias de íon de lítio, de forma a obter uma alta recuperação dos diferentes materiais com uma elevada pureza.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diversos objetivos específicos norteiam o desenvolvimento deste trabalho, buscando atingir o objetivo geral mencionado:

- Realizar testes utilizando amostras poliméricas de resíduos sólidos urbanos (RSU);
- Avaliar o processo de tribocarregamento das partículas poliméricas;
- Avaliar os principais parâmetros que influenciam no processo de separação das partículas poliméricas;
- Determinar as condições ideais para a operação do separador eletrostático na separação dos resíduos poliméricos;
- Propor e testar uma rota de reciclagem para uma mistura contendo diferentes tipos de polímeros;
- Determinar as condições ideais para a operação do separador eletrostático na separação dos componentes de bateria de íon de lítio;
- Caracterizar três tipos de baterias de íon de lítio esgotadas;
- Aplicar as melhores condições de separação eletrostática no processamento de diferentes tipos de baterias de íon de lítio;
- Avaliar o processamento mecânico das baterias de íon de lítio, desde a cominuição até os produtos obtidos;
- Realizar o balanço de massa do processo para cada bateria.



### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS

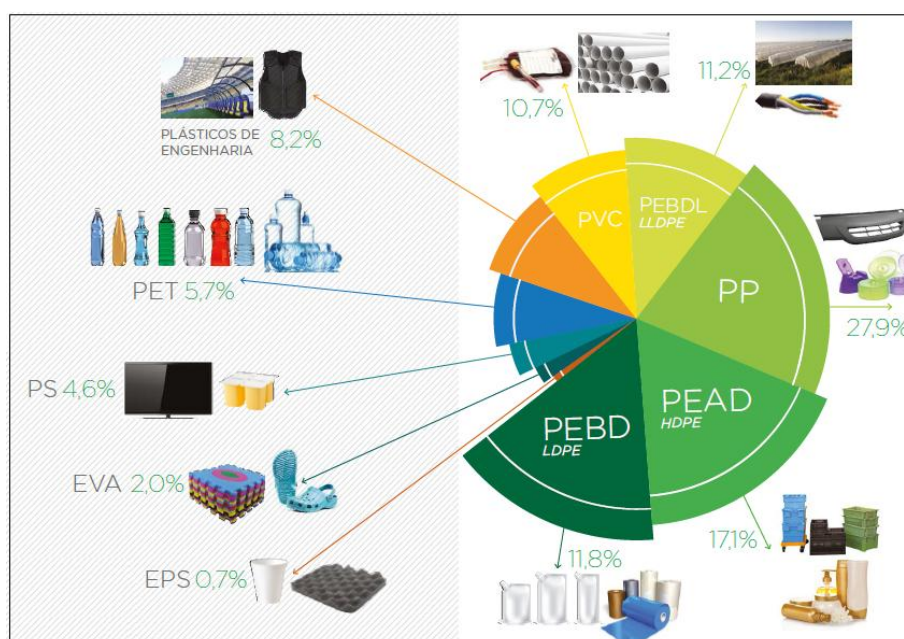
Os polímeros são macromoléculas caracterizadas por seu tamanho, estrutura química e interações intra e intermoleculares. Possuem muitas unidades químicas ligadas por ligações covalentes, repetidas regularmente ao longo da cadeia (MANO e MENDES, 1999). Em grego, muitas unidades repetidas são chamadas de *poli* (muitas) e *mero* (unidades repetitivas), daí derivando o termo polímero. As características dos polímeros variam muito, uma vez que dependem da natureza química e física das unidades repetitivas. Os polímeros são classificados em três principais categorias: termoplásticos, termorrígidos e elastômeros (MANRICH, FRATTINI e ROSALINI, 1997).

Os polímeros termoplásticos representam a maioria dos resíduos poliméricos encontrados nos lixões, aterros sanitários e cursos de rios, principalmente na forma de embalagens plásticas diversas (MANRICH, FRATTINI e ROSALINI, 1997). Segundo a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST, 2013), os polímeros termoplásticos mais utilizados são: polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC), politereftalato de etileno (PET) e poliestireno (PS), os quais em conjunto correspondem a cerca de 90% do consumo nacional de materiais poliméricos.

Os materiais termoplásticos apresentam muitas vantagens, pois são moldáveis a quente, bons isolantes térmicos e elétricos, resistentes ao impacto, possuem baixa densidade, bom acabamento e baixo custo, apresentando assim uma larga faixa de aplicação. Devido a estas propriedades o consumo dos polímeros vem crescendo no Brasil e no mundo. Segundo a ABIPLAST (2013), no ano de 2013 o consumo aparente de transformados plásticos no Brasil chegou a 6,91 milhões de toneladas. Já o consumo per capita brasileiro de plástico gira em torno de 35 kg/hab, bem abaixo dos índices observados em países desenvolvidos, que têm consumo per capita próximo a 100 kg/hab (ABIPLAST, 2014).

A aplicação das resinas poliméricas mais utilizadas pode ser observada na Figura 1. Observa-se que a maior aplicação das resinas termoplásticas é na produção de PP (27,9%) e PEAD (17,1%), que são os dois principais polímeros estudados neste trabalho.

Figura 1 - Aplicação das diferentes resinas termoplásticas no Brasil.



Fonte: ABIPLAST (2013).

### 3.1.1 Reciclagem de resíduos poliméricos

Segundo Li, Wu e Xu (2015), a reciclagem mecânica é considerada a melhor forma de tratamento para os resíduos poliméricos. Esse método não só reduz o desperdício, como também poupa a energia para produzir novos polímeros virgens. A utilização de combustíveis fósseis para a produção de polímeros corresponde de 4 - 8% da produção mundial de petróleo, sendo em torno de 4% como matéria-prima e 4% durante a conversão, sendo que essa energia pode ser economizada (PERDON, 2004). No Brasil, muitos dos materiais que poderiam ser reciclados ainda continuam sendo destinados a aterros e lixões. Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012), o potencial ambiental e econômico desperdiçado com a destinação inadequada de polímeros é em média de R\$ 5,08 bilhões por ano. Assim, é necessária uma integração do ciclo de produção dos polímeros com os sistemas de tratamento desses resíduos. Dessa forma, será possível atender à demanda social por este material com um impacto ambiental mínimo (AL-SALEM, LETTIERI e BAYENS, 2009).

Diversos produtos podem utilizar resinas recicladas em sua composição, de acordo com as normas apontadas pelos órgãos competentes (INMETRO, ABNT e ANVISA). Assim, linhas de produtos com apelo ecológico são usadas para fabricar artigos como: cabides de roupas, prendedores, vasos, bandejas, bacias, vassouras, etc (ABIPLAST, 2013).

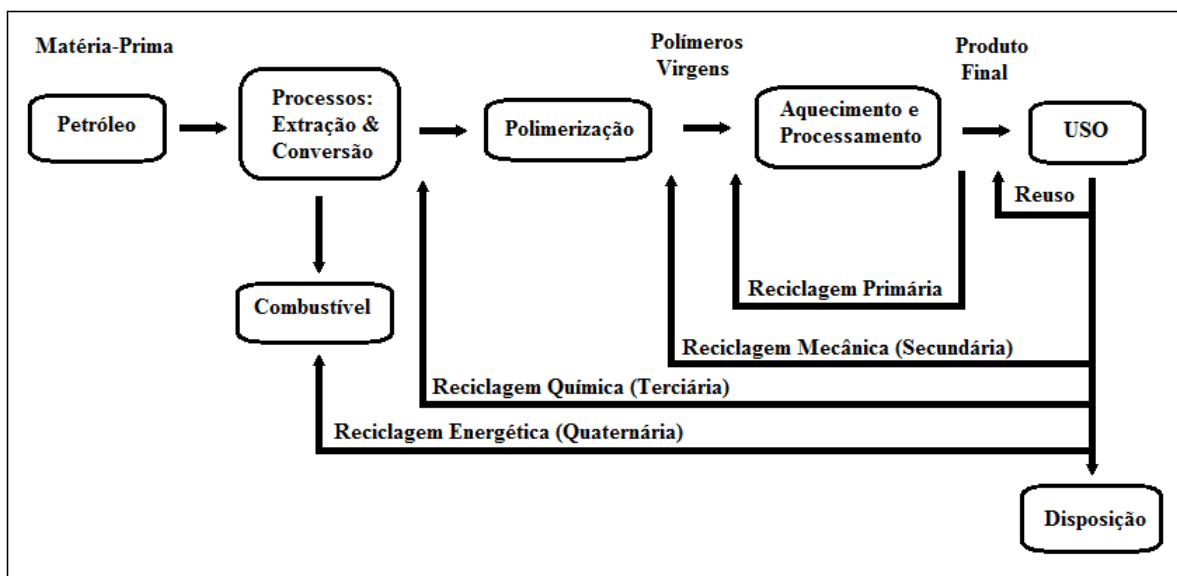


A reciclagem de resíduos poliméricos, especialmente pós-consumo, teve um início lento quando comparado a outros materiais comumente utilizados, tais como papel, vidro e metais, sendo a recuperação e taxas de reciclagem geralmente baixas. Isso se deve parcialmente a enorme variedade de polímeros, aditivos e compostos utilizados. Esta variedade é uma das principais vantagens dos polímeros, e uma das razões para sua versatilidade, no entanto, esta variação se torna um problema quando o assunto é a reciclagem (SHEN e WORRELL, 2014).

O PEAD e o PP são os polímeros de maior interesse por parte das empresas recicladoras. Os preços dos polímeros pós-consumo para reciclagem variam dependendo da oferta por região, das condições (grau de contaminação, solto ou enfardado) e da origem (sucateiros, coleta seletiva, catadores, unidades de triagem) (PLASTIVIDA, 2011). Os artefatos fabricados de polímeros reciclados têm limitações de aplicação, ou seja, não podem ser utilizados em contato com bebidas, remédios, alimentos, brinquedos e material de uso hospitalar, pois, dependendo do uso anterior, ele pode estar contaminado. Visando reduzir o descarte dos polímeros reciclados é conveniente que estes sejam utilizados em aplicações de longa vida útil, como pavimentação, madeira plástica, construção civil, plasticultura, indústria automobilística e eletroeletrônica, etc (SPINACÉ e PAOLI, 2005).

Os processos de tratamento e de reciclagem dos resíduos poliméricos podem ser alocados em quatro categorias principais: reextrusão (primária), mecânica (secundária), química (terciária) e energética (quaternária) (MASTELLONE, 1999). Além dessas, o reuso dos materiais é uma alternativa que sempre deve ser considerada. A Figura 2 apresenta uma associação dos diferentes processos de tratamento e de reciclagem dos resíduos sólidos poliméricos.

Figura 2 - Produção e rotas de destinação de polímeros.



Fonte: Adaptado de Al-Salem et. al. (2010).

Alguns itens fabricados de material polimérico acabam tornando-se resíduos após uma única utilização ou um curto período de tempo após a compra. Assim, o reuso destes materiais é preferível à reciclagem, pois utiliza menos energia e menos recursos (AL-SALEM, LETTIERI e BAYENS, 2009). Um dos exemplos mais comuns de reutilização é o caso dos recipientes de vidro, onde as garrafas de bebidas retornam para as empresas para serem limpas e reutilizadas (HAMAD, KASEMM e DERI, 2013). No caso das embalagens e produtos poliméricos, a reutilização não é amplamente praticada, e em geral tendem a ser descartados após a primeira utilização. Porém, um exemplo de reutilização de polímeros são as bobonas de 20 L de água mineral, as quais são reutilizadas até uma determinada data de validade.

A reciclagem mecânica primária consiste no reprocessamento do refugo de plástico (sucatas e fragmentos) resultante do próprio processo produtivo ou do processo de reciclagem, não sendo aplicável, via de regra, aos polímeros pós-consumo (OLIVEIRA, 2012). Já a reciclagem mecânica secundária é aplicada em materiais pós-consumo. O polímero é moído e, em seguida, reprocessado para produzir um novo componente que pode ou não ter o mesmo uso que o do seu original (CUI e FOSSBERG, 2003). Por ser de suma importância para este trabalho, a reciclagem mecânica será abordada com mais detalhamento no item 3.1.2.

A reciclagem química é o termo usado para se referir a processos avançados que convertem os materiais poliméricos em moléculas menores, geralmente líquidos ou gases, que são adequados para o uso como matéria-prima para a produção de novos produtos

petroquímicos e poliméricos (MASTELLONE, 1999). O termo químico é utilizado devido ao fato de ocorrer uma alteração na estrutura química do polímero. Tais processos permitem a obtenção de novas substâncias químicas sendo que o tipo de processo utilizado dependerá do material a ser reciclado (HORVAT e FLORA, 1999). A reciclagem química geralmente é indicada para a reciclagem de uma mistura de diversos materiais, porém é mais eficiente quando os materiais chegam limpos e puros, o que facilita a obtenção de produtos de melhor qualidade. Portanto, assim como na reciclagem mecânica, a utilização de um pré-tratamento do resíduo com a finalidade de atender a especificação de um determinado processo de reciclagem pode ser necessária (HOBBS e HALLIWELL, 2000).

Entre os processos químicos, a pirólise é o método mais utilizado, o qual consiste na degradação ou decomposição térmica na ausência de ar ou deficiência de oxigênio. Esse método consiste em uma reação endotérmica, sendo necessária a adição de calor para realização do processo. Polímeros com alto teor de impurezas podem ser reciclados por pirólise. No entanto, obtém-se uma grande variedade de produtos de decomposição que são de difícil separação e, além disso, possuem um valor comercial menor. Uma vantagem da pirólise é possibilidade da obtenção de hidrocarbonetos e, em alguns casos, produtos químicos brutos com alto valor comercial (BRANDRUP et al., 1996).

Por fim, a reciclagem energética implica na queima de resíduos para a produção de energia na forma de calor, vapor e eletricidade. Esse método só é considerado como uma forma aceitável de tratamento de resíduos, quando os processos de recuperação de materiais não forem viáveis devido a restrições econômicas (AL-SALEM, LETTIERI e BAYENS, 2009). Assim, a reciclagem energética pode ser definida como a técnica de destruição térmica dos resíduos, produzindo idealmente dióxido de carbono e água (além de outros produtos indesejados de combustão), além de calor.

O conteúdo energético dos polímeros é alto e muito maior que de outros materiais. O valor do poder calorífico de 1 kg de resíduo polimérico é comparável ao de 1 L de óleo combustível, e é maior que o do carvão (KAMINSKY, 1992). Os sistemas de incineração modernos utilizam altas temperaturas, sistemas de controle de emissão de gases e controle de mistura dos resíduos, podendo assim lidar com resíduos dos mais variados tipos de características físicas, químicas ou biológicas (SANTOLERI, 2011). Por outro lado, a incineração é frequentemente criticada devido à queima de materiais com alto valor agregado, os quais não deveriam ser incinerados, além do fato de alguns materiais não serem bons combustíveis ou gerarem gases nocivos à saúde ou ao ambiente (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>). Por fim, os incineradores exigem elevados investimentos operacionais e de capital, além de que

normalmente são necessários combustíveis complementares para alcançar elevadas temperaturas de combustão (AL-SALEM, LETTIERI e BAYENS, 2009).

### 3.1.2 Reciclagem mecânica de resíduos poliméricos

A reciclagem mecânica, ou reciclagem secundária, é o processo de valorização dos resíduos sólidos poliméricos para a reutilização na fabricação de novos produtos através de meios mecânicos (MASTELLONE, 1999). Esse é o método de reciclagem mais utilizado, porém só pode ser realizado em produtos que contenham apenas um tipo de resina, apenas PP, ou PEAD, ou PET, etc. Dessa forma, quanto mais misturado e contaminado for o resíduo, mais difícil será a realização deste processo de reciclagem, tornando essencial a separação do material plástico previamente à coleta (AL-SALEM, LETTIERI e BAEYENS, 2010).

Esse tipo de reciclagem envolve uma série de etapas de preparação e de tratamento a ser considerado. Por isso, se torna um processo caro e com bastante uso de energia. Segundo Parente (2006), a reciclagem mecânica, em escala industrial, envolve as seguintes etapas:

- Separação: é realizada uma triagem de acordo com o aspecto visual ou com a identificação de cada polímero. Em sua maioria, é uma tarefa essencialmente manual, cujo objetivo é separar materiais diferentes (tampas, garrafas, sacos plásticos, etc).

- Moagem: envolve a redução do tamanho do material, transformando-o em fragmentos menores, como grânulos, pó ou flocos.

- Lavagem: o material é lavado para a retirada dos contaminantes. A água utilizada deve receber um tratamento para sua possível reutilização ou descarte como efluente.

- Secagem: o material é seco para a remoção da água de lavagem.

- Aglutinação: o material é compactado em um aglutinador para que o volume enviado ao processador final, normalmente uma extrusora, seja reduzido.

- Processamento: os polímeros são peletizados para serem enviados para a indústria de transformação. A massa plástica vai ser fundida e homogeneizada na extrusora.

Um bom exemplo é a reciclagem mecânica do PET. Uma vez que o PET é recolhido e separado, o mesmo representa uma matéria-prima para linhas de processamento de recuperação. Quando realizado de maneira correta, materiais de PET podem ser produzidos com alta qualidade para competir com o polímero virgem (AL-SALEM, LETTIERI e BAEYENS, 2009).

Um fator importante desse processo é a heterogeneidade do polímero reciclado, a qual acarreta em uma variação das propriedades mecânicas do produto acabado. Esta

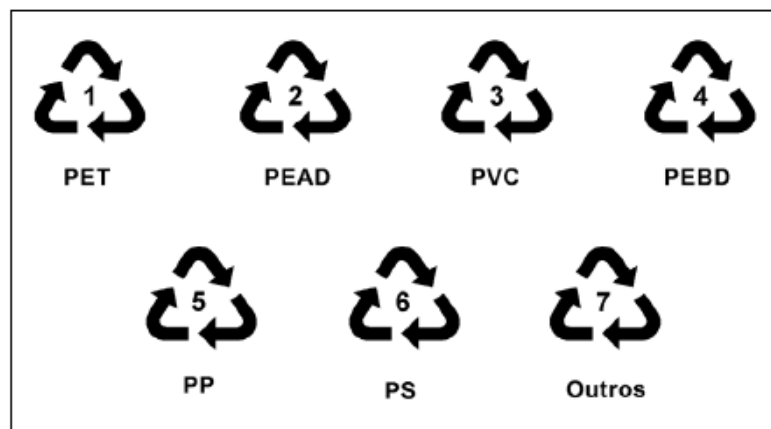
heterogeneidade está relacionada à degradação que os polímeros sofrem durante as etapas do processo (moagem, lavagem, secagem, extrusão, etc) acarretando em degradação por cisalhamento, termo-oxidativa e por hidrólise (SPINACÉ e PAOLI, 2005).

### 3.1.3 Separação de materiais poliméricos

Em termos industriais, a triagem e a identificação dos diferentes polímeros devem ser realizadas dentro de um curto espaço de tempo. A identificação rápida e precisa, seguida por algum tipo de triagem manual ou automatizada são essenciais (AL-SALEM, LETTIERI e BAEYENS, 2009). Assim, a fim de melhorar o valor e a taxa de reciclagem de resíduos poliméricos é realmente necessária uma separação eficaz desses resíduos para a realização de um processo ótimo (WU, LI e XU, 2013).

Nem todo polímero pode ser reciclado, e dentre os recicláveis foi criada uma classificação com o objetivo de auxiliar na identificação feita no trabalho de triagem. Consiste em uma numeração de 1 a 7, com o objetivo de indicar o tipo particular de polímero do qual o produto é feito. Esta simbologia pode ser observada na Figura 3, a qual foi adotada pela ABNT na Norma Brasileira 13230 – Reciclabilidade e identificação de materiais plásticos (NBR 13230, 2008).

Figura 3 - Simbologia utilizada para a identificação de plásticos recicláveis.



Fonte: NBR 13230 da ABNT.

Este código é normalmente colocado na base do recipiente ou no verso da embalagem que contém o produto. O objetivo principal é facilitar a recuperação dos recipientes poliméricos descartados nos RSU, uma vez que auxiliam sua separação e posterior reciclagem

e revalorização. Apesar de ser mais utilizado para a identificação de embalagens poliméricas, este sistema também deveria ser aplicado a outros produtos de plástico com a finalidade de facilitar a logística reversa (COLTRO, GASPARINO e QUEIROZ, 2008).

Além do uso da simbologia adotada, a identificação dos polímeros também pode ser realizada através de outros métodos simples, como o teste de queima, por exemplo, o qual é baseado nas distintas características físicas e de degradação térmica dos polímeros (BRAUN, 1982). O comportamento de queima dos principais polímeros pode ser observado na Tabela 1. Além do teste de chama a identificação pode ser realizada através da comparação das características e propriedades dos polímeros, como: transparência, embranquecimento, dureza, solubilidade, maleabilidade, barulho e densidade.

Tabela 1 - Comportamento de queima dos principais polímeros encontrados nos resíduos sólidos urbanos.

Material	pH da fumaça	Odor da fumaça	Cor da chama	Incendeia ou auto extingüível
PEAD, PEBD, PEBDL	Neutro	Vela queimada	Amarela com base azul	Incendeia
PS, HIPS, ABS	Neutro	Estireno, com muita fuligem	Amarela com base azul	Incendeia
PP	Neutro	Vela queimada	Amarela com base azul	Incendeia
PVC	Ácido	Acre	Amarela com base verde	Auto extingüível
PET	Neutro	Adocicado	Amarela	Incendeia
PU	Neutro	Acre, picante, azedo	Amarelam com base azul	Incendeia

Fonte: Adaptado de MANRICH, FRATTINI e ROSALINI (1997).

Entre os métodos de separação, a manual é a mais utilizada no Brasil, pois a maioria das empresas de reciclagem são de pequeno porte e a mão de obra é relativamente barata. Esse método consiste na identificação dos diferentes tipos de resíduos poliméricos através da habilidade do operador. Este processo envolve um grande número de operadores e depende da acuidade visual e da sensibilidade do operador que está realizando a separação (SPINACÉ e PAOLI, 2005).

Outro método, a separação óptica é utilizada como um processo de pré-triagem para materiais com tamanho de partícula médio entre 40 e 60 mm. O processo se baseia na

diferença de cores e picos dos diferentes tipos de polímeros a serem separados. Geralmente é realizado antes do processo de redução de tamanho das partículas (WU, LI e XU, 2013). Os equipamentos automatizados de tecnologia óptica, como raios-X, e por sensor de infravermelho (NIR), são amplamente utilizados em instalações de reciclagem de polímeros em todo o mundo. No entanto, é difícil realizar a separação de polímeros mistos, uma vez que eles têm propriedades semelhantes, tais como a mesma cor e pico de intensidade (ARVANITTOYANNIS e BOSNEA, 2001; WU, LI e XU, 2013).

Já a separação por densidade se baseia na diferença de densidade dos diferentes materiais poliméricos. Assim, é possível encontrar um meio adequado para separar os polímeros mais pesados dos mais leves. Este método geralmente é realizado através de soluções à base de água (HU e CALO, 2006). No entanto, muitos polímeros possuem faixas de densidade sobrepostas ou muito próximas, o que dificulta este tipo de separação. Um exemplo é a separação do PET ( $\rho = 1,35 - 1,40 \text{ g.cm}^{-3}$ ) e do PVC ( $\rho = 1,30 - 1,70 \text{ g.cm}^{-3}$ ), onde o intervalo de densidade desses polímeros se sobrepõe impossibilitando este tipo de separação. Outro problema é a proximidade das faixas de densidade, como no caso do PP ( $\rho = 0,90 - 0,91 \text{ g.cm}^{-3}$ ), do PEBD ( $\rho = 0,917 - 0,94 \text{ g.cm}^{-3}$ ) e do PEAD ( $\rho = 0,94 - 0,97 \text{ g.cm}^{-3}$ ) (BRIASSOULIS, HISKAKIS e BADOU, 2013; WU, LI e XU, 2013). Apesar de algumas dificuldades, de um modo geral, as empresas de reciclagem de polímeros fazem a separação destes materiais através da diferença de densidade (SPINACÉ e PAOLI, 2005).

Por fim, pode-se citar a separação por flotação, a qual possui uma alta eficiência de recuperação, sendo especialmente adequada para misturas difíceis de serem separadas através do processo de separação por densidade (SHENT, PUGH e FORSSBERG, 1999). Os polímeros com superfície hidrofílica permanecem em solução, enquanto as bolhas de ar reúnem na superfície do leito as partículas que são hidrofóbicas. Isso é possível devido a diferença de densidade entre as bolhas de ar e a solução (PASCOE e HOU, 1999; SHIBATA et al., 1996). Esse processo depende diretamente da forma e tamanho das partículas poliméricas, o qual não deve ser maior do que  $500 \mu\text{m}$  (RICHARD et al., 2011). A principal desvantagem deste processo é o grande uso de água em todo o processo, ocasionando uma preocupação quanto à poluição secundária (WU, Li e XU, 2013).

### 3.2 EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

O grande desenvolvimento tecnológico faz com que também haja uma grande demanda de equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE), fazendo com que os mesmos sejam cada vez mais rapidamente descartados, pois a cada dia surgem novos modelos tornando obsoletos produtos adquiridos há pouco tempo. Estes resíduos apresentam uma grande quantidade de materiais que podem ser recuperados, evitando assim, o uso desnecessário de recursos naturais (KASPER et al., 2011). São gerados, mundialmente, de 20 a 50 milhões de toneladas de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEEs), representando assim, um problema de ordem global (LEE et al., 2010; HUANG et al., 2009).

Segundo estimativas, se a geração de resíduos eletrônicos não for controlada, em 2017 o volume de resíduos eletrônicos no planeta aumentará 33%. No ano de 2012 os Estados Unidos e China geraram juntos mais de 16 milhões de toneladas desse resíduo, sendo os maiores geradores do mundo. Já o Brasil produziu cerca de 1,4 milhão de toneladas de resíduos eletrônicos neste mesmo ano, com uma média de 7 kg por habitante (SPITZCOVSKY, 2013; StEP, 2015).

Nos últimos anos, a reciclagem de lixo eletrônico tem atraído cada vez mais atenção por parte das instituições públicas e de pesquisa por causa da necessidade da proteção ambiental e benefícios econômicos. Os REEE's não contêm apenas contaminantes tóxicos e perigosos para o meio ambiente e para a saúde humana (chumbo, mercúrio, arsênio, cádmio, cromo, etc), mas também recursos valiosos e preciosos se tratados de forma adequada (CUI e FORSSBERG, 2003). Estes resíduos representam um recurso secundário para a obtenção de metais base (ferro, alumínio, cobre, níquel e estanho), de metais preciosos (ouro, prata, platina e paládio) e de terras raras (ítrio, lantânio, neodímio, praseodímio) (WIDMER et al., 2005).

A composição geral dos resíduos eletroeletrônicos é muito variável, devido à grande quantidade de diferentes materiais presentes nos REEE. Os metais ferrosos são os materiais mais comuns, representando quase metade do peso total dos REEE's. Após, os polímeros constituem cerca de 21% em peso, seguidos pelos metais não-ferrosos (cobre, alumínio, metais preciosos, etc), que representam cerca de 13% do peso total (WIDMER et al., 2005). A dificuldade da reciclagem destes materiais se deve a sua heterogeneidade de constituição juntamente com a complexidade de produção (VEIT et al., 2005).

Os métodos utilizados na reciclagem e tratamento desses resíduos ainda não são eficientes, devido ao fato que ainda são comumente empregados a incineração e a disposição em aterros (PARK e FRAY, 2009). Contudo, já existem diretrizes que incentivam o



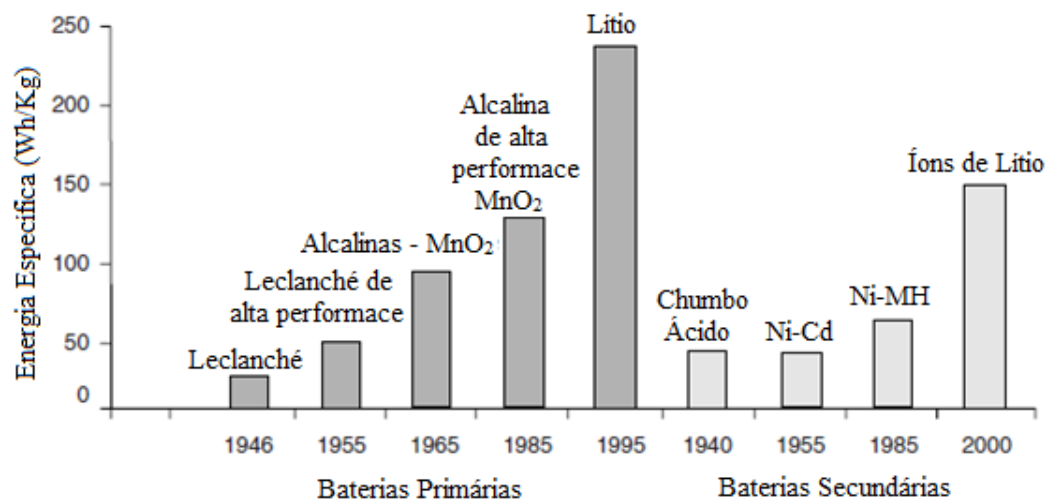
desenvolvimento de metodologias de tratamento e reciclagem adequadas. No Brasil, o comércio e a eliminação de resíduos perigosos são regulados pela resolução 23 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), que incorpora as disposições da Convenção de Basileia.

Dentre os EEEs portáteis, destacam-se os celulares, que vêm tendo sua vida útil reduzida, sendo substituídos por seus usuários em um tempo inferior a três anos (JING-YING et al., 2012; KASPER et al., 2011). De acordo com dados da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL, 2015), o Brasil registrou em outubro de 2015, cerca de 273,79 milhões de linhas ativas na telefonia móvel, tendo uma densidade de 133,64 acessos por 100 habitantes. Segundo a Associação Brasileira da Indústria Elétrica Eletrônica (ABINEE, 2014), de janeiro a maio de 2014 as vendas de telefones celulares atingiram 28,2 milhões de unidades, representando um crescimento de 8% em relação ao mesmo período de 2013. Esses são equipados com baterias de íons de lítio (LIBs - *Lithium-ion Batteries*), uma vez que elas são ambientalmente aceitáveis e eficientes (com maior densidade de energia, ciclo de vida longo, baixa taxa de descarga e segurança no manuseio) (ZHANG, X. et al., 2014).

### **3.2.1 Baterias de íon de lítio**

A primeira pilha foi desenvolvida em 1800 pelo físico Alessandro Volta, desde então, esses dispositivos têm sofrido diversas modificações com o objetivo de satisfazer às necessidades de maior armazenamento de energia do mundo atual (VARELA et al., 2002). A partir dos anos de 1940, começou o desenvolvimento das chamadas pilhas secundárias ou recarregáveis, dando surgimento às primeiras baterias de chumbo-ácido. A sua principal vantagem em relação às pilhas primárias é a possibilidade de recarga. Assim, as baterias começaram a se desenvolver, obtendo-se uma maior capacidade e uma maior potência (Figura 4). Desta forma, inicialmente foram desenvolvidas as baterias de Ni-Cd e NiMH, que foram amplamente utilizadas desde o surgimento da telefonia móvel. Anos mais tarde, entretanto, estas foram preteridas por novas baterias, mais eficientes e menos prejudiciais ao meio ambiente, como as de íons de lítio e lítio-polímero. As duas últimas são aquelas encontradas nos telefones celulares produzidos atualmente, assim como em MP3 players, câmeras digitais, filmadoras e laptops (VARELA et al., 2002).

Figura 4- Avanços no desempenho das baterias para aplicação em portáteis.

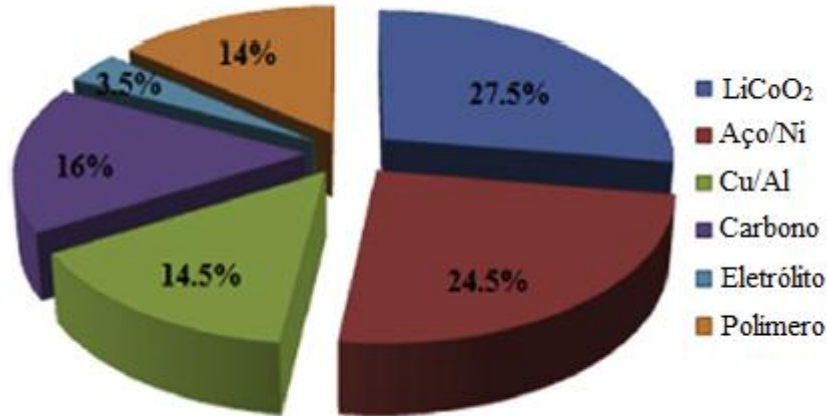


Fonte: Adaptado de LINDEN e REDDY (2008).

O desenvolvimento das baterias de íons de lítio começou no fim dos anos 80, porém o elevado custo inviabilizava sua produção. Foi na metade da década de 90 que a produção ganhou impulso após alguns melhoramentos e a baixa no custo de produção (BUSNARDO, PAULINO e AFONSO, 2007). As LIB's têm substituído as baterias de Ni-Cd e Ni-MH na maioria das aplicações portáteis, devido à sua alta densidade de energia, baixa taxa de descarga automática, ausência do efeito de memória e excelente ciclo de vida. Portanto, o aumento da demanda por dispositivos portáteis, tais como telefones móveis, microcomputadores e câmeras digitais, contribuiu diretamente para o aumento do consumo de LIBs (FREITAS e GARCIA, 2007).

A produção mundial destas baterias atingiu quase 4,6 bilhões de unidades em 2010 (UMICORE, 2015). Por conseguinte, as LIB's esgotadas se tornam uma preocupação ambiental. Além disso, esse tipo de bateria é uma fonte rica de metais de grande interesse comercial. A composição química das LIBs apresenta LiCoO<sub>2</sub> como o material ativo do cátodo e grafite (carbono) como material ativo do ânodo, além de cobre e alumínio dos eletrodos (Figura 5) (SHIN et al., 2005).

Figura 5 - Composição química de uma típica bateria secundária de íon de lítio.



Fonte: Adaptado de SHIN et al. (2005).

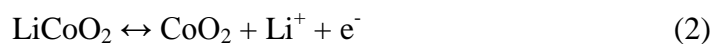
Existem dois tipos de LIBs, as primárias e as secundárias. Baterias primárias utilizam lítio metálico, enquanto as baterias secundárias são recarregáveis e não utilizam lítio metálico. A estrutura das LIBs secundárias é basicamente composta por um cátodo, um ânodo, um eletrólito orgânico e um separador. O cátodo é uma placa de alumínio revestida com uma mistura de material ativo catódico, adesivos e aditivos. O ânodo é constituído por uma placa de cobre revestido com uma mistura de grafite, adesivos e aditivos (ZHANG et al., 1998). O cátodo é um dos componentes essenciais da bateria, uma vez que determina a eficiência da carga assim como o custo da bateria. A composição de cada bateria pode variar ligeiramente dependendo do fabricante (SHIN et al., 2005).

As LIBs possuem o seguinte princípio de funcionamento: a energia é armazenada pelo movimento de íons de lítio a partir do cátodo para o ânodo (carga) ou vice-versa (processo de descarga). As equações (1), (2) e (3) apresentam a movimentação dos íons de lítio nas reações químicas que ocorre nos eletrodos (XU et al., 2008; ZANG et al., 1998).

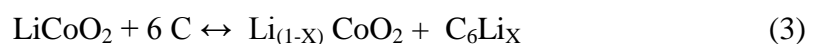
Reação catódica:



Reação anódica:



Reação global:



No momento do carregamento a reação direta ocorre conforme a equação (1) e quando ocorre o descarregamento da bateria (utilização), a reação inversa ocorre conforme a equação (2). A resistência interna dessas baterias aumenta com o processo de carga e descarga, uma vez que a capacidade de transmitir a corrente diminui. Portanto, a eficiência de transmissão de corrente e carregamento da bateria não permanece a mesma com o passar do tempo, sendo necessária a sua substituição, o que leva a geração de resíduos de baterias de íon de lítio (ZANG et al., 1998).

O eletrodo positivo das baterias de íons de lítio é composto por um óxido de lítio-cobalto pulverizado em uma folha de alumínio. Essa folha de alumínio representa o coletor de carga do eletrodo, que é responsável pela mobilidade eletrônica nas baterias. Os óxidos de lítio representam o material ativo do cátodo das baterias. Ou seja, são eles os responsáveis pelas reações eletroquímicas que ocorrem no eletrodo positivo das baterias (VARELA et al., 2002).

Já o eletrodo negativo é composto por várias camadas de átomos de carbono, entre as quais se localizam os íons de lítio. Esse arranjo forma uma estrutura de grafite, que representa o material ativo do ânodo. Esse grafite, por sua vez, é pulverizado em uma folha de cobre, que atua como coletor de carga, assim como atua a folha de alumínio no cátodo das baterias de íons de lítio. O material ativo tanto do cátodo quanto do ânodo é colocado no respectivo coletor de carga com uma resina polimérica chamada fluoreto de polivinilideno (PVDF) (CONTESTABILE, PANERO e SCROSATI, 2001).

O material ativo catódico mais comumente usado em LIBs é o  $\text{LiCoO}_2$ . Este material oferece vantagens significativas em relação à síntese, alto potencial de trabalho e excelente capacidade de ciclo à temperatura ambiente. Apesar disso, alternativas têm sido desenvolvidos para reduzir os custos (devido ao uso do cobalto) e melhorar a sua estabilidade (MOHAN et al., 2009; MUKHERJEE et al., 2012). A questão da toxicidade e custo de  $\text{LiCoO}_2$  foi resolvido optando-se por cátodos de óxido de metal de transição alternativos, como  $\text{LiNiO}_2$  e  $\text{LiMnO}_2$ . O  $\text{LiNiO}_2$  é mais barato e tem uma densidade de energia mais elevada, porém é menos estável e menos ordenado, em comparação com  $\text{LiCoO}_2$ . Esse óxido é muito sensível à variação de temperatura, fazendo com que se decomponha mais facilmente que os demais óxidos. Por outro lado,  $\text{LiMnO}_2$  obteve resultados com sucesso considerável, como um cátodo de óxido de metal viável (MOHAN et. al, 2009; MUKHERJEE et. al, 2012). Existem, também, compostos intermediários entre esses dois óxidos, cujas propriedades apresentam valores intermediários (LINDEN e REDDY, 2008; NAZRI e PISTOIA, 2003).

Outro componente muito importante nas baterias de íons de lítio é o eletrólito. O mais utilizado é composto por sais de Li dissolvidos em solventes orgânicos (carbonatos em sua maioria), juntamente com alguns aditivos para melhorar sua estabilidade e aumentar a segurança, que são absorvidos pelo separador (membrana polimérica). Como vantagem, esse tipo de eletrólito apresenta uma alta condutividade iônica, que é o parâmetro mais importante na escolha do eletrólito (LINDEN e REDDY, 2008).

As baterias de íons de lítio apresentam diversas vantagens com relação às outras baterias portáteis recarregáveis, tais como: alta densidade energética, baixíssima taxa de auto descarga, ausência do efeito memória e maior segurança no manuseio. Além disso, elas apresentam longos ciclos de vida e são extremamente leves, permitindo que sejam projetadas para terem massa e tamanhos reduzidos (BUSNARDO, PAULINO e AFONSO, 2007).

Também, as baterias de íons de lítio apresentam o maior tempo de operação dentre as baterias secundárias, podendo chegar a 12 horas em comparação às 8 horas de funcionamento a que podem chegar as baterias de NiMH e NiCd durante uma única descarga. Diversos fatores influenciam no tempo de vida útil das baterias, tais como temperatura, regime de carga e descarga e cuidados no manuseio. O tempo de operação das baterias pode ser reduzido com o passar do tempo, pois a capacidade delas se torna reduzida em função da degradação natural dos materiais dos eletrodos, seja por corrosão ou por reações irreversíveis que ocorrem no interior de todas as baterias e que consomem o material ativo dos eletrodos (LINDEN e REDDY, 2008).

Dentre os fatores que influenciam o funcionamento das baterias, a temperatura de operação é um dos que mais tem efeito no seu tempo de vida útil. As baterias de íons de lítio são projetadas para operarem na faixa de temperatura entre  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sendo que a temperatura ótima de operação é de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (LINDEN e REDDY, 2008). Fora dessa faixa, o desempenho das baterias cai consideravelmente, principalmente em baixas temperaturas. Em  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , já se pode observar queda significativa da capacidade das baterias e condutividade iônica de seu eletrólito (ZHANG, XU e JOW, 2003).

### **3.2.2 Reciclagem de baterias de íon de lítio**

Sucatas metálicas podem ser sujeitas a diferentes processos de reciclagem. Atualmente, a reciclagem de LIBs apresenta diferentes tecnologias e processos propostos na literatura. Estes métodos baseiam-se nos dois tipos básicos de reciclagem: processos físicos e químicos. Entre os processos físicos, pode-se citar o processamento mecânico (cominuição,

separação granulométrica, etc) e tratamentos térmicos. Quanto aos processos químicos, têm-se a lixiviação ácida, biolixiviação, extração por solvente, precipitação química e eletroquímica (XU et al., 2008). Os melhores resultados geralmente são obtidos com uma combinação de processos físicos e químicos. Os processos de separação mecânica são aplicados com um pré-tratamento para remoção do invólucro externo e promover a liberação e concentração das frações metálicas. Após, a fração metálica é submetida a um processo hidrometalúrgico ou pirometalúrgico (AL-THYABAT et al., 2013; LUPI, PASQUALI e DELL'ERA, 2005).

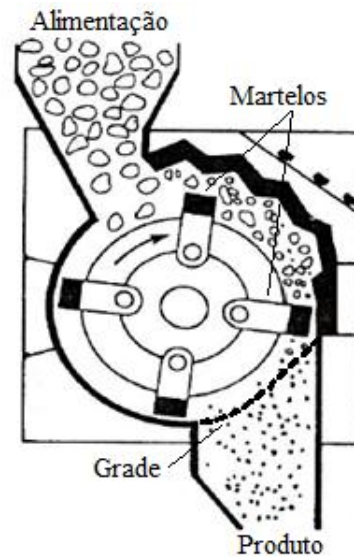
Apesar do grande avanço na investigação de tecnologias de reciclagem de LIBs, o desenvolvimento de métodos eficientes para a recuperação de materiais valiosos presentes em sua composição, tais como cobalto, cobre e alumínio, permanece um desafio importante para um mundo sustentável devido a atual preocupação ambiental e vantagens econômicas (COSTA et al., 2015).

### *3.2.2.1 Processos mecânicos*

Os processos mecânicos de separação consistem na redução e homogeneização do tamanho das partículas e na separação de fases de um componente ou na separação de diferentes componentes de acordo com suas propriedades físicas. As operações normalmente utilizadas na separação mecânica são: separação magnética e eletrostática, britagem, separação por gravidade, moagem, peneiração, peneira vibratória, separação pneumática, separação em classificador ziguezague e flotação (GEORGI-MASCHLER et al., 2012; SHIN et al., 2005; ZHANG, T. et al., 2014).

A cominuição é a primeira etapa de qualquer processo de reciclagem. Esse processo tem como objetivo a redução do tamanho do material, assim como uniformização do tamanho das partículas. Existem diferentes tipos de moinhos que podem ser utilizados (martelos, facas, bolas), cada um com um mecanismo diferente de moagem. O moinho de martelos utiliza o impacto e a pressão gerada pelos martelos nas partículas para fragmentá-las (Figura 6). O moinho de facas possui o princípio de corte ocasionado pela rotação das facas móveis juntamente com a faca fixa. Já o moinho de bolas se baseia na abrasão ocasionada pelas bolas juntamente com o material que deve ser cominuído (COSTA, 2010).

Figura 6 - Funcionamento do moinho de martelos.



Fonte: Adaptado de HAYES (1993).

Em seguida, a separação magnética é uma das operações mais utilizadas para a separação de materiais, uma vez que todos os materiais são afetados, de alguma forma, por campos magnéticos. Conforme o seu comportamento em um campo magnético, o material pode ser classificado em ferromagnético (fortemente atraído), paramagnético (fracamente atraído) e diamagnético (não são atraídos) (CALLISTER, 2002).

Um separador magnético geralmente é constituído de um alimentador, que levará o material até uma esteira, a qual circunda toda a superfície de um cilindro ferromagnético, que é o componente gerador do campo magnético. Dessa forma, a esteira conduz os materiais até o campo magnético gerado pelo ímã. Os materiais ferromagnéticos e paramagnéticos ficam aderidos à superfície da esteira até serem conduzidos para fora do campo magnético e serem coletados em um recipiente. Já o material diamagnético não se adere a superfície da esteira e é coletado em outro recipiente (CALLISTER, 2002).

Quando o material é heterogêneo, o método mais prático para separar as frações de materiais com partículas uniformes é o peneiramento. Este método consiste em passar o material por uma série de peneiras com malhas progressivamente menores, onde cada uma destas retém uma das partes da amostra. Esta operação, chamada análise granulométrica, é aplicável a partículas de diâmetros compreendidos entre 7 cm e 40  $\mu\text{m}$ . A análise granulométrica é realizada com peneiras padronizadas quanto à abertura das malhas e à espessura dos fios de que são feitas (GOMIDE, 1980).

### 3.2.2.2 Processos hidrometalúrgicos

A hidrometalurgia é amplamente utilizada na extração de metais, tanto no processamento primário como no secundário. Entre as suas principais vantagens está o baixo custo de implantação, além da utilização de solventes comuns e baratos para a lixiviação dos metais. Esses solventes podem ser tratados e reutilizados, o que o torna ainda mais interessante do ponto de vista econômico. No entanto, esta técnica apresenta algumas desvantagens como a falta de seletividade e a geração de efluentes tóxicos (BODSWORTH, 1994).

A lixiviação, em condições naturais, é um processo lento e a concentração dos metais lixiviados é baixa. A taxa de extração pode ser acelerada pela variação de alguns parâmetros que influenciam no processo, tais como pH do lixivante, temperatura, pressão e tempo de contato do lixivante com o sólido a ser lixiviado. Quanto mais ácidos ou básicos forem os agentes lixiviantes, assim como quanto maior a temperatura e pressão do sistema, maior será a taxa de extração de metais. Além disso, quanto maior o tempo de contato entre a solução lixivante e o mineral, maior será, também, a quantidade de metais dissolvidos (BODSWORTH, 1994).

Após o processo de lixiviação, os metais de interesse permanecem em solução, podendo ser recuperados de diferentes formas. Na técnica de eletro-obtenção, por exemplo, os íons metálicos são recuperados através do processo de redução catódica. Nesse processo, dois eletrodos são imersos na solução contendo os íons metálicos e uma diferença de potencial é aplicada entre eles. Dessa forma, os íons metálicos serão convertidos em depósitos sólidos cristalinos na superfície do cátodo. Também, podem ser utilizadas técnicas de extração por solventes e de precipitação com a variação de pH. Nessa última, são adicionados ácidos ou bases na solução lixiviada, promovendo a precipitação dos metais na forma de óxidos, sais e hidróxidos (SILVEIRA et al., 2015).

Na recuperação de metais a partir de resíduos de LIBs, processos hidrometalúrgicos são considerados adequados por causa das vantagens tais como: alta recuperação de metais com boa pureza, baixa necessidade de energia e emissão mínima de resíduos gasosos. Processos hidrometalúrgicos têm sido empregados por muitos pesquisadores para a recuperação de lítio e cobalto a partir de diferentes tipos de LIBs (DORELLA e MANSUR, 2007; FREITAS e GARCIA, 2007; JHA et al., 2013; LI et al., 2013; ZANG et al., 1998).



### 3.2.2.3 Processos pirometalúrgicos

A pirometalurgia é um dos processos mais utilizados mundialmente, se caracterizando principalmente pelo fato de não gerarem efluentes líquidos, uma vez que não são utilizados solventes nem soluções ácidas ou alcalinas. Além disso, são processos bastante flexíveis quanto aos materiais que podem ser processados, pois todo composto que contém uma mistura de metais ou ligas metálicas pode ser tratado pelas diversas técnicas pirometalúrgicas existentes. Entretanto, esses processos geram emissões gasosas, sendo necessária a instalação de um sistema de tratamento dessas emissões no processo (BERNARDES, ESPINOSA e TENÓRIO, 2004). Além disso, há um alto custo devido ao tratamento de gases e do alto consumo de energia no processo. A falta de seletividade para alguns grupos de metais, como as terras raras, é outra desvantagem desse tipo de processo (BERTUOL, 2007).

Também, há um elevado gasto energético para a produção de ligas metálicas em fornos de alta temperatura visando à recuperação dos metais de interesse. Em um mesmo processo, ocorre a queima do material orgânico e a volatilização de materiais voláteis, o que gera grande emissão de gases (BERNARDES, ESPINOSA e TENÓRIO, 2004). Na Europa esse tipo de processo é bem difundido apresentando bons resultados (ANULF, 1990; SCHWEERS, ONUSKA e HANEWALD, 1992).

## 3.3 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

No decorrer dos anos diversas leis e diretrizes ambientais têm sido discutidas e implantadas ao redor do mundo para minimizar os impactos ambientais que o grande consumo, e conseqüente descarte inapropriado, de diversos materiais podem causar. Uma das mais antigas diretivas, a Convenção da Basileia, criada na Suíça em 1989, trata do controle transfronteiriço de resíduos perigosos e seu depósito. A convenção prevê que os resíduos gerados em um determinado país devem ser eliminados no mesmo. Uma vez que os resíduos de sucata eletrônica são considerados perigosos, a exportação destes é permitida somente em condições especiais (BASEL CONVENTION, 1989).

Outras ações que podem ser citadas é a Diretiva WEEE e a Diretiva RoHS, as quais foram criadas pela União Europeia em 2003. Como objetivo, elas visam reduzir o impacto ambiental gerado pela sucata eletrônica e são aplicadas em 25 países membros. Segundo a Diretiva WEEE, o fabricante é o responsável pelo recolhimento, reciclagem e/ou eliminação dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Já a Diretiva RoHS trata da restrição do uso

de determinadas substâncias consideradas perigosas durante o processo de fabricação dos produtos. As substâncias restritas são: cádmio, chumbo, cromo hexavalente, mercúrio, bifenilos polibromados e éteres difenil polibromados (EUROPEAN COMMISSION, 2003).

No Brasil, a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente, foi a primeira legislação a dispor sobre preservação ambiental e conservação de recursos naturais no país, e embora trate desse segundo ponto sob a perspectiva de exaustão dos recursos, não aborda a disposição de resíduos ou reciclagem (BRASIL, 1981). Também, a Política Nacional sobre Educação Ambiental (Lei nº 9.795, 1999) foi criada para incentivar crianças e professores a desenvolverem a consciência ambiental, sendo os princípios que dizem respeito à sustentabilidade especialmente importantes para a reciclagem. Entre os objetivos, destaca-se o estímulo à consciência sobre a problemática ambiental e social, o incentivo à preservação do equilíbrio ambiental como parte do exercício da cidadania, assim como o incentivo à integração da ciência e tecnologia (BRASIL, 1999).

A primeira legislação brasileira com abrangência nacional que inclui os resíduos eletrônicos é a Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que foi instituída no país em 2010 e estabelece a responsabilidade compartilhada entre o governo, indústria, comércio e consumidor final no gerenciamento e na gestão dos resíduos sólidos. O objetivo da PNRS é estimular a produção e o consumo consciente e sustentável, a fim e garantir a preservação do meio ambiente. Dentre as medidas que constam na PNRS está o estímulo à produção limpa, que gere o menor impacto ambiental possível, utilizando matérias primas menos nocivas à natureza e que possam ser reaproveitadas ou recicladas ao final da sua vida útil. Outra medida bastante importante é a implementação do sistema de logística reversa (BRASIL, 2010).

Conforme o artigo 33, o sistema de logística reversa impõe a organização de um sistema de coleta e tratamento independente do sistema público de limpeza para alguns produtos perigosos ao final de sua vida útil, como pilhas, baterias, lâmpadas fluorescentes e de vapor de sódio e mercúrio, pneus, produtos eletrônicos e óleos e seus resíduos. Dessa forma, consumidores, distribuidores e fabricantes são responsáveis por gerenciar esse novo sistema de destinação final dos resíduos sólidos de forma compartilhada, podendo ser punidos pelo não cumprimento desse artigo. As punições para o descumprimento de qualquer uma das medidas vigentes na PNRS estão descritas no artigo 52 (BRASIL, 2010).

Cada estado brasileiro também pode ter suas regulamentações com relação à coleta e à disposição final de resíduos. No Rio Grande do Sul, a lei que regulamenta o gerenciamento de resíduos perigosos, como as baterias, é a lei 11.019, de setembro de 1997, complementada

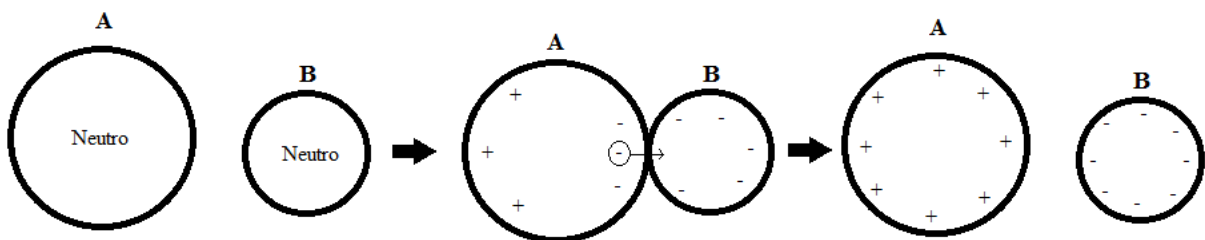
pela lei 11.187 de julho de 1998, a qual proíbe o descarte de quaisquer tipos de pilhas e baterias em lixo doméstico ou comercial (RIO GRANDE DO SUL, 1998).

### 3.4 SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA

A eletrostática é o estudo das cargas elétricas estáticas sob condições em que as partes positiva e negativa estão separadas umas das outras. A separação eletrostática é realizada através do uso de forças que atuam sobre corpos carregados ou polarizados sob a ação de um campo elétrico. O carregamento das partículas pode ser realizado através de vários métodos, tais como por indução condutora, eletrificação por contato, e bombardeamento de íons. Os métodos de indução condutora e bombardeamento de íons são usados para separar materiais condutores de materiais não condutores. Já o método de eletrificação por contato é normalmente empregado para materiais não condutores separados, como rocha fosfática e quartzo, com base no seu grau de condutividade (ORTEGA-RIVAS, 2012).

O princípio de eletrificação por contato é ilustrado na Figura 7. Nela, um corpo entra em contato (atritado) com outro de modo que um excesso de cargas negativas é fixado na superfície de um dos corpos. Assim, a carga positiva é desenvolvida no corpo deficiente em elétrons, enquanto o corpo que atraiu os elétrons fica negativamente carregado (ANDERSON et al., 1979). Dessa forma, a carga resultante em cada corpo eletrizado possui polaridade oposta.

Figura 7 - Mecanismo de eletrificação por contato.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já o método de bombardeamento de íons é utilizado para obter carga em materiais de propriedades elétricas diferentes. Partículas condutoras e não condutoras entram em contato com uma superfície condutora aterrada. As partículas dos dois materiais são bombardeadas por íons de gases atmosféricos gerados por descarga elétrica (efeito corona) a partir de um

eletrodo de alta tensão. Quando o bombardeamento de íons cessa, a partícula condutora perde a sua carga adquirida para a superfície aterrada muito rapidamente e sofre uma força eletrostática oposta, fazendo com que seja repelida a partir da superfície condutora. O lado das partículas não condutoras que está afastada da superfície condutora torna-se revestido com íons de carga com polaridade oposta da superfície, fazendo com que a força eletrostática tenda a mantê-la aderida a superfície. Sendo a força eletrostática maior do que a força de gravidade ou outras forças que tendem a separar a partícula da superfície condutora, a partícula é mantida em contato com a superfície (ORTEGA-RIVAS, 2012).

Outro modo de carregamento das partículas é através da cominuição. Porém, segundo estudo de LAWVER (1969), em determinados intervalos de tamanho de partícula o carregamento por cominuição não produz carga suficiente para que sejam influenciadas por um campo elétrico. No entanto, para partículas na grandeza de micrômetros, verificou-se que a carga resultante é suficientemente elevada para que as partículas demonstrem uma resposta à força do campo elétrico, ao invés da força gravitacional. Para materiais homogêneos, a cominuição produz partículas pouco equilibradas em termos de cargas elétricas, de modo que a separação eletrostática não seria uma opção viável. Porém, partículas que se diferem na composição química são satisfatoriamente carregadas por cominuição, e a separação eletrostática deve obter resultados satisfatórios.

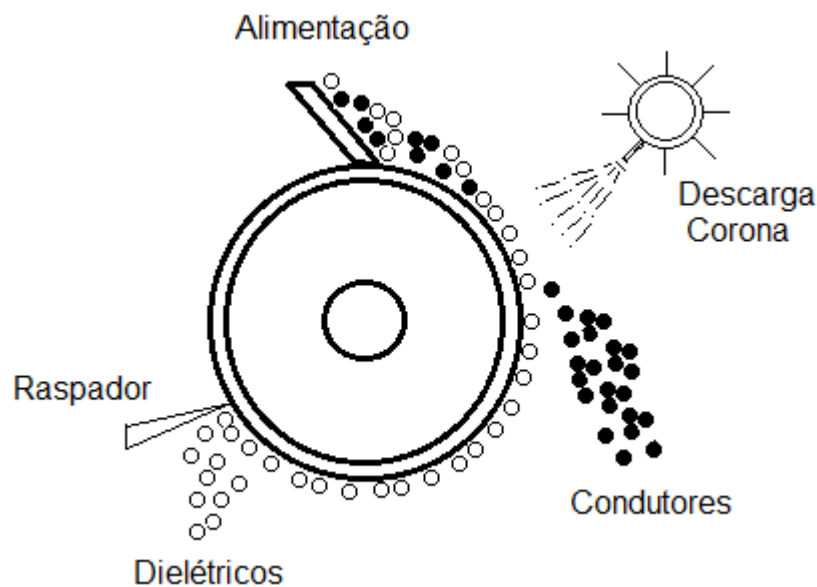
A separação eletrostática pode ser utilizada em diversas aplicações industriais (Tabela 2). Diferentes tipos de equipamentos são utilizados, dependendo do material a ser separado. As fontes de alta tensão utilizadas em separadores eletrostáticos comerciais podem chegar a grandezas de 250 kV.

Tabela 2- Aplicações industriais típicas da separação eletrostática.

Materiais	Tratamento de Superfície	Mecanismo de Carga Usual
Hematita-quartzo	Secagem	Bombardeamento de íons
Limonite-rutilo	Lavagem e secagem	Bombardeamento de íons
Zircônio-ilmenite	Secagem	Bombardeamento de íons
Cassiterita-scheelita	Secagem	Bombardeamento de íons
Feldspato-quartzo	Secagem	Indução condutora
Halite-silvanite	Aquecimento a 340 °C	Indução condutora
Pirita-carbono	Secagem	Bombardeamento de íons
Carbono-giz	Controle de umidade	Indução condutora
Diamante-silício	Lavagem e secagem	Indução condutora

Um equipamento comum que faz uso do mecanismo de bombardeamento de íons para carregamento de partículas é conhecido como separador por efeito corona. A Figura 8 apresenta como é realizada a separação em um separador eletrostático por efeito corona (GAUDIN, 1971). As partículas são alimentadas no separador de alta tensão e são carregadas por efeito corona. A quantidade de carga adquirida é função do raio da partícula, da permeabilidade da partícula e do tempo de residência. As partículas condutoras partilham a sua carga rapidamente com o tambor rotativo antes de ser projetado para longe dele. Já as partículas não condutoras são atraídas para a superfície do tambor e são removidos por uma vassoura (raspador). Desta forma, é definida a separação entre materiais condutores e não condutores.

Figura 8 - Separador eletrostático por efeito corona.



Fonte: Adaptado de GAUDIN (1971).

Outros separadores eletrostáticos de efeito corona que são comumente utilizados são o separador de placa e o separador de tela. O carregamento das partículas alimentadas é realizado através da indução em ambas as unidades. Neste caso, a eficiência de separação é menor para separadores de placa e de tela do que para os separadores de descarga corona. Por esta razão, este tipo de unidade é montado em série com até cinco fases de separação (GAUDIN, 1971).

### 3.5 SEPARAÇÃO TRIBOELETRÓSTÁTICA

A separação triboeletrostática é considerada um dos métodos mais promissores para a reciclagem de polímeros, uma vez que é muito mais barata e a eficiência de separação é muito melhor do que os métodos de separação convencionais. Os experimentos de bancada têm apresentado um futuro brilhante para utilizar a tecnologia na reciclagem de polímeros, contudo, ainda existem alguns desafios que devem ser superados antes de se tornar um processo industrial contínuo (WU, Li e XU, 2013).

Esta prática de triagem é capaz de distinguir duas diferentes resinas simplesmente atritando-as umas contra as outras. Um separador triboeletrostático classifica os materiais com base no fenômeno de transferência de carga de superfície. Quando dois materiais com diferentes propriedades de superfície entram em contato entre si, eles podem adquirir carga. Este fenômeno de tribocarregamento é também conhecido como eletrificação por contato ou eletrificação por atrito (LOWELL e ROSE-INNES, 1980).

Os materiais são friccionados um contra o outro, assim, um dos materiais torna-se positivamente carregado, e o outro se torna negativamente carregado ou permanece neutro. O mecanismo de transferência de carga em tribocarregamento pode ser explicado de diferentes formas, sendo que o mais aceito é o mecanismo de transferência de elétrons. Assim, a principal força motriz para a transferência de carga é a diferença entre as funções de trabalho das duas superfícies (HARPER, 1951).

A separação triboeletrostática utiliza o tribocarregamento como fenômeno para obter diferentes materiais carregados com polaridades opostas e, em seguida, alimentá-los em um campo elétrico para separá-los por suas diferentes polaridades de carga. A medição efetiva da função de trabalho de cada polímero é muito difícil, porém as séries triboelétricas dos polímeros podem expressar uma sequência das funções de trabalho, sendo um indicador importante para a separação destes materiais, uma vez que determinam a polaridade adquirida de cada material carregado (PARK et al., 2008b). Pesquisadores já apresentaram várias séries triboelétricas para prever a polaridade da carga que é transferida de uma superfície para outra. Algumas das principais séries triboelétricas de polímeros são apresentadas na Tabela 3, as quais podem fornecer uma breve previsão para a reciclagem de resíduos poliméricos por separação triboeletrostática.

Tabela 3 - Séries triboelétricas de polímeros apresentadas na literatura.

Autor	(+)	Série Triboelétrica	(-)
Fujita et al. (1995)		ABS – PP – PC – PMMA – PE – PVC – PTFE	
Matsushita et al. (1999)		PS – PET – PE – PP – PVC	
Dodbiba et al. (2003)		ABS – PC – PET – PS – PE – PP - PVC	
Iuga et al. (2005)		PMMA – PE – PET – PP – PVC	
Park et al. (2007a)		PMMA – ABS – PET – PEAD – PP – PVC – PTFE	
Park et al. (2008b)		PMMA – ABS – HIPS – PET – PEAD – PEBD – PP – PVC	
Li et al. (2015)		PP – ABS – PVC – PC – PS - PE	

Considerando o princípio de tribocarregamento, muitos estudos de dispositivos de separação triboeletrostática para a separação de misturas poliméricas têm sido estudados. Um exemplo é a recuperação de PVC, o qual é considerado perigoso e deve ser removido quando misturado com outros resíduos poliméricos. Levando em consideração as séries triboelétricas apresentadas na Tabela 3, nota-se que quando misturados com a maioria dos resíduos poliméricos o PVC fica carregado negativamente e a maioria dos outros polímeros são carregados positivamente, sendo possível assim remover o PVC dos outros polímeros através da deflexão eletrostática (JEON et al., 2009; LEE e SHIN, 2002; PARK, JEON e PARK, 2007b). Porém, nota-se que não há uma série triboelétrica universal, havendo muitas discordâncias entre os pesquisadores, como no caso da sequência de PP, PE e PET. Isso pode ser justificado pelo fato de que muitas vezes as condições experimentais variam de uma experiência para outra. Também, relata-se que os aditivos utilizados nos diferentes polímeros comerciais também podem influenciar nos resultados das séries triboelétricas (MATSUSHITA, MORI e SOMETANI, 1999).

A estabilidade de cargas superficiais de polímeros e outros materiais isolantes, sob certas condições, parecem ser estáveis por um longo período de tempo. Entretanto, traços naturais de água circundante as partículas ajudam na descarga da superfície dos polímeros. As moléculas de água são capazes de se dissociar-se e formar íons hidrônio ( $H_3O^+$ ) e íons hidroxila ( $OH^-$ ), os quais podem atuar como portadores de carga. Assim, as moléculas de água podem ser adsorvidas pelo material através da umidade presente no ar ou estar contida na massa de polímero, promovendo a dissipação da carga (ALBRECHT et al., 2002; NÉMETH et al., 2003).

### 3.5.1 Pré-tratamento

Antes da realização da separação triboeletrostática, alguns outros processos devem ser realizados com os materiais poliméricos, os quais são chamados de pré-tratamento. Primeiramente deve-se levar em consideração a lavagem e a secagem, dado que a função da superfície de trabalho iria aumentar com a contaminação e oxidação da superfície, sendo realmente importante manter a superfície das partículas limpas (TRIGWELL et al., 2003).

Também, os resíduos poliméricos devem ser cominuídos até uma faixa de tamanho ideal, através de moinhos de corte ou trituradores (DODBIBA et al., 2005; PARK et al., 2007a). A classificação do tamanho de partículas é realizada através de peneiras. O tamanho de partícula adequado para separação triboeletrostática varia de dispositivo para dispositivo. Para materiais isoladores, como os polímeros, um tamanho de partícula muito grande pode diminuir relativamente a área superficial específica, levando à diminuição da força do campo elétrico, o qual é a principal força de separação do processo. Além disso, a força do campo elétrico necessária para a deflexão eletrostática das partículas eletrizadas aumenta exponencialmente com o aumento do tamanho da partícula (DODBIDA et al., 2005).

Por outro lado, partículas com diâmetro médio muito pequeno também não são favoráveis, uma vez que a energia gasta na etapa de cominuição será maior, além da maior adesão das partículas nas paredes do tribocarregador, ocorrendo bloqueios e queda de rendimento. Também, há o aumento de colisão entre partículas do mesmo tipo de polímero que pode levar à diminuição da eficiência de separação. Assim, o tamanho das partículas tornasse um parâmetro muito importante que influencia na eficiência final da separação, sendo a cominuição e o peneiramento processos essenciais para a separação triboeletrostática (WU, LI e XU, 2013).

### 3.5.2 Tribocarregamento

Tribocarregamento ou carregamento por atrito é uma das mais antigas formas conhecidas de carregamento elétrico, sendo, talvez a que menos é entendida nos seus mecanismos fundamentais em relação a processos como carregamento por contato ou por eletroquímica. A maioria dos dados em relação a triboeletrificação é principalmente de natureza fenomenológica. Em alguns casos nem sequer é claro como explicar o sinal de uma carga em uma superfície específica para um par de materiais que são friccionados.



A triboeletrificação por atrito, de um modo geral, pode acontecer em qualquer contato dinâmico de superfícies. Segundo HARPER (1967), as principais formas de contato triboelétrico dinâmico são: por deslizamento, rotação e vibração das superfícies em contato, por impacto ou induzido pela deformação devido à redistribuição de carga sobtensão. Além disso, uma carga perceptível pode, por vezes, resultar de uma variação periódica de pressão entre as superfícies dos materiais, mesmo quando eles não se movem um contra o outro.

O carregamento de dois materiais através da fricção geralmente obtém uma carga de sinal opostos em cada superfície participante. Por exemplo, a fricção de zinco com vidro, gera uma carga positiva no vidro e outra negativa no zinco (HARPER, 1967). Muitas vezes, os materiais podem ser dispostos numa série triboelétrica, a qual demonstra se o material será carregado positivamente ou negativamente quando atritado a outro material presente na série (Tabela 3). Alguns fatores podem influenciar e até reverter o sinal da carga, como a forma das superfícies. Por exemplo, se a superfície for côncava ou convexa, o material pode adquirir diferentes sinais de carga. Variações de sinais (cargas instáveis) podem ocorrer devido à variação da rugosidade da superfície dos materiais (CHANG, KELLY e CROWLEY, 1995).

Com o intuito de aumentar a pressão de fricção e a frequência, diversos dispositivos têm sido investigados nos últimos anos para o carregamento triboelétrico de partículas poliméricas na separação triboeletrostática. Assim, há dois tipos de mecanismos de carregamento, o tribocarregamento sólido de fase única e o tribocarregamento com duas fases gás-sólido.

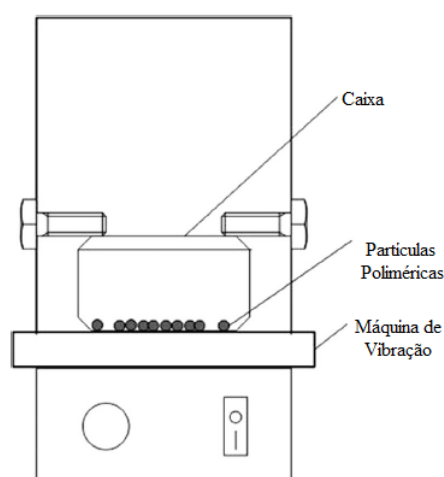
No primeiro, o tribocarregamento ocorre através da fricção das partículas poliméricas uma com as outras, ou com o atrito entre as partículas e a as paredes do material que é constituído o tribocarregador. O tubo rotativo é utilizado como um tribocarregador para separar resíduos plásticos desde o início da década de 1990 (INCULET, CASTLE e BROWN, 1994).

Nesse método, um tubo é disposto horizontalmente com uma pequena inclinação para que as partículas se movimentem devido à gravidade. A alimentação é contínua através de uma das extremidades do tubo, enquanto ele gira. Como vantagem, esse método necessita de menos energia do que outros métodos empregados, além de poder ser facilmente implantado em um processo contínuo. No entanto, como desvantagem, ele tem um baixo índice de colisão entre as partículas, gerando uma baixa carga, o que dificulta a separação (WU, LI e XU, 2013).

Outro método de carregamento sólido-sólido bastante aplicado é o tribocarregamento por vibração. O tribocarregador consiste em uma plataforma vibratória com uma caixa de

carregamento, podendo ou não conter ranhuras, as quais aumentam a área superficial. O carregamento ocorre através da fricção das partículas umas com as outras, ou das partículas com a parede da caixa do tribocarregador (Figura 9). Vários trabalhos realizados citam o mecanismo de vibração como tribocarregador, os quais consideram que este método pode ser bastante eficaz no carregamento de partículas poliméricas (DASCALESCU et al., 2005; HIGASHIYAMA, UJIIE e ASANO, 1997; LI, WU e XU, 2015; LUNGU, 2004).

Figura 9 - Tribocarregador por vibração.



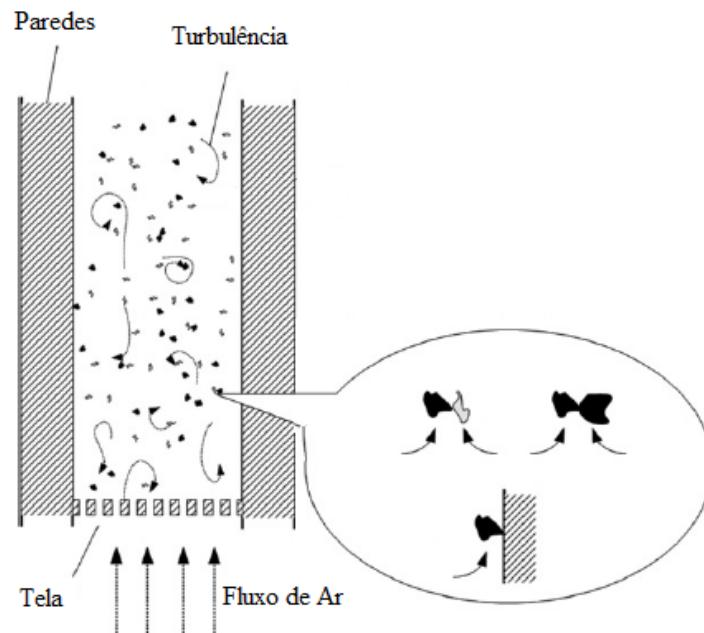
Fonte: Adaptado de LI, WU e XU (2015).

Já o mecanismo de duas fases gás-sólido, tem o leito fluidizado como o tribocarregador mais utilizado. O fluxo de ar que passa através do leito fornece um ambiente favorável para que ocorram as colisões partícula/partícula e partícula/parede do leito, as quais são o principal mecanismo de tribocarregamento neste tipo de dispositivo (CALIN et al., 2008). Não importa a forma do leito fluidizado, o objetivo principal é o de proporcionar um ambiente que as partículas possam atritar umas contra as outras para que se obtenha carga suficiente para haver deflexão no campo elétrico.

A Figura 10 ilustra o mecanismo de tribocarregamento em leito fluidizado. O ar é injetado pela base do leito gerando uma turbulência e fazendo com que as partículas sejam projetadas para cima. Durante o processo, há diferentes contatos, o contato entre as partículas de mesmo tipo, o contato entre as partículas de materiais diferentes, e o contato entre partícula e o material da parede. Alguns pesquisadores já utilizaram esta estrutura em suas pesquisas

(INCULET, CASTLE e BROWN, 1998; IUGA et al., 2005; LEE e SHIN, 2002; PARK, JEON e PARK, 2007).

Figura 10 - Mecanismo de contato das partículas em tribocarregador de leito fluidizado.



Fonte: Adaptado de WU, LI e XU (2013).

Outro tipo de tribocarregador é o ciclone, o qual é semelhante ao leito fluidizado. Neste método, o fluxo de ar empurra as partículas em espiral e cria um elevado número de colisões entre as partículas e também contra a parede do ciclone. Nele a força de atrito é muito maior do que qualquer outro equipamento, de modo que a eficiência do carregamento e a energia requerida sejam mais altas (WU, LI e XU, 2013). Pesquisas tem demonstrado a eficiência do ciclone como tribocarregador. O tribocarregamento de partículas de ABS/PP/PVC (DODBIBA et al., 2003b), PVC/PET/ABS (PARK et al., 2008a) e PP/PS/PC/PVC/ABS/PP (LI, WU e XU, 2015), foi realizado com eficiência por esse tipo de tribocarregador.

Por fim, não há dispositivo perfeito para tribocarregamento de partículas poliméricas. Tribocarregadores de uma fase sólido-sólido são mecanicamente mais simples e necessita uma baixa potência, porém o grau de atrito gerado não é muito grande, sendo assim, recomendados quando a mistura polimérica não necessita de muita energia para obter carga suficiente. Já o tribocarregador duas fases gás-sólido fornece um alto grau de atrito entre as partículas, porém necessita de muita energia devido ao fluxo de ar que mantém o ambiente

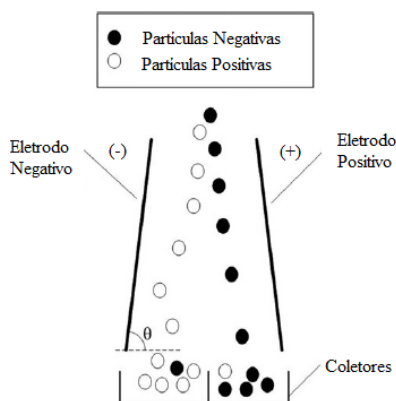
extremamente turbulento para que haja as colisões de partículas. Assim, esse mecanismo é mais eficiente para polímeros difíceis de obterem carga superficial (WU, LI e XU, 2013).

### 3.5.3 Deflexão eletrostática

A deflexão eletrostática é a responsável pela separação das partículas submetidas a um campo elétrico, sendo assim, é a principal parte de uma separação triboeletrostática. As partículas poliméricas, que passaram pelo processo de tribocarregamento, são alimentadas em um separador eletrostático e desviadas pelo eletrodo estático de alta tensão de acordo com as forças que estão agindo sobre elas. Diferentes projetos de separadores são utilizados, sendo que suas configurações desempenham um papel importante no processo de separação (WU, LI e XU, 2013).

O separador eletrostático tipo queda livre é o mais utilizado no processo de separação triboeletrostática de materiais poliméricos. As partículas carregadas entram no campo elétrico e através da influência do mesmo, da força da gravidade e a da força da resistência do ar, elas são desviadas para o eletrodo de acordo com a polaridade da sua carga (Figura 11). Fatores como a dimensão das partículas, massa, carga superficial e força do campo elétrico, afetam diretamente o processo de separação, sendo que a eficiência depende mais dos últimos dois fatores. Esse sistema tem como vantagem a simplicidade mecânica e uso moderado de energia. Como desvantagem, o sistema apresenta a grande influência da força da gravidade, que afeta a eficiência de separação principalmente para partículas maiores (WU, LI e XU, 2013).

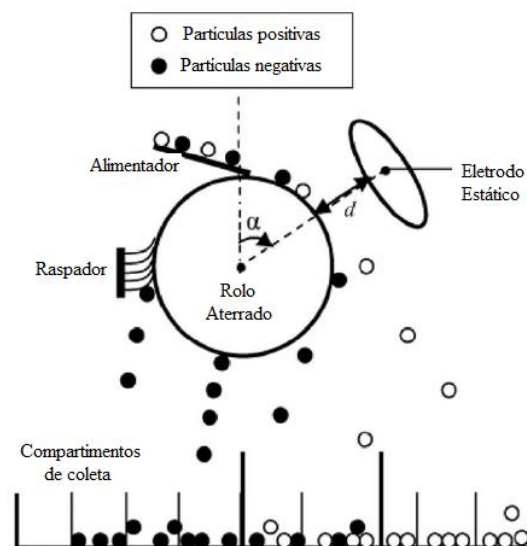
Figura 11 - Separador eletrostático tipo queda livre.



Fonte: Adaptado de WU, LI e XU (2013).

Embora ainda seja pouco aplicado na separação de resíduos poliméricos, o separador tipo rolo é usado há muitos anos na separação de materiais condutores de não condutores (GAUDIN, 1971). As partículas são alimentadas sobre a superfície do rolo, passam pelo campo elétrico gerado pelo eletrodo que interfere na trajetória apenas das partículas positivas e não das negativas, as quais são coletadas em diferentes coletores ao fundo do separador (Figura 12). Uma tensão ótima do eletrodo deve ser otimizada de acordo com a eficiência de carregamento, pois uma baixa tensão pode não ser suficiente para atrair as partículas carregadas enquanto que uma alta tensão pode atrair fortemente as partículas fazendo com que se choquem contra o mesmo e acabem recuperados nos coletores errados (WU, LI e XU, 2013).

Figura 12 - Separador eletrostático tipo rolo.



Fonte: Adaptado de TILMATINE et al. (2010).

Segundo Tilmatine et al. (2010), esse método de separação triboeletrostática é mais adequado para a separação de partículas poliméricas grosseiras, com diâmetro médio acima de 2,0 mm, quando comparado com o sistema de queda livre, especialmente para partículas de difícil tribocarregamento. A força centrífuga gerada pela rotação do rolo se associa positivamente com a força do campo elétrico, ajudando na projeção das partículas carregadas positivamente a partir do rolo, enquanto as partículas carregadas negativamente se aderem ao rolo até serem retiradas pelo raspador. Também, para melhorar a pureza do produto, as partículas devem formar uma monocamada sobre o rolo, de modo que um transportador de

correia ou um alimentador vibratório são necessários na alimentação do separador (MILOUDI et al., 2011).

Outros sistemas podem ser utilizados para a deflexão eletrostática, como o uso de um leito fluidizado com eletrodos que geram um campo elétrico. Assim, o tribocarregamento e a separação eletrostática são realizados ao mesmo tempo. O fluxo de ar entra pela parte inferior e as partículas se mantêm em estado de fluidização até adquirirem carga suficiente para serem atraídas pelos eletrodos (DASCALESCU, 2011; DRAGAN et al., 2010). Também, pode-se utilizar um separador de tipo correia, o qual consiste em um alimentador vibratório, uma correia transportadora ligado ao terra, um eletrodo estático alimentado por uma fonte de alta tensão e um coletor de partículas com três compartimentos. As partículas carregadas negativamente são submetidas a uma força de atração exercida pelo eletrodo estático, enquanto as carregadas positivamente são aderidas à superfície da correia até um raspador removê-las (MILOUDI et al., 2013).

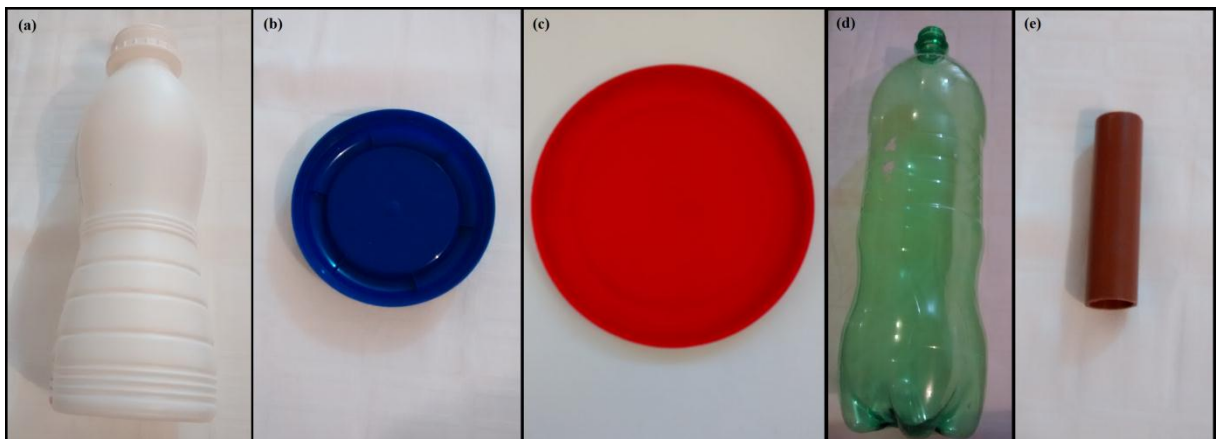
## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAIS

#### 4.1.1 Polímeros

Para a realização do presente trabalho foram selecionados cinco tipos de polímeros, PP, PEAD, PEBD, PET e PVC, os quais representam cerca de 81,0% do total dos materiais poliméricos encontrados na coleta seletiva (CEMPRE, 2014). Os polímeros utilizados possuem cores diferentes para uma melhor visualização da separação (Figura 13). O foco deste trabalho é a utilização de materiais provenientes dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), pois poucos trabalhos são realizados com resíduos reais de polímeros, e sim com polímeros virgens (LI, XU e XU, 2015). Os materiais utilizados neste trabalho foram obtidos juntamente a Associação de Seleccionadores de Materiais Recicláveis de Santa Maria (ASMAR), a qual trabalha com a coleta, seleção e envio para empresas de reciclagem de materiais recicláveis.

Figura 13 - Polímeros utilizados no desenvolvimento do trabalho (a) PEAD, (b) PP, (c) PEBD, (d) PET e (e) PVC.



#### 4.1.2 Baterias íon de lítio

As baterias de íon de lítio utilizadas neste trabalho foram coletadas juntamente a uma empresa de manutenção de celulares. No estudo dos parâmetros da separação eletrostática foram utilizados os componentes das baterias Nokia BL-4. Durante o desenvolvimento de

todo o processo foram utilizadas três modelos de baterias, as quais estavam presentes em maior quantidade em cada marca: Nokia BP – 4L, 1500, mAh, 3,7 V, 5.6 Wh; Motorola BR50, 3,7 V e Samsung BN, 960 mAh, 3,7 V, 3,55 Wh (Figura 14).

Figura 14 - Baterias utilizadas no desenvolvimento do processo geral do processamento mecânico (a) Nokia BP-4L, (b) Motorola BR 50 e (c) Samsung BN.



### 4.1.3 Equipamentos

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram utilizados diversos equipamentos, os quais pertencem ao Laboratório de Processos Ambientais (LAPAM), ou ao Departamento de Engenharia Química da UFSM. Os equipamentos utilizados são descritos abaixo, o modo como cada um foi utilizado será descrito nos métodos deste trabalho.

- Moinho de Facas, Modelo N150 (Rone Indústria e Comércio de Máquinas Ltda);
- Moinho de Martelos (Tigre, modelo A4);
- Sistema de peneiras vibratórias (Produtest - Peneiras para Análises, Ciclos 50/60);
- Termo Higrômetro Digital (J Prolab, -50 + 70 °C +/- 1°C; 20 – 90% HR +/- 5% HR);
- Alimentador vibratório, modelo 15A (Inbras – Eriez, Equipamentos Magnéticos Vibratórios);
- Compressor de ar de pistão, modelo MSV 6/30 (Schulz);
- Separador Eletrostático de Laboratório, Modelo ESP-14/01S (Inbras – Eriez, Equipamentos Magnéticos Vibratórios);
- Balança Analítica, Bioscale - Modelo 2204 (Resolução 0,0001 g, capacidade de 220,0 g);



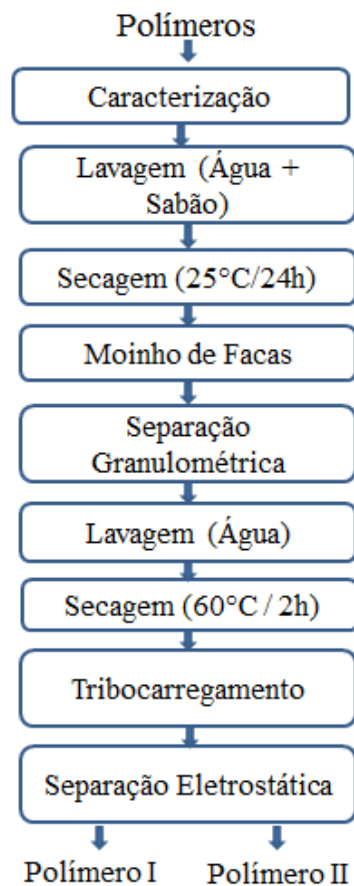
- Balança Semi-Analítica, Bel Engineering - Modelo Marks 5201 (Resolução 0,1 g, capacidade de 5200,0 g);
- Difratormetro de Raios – X, DRX (Rigaku – Miniflex 300);
- Microscópio Eletrônico de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva – MEV/EDS (Tescan Vega3);
- Calorímetro Diferencial de Varredura, DSC – 60 Plus (Shimadzu).

## 4.2 MÉTODOS

### 4.2.1 Reciclagem de resíduos poliméricos

Os materiais poliméricos coletados passaram por diversas operações unitárias e análises a fim de verificar a aplicação da separação triboeletrostática na separação desses materiais. As etapas foram realizadas conforme o diagrama de blocos apresentado na Figura 15, sendo cada etapa descrita posteriormente.

Figura 15 – Fluxograma da rota proposta para a separação dos resíduos poliméricos.



#### *4.2.1.1 Caracterização dos polímeros utilizados*

Os polímeros utilizados neste estudo foram caracterizados quanto a sua composição para confirmar que os mesmos representam os polímeros de interesse. Foram retiradas amostras dos cinco polímeros selecionados, as quais foram limpas e secas. Após, os polímeros foram caracterizados através de análise em um Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC) (Shimadzu – 60 Plus). Essas análises foram realizadas em dois ciclos, sendo os resultados apresentados referente ao segundo ciclo de aquecimento, sendo taxa de aquecimento foi de 20 °C min<sup>-1</sup>.

#### *4.2.1.2 Lavagem, secagem e cominuição em moinho de facas*

Os polímeros selecionados foram lavados individualmente com água e sabão. Com auxílio de uma esponja removeu-se todas as impurezas aderidas à superfície do material. Após, os materiais foram dispostos em uma bancada e permaneceram durante 24 horas a temperatura ambiente (25°C) para secagem. Esse processo é necessário, pois segundo Lee e Shin (2002), a aplicação de lavagem e secagem minimiza a contaminação da superfície das partículas, o que beneficia a reprodutibilidade e a eficiência do tribocarregamento.

Em seguida, os materiais poliméricos foram levados individualmente ao processo de cominuição com o objetivo de reduzir o tamanho do material. Estudos mostram que o tamanho da partícula influencia diretamente na separação triboeletrostática (DODBIBA et al., 2005). O processo de cominuição foi realizado em um moinho de facas da marca Rone (Figura 16). O tempo do processo é relativo, cerca de 10 minutos para 50 g de material, já que o material deve ser cominuído até passar pela malha de fundo do moinho. A abertura da malha utilizada foi de 5 mm.

Figura 16 - Moinho de facas utilizado na cominuição dos materiais poliméricos.



#### 4.2.1.3 Separação granulométrica

Após a etapa de cominuição, o material cominuído passou pela etapa de separação granulométrica. Esta etapa consiste em colocar o material em peneiras vibratórias com aberturas de malha definidas. As peneiras vibratórias foram acopladas em um agitador, conforme mostra a Figura 17. As peneiras utilizadas foram a de Tyler 9 e 7, que correspondem a uma abertura de 2,0 e 2,8 mm, respectivamente. As partículas permaneceram por 10 minutos nas peneiras para seleção das partículas com tamanho médio de  $-2,8/+2,0$  mm.

Figura 17 - Peneiras vibratórias utilizadas na etapa de separação granulométrica.



Segundo Tilmatine et al. (2010), o separador eletrostático tipo rolo, quando comparado com o separador eletrostático tipo queda livre, se mostra mais apropriado na separação de materiais poliméricos mais grosseiros, os quais apresentam um diâmetro médio superior a 2,0 mm. Além disso, Dodbiba et al. (2005), relata em seu estudo, que partículas relativamente grosseiras, com diâmetro médio maior que 3 mm, sofrem um desvio menor pelos eletrodos, pois a carga triboelétrica obtida pelas partículas é menor do que o necessário. Com o aumento do tamanho das partículas, a força do campo elétrico necessária para que ocorra a deflexão eletrostática das partículas aumenta exponencialmente. Sendo assim, foram selecionadas partículas com tamanho médio no intervalo de 2,0 a 2,8 mm.

#### 4.2.1.4 Lavagem e secagem secundária

Durante os processos de cominuição e peneiramento, as partículas poliméricas podem adquirir cargas superficiais, o que interfere diretamente na eficiência de carregamento e influencia na pureza e recuperação de todo o processo (WU, LI e XU, 2013). Uma forma de neutralizar essas cargas é através de uma lavagem e secagem, processos que ajudam a descarregar as partículas poliméricas (TRIGWELL et al., 2003). Assim, foram aplicados processos de lavagem com água e secagem em estufa a 60°C por 2 h, para promover o descarregamento elétrico das partículas. Assim, as partículas levadas para o processo de tribocarregamento permanecem neutras, o que beneficia a reprodutibilidade do processo.

#### 4.2.1.5 Polímeros utilizados nos testes de separação

A mistura polimérica utilizada nas etapas relativas ao estudo dos melhores parâmetros de tribocarregamento e da separação eletrostática, é formada por PP e PEAD. A escolha desta mistura foi devida há dificuldade de separação destes dois polímeros. O PP possui uma massa específica na faixa de  $0,9 - 0,91 \text{ g cm}^{-3}$ , enquanto o PEAD possui uma massa específica na faixa de  $0,94 - 0,97 \text{ g cm}^{-3}$ , o que dificulta a separação por densidade destes polímeros, uma vez que as faixas estão muito próximas. Além disso, observa-se na Tabela 3, que na maioria das séries triboelétricas apresentadas, o PEAD, tratado apenas como PE, fica ao lado do PP, não havendo um polímero em que possa confeccionar um recipiente para realizar o tribocarregamento de forma que cada um dos materiais adquira cargas opostas.

Dessa forma, o material selecionado para a confecção dos tribocarregadores dos dois mecanismos foi o PP, de forma que o carregamento das partículas ocorra da seguinte maneira:

- Atrito entre partícula de PEAD e partículas de PP: partícula de PEAD fica positiva e partícula de PP fica negativa;
- Atrito entre partícula de PEAD e parede do tribocarrgador de PP: partícula de PEAD fica positiva;
- Atrito entre partícula de PP e parede do tribocarregador de PP: presume-se que as partículas de PP permaneceram neutras, uma vez as partículas e o leito são do mesmo polímero.

Assim, as partículas de PP que ficarem negativas são atraídas pelo rolo e são recolhidas no coletor 1 (Figura 19). As partículas de PP que permanecerem neutras não são atraídas nem pelo rolo, nem pelo eletrodo de atração, sendo recolhidas no coletor 2. Já as partículas de PEAD que ficaram positivas são atraídas pelo eletrodo de atração e são recolhidas no coletor 3. Assim, é possível promover a separação destes dois polímeros em um separador tipo rolo, o que não seria possível em um separador tipo queda livre, pois o mesmo apenas é aplicado quando as duas partículas adquirem carga, não havendo partículas neutras.

#### 4.2.1.6 Funcionamento do separador eletrostático e cálculos realizados para os testes de tribocarregamento e separação eletrostática

O Separador Eletrostático, Modelo ESP-14/01S (Inbras – Eriez) com configuração contendo apenas o eletrodo de atração, foi utilizado em todos os experimentos realizados

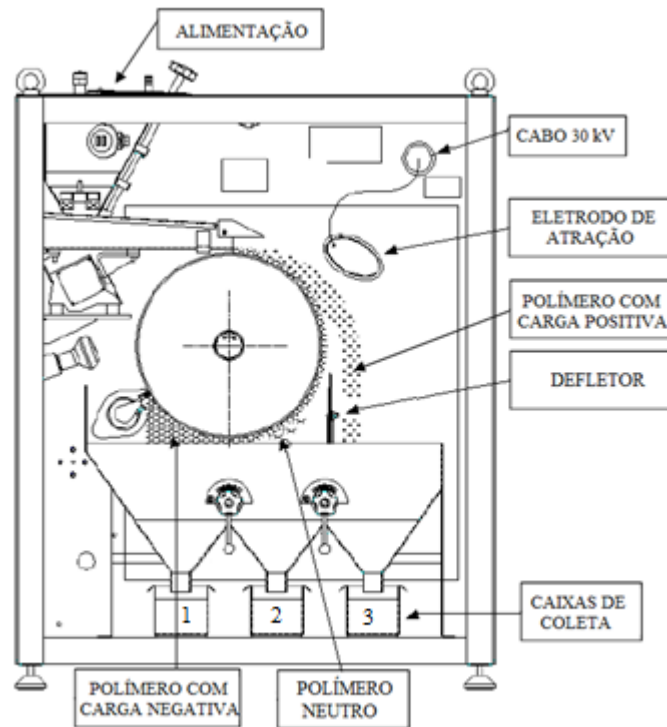
nesta etapa do trabalho. O equipamento é composto por um alimentador vibratório, um eletrodo de atração, os coletores, um raspador, uma lâmpada de aquecimento e um painel elétrico com todos os controles. A imagem do separador é apresentada na Figura 18.

Figura 18 - Separador eletrostático tipo rolo configurado apenas com o eletrodo de atração.



Na separação de uma mistura binária de materiais poliméricos tem-se que depois do processo de tribocarregamento cada material adquire cargas elétricas com polaridade diferentes, podendo ficar positivos, negativos ou neutros. Dessa forma, cada material deverá cair em uma determinada caixa coletora, dependendo de sua carga. Os materiais negativos são aderidos ao rolo e caem no coletor [1], as partículas neutras caem no [2], enquanto as partículas positivas são atraídas pelo eletrodo de atração e devem cair no coletor [3] conforme indicado na Figura 19.

Figura 19 - Esquema prático do funcionamento do separador eletrostático tipo rolo aplicado na separação de materiais poliméricos.



Fonte: Adaptado de INBRAS - ERIEZ (2015).

Após passarem pelo separador eletrostático, as partículas foram recolhidas nos coletores do separador. Para a realização do cálculo da recuperação e da pureza de cada polímero, as partículas poliméricas de cada coletor foram separadas manualmente com auxílio de uma pinça e uma espátula, obtendo-se sempre dois grupos de partículas, do polímero 1 e do polímero 2, em cada coletor. Então, as partículas de cada material foram individualmente pesadas em balança digital (precisão =  $\pm 0,0001$  g). A recuperação de cada material foi calculada conforme equação abaixo:

$$\text{Recuperação (\%)} = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \times 100 \quad (4)$$

Onde,  $m_{ic}$  é a massa do material  $i$  coletado no coletor destinado ao mesmo, e  $m_{it}$  é a massa total do material  $i$  que foi alimentada no equipamento. A pureza de cada material em cada coletor é dada por:

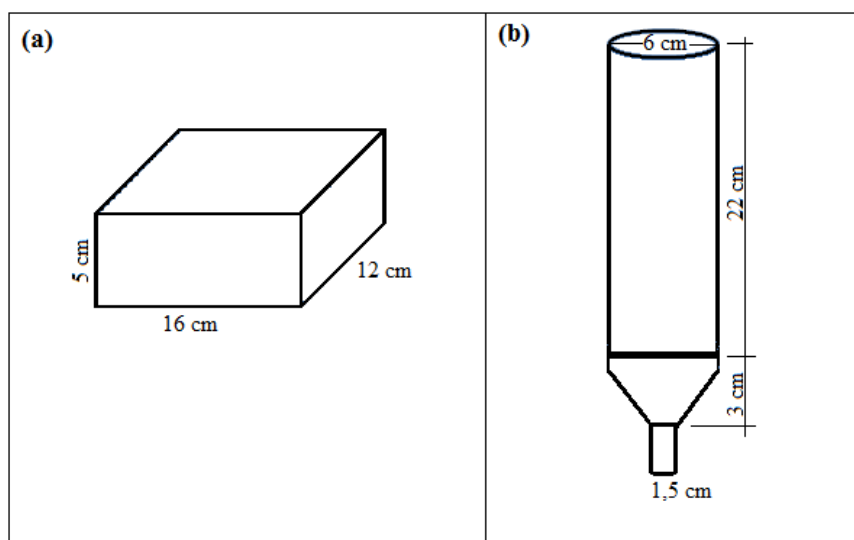
$$\text{Pureza (\%)} = \frac{m_{ic}}{m_{tc}} \times 100 \quad (5)$$

Onde,  $m_{ic}$  é a massa do material  $i$  coletado no coletor destinado ao mesmo, e  $m_{tc}$  é a massa total de partículas poliméricas neste coletor.

#### 4.2.1.7 Estudo do tribocarregamento

Após o processo de lavagem e secagem secundárias para descarregamento elétrico das partículas, a mistura polimérica foi levada ao processo de tribocarregamento, ou carregamento por atrito. Todos os testes realizados nesta etapa foram realizados com 20 g de uma mistura de PP e PEAD (50/50). Neste trabalho, foram testados dois mecanismos para o tribocarregamento, primeiramente testou-se o tribocarregamento sólido de fase única através de um sistema de vibração, e comparou-se com o tribocarregamento com duas fases gás-sólido através de um leito fluidizado. O material usado na fabricação da caixa para o sistema de vibração e do leito fluidizado foi o PP. O esquema dos dois sistemas utilizados pode ser observado na Figura 20. No tribocarregamento por vibração as partículas foram submetidas a um sistema de vibração (motor vibratório) e permaneceram por 10 min a uma vibração máxima do sistema (desolcamento = 0,120''), e após foram levadas ao separador eletrostático (SE). No tribocarregamento em leito fluidizado, o sistema é equipado por um compressor de ar e um leito fluidizado, onde as partículas permaneceram por 10 min e com uma velocidade de ar de 3,5 m/s, e após foram levadas ao SE.

Figura 20 - Sistemas de tribocarregamento utilizados (a) caixa de PP para vibração (b) leito fluidizado de PP.





Outro parâmetro estudado foi a interferência da umidade relativa (UR) no tribocarregamento das partículas. Estudos indicam que a polaridade de carga não muda, mas a magnitude da carga diminui com o aumento da umidade relativa. O comportamento de carga e descarga dos polímeros poderia ser explicado pela formação de películas de água sobre a superfície das partículas (NEMETH et al., 2003). Na maioria dos casos, a baixa umidade beneficia o processo de carregamento. No entanto, não é fácil controlar a umidade relativa inferior a 20% em uma planta industrial (PARK et al., 2007a). Dessa forma, estudou-se a influência da umidade relativa no tribocarregamento das partículas. Os valores da UR estudados foram de 42, 52, 60 e 77%. Este estudo foi realizado a fim de certificar-se da importância do controle da umidade durante o processo. A aferição da UR foi realizada por um termo higrômetro digital (J Prolab).

Por fim, foi realizado o estudo da influência do tempo de tribocarregamento em leito fluidizado. Esta etapa foi realizada com tribocarregamento em leito fluidizado de PP com uma velocidade de ar de 3,5 m/s. Então, o tempo foi variado em 2,5, 5, 10, 15 e 20 min, e a separação foi avaliada de forma que fosse possível a maior recuperação dos materiais com a maior pureza possível. O melhor tempo foi fixado para continuidade do trabalho.

Em todos os testes a mistura polimérica foi carregada no tribocarregador e então levadas ao separador eletrostático (SE) para separação. Os parâmetros utilizados no SE nesta etapa foram: tensão de 30 kV, velocidade do rolo de 10 rpm, distância do eletrodo de atração de 3 cm, ângulo do eletrodo de atração de 45°, ângulo do defletor do coletor de 0° e alimentação em 30%. Os parâmetros iniciais foram baseados no estudo de Tilmatine et al. (2010), o qual utilizou um separador tipo rolo para separar uma mistura de PEAD e PEBD, e também, baseou-se em testes preliminares realizados para verificar a viabilidade do processo.

#### *4.2.1.8 Estudo dos parâmetros da separação eletrostática*

O estudo dos parâmetros que envolvem a separação eletrostática foi realizado com o intuito de determinar quais as condições para melhor operação do equipamento. Nesta etapa, foram utilizadas 20 g de uma mistura de PP e PEAD (50/50), que passaram pelo processo de tribocarregamento conforme estudo anterior. O alimentador vibratório foi mantido em 30%. O ângulo do eletrodo de atração permaneceu em 45° em todos os testes, pois conforme trabalho de Tilmatine et al. (2010), em estudo da separação de PEAD e PEBD em separador tipo rolo, esse é o ângulo que oferece uma maior eficiência. Todos os testes foram realizados com umidade relativa de 42% ± 3%.

Em seguida, foram variados os demais parâmetros que envolvem a separação triboeletrostática. Os parâmetros, os valores testados e as unidades, podem ser observados na Tabela 4. Após a obtenção dos valores dos melhores parâmetros para operação do separador eletrostático, foi realizado teste em triplicata nas melhores condições obtidas para confirmação da reprodutibilidade do processo.

Tabela 4 – Parâmetros estudados na separação triboeletrostática de PP e PEAD.

Parâmetro	Variação	Unidade
Ângulo do defletor	0 – 2,5 – 5 – 7,5 – 10	°
Distância do eletrodo de atração	2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7	cm
Tensão do eletrodo de atração	10 – 15 – 20 – 25 – 30	kV
Velocidade de rotação do rolo	5 – 10 - 20 - 30 - 40 - 50	rpm

#### 4.2.1.9 Aplicação das condições ideais em outras misturas poliméricas

Após a definição dos melhores parâmetros para o tribocarregamento e para a separação eletrostática, aplicaram-se os melhores resultados em outras misturas poliméricas. Primeiramente, realizou-se a separação do PP e PEBD, para certificar-se que os parâmetros estudados também funcionam com esta mistura. Também, aplicaram-se os melhores parâmetros na separação de uma mistura de PET e PVC.

Além disso, foi realizado um teste sem a aplicação do processo de tribocarregamento. As partículas passaram pelo processo de cominuição e foram levadas diretamente ao separador eletrostático. Através deste teste pode-se verificar se a carga adquirida no processo de cominuição é, ou não é, suficiente para a realização do processo de separação eletrostática. As partículas foram cominuídas em moinho de facas com malha de abertura de 10 mm, e em seguida foram submetidas ao processo de separação eletrostática. Na sequência, as partículas foram cominuídas novamente em moinho de facas com malha de abertura de 5 mm, e posteriormente foram submetidas ao processo de separação eletrostática.

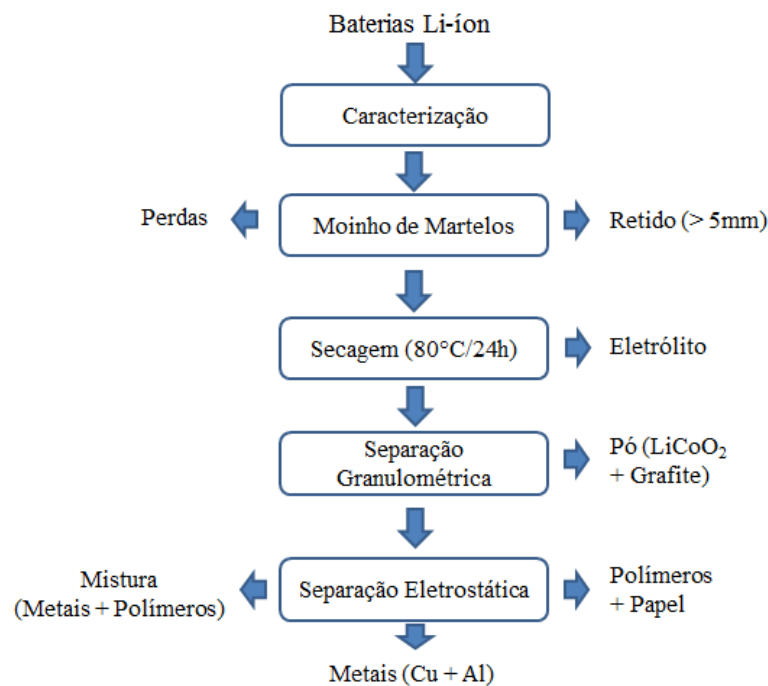
Por fim, realizou-se uma proposta de rota para a separação dos diferentes polímeros. Uma mistura de PP, PEAD, PET e PVC foram separadas através de um conjunto de métodos. Primeiramente, separaram-se as frações de PP e PEAD, das de PET e PVC, através de uma

separação por densidade, onde o meio denso utilizado foi a água ( $\rho = 1 \text{ g.cm}^{-3}$ ) (Spinacé e Paoli, 2005). Posteriormente, as misturas de PP e PEAD, e as misturas de PVC e PET, foram separadas através de separação eletrostática.

#### 4.2.2 Reciclagem de baterias de íon de lítio

As baterias de íon de lítio coletadas também passaram por diversas operações unitárias e análises a fim de caracterizar e recuperar os diferentes materiais presentes, como metais, polímeros e pó (grafite +  $\text{LiCoO}_2$ ), através da separação eletrostática por efeito corona. As etapas foram realizadas conforme o diagrama de blocos apresentado na Figura 21, sendo cada etapa descrita posteriormente.

Figura 21 – Fluxograma da rota proposta para a reciclagem de LIBs.



##### 4.2.2.1 Caracterização das baterias de íon de lítio

As baterias utilizadas neste estudo foram caracterizadas quanto à massa e composição de seus componentes. Uma unidade dos três modelos de baterias selecionadas foram abertos manualmente com ajuda de alicate e serra. Posteriormente seus componentes foram separados e levados a uma estufa a  $80^\circ\text{C}$  durante 24 h para a eliminação do solvente orgânico presente no eletrólito. O material ativo de ambos os eletrodos, presente em forma de pó, foi raspado

com auxílio de uma espátula e recolhido separadamente, e então cada componente foi pesado individualmente. Os componentes particulados com baixa granulometria (pós) do cátodo e do ânodo foram caracterizados por Difração de Raio-X (Rigakue Miniflex300). Os componentes metálicos (eletrodos e *case* metálico) foram caracterizados através de análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), acoplado com Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X (EDS) (Tescan, Vega3). Os componentes do separador polimérico foram caracterizados através de análise em um Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC) (Shimadzu – 60 Plus).

#### 4.2.2.2 Cominuição

As baterias utilizadas neste estudo foram cominuídas em um moinho de martelos (Tiger, modelo A4) com grade de abertura de 5 mm (Figura 22). As partículas que ficaram retidas na grade foram recolhidas separadamente, as partículas que passaram pela grade foram encaminhadas para secagem.

Figura 22 - Moinho de martelos utilizado na cominuição das baterias de íon de lítio.



#### 4.2.2.3 Secagem e separação granulométrica

As partículas provenientes da cominuição foram submetidas a um processo de secagem em estufa a 80 °C durante 24 h, conforme estudo de Costa (2010). Esta etapa é realizada para evaporação e eliminação dos solventes orgânicos presentes no eletrólito das baterias. Após a secagem, o material foi submetido a uma separação granulométrica em peneiras vibratórias (Figura 23). A peneira utilizada foi a de Tyler 65, com uma abertura de 212 µm, assim foi possível a separação da fração fina (LiCoO<sub>2</sub> e grafite), das frações metálicas e poliméricas. Esta separação das frações finas foi baseada em estudo realizado por Bertuol et al. (2015).

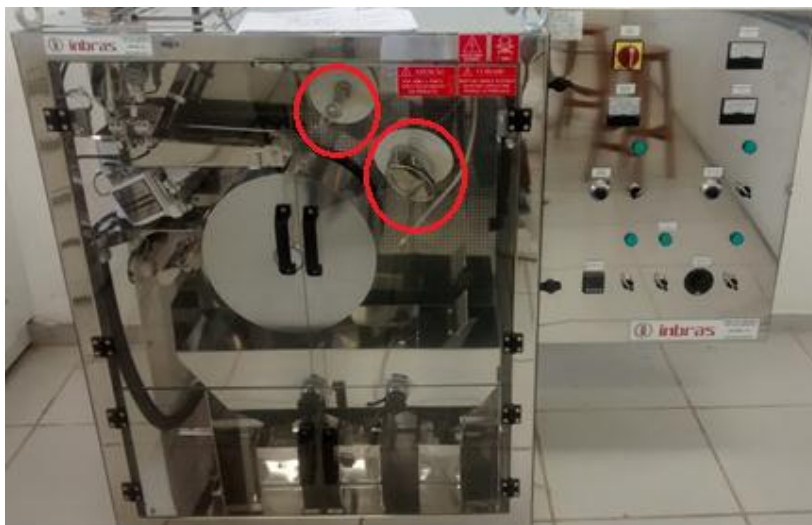
Figura 23 - Peneira vibratória utilizada na etapa de separação granulométrica.



#### 4.2.2.4 Estudos dos parâmetros da separação eletrostática

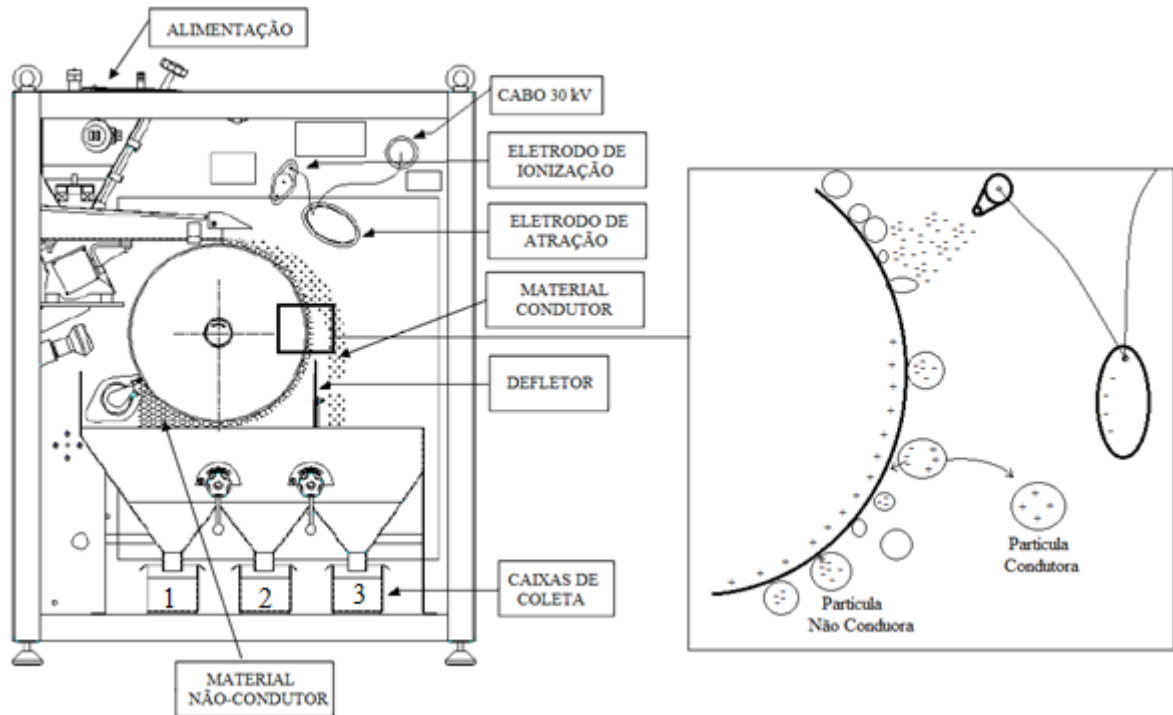
O equipamento utilizado nesta etapa foi o Separador Eletrostático, modelo ESP-14/01S (Inbras – Eriez), com a configuração contendo o eletrodo de ionização e eletrodo de atração. O separador é apresentado na Figura 24.

Figura 24 - Separador eletrostático tipo rolo configurado com eletrodo de ionização e eletrodo de atração.



Na separação eletrostática por efeito corona de uma mistura contendo partículas condutoras e não condutoras (metais e polímeros, respectivamente), todas as partículas adquirem carga através do bombardeamento de íons realizado pelo eletrodo de ionização. As partículas não condutoras retêm a carga negativa adquirida, assim permanecem aderidas ao rolo, que por estar aterrado possui uma carga positiva. As partículas condutoras recebem o bombardeamento de íons e descarregam a carga recebida para o rolo, de forma que ocorre uma polarização. A carga negativa é descarregada no rolo e a carga positiva se concentra na outra face da partícula, fazendo com que a mesma seja atraída pelo eletrodo de atração que possui uma polaridade negativa. Dessa forma, cada material deverá cair em uma determinada caixa coletora, dependendo da sua característica. Os materiais não condutores são recolhidos no primeiro coletor, as partículas condutoras são coletadas no terceiro coletor, enquanto o segundo coletor é composto por uma mistura de partículas condutoras e não condutoras. O esquema prático do funcionamento do separador eletrostático é apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Esquema prático do funcionamento do separador eletrostático tipo rolo aplicado na separação dos componentes de bateria de íon de lítio.



Fonte: Adaptado de INBRAS-ERIEZ (2015).

Após passarem pelo separador eletrostático, as partículas dos diferentes materiais são coletadas nas caixas coletoras em três diferentes frações: fração condutora (FC), fração não condutora (FNC) e fração intermediária (FI). Então, em cada fração as partículas dos diferentes materiais foram separadas manualmente, através do método de seleção com auxílio de pinça e espátula, e pesadas em balança digital (precisão =  $\pm 0,0001$  g). Os resultados são expressos pela porcentagem de metais presente em cada fração, conforme equação abaixo:

$$\text{Metais (\%)} = \frac{m_{mf}}{m_{tf}} \times 100 \quad (4)$$

Onde,  $m_{mf}$  é a massa de metais presente na fração observada,  $m_{tf}$  é a massa total da fração observada. Assim, o presente trabalho tem como objetivo a maximização dos metais na fração condutora (FC), além da minimização dos metais na fração não condutora (FNC) e intermediária (FI).

#### 4.2.2.4.1 Processamento mecânico com substituição do eletrodo de alumínio

Para a realização do estudo dos parâmetros do processo de separação eletrostática dos polímeros e metais presentes nas baterias de íons de lítio, os componentes utilizados devem estar limpos para evitar interferências por contaminação. Devido a isso, nesta etapa utilizaram-se os componentes reais das baterias de íon de lítio, com exceção do eletrodo de alumínio. Esse eletrodo foi substituído por alumínio comercial, devido à dificuldade da remoção do óxido de lítio-cobalto da superfície do cátodo de alumínio. Assim, o material utilizado foi uma folha de alumínio comercial, com massa proporcional ao presente nas baterias (BERTUOL et al., 2015). Os demais componentes (eletrodo de cobre, case metálico, conectores, separador polimérico) foram obtidos da desmontagem manual das baterias de íon de lítio. Os componentes provenientes das baterias foram limpos para não deixar nenhum resíduo, e então o material (50 g) foi cominuído em um moinho de martelos com malha de abertura de 5 mm.

#### 4.2.2.4.2 Parâmetros estudados na separação eletrostática

O processo de separação eletrostática por efeito corona envolve diversos parâmetros, os quais podem ser variados para obtenção da melhor combinação (Figura 26). Neste trabalho, os seguintes parâmetros foram mantidos constantes:

- Distância do eletrodo de ionização ( $D1$ ) = 6 cm;
- Ângulo do eletrodo de ionização ( $\Theta1$ ) =  $25^\circ$ ;
- Ângulo do eletrodo de atração ( $\Theta2$ ) =  $75^\circ$ .

As definições preliminares realizadas foram baseadas no trabalho de Jiang, Jia e Zhenming (2008), o qual estudou a aplicação da separação eletrostática por efeito corona na reciclagem de placas de circuito impresso (PCI). Assim, efetuou-se o estudo das demais variáveis do processo (Tabela 5).

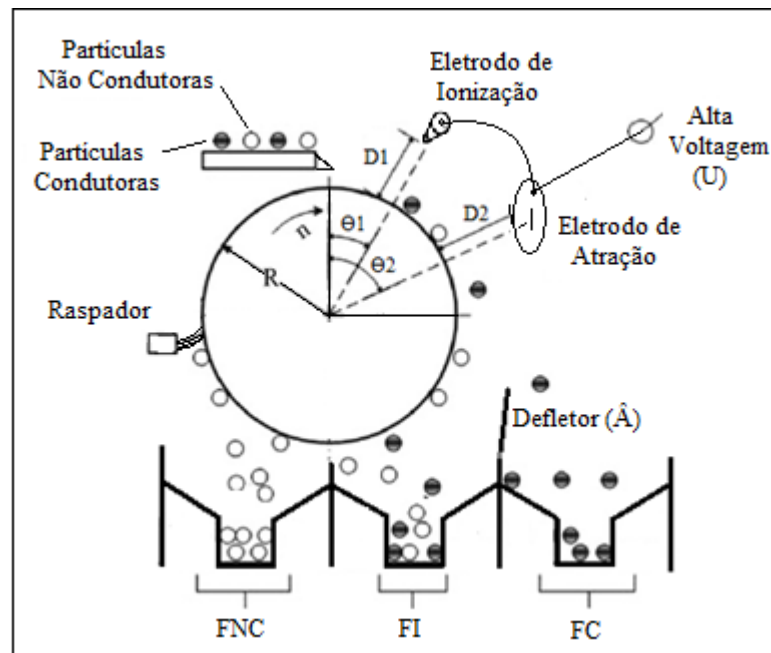


Tabela 5 – Parâmetros estudados na separação eletrostática dos componentes de LIBs.

Parâmetro	Variação	Unidade
Velocidade de rotação do rolo (n)	10 – 20 – 30 – 40 – 50	rpm
Tensão dos eletrodos (U)	15 – 20 – 25 – 30	kV
Distância do eletrodo de atração (D2)	4 – 6 – 9 – 12	cm
Ângulo do defletor do coletor ( $\hat{A}$ )	0 – 2,5 – 5 – 7,5	°

Todos os experimentos foram realizados em ambiente com temperatura de  $20 \pm 2$  °C e umidade relativa do ar entre 40 – 50%, os quais foram medidos através de um termo higrômetro digital (J Prolab). O alimentador vibratório foi mantido em 30% de sua potência de entrada. Dessa forma, foi possível o estudo e verificação dos valores dos principais parâmetros que envolvem a separação eletrostática por efeito corona.

Figura 26 - Parâmetros que podem ser variados na separação eletrostática por efeito corona.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.2.5 Processamento mecânico e balanço global de massa

A partir dos resultados obtidos no estudo dos parâmetros de SE, aplicou-se todo o processamento mecânico para os três modelos de baterias selecionados. O balanço de massa global do processo foi realizado para cada modelo, de modo a apresentar as perdas e

resultados da separação em cada etapa. Os produtos obtidos em cada fração foram individualmente analisados e a separação foi comprovada visualmente. Além disso, o pó separado na etapa de separação granulométrica foi caracterizado por análise em Difração de Raio X (Rigakue Miniflex 300).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

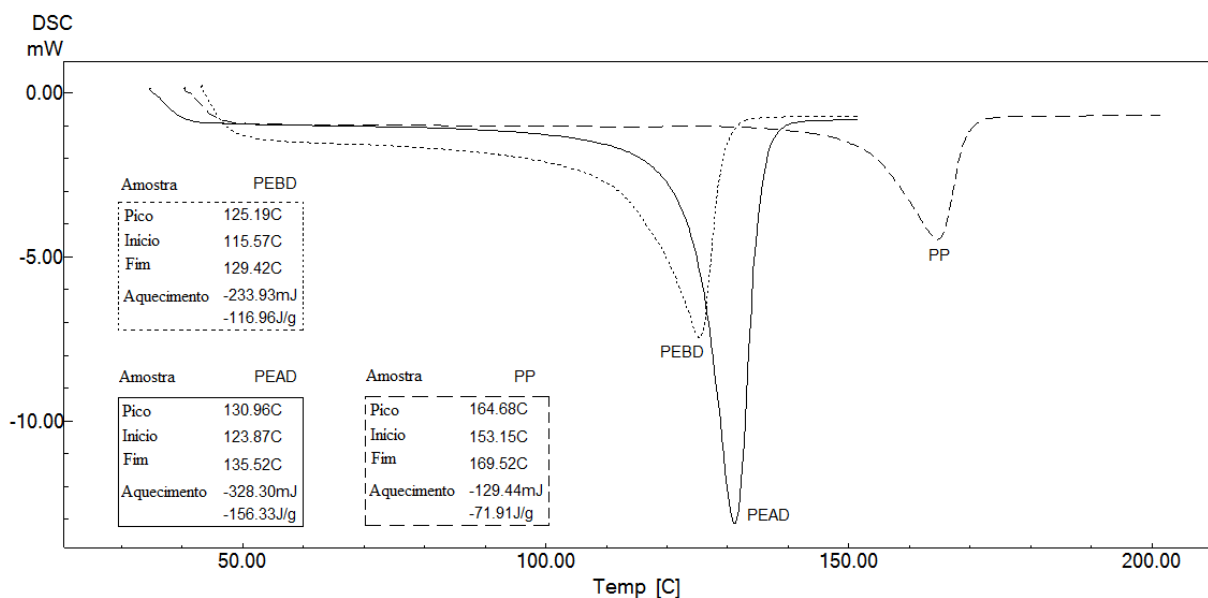
### 5.1 RECICLAGEM DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS

Os resultados obtidos no estudo da aplicação da separação triboeletrostática na reciclagem de resíduos poliméricos são apresentados a seguir.

#### 5.1.1 Caracterização dos polímeros

O método de DSC pode ser definido como a técnica termoanalítica na qual as variações de entalpia da amostra são monitoradas em relação a um material de referência termicamente inerte enquanto ambas são submetidas a uma programação controlada de temperatura (DENARI e CAVALHEIRO, 2012). O equipamento utilizado foi o DSC – 60 Plus da Shimadzu. As amostras (1,8 mg a 3,0 mg) foram submetidas a uma taxa de aquecimento de 20 °C/min, em um intervalo de 20 °C a 150 °C para o PEAD e o PEBD, e de 20 °C a 200 °C para o PP. As análises foram realizadas em dois ciclos térmicos, através da Figura 27 se observa as curvas obtidas para o segundo ciclo térmico das análises realizadas para o PEBD PEAD e PP.

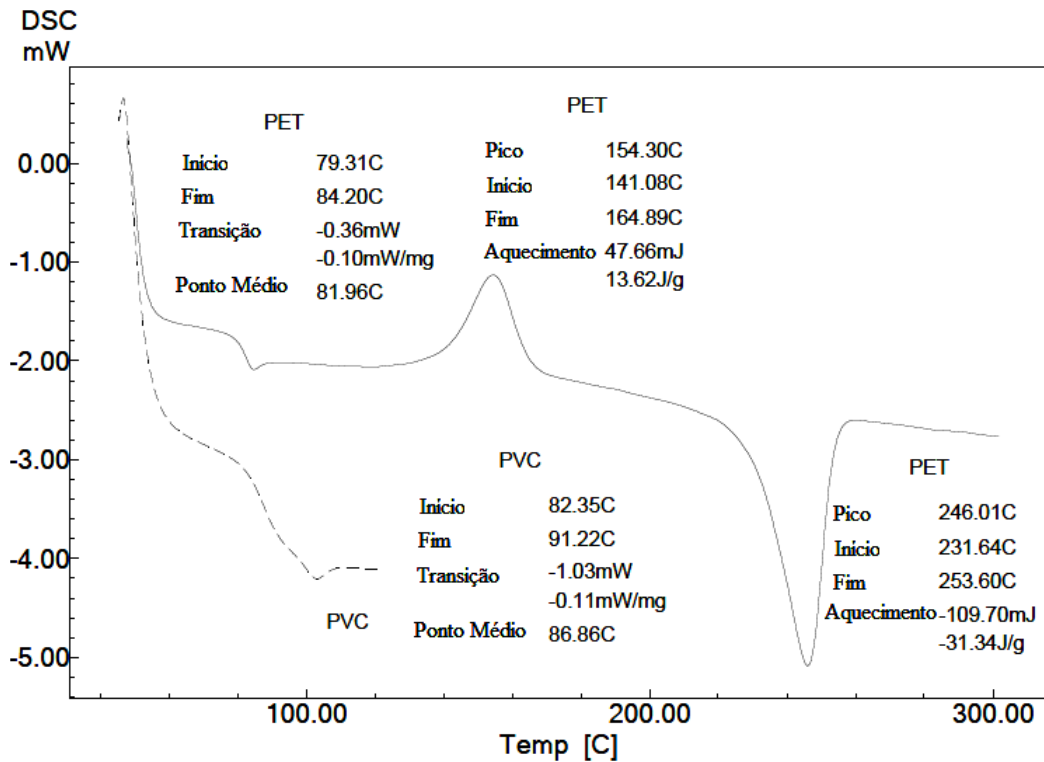
Figura 27 - Curvas de DSC obtidas na caracterização de PEAD, PEBD e PP.



A análise realizada para o PEAD apresenta um pico característico em uma temperatura de 131 °C, a qual representa a temperatura de fusão deste polímero. Esta análise está de acordo com a literatura a qual indica que a temperatura de fusão do PEAD está próximo de 131 °C. A análise para o PEBD apresenta um pico endotérmico em 125 °C, temperatura de fusão mais baixa do que a do PEAD, o que era esperado. O PEBD possui uma temperatura de fusão menor devido a sua estrutura ramificada, enquanto o PEAD possui uma estrutura linear. Assim, o PEAD possui uma maior aproximação das cadeias poliméricas em sua estrutura, resultando em um maior empacotamento das cadeias e conseqüentemente uma maior temperatura de ponto de fusão. Já o PP, obteve uma temperatura de fusão de 165 °C, podendo-se observar um pico bem característico na análise realizada. Esta temperatura está de acordo com a literatura, a qual indica que o pico de fusão do PP deve estar entre 155 °C e 170 °C (MANIVANNAN e SEEHRA, 1997).

Também, foram caracterizadas as partículas de PET e PVC utilizadas nos experimentos. Através da Figura 28, pode-se notar que a análise obtida do PET está exatamente de acordo com a literatura. Em uma temperatura de 82 °C observa-se uma mudança da linha de base, a qual corresponde à temperatura de transição vítrea do PET, e a uma temperatura de 154 °C ocorre um pico exotérmico, correspondente à temperatura de cristalização do polímero, e a uma temperatura de 246 °C tem-se a temperatura de fusão do PET (DEMIREL, YARAS e ELÇIÇEK, 2011). Através da mesma da mesma figura, nota-se que a análise realizada com o PVC também está de acordo com a literatura. Observa-se que a amostra apresenta uma mudança na linha de base correspondente a temperatura de transição vítrea em 86,8 °C, característico de um PVC puro (GONG et al., 2004). Dessa forma, os polímeros utilizados neste estudo foram caracterizados e suas composições foram comprovadas.

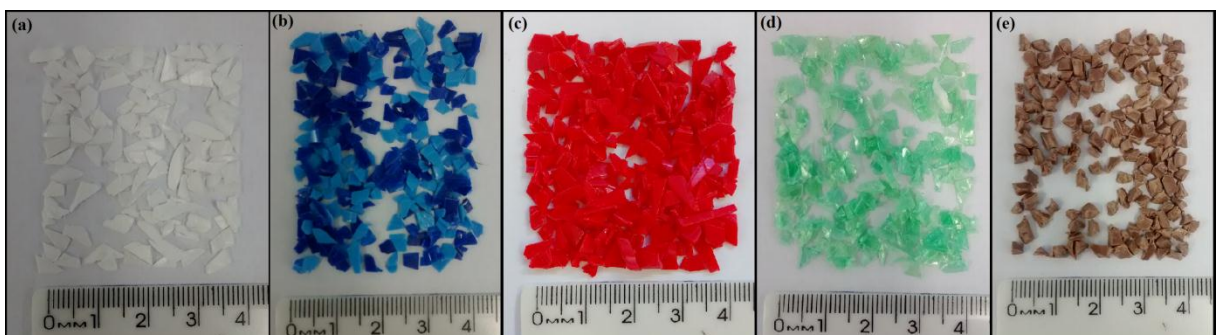
Figura 28 - Curvas de DSC obtidas na caracterização de PET e PVC.



### 5.1.2 Cominuição e separação granulométrica

O material polimérico lavado e seco foi cominuído em moinho de facas, e em seguida foi submetido a um processo de separação granulométrica. As partículas com tamanho médio de  $- 2,8 / +2,0$  mm foram selecionadas. Podem-se observar através da Figura 29, que as partículas de todos os polímeros utilizados neste estudo possuem granulometria dentro da faixa selecionada.

Figura 29 - Partículas poliméricas após processo de lavagem, secagem, cominuição e separação granulométrica, (a) PEAD, (b) PP, (c) PEBD, (d) PET e (e) PVC.



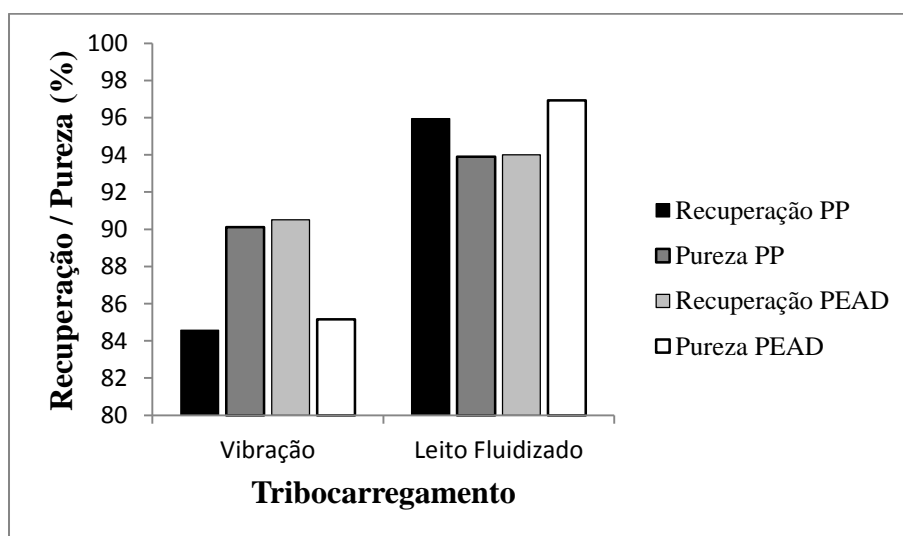
### 5.1.3 Tribocarregamento

#### 5.1.3.1 Escolha do mecanismo de tribocarregamento

A escolha do mecanismo de tribocarregamento é de suma importância para este trabalho, uma vez que é ele que definirá a eficiência, ou a não eficiência, do carregamento das partículas. Alguns autores citam o tribocarregamento sólido de fase única (vibração, tambor rotativo, etc) como um bom meio de carregar eletricamente as partículas poliméricas (ASKA et al., 2013; INCULET, CASTLE e BROWN, 1994). Porém, os autores relatam que o tribocarregamento com duas fases gás-sólido, através do uso de leito fluidizado ou ciclone, se mostra mais eficiente no carregamento das partículas (CALIN et al., 2008; LEE e SHIN, 2002; PARK, JEON e PARK, 2007b; PARK et al., 2008a).

Neste estudo, os resultados obtidos estão de acordo com o que é relatado pelos autores citados anteriormente. Observa-se na Figura 30 que o tribocarregamento em leito fluidizado (de duas fases gás-sólido) obteve um melhor resultado, com uma recuperação de 95,95% de PP (pureza de 93,9%), e recuperação de 94,0% de PEAD (pureza de 96,9%). Já o tribocarregamento realizado com sistema de vibração obteve uma recuperação de 84,5% de PP (pureza de 90,1%), e recuperação de 90,5% de PEAD (pureza de 85,1%).

Figura 30 - Escolha do melhor sistema de tribocarregamento.



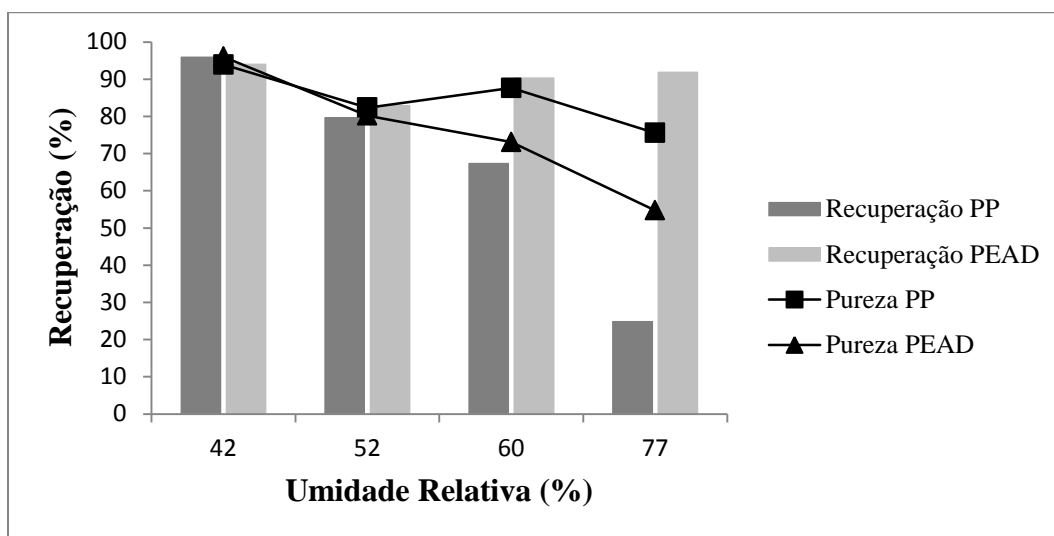
Considerando a dificuldade de carregamento e separação dos dois polímeros estudados, como citado anteriormente, o resultado obtido está coerente com o relatado pelos autores estudados quanto ao melhor mecanismo de tribocarregamento. Isto se deve ao fato de que um tribocarregamento realizado em um sistema de duas fases gás-sólido (leito fluidizado) proporciona uma maior colisão entre as partículas, proporcionando assim, um carregamento mais eficiente das partículas poliméricas. O sistema sólido de fase única (vibração) se mostrou relativamente viável para uma separação de PP e PEAD, porém os resultados obtidos foram inferiores. Desta forma, todos os testes realizados nas etapas posteriores foram realizados com um tribocarregamento em leito fluidizado de PP.

#### *5.1.3.2 Estudo do efeito da umidade relativa do ar*

Uma vez definida a metodologia para a realização do tribocarregamento, realizou-se o estudo do efeito da umidade relativa do ar no carregamento elétrico das partículas. Observa-se na Figura 31, que tanto a recuperação quanto a pureza dos polímeros caem drasticamente com o aumento da umidade relativa do ar (UR).

Em uma UR de 42% obteve-se uma recuperação e pureza dos polímeros satisfatória. Nessa umidade, a recuperação de PP foi de 95,9% (pureza de 93,9%), e de PEAD de 94,0% (pureza de 96,05%), respectivamente. Já em uma umidade relativa de 52% as recuperações e purezas já caem para patamares de cerca de  $80\% \pm 2\%$  para ambos os polímeros. Aumentando a umidade, os valores chegam a uma recuperação muito baixa de 24,8% de PP em umidade de 77%. Observa-se que nessa mesma umidade, obteve-se uma recuperação de 91,8% de PEAD, porém com uma pureza muito baixa de 54,7%, o que não é favorável ao processo, pois o objetivo é a maior taxa de recuperação com a maior pureza possível dos dois polímeros estudados.

Figura 31 - Estudo do efeito da umidade relativa do ar no tribocarregamento das partículas de PP e PEAD.



Nota-se que a umidade relativa do ar possui uma alta influência no tribocarregamento das partículas. Em estudo realizado por Li, Wu e Xu (2015), a umidade relativa foi estudada para o tribocarregamento de partículas de ABS, PS e PVC em um tribocarregador ciclone de PMMA. Segundo os autores a maior carga adquirida pelos polímeros estudados ocorre em uma umidade entre 45% e 55%, sendo umidades maiores totalmente desfavoráveis para o tribocarregamento das partículas. Assim, os resultados obtidos estão de acordo com o estudo apresentado na literatura. Também, em outra pesquisa realizada por Park, Jeon e Park (2008b) foi realizado o estudo do efeito da umidade relativa no tribocarregamento de partículas de PMMA e PVC em uma caixa de agitação de PEAD. Segundo o estudo, a densidade de carga é alterada pela umidade relativa, pois a água perturba a superfície de polarização entre as partículas e reduz a densidade de carga, descarregando as partículas carregadas. Assim, quanto maior a umidade relativa menor será a carga adquirida, obtendo-se os melhores resultados para umidades abaixo de 40%.

O estudo apresentado no presente trabalho, não realizou testes com umidades abaixo de 42% devido à dificuldade de manter a UR em patamares mais baixos. Isso se deve principalmente as condições climáticas da região geográfica onde foi realizado o estudo, dificultando a obtenção de baixas UR. Porém, o trabalho está de acordo com Park et al. (2007a), o qual indica que é extremamente difícil controlar a umidade relativa em patamar muito baixo em uma planta industrial.

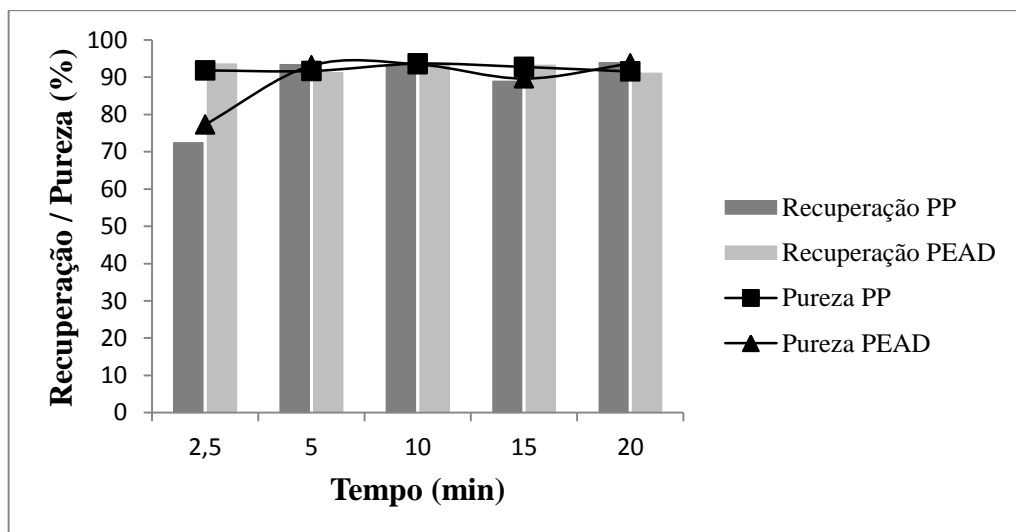


Portanto, devido à dificuldade e custo do controle da umidade relativa em uma planta industrial, este trabalho teve como objetivo a realização do processo em umidades mais altas. Valores próximos de 40% foram testados de forma que poderiam ser facilmente reproduzidos em escala industrial.

### 5.1.3.3 Estudo do efeito do tempo de residência do tribocarregamento

Estabelecido o tribocarregamento em leito fluidizado de PP e o processo realizado com umidade relativa em torno de 42%, realizou-se o estudo do tempo de residência do tribocarregamento. Devido à importância deste parâmetro, os experimentos nesta etapa foram realizados em duplicata para melhor definição. Pode-se observar na Figura 32 que o tempo de 2,5 minutos não é suficiente para a realização do tribocarregamento das partículas, uma vez que a recuperação de PP foi muito baixa, cerca de  $72,4\% \pm 1,6\%$ , apesar da recuperação de PEAD ser de  $93,5\% \pm 0,1\%$ . Já em um tempo de 5 minutos, pode-se notar um aumento nas recuperações e purezas dos polímeros estudados, sendo que o PP obteve uma recuperação de  $93,4\% \pm 1,6\%$  (pureza de  $91,6\% \pm 2,3\%$ ), e o PEAD obteve uma recuperação de  $91,2\% \pm 2,8\%$  (pureza de  $93,1\% \pm 1,4\%$ ). Através da Figura 32, pode-se notar que os demais tempos, de 10, 15 e 20 min, obtiveram valores muito parecidos com o de 5 minutos.

Figura 32 - Estudo do efeito do tempo de residência no tribocarregamento das partículas de PP e PEAD.



Dascalescu et al. (2005), em seu estudo, relatam que a carga aumenta com o aumento do tempo de residência e fica saturada com valores muito altos. No entanto, o tempo de residência não necessita ser longo o suficiente para a saturação da carga, uma vez que também existem problemas para tempos de residência mais longos. Segundo Matsushita et al. (1999), quando o tempo de residência é muito longo, as colisões entre as partículas diminuem, porém as colisões de partículas e parede continuarão a acontecer e algumas partículas podem adquirir carga oposta à polaridade original, fazendo com que haja a diminuição da recuperação e da pureza do produto final.

Assim, definiu-se um tempo de 5 minutos como padrão para o tribocarregamento, pois, além da saturação citada em tempos maiores, quanto menor o tempo menor será o gasto energético no processo de tribocarregamento em leito fluidizado, o que é de suma importância em um processo industrial.

#### **5.1.4 Determinação das variáveis ideais para a realização da separação eletrostática**

Após a definição dos parâmetros de tribocarregamento, realizou-se o estudo dos parâmetros que envolvem a etapa de separação eletrostática. Os parâmetros iniciais utilizados foram:

- Ângulo do defletor ( $\hat{A}$ ) =  $0^\circ$ ;
- Distância do eletrodo de atração (D2) = 3 cm;
- Tensão do eletrodo de atração (U) = 30 kV;
- Velocidade de rotação do rolo (n) = 10 rpm.

Cada parâmetro foi definido um a um a começar pela variação do ângulo do defletor. Os resultados obtidos são discutidos a seguir.

##### *5.1.4.1 Efeito do ângulo do defletor do coletor*

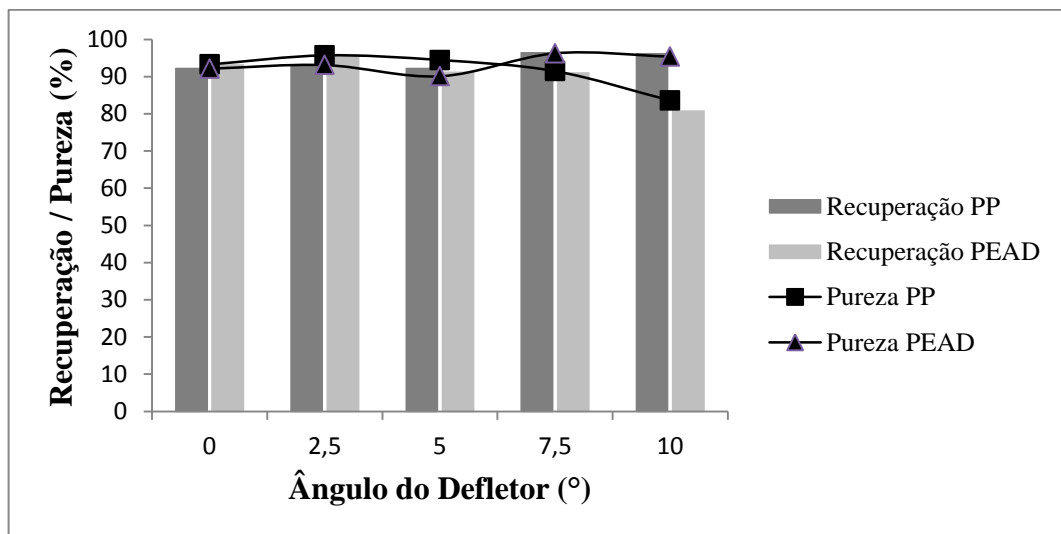
Primeiramente, através de testes preliminares observou-se que dependendo da carga adquirida pelas partículas poliméricas e da velocidade de rotação do rolo, as partículas poderiam ser lançadas mais longe ou mais perto no compartimento do coletor. Assim, a primeira variável a ser estudada foi o ângulo do defletor do coletor.

Observa-se através da Figura 33 que o ângulo que obteve o melhor resultado foi o de  $2,5^\circ$ , o qual proporcionou uma recuperação de PP de 92,8% (pureza de 95,7%), e recuperação de PEAD de 95,9% (pureza de 93,1%), valores um pouco acima dos obtidos para o ângulo de

0°, que foram de recuperação de 92,2% (pureza de 93,2%) para o PP, e recuperação de 93,2% (pureza de 92,1%) para o PEAD.

Nota-se que com o aumento do ângulo para 5°, 7,5° e 10° ocorre uma diminuição na recuperação de PEAD. Isto ocorre pelo fato de que quanto maior o ângulo do defletor mais difícil é para as partículas de PEAD ultrapassarem o mesmo, fazendo com que as mesmas fiquem retidas no coletor destinado as partículas de PP.

Figura 33 - Estudo do efeito do ângulo do defletor do coletor na separação eletrostática de PP e PEAD.



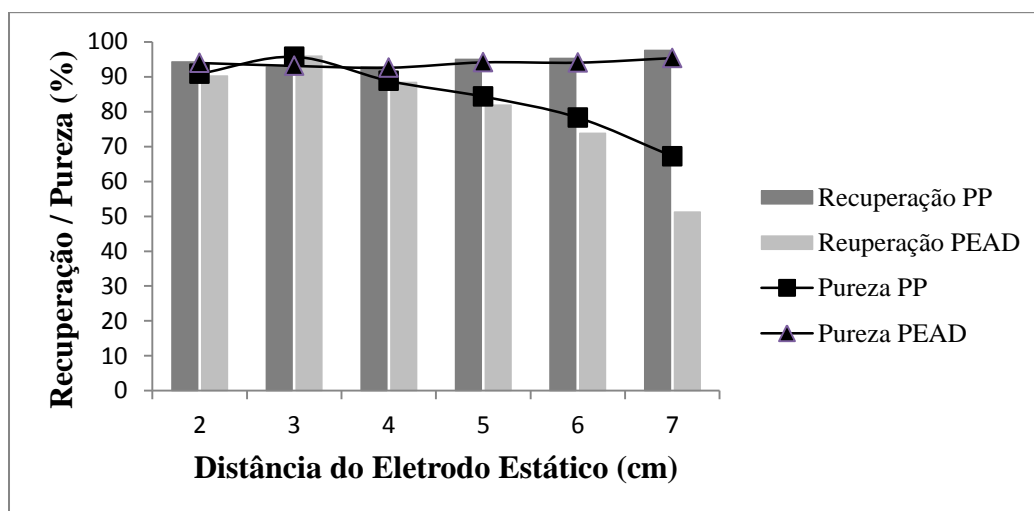
A separação eletrostática de materiais poliméricos em um separador tipo rolo é muito pouco difundida na literatura. Tilmatine et al. (2010), foi o único trabalho encontrado na literatura que realizou o estudo da separação eletrostática, de grânulos de polímeros virgens de PEAD e PEBD, em separador eletrostático tipo rolos. No entanto, o mesmo não cita o ângulo do defletor do coletor como uma variável estudada, não havendo como comparar este resultado com a literatura. Sendo assim, define-se 2,5° como o melhor ângulo do defletor do coletor do separador eletrostático.

#### 5.1.4.2 Efeito da distância do eletrodo de atração

Definido o ângulo do defletor, realizou-se o estudo da distância entre o eletrodo de atração e a superfície do rolo do separador. A Figura 34 apresenta os resultados obtidos para a distância do eletrodo. Observa-se que a distância que proporcionou os melhores resultados foi

a de 3 cm, a qual obteve uma recuperação de PP de 92,8% (pureza de 95,7%), e recuperação de PEAD de 95,9% (pureza de 93,1%). Em distâncias maiores nota-se que a recuperação de PEAD vai decaindo, obtendo uma recuperação abaixo de 90% a partir de 4 cm. Isso se deve ao fato de que quanto maior a distância do eletrodo, maior deverá ser a tensão aplicada no eletrodo para que ele seja capaz de atrair as partículas carregadas positivamente, no caso de PEAD. Assim, as partículas de PEAD acabam sendo coletadas no coletor destinado ao PP, fazendo com que a pureza de PP também diminua significativamente com o aumento da distância do eletrodo.

Figura 34 - Estudo do efeito da distância do eletrodo de atração na separação eletrostática de PP e PEAD.



A distância de 2 cm obteve como resultado a recuperação e pureza de PP de 94,3% e 90,8%, e de PEAD de 90,3% e 93,9%, respectivamente, valores tão bons quanto os obtidos com uma distância de 3 cm. Porém, com uma distância tão curta entre o eletrodo e o rolo, ocorre uma grande descarga elétrica do eletrodo no rolo, a qual pode ser identificada através de pequenos raios (Figura 35). Dessa forma, essa distância não pode ser considerada, já que a ocorrência de descargas elétricas pode prejudicar o funcionamento do separador eletrostático.

Figura 35 - Descarga elétrica do eletrodo de atração no rolo a uma distância de 2 cm.



Por fim, os resultados obtidos estão de acordo com o trabalho de Tilmatine et al. (2010), o qual concluiu que a distância mais eficiente na separação seria a de 3 cm. Porém, este trabalho havia testado apenas duas distâncias, de 3 e 7 cm, não apresentando a tendência do aumento gradual da mesma. Sendo assim, define-se 3 cm como sendo a melhor distância na separação das partículas de PP e PEAD.

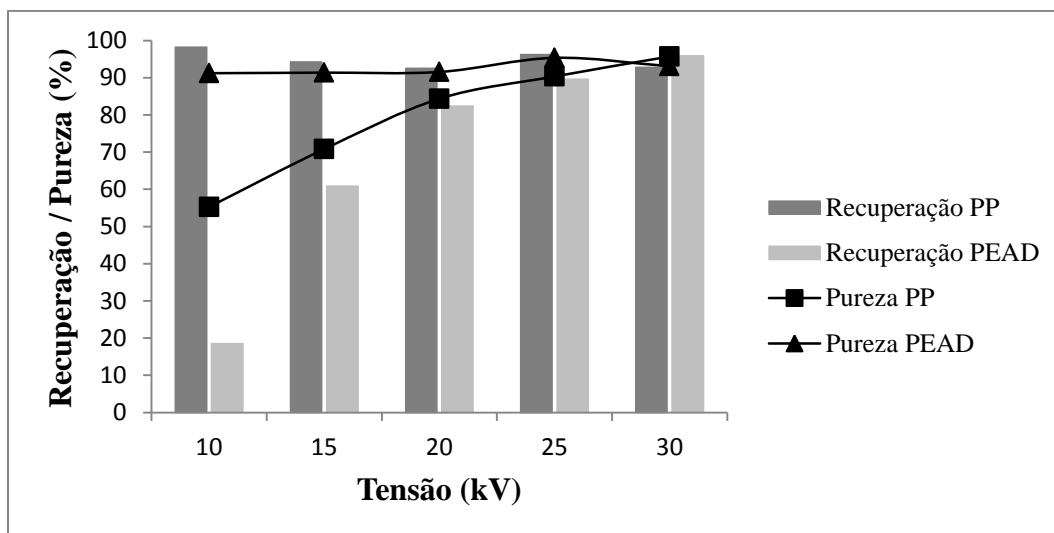
#### *5.1.4.3 Efeito da tensão do eletrodo de atração*

Fixados o ângulo do defletor e a distância do eletrodo de atração, observou-se a influência da tensão do eletrodo de atração. A tensão aplicada no eletrodo é a variável mais estudada em separação eletrostática de resíduos poliméricos, sobretudo em separação eletrostática em separador tipo queda livre (AKSA et al., 2013; DODBIBA et al., 2005; PARK, JEON e PARK, 2007b; PARK et al., 2008b). Através da Figura 36 pode-se observar claramente que quanto menor é a tensão aplicada no eletrodo, menor é a recuperação de PEAD e menor é a pureza de PP.

O melhor resultado obtido foi com tensão de 30 kV, onde obteve-se uma recuperação de PP de 92,8% (pureza de 95,7%), e uma recuperação de PEAD de 95,9% (pureza de 93,1%). Baixando-se a tensão para 25 kV já se observa uma queda na recuperação de PEAD, a qual cai para 89,6%, enquanto que a pureza de PP também cai, chegando a 90,3%. Em

valores menores, 20, 15 e 10 kV de tensão, a recuperação de PEAD e pureza de PP continuam diminuindo, sendo desfavorável ao processo.

Figura 36 - Estudo do efeito da tensão eletrodo de atração na separação eletrostática de PP e PEAD.



A tensão necessária para a separação das partículas está diretamente relacionada à densidade de carga que as partículas adquirem no processo de tribocarregamento. Segundo Park, Jeon e Park (2007), se a densidade de carga das partículas é alta, ela pode ser facilmente desviada por uma baixa tensão, já se a densidade de carga das partículas é baixa, ela necessita de uma alta tensão para que seja desviada. Dessa forma, considerando a dificuldade de separação eletrostática de uma mistura de PP e PEAD, como já comentado, é necessária uma alta tensão para a separação eficiente destes polímeros. Sendo assim, a tensão definida para a continuidade do trabalho é a de 30 kV.

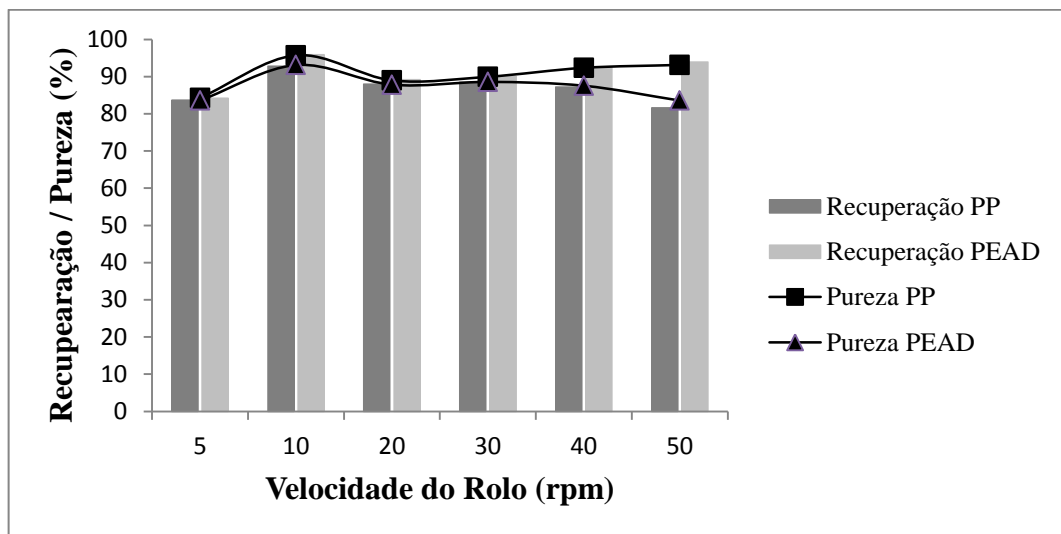
#### 5.1.4.4 Efeito da velocidade de rotação do rolo

Por fim, definidos o ângulo do defletor, e a distância e a tensão do eletrodo de atração, realizou-se o estudo do efeito da velocidade de rotação do rolo na separação eletrostática de PP e PEAD. Os resultados são apresentados na Figura 37.

Observa-se que em uma velocidade de 5 rpm as recuperações e purezas não são satisfatórias, isso ocorre pois em uma velocidade tão baixa o rolo não possui uma rotação contínua, possuindo pequenas variações que interferem no resultado. Já a uma velocidade de

10 rpm obteve-se o melhor resultado. Nessa velocidade a recuperação de PP foi de 92,8% (pureza de 95,7%), e uma recuperação de PEAD de 95,9% (pureza de 93,1%). Em velocidades maiores, 20, 30, 40 e 50 rpm, ocorre uma clara diminuição na recuperação de PP e na pureza de PEAD. Isso ocorre, pois com o aumento da velocidade do rolo as partículas neutras de PP, que não se aderem ao rolo, acabam sendo lançadas mais longe, e acabam ultrapassando o defletor do coletor e caindo no coletor destinado ao PEAD.

Figura 37 - Estudo do efeito da velocidade de rotação do rolo na separação eletrostática de PP e PEAD.



Em seu estudo, Tilmatine et al. (2010) relata que entre as velocidades de 40, 80 e 120 rpm, a mais apropriada para a separação de PEAD e PEBD foi a de 40 rpm, porém o estudo não apresenta se velocidades menores seriam mais eficientes. Sendo assim, a velocidade de 10 rpm é a mais apropriada para o processo estudado, uma vez que consegue separar não só as partículas positivas (PEAD) e negativas (parte das de PP), mas também consegue realizar a separação das partículas neutras (parte das de PP) das partículas positivas. Por fim, as quatro variáveis relacionadas ao processo de separação eletrostática foram definidas.

#### 5.1.4.5 Melhores resultados obtidos

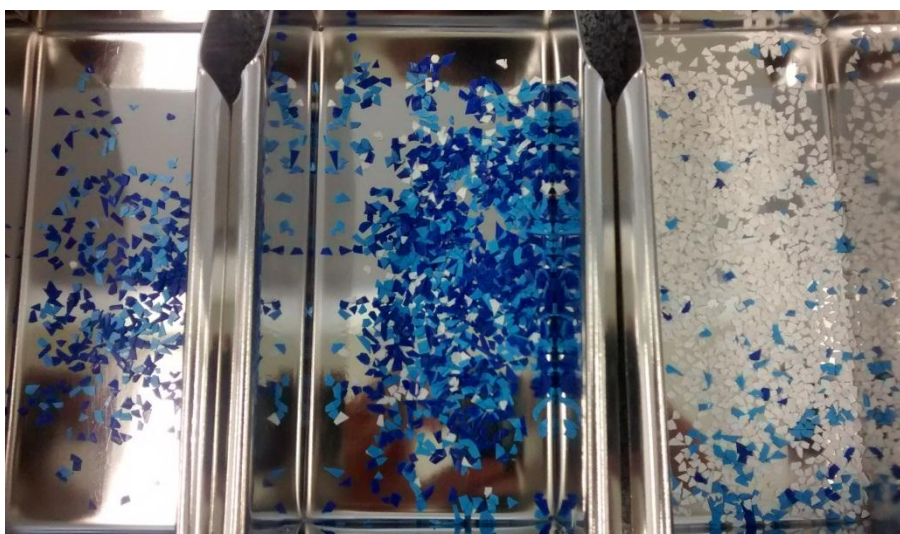
Realizados todos os experimentos, as melhores condições de carregamento triboeletrostático e separação eletrostática foram determinadas. Os melhores resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Descrição das melhores condições do processo de separação triboeletrostática de PP e PEAD.

Parâmetro	Condição
Mecanismo de Tribocarregamento	Leito Fluidizado
Umidade Relativa do Ar	$\pm 42\%$
Tempo de Residência	5 min
Ângulo do Defletor	$2,5^\circ$
Distância do Eletrodo	3 cm
Ângulo do Eletrodo (fixado)	$45^\circ$
Tensão	30 kV
Velocidade do Rolo	10 rpm

Os parâmetros apresentados na Tabela 6 foram aplicados em triplicata para a separação de PP e PEAD, de forma a confirmar a reprodutibilidade do processo realizado. Os resultados obtidos nos testes foram: recuperação de PP de  $91,9\% \pm 1,1\%$ ; (pureza de  $93,5\% \pm 2,1\%$ ); e recuperação de PEAD de  $93,5\% \pm 2,2\%$  (pureza de  $92,0\% \pm 1,2\%$ ). Visualmente, o melhor resultado obtido pode ser observado através da Figura 38, onde nota-se claramente a separação das partículas de PP (azul claro e escuro) das de PEAD (branco).

Figura 38 - Separação das partículas de PP (azul claro e escuro) e PEAD (branca) nas melhores condições estudadas.





### 5.1.5 Aplicação do melhor resultado em outras misturas poliméricas

Os melhores resultados obtidos na separação triboeletróstática de PP e PEAD, e apresentados na Tabela 6, foram testados na separação de outras misturas poliméricas, as quais os resultados são apresentados a seguir.

#### 5.1.5.1 Separação de PP e PEBD

A separação da mistura de PP e PEBD segue o mesmo princípio da separação de PP e PEAD, uma vez que os PE's estão lado a lado nas maiorias das séries triboelétricas (Tabela 3), ou muitas vezes são considerados apenas como PE.

Nos testes, o PP adquiriu carga negativa ou neutra, enquanto o PEBD adquiriu cargas positivas e foi atraído pelo eletrodo de atração. Nesta separação, obteve-se uma recuperação de PP de 90,2% (pureza de 93,8%), e uma recuperação de PEBD de 94,2% (pureza de 90,8%). A separação pode ser visualizada através da Figura 39, onde claramente observa-se a separação de PP (azul escuro e claro) do PEBD (vermelho).

Figura 39 - Separação das partículas de PP (azul escuro e claro) e PEBD (vermelha) nas melhores condições estudadas.



### 5.1.5.2 Separação de PET e PVC

A separação da mistura de PET e PVC obteve resultados que diferem da literatura. Segundo a Tabela 3, na maioria das séries triboelétricas o PET está ao lado mais positivo e o PVC está ao lado mais negativo. Já o PP, material do leite, está localizado ao meio da série, (+) PET – PP – PVC (-). Porém, nos testes realizados o PET ficou aderido ao rolo do separador, apontado que o mesmo obteve uma carga negativa, enquanto o PVC foi atraído pelo eletrodo de atração, indicando que este adquiriu uma carga positiva. Desta forma, a série triboelétrica correta segundo este estudo seria (+) PVC – PP – PET (-). Sendo assim, a separação obteve uma recuperação de PET de 96,8% (pureza de 95,9%), e uma recuperação de PVC de 95,9% (pureza de 96,8%). A separação pode ser visualizada através da Figura 40, onde claramente observa-se a separação do PET (verde escuro e claro) do PVC (marrom).

Figura 40 - Separação das partículas de PET (verde escuro e claro) e PVC (marrom) nas melhores condições estudadas.



### 5.1.6 Aplicação do processo de cominuição seguido de separação eletrostática

Segundo Wu, Li e Xu (2013), os materiais podem adquirir carga durante as etapas de cominuição e separação granulométrica. Sendo assim, com objetivo de analisar a possibilidade de não realizar o processo de tribocarregamento, realizou-se experimentos com a separação eletrostática sendo aplicada logo após a cominuição das partículas. Através das Figuras 41 e 42, observa-se que realmente as partículas poliméricas adquirem uma carga

elétrica durante o processo proporcionando uma pequena separação entre as diferentes partículas. Porém, esta carga não é suficiente para a realização de uma separação eficiente. Para melhor realizar o estudo deste processo direto, novos testes devem ser realizados, de forma a confirmar a possibilidade, ou não, da não realização do processo de tribocarregamento.

Figura 41 - Separação das partículas de PP (azul claro e escuro) e PEAD (branca), sem tribocarregamento e após o processo de cominuição em moinho de facas com malha de 10 mm.



Figura 42 - Separação das partículas de PP (azul claro e escuro) e PEAD (branca), sem tribocarregamento e após o processo de cominuição em moinho de facas com malha de 5 mm.

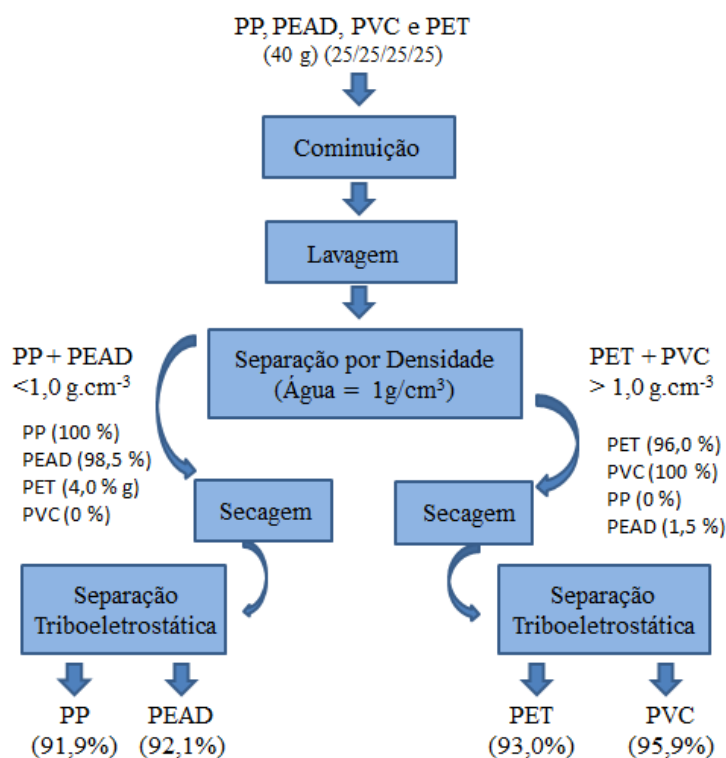


### 5.1.7 Proposta de rota para a reciclagem de resíduos poliméricos

Por fim, considerando os resultados obtidos no processo de separação eletrostática e as possíveis separações das misturas binárias de polímeros, propõem-se um processo para a separação de uma mistura de PP, PEAD, PVC e PET. Esta proposta envolve a cominuição, lavagem, separação por densidade (água), secagem e separação triboeletrostática, de forma a recuperar os diferentes polímeros com uma alta taxa de recuperação ao final do processo (Figura 43).

Observa-se que através da utilização da água ( $\rho = 1,0 \text{ g.cm}^{-3}$ ) foi possível a separação dos polímeros de densidade menor, PP ( $\rho = 0,90 - 0,91 \text{ g.cm}^{-3}$ ) e PEAD ( $\rho = 0,94 - 0,97 \text{ g.cm}^{-3}$ ), dos de densidade maior, PET ( $\rho = 1,35 - 1,40 \text{ g.cm}^{-3}$ ) e PVC ( $\rho = 1,30 - 1,70 \text{ g.cm}^{-3}$ ). A segunda etapa do processo envolve uma separação triboeletrostática, onde é possível a separação de uma mistura de PP/PEAD, e de uma mistura de PET/PVC, como apresentado neste trabalho. Através deste processo, foi possível a recuperação de 92,9 % de PP, 92,1% de PEAD, 93,0% de PET e 95,9 % de PVC, com purezas acima de 92%. Assim, a rota proposta se mostra muito eficiente na recuperação dos diferentes polímeros a partir de uma mistura inicial contendo quatro diferentes tipos de polímeros.

Figura 43 – Rota proposta para a reciclagem de uma mistura de resíduos poliméricos.



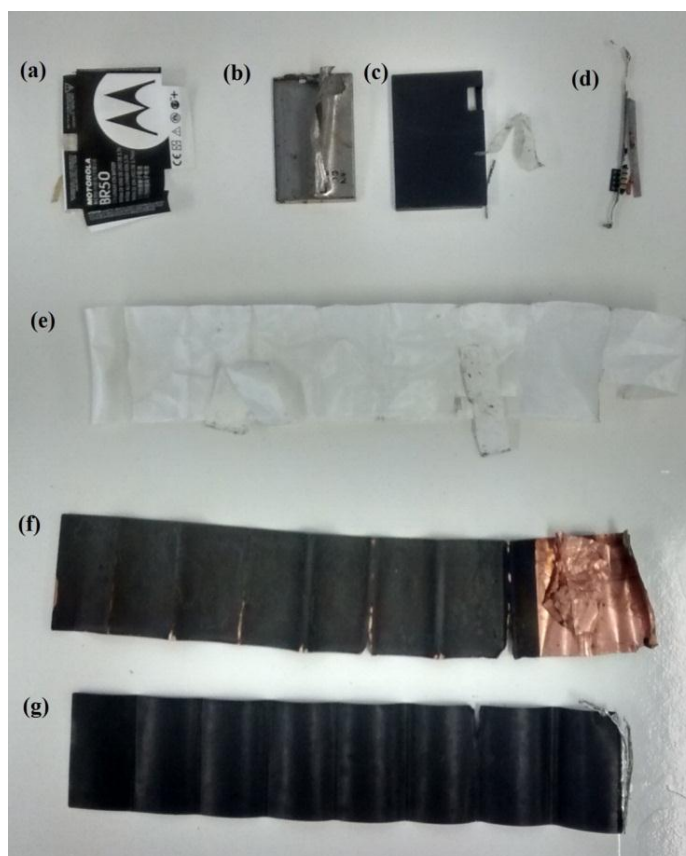
## 5.2 RECICLAGEM DE BATERIAIS DE ÍON DE LÍTIO

Os resultados obtidos no estudo da aplicação da separação eletrostática na reciclagem de baterias de íon de lítio são apresentados a seguir.

### 5.2.1 Caracterização mássica das baterias de íon de lítio

As baterias de íon de lítio foram manualmente abertas e seus componentes foram separados. A Figura 44 apresenta os diferentes constituintes presentes em uma bateria de íon de lítio. Observa-se a presença de um invólucro polimérico (a), de um invólucro metálico (b), de polímeros pertencentes à estrutura externa (c), dos conectores que fazem o contato elétrico da bateria (d), do separador polimérico que fica entre o cátodo e o ânodo (e), do ânodo composto por um eletrodo de cobre recoberto por camadas de grafite (f), e pelo cátodo composto por uma eletrodo de alumínio recoberto por uma material ativo catódico, geralmente  $\text{LiCoO}_2$  (g).

Figura 44 - Componentes presentes em uma bateria de íon de lítio (Bateria II).



Cada componente das baterias foi separado e pesado, com objetivo da determinação da composição mássica das mesmas. A Tabela 7 apresenta a caracterização dos componentes presentes realizada para uma unidade de cada bateria selecionada. A massa total das baterias varia de, 18,5 g a 27,75 g, aproximadamente. Já a massa dos componentes dos eletrodos varia de 33,3% m/m para a bateria 2, até 64,3 % m/m das baterias do modelo 3. A separação dos componentes é possível em todas as baterias, porém algumas apresentam grande dificuldade, principalmente quanto a separação do material ativo catódico do eletrodo de alumínio.

Tabela 7 - Quantificação dos componentes presentes nas baterias de íon de lítio estudadas.

Componente	Bateria 1		Bateria 2		Bateria 3	
	Massa (g)	Fração (%)	Massa (g)	Fração (%)	Massa (g)	Fração (%)
Papel	0	0,00	0,03	0,16	0	0
Invólucro Metálico	5,01	18,05	7,55	40,82	2,88	14,39
Polímeros	1,45	5,23	2,098	11,34	0,94	4,70
Conector	0,24	0,86	0,41	2,22	0,63	3,15
Separador Polimérico	0,9	3,24	0,305	1,65	0,55	2,75
Cobre	2,29	8,25	0,967	5,23	1,62	8,10
Grafite	3,74	13,48	1,443	7,80	3,35	16,74
Alumínio	1,45	5,23	0,64	3,46	0,98	4,90
LiCoO <sub>2</sub>	8,83	31,82	3,104	16,78	6,92	34,58
Eletrólito	3,84	13,84	1,95	10,54	2,14	10,69
Σ	27,75	100,00	18,497	100,00	20,01	100

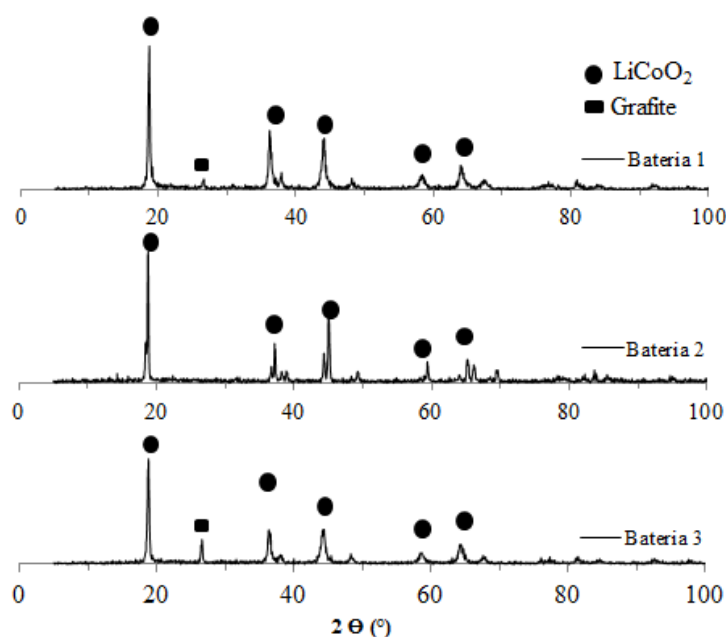
Entre os demais componentes, as folhas de cobre e alumínio representam uma fração entre 8,69% m/m para o modelo 2, a 13,8% m/m para o modelo 1. O material ativo do cátodo, que contém lítio e cobalto, representa entre 16,78% a 34,58% da massa total da bateria, enquanto que o material ativo do ânodo (grafite) representa entre 7,8% a 16,74%. Já os separadores compõem 2,55% m/m em média. A quantificação do eletrólito foi realizada através da diferença de massa inicial das baterias antes do processo de abertura e após a secagem em estufa. A variação da quantidade de voláteis encontrada nas baterias foi de

10,54% para o modelo 2 até 13,84% para o modelo 1. Esses voláteis são representados pelos solventes e pelos aditivos que compõem o eletrólito. A quantificação das baterias de íon de lítio estão de acordo com a literatura para as baterias 1 e 3 (BERTUOL et al., 2015; COSTA, 2010). Já a bateria 2 apresenta algumas porcentagens mássicas que divergem da literatura, o que pode ser atribuído ao fato do case metálico representar uma grande fração mássica desta bateria, o qual corresponde a 40,83%.

### 5.2.2 Caracterização dos componentes por análises qualitativas

Visando à caracterização dos materiais ativos presentes nos eletrodos, foram realizados testes em DRX com o objetivo de identificar os componentes presentes. Os resultados confirmaram que o material catódico das três baterias é o  $\text{LiCoO}_2$ , enquanto o material anódico é o grafite (Figuras. 45 e 46).

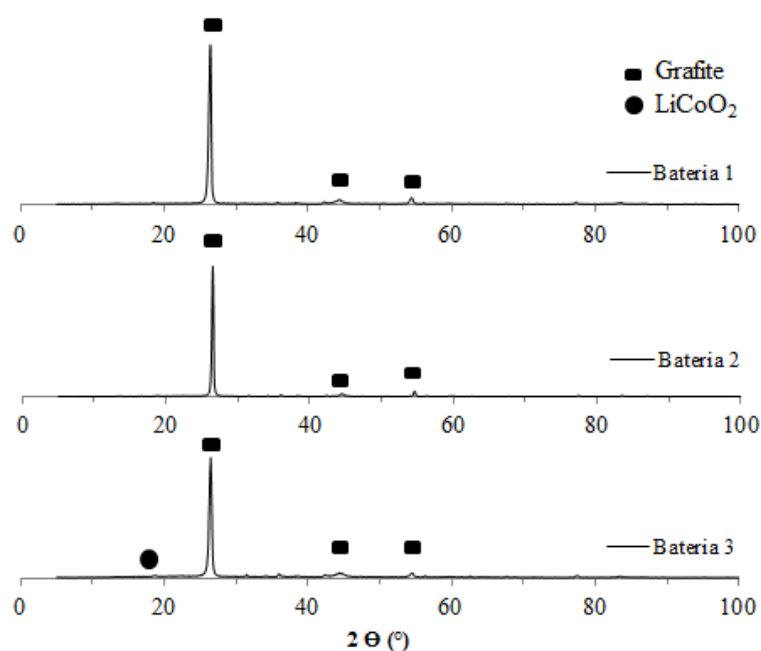
Figura 45 - Difratoograma do material catódico das baterias de íon de lítio.



O difratograma do material ativo do cátodo apresentou picos bem definidos de  $\text{LiCoO}_2$ , assim como o do material ativo do ânodo apresentou picos bem definidos de grafite, confirmando estudos anteriores (BERTUOL et al., 2015; FERREIRA et al., 2009; ZHANG et al., 2014). Além dos picos de  $\text{LiCoO}_2$ , o difratograma apresenta pequenos picos, referentes ao grafite, resultante de contaminação durante o processo de separação do material ativo do

cátodo e do ânodo. Isso pode ser observado com clareza nas baterias 1 e 3 (Figura 45), onde há um pequeno pico em  $26^\circ$ , o qual corresponde ao grafite. Já no material anódico, também pode ser observado algumas pequenas contaminações, porém em proporções quase imperceptíveis, como mostrado na bateria 3 a  $19^\circ$  (Figura 46), o qual corresponde a uma pequena contaminação de  $\text{LiCoO}_2$ .

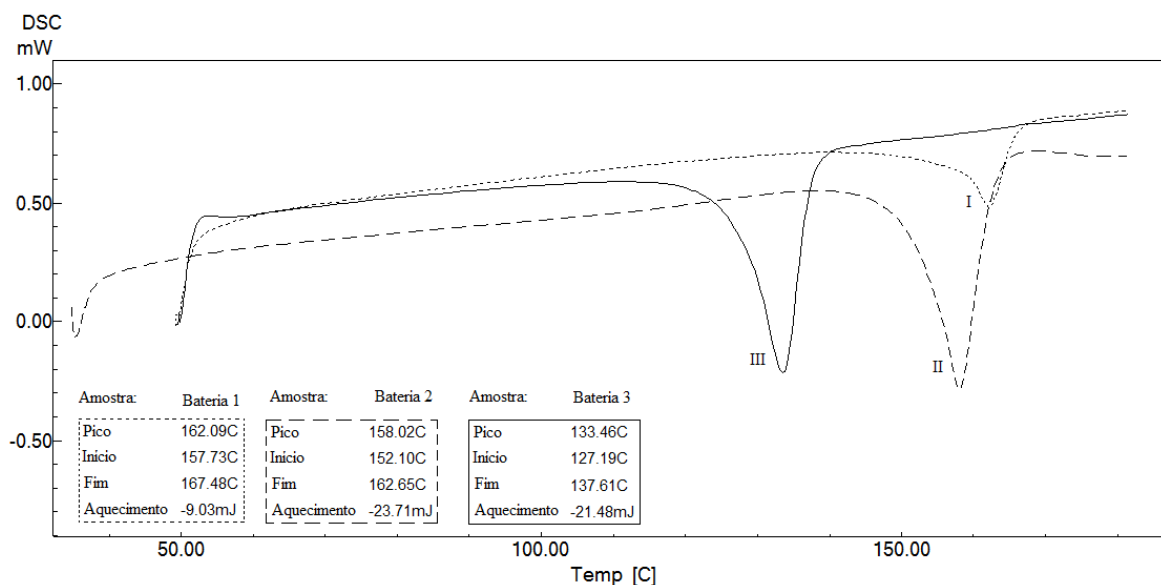
Figura 46 - Difratoograma do material anódico das baterias de íon de lítio.



Em seguida, o separador polimérico das baterias foi submetido a uma análise de DSC. O equipamento utilizado foi o DSC – 60 Plus da Shimadzu. As análises foram realizadas em dois ciclos de aquecimento, sendo o resultado apresentado correspondente ao segundo ciclo. A taxa de aquecimento foi de  $20^\circ\text{C}/\text{min}$ . Observam-se na Figura 47 as análises realizadas para cada bateria.



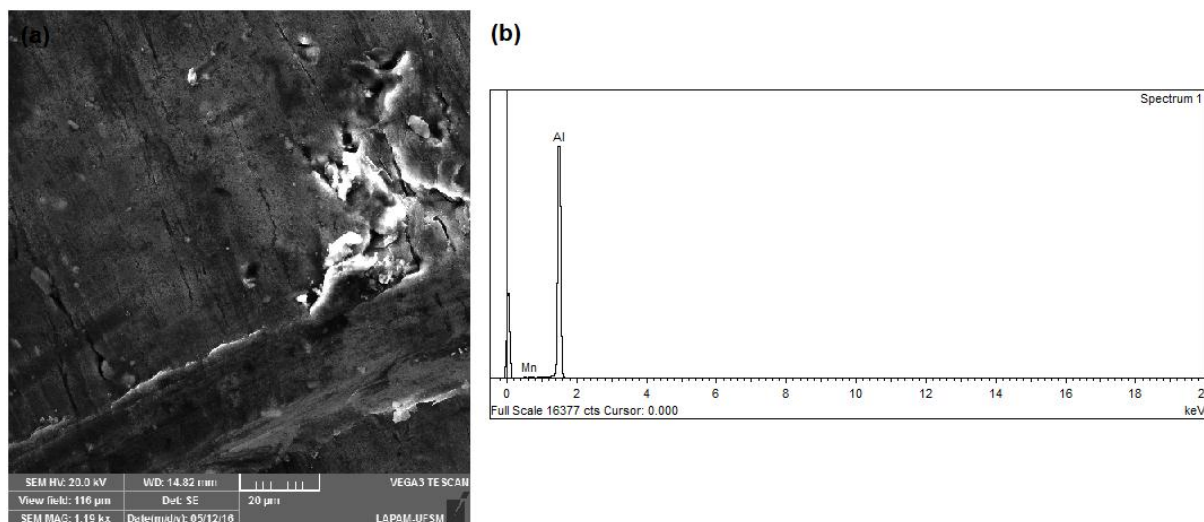
Figura 47 - Curvas de DSC obtidas na caracterização dos separadores poliméricos presentes nas baterias de íon de lítio.



Nota-se que o separador da bateria 1 provavelmente é composto de PP, pois obteve uma temperatura de fusão de 162 °C, podendo-se observar um pico endotérmico bem característico na análise realizada. Esta temperatura esta de acordo com a literatura, a qual indica que o pico de fusão do PP deve estar entre 155 °C e 170 °C. Sendo assim, o separador da bateria 2 apresenta um pico endotérmico em 158 °C, também sendo provavelmente composto por PP, uma vez que esta dentro da faixa correspondente a temperatura de fusão do PP. Por fim, o separador da bateria 3 provavelmente é composto por PEAD, pois obteve um pico a uma temperatura de 133 °C, o qual é característico ao PEAD, que possui uma temperatura de fusão próximo a 131 °C (MANIVANNAN e SEEHRA, 1997).

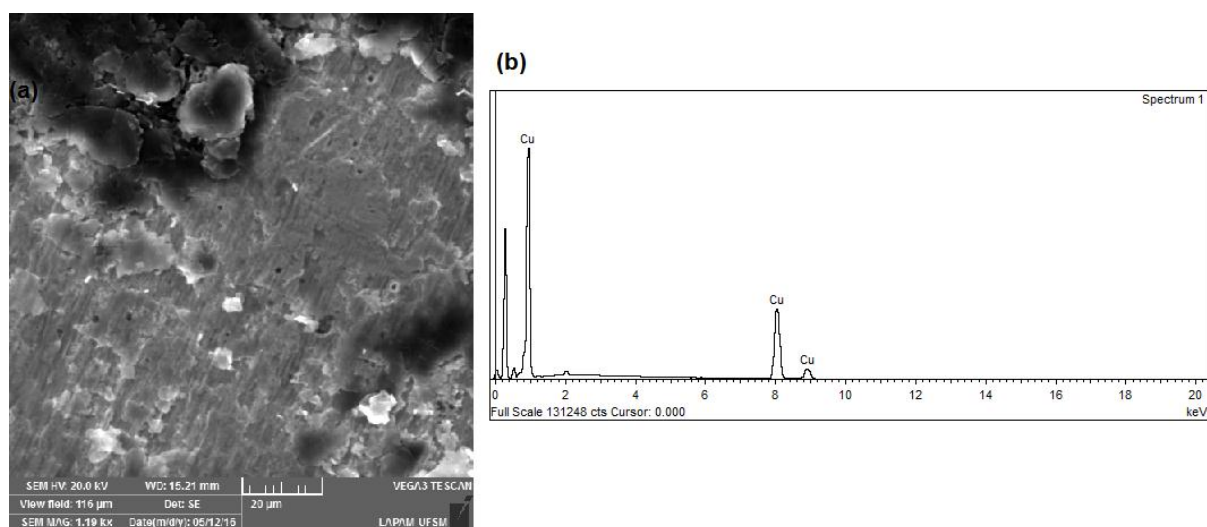
Por fim, foram realizadas análises de MEV/EDS para a confirmação da constituição dos componentes metálicos das baterias. Os eletrodos suporte do material catódico das baterias são constituídos de alumínio. Como exemplo, observa-se na Figura 48, a análise de MEV/EDS realizada no eletrodo de alumínio da bateria 1. Através da análise de MEV (Figura 48a) com uma ampliação de 1190 vezes, é possível visualizar a presença de pequenas fissuras na estrutura do eletrodo. Essas podem ser atribuídas ao processo de raspagem do material catódico presente junto ao eletrodo, o qual foi realizado com auxílio de uma espátula. Também, através da análise de EDS (Figura 48b) com varredura sobre toda a área, nota-se que o eletrodo realmente é constituído de alumínio, podendo notar-se um pico bem definido referente a este elemento.

Figura 48 - Análise de MEV/EDS do eletrodo de alumínio da bateria 1, a) MEV e b) EDS.



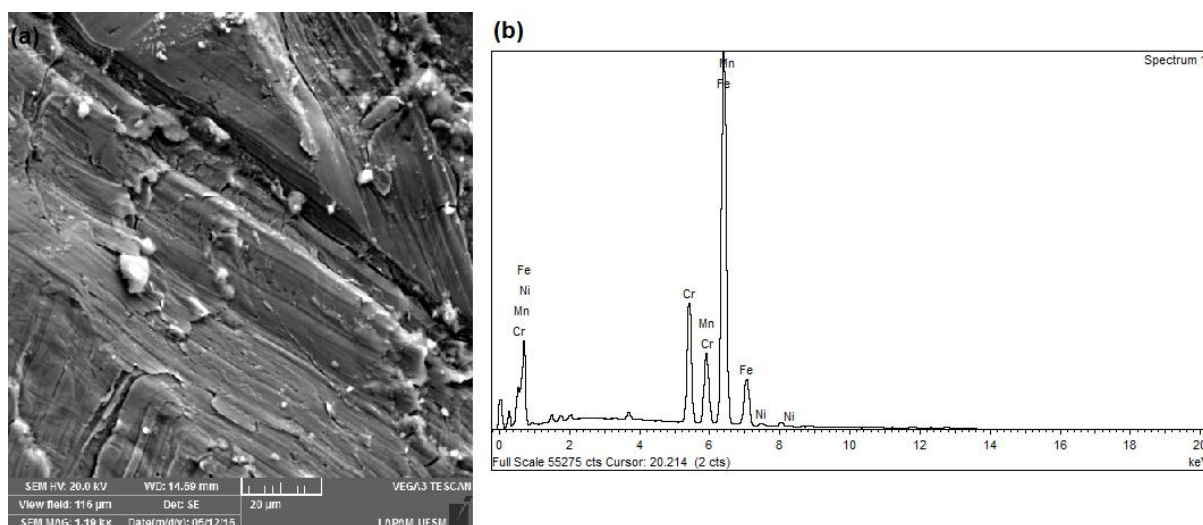
Os eletrodos suporte para o material anódico são constituídos de cobre. Como exemplo, a Figura 49 apresenta a análise de MEV/EDS realizada para o eletrodo de cobre da bateria 1. A análise de MEV (Figura 49a) apresenta a superfície do eletrodo em uma magnitude de 1190 vezes. É possível observar pequenas ranhuras e microfissuras na estrutura do eletrodo, sendo atribuídas ao processo de raspagem do material anódico. Já, através da análise de EDS (Figura 49b) com varredura sobre toda a área, nota-se a confirmação da composição desse eletrodo, o qual é constituído de cobre.

Figura 49 - Análise de MEV/EDS do eletrodo de cobre da bateria 1, a) MEV e b) EDS.



Outro material metálico, o invólucro metálico das baterias podem ser constituídos de diferentes materiais, como alumínio ou aço. Como exemplo, a Figura 50 apresenta a análise de MEV/EDS realizada para o invólucro metálico da bateria 2. A análise de MEV (Figura 50a) apresenta a superfície do invólucro com um aumento de 1190 vezes. Nela é possível observar a microestrutura da superfície do invólucro metálico, onde as ranhuras maiores podem ser atribuídas ao desgaste da bateria durante o uso. Já, através da análise de EDS (Figura 50b) com varredura sobre toda a área, é possível concluir que o invólucro desta bateria é constituído de aço, devido a grande presença de ferro em sua composição. Também, nota-se a presença de Cr e Ni, elementos que podem ser aplicados como revestimento em aços inoxidáveis (CrNi). Assim, têm-se a caracterização química do eletrodo de alumínio, eletrodo de cobre e do invólucro metálico das baterias de íon de lítio, comprovando as suas composições.

Figura 50 - Análise de MEV/EDS do invólucro metálico da bateria 2, a) MEV e b) EDS.



### 5.2.3 Processamento mecânico do material sintético

Devido à dificuldade da separação manual do óxido de lítio-cobalto do cátodo de alumínio, optou-se por utilizar um material “sintético” constituído de todos os demais componentes metálicos (eletrodo de cobre, invólucro metálico, conectores) e poliméricos da bateria de íon de lítio, com exceção do eletrodo de alumínio que foi substituído por uma folha de alumínio comercial. Assim, obteve-se os componentes livres das partículas de baixa

granulometria, grafite e  $\text{LiCoO}_2$ , de forma que não interfiram na separação dos componentes metálicos e não metálicos. O material foi cominuído em moinho de martelos com malha de abertura de 5 mm. As partículas obtidas podem ser observadas na Figura 51.

Figura 51 - Material sintético utilizado no estudo dos parâmetros da separação eletrostática.



#### 5.2.4 Separação eletrostática

Com o objetivo de definir os melhores parâmetros para a realização da separação eletrostática dos componentes das baterias, realizou-se a variação de diferentes parâmetros. Os parâmetros iniciais utilizados foram:

- Velocidade de rotação do rolo ( $n$ ) = 10 rpm;
- Tensão do eletrodo de atração ( $U$ ) = 25 kV;
- Distância do eletrodo de atração ( $D_2$ ) = 9 cm;
- Ângulo do defletor ( $\hat{A}$ ) =  $0^\circ$ .

Cada parâmetro foi definido um a um a começar pela variação da velocidade de rotação do rolo. Os resultados obtidos são discutidos a seguir.

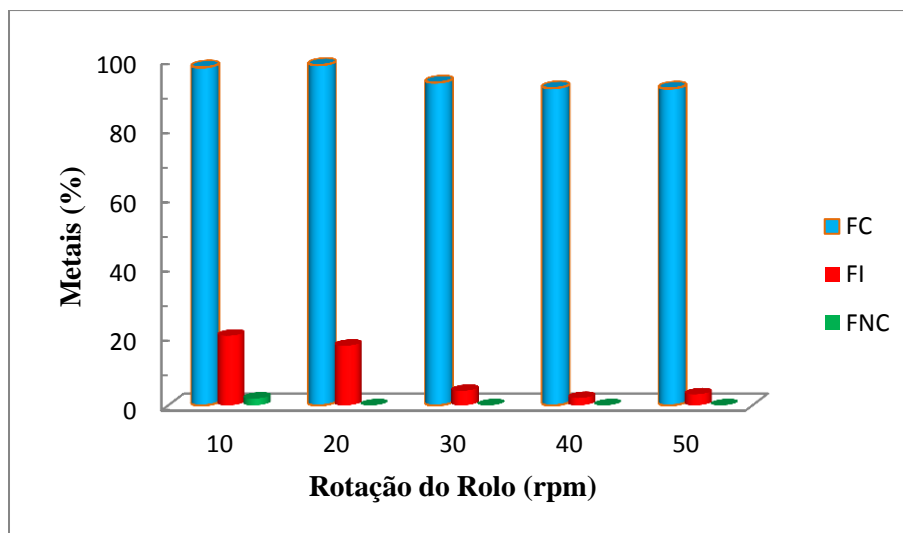
#### 5.2.4.1 Estudo do efeito da velocidade de rotação do rolo

Como citado na metodologia deste trabalho, alguns parâmetros foram mantidos constantes neste trabalho: distância do eletrodo de ionização ( $D1 = 6$  cm), ângulo do eletrodo de ionização ( $\Theta1 = 25^\circ$ ) e ângulo do eletrodo de atração ( $\Theta2 = 75^\circ$ ). Essas definições preliminares foram baseadas no trabalho de Jiang, Jia e Zhen-ming (2008), o qual estudou a aplicação da separação eletrostática por efeito corona na reciclagem de placas de circuito impresso (PCI).

Sendo assim, o primeiro parâmetro a ser estudado na separação eletrostática foi a velocidade de rotação do rolo do separador ( $n$ ). Para os testes iniciais, o eletrodo de atração foi regulado para a distância de 9 cm, a tensão fixada em 25 kV e o ângulo do defletor em  $0^\circ$ . Assim, a rotação do rolo foi variada e os resultados obtidos podem ser observados na Figura 52.

Percebe-se que com rotações mais altas há uma redução da quantidade de metais na fração intermediária, porém, também há uma diminuição do percentual de metais na fração condutora devido a um aumento da quantidade de polímeros que não se aderem ao rolo e acabam caindo nessa fração devido à alta rotação. Assim, o melhor resultado obtido foi a uma velocidade de 20 rpm, onde obteve-se uma fração condutora (FC) com 98,24% de metais, além de uma fração intermediária (FI) com 17,21% de metais e uma fração não condutora (FNC) livre da presença de partículas metálicas. Em uma velocidade de 10 rpm também se obteve uma grande percentagem de metais na FC, sendo de 97,57%, porém a FI teve uma fração metálica de 20,1%, o que não é desejável, já que o objetivo é que a maioria das partículas metálicas sejam recolhidas na FC.

Figura 52 - Estudo da influência da velocidade de rotação do rolo na separação eletrostática dos componentes de baterias de Li-íon, onde: FC = Fração Condutora, FI = Fração Intermediária e FNC = Fração Não Condutora.



No estudo da reciclagem de placas de circuito impresso (PCI) por separação eletrostática, Jiang, Jia e Zhen-ming (2008), definiram que para uma maximização da fração condutora, a melhor velocidade de rotação do rolo é a de 80 rpm. Neste trabalho define-se a melhor velocidade como sendo a de 20 rpm. Esta diferença pode ser atribuída principalmente ao tamanho de partícula utilizada nos dois trabalhos. Em seu trabalho, Jiang, Jia e Zhen-ming (2008), utilizaram partículas com tamanho menor que 0,6 mm, devido à dificuldade para a liberação do cobre presente nas placas. Já, neste trabalho o tamanho de partícula utilizado é na faixa de 0,212 – 5,0 mm, as quais por serem maiores sofrem mais influência da gravidade, e, portanto, associado a altas velocidades as partículas poliméricas que deveriam ficar aderidas ao rolo acabam se desprendendo e caindo no coletor destinado aos metais.

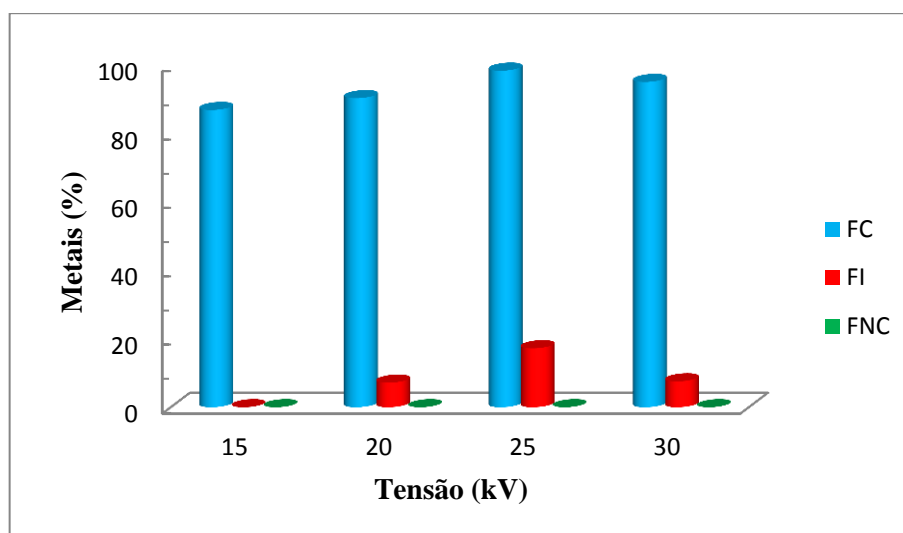
#### 5.2.4.2 Estudo do efeito da tensão dos eletrodos

Após a definição da melhor velocidade do rolo como 20 rpm, outro importante parâmetro foi testado, a tensão (U) aplicada nos eletrodos. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 53.

Primeiramente observa-se que em tensões mais baixas, 15 e 20 kV, a FC contém uma fração metálica de apenas 86,77% e 90,22%, respectivamente, sendo esta voltagem insuficiente para promover a separação desejada. Já em uma tensão de 30 kV a fração metálica na FC foi de 94,95%, um pouco superior do que as anteriores, porém podendo ser

ainda melhorada. Assim, em uma tensão de 25 kV, a FC obteve uma percentagem de metais de 98,24%, sendo a que obteve a maior quantidade de metais.

Figura 53 - Estudo da influência da tensão dos eletrodos na separação eletrostática dos componentes de baterias de Li-íon, onde: FC = Fração Condutora, FI = Fração Intermediária e FNC = Fração Não Condutora.



A fração intermediária a 25 kV também obteve uma quantidade alta de metais, sendo de 17,21%, porém se priorizou a obtenção de metais na FC. Sendo assim, o resultado mais satisfatório foi obtido a uma tensão de 25 kV. O resultado obtido também difere um pouco com o trabalho de Jiang, Jia e Zhen-ming (2008), o qual definiu como melhor resultado uma tensão de 30 kV para uma otimização da fração condutora.

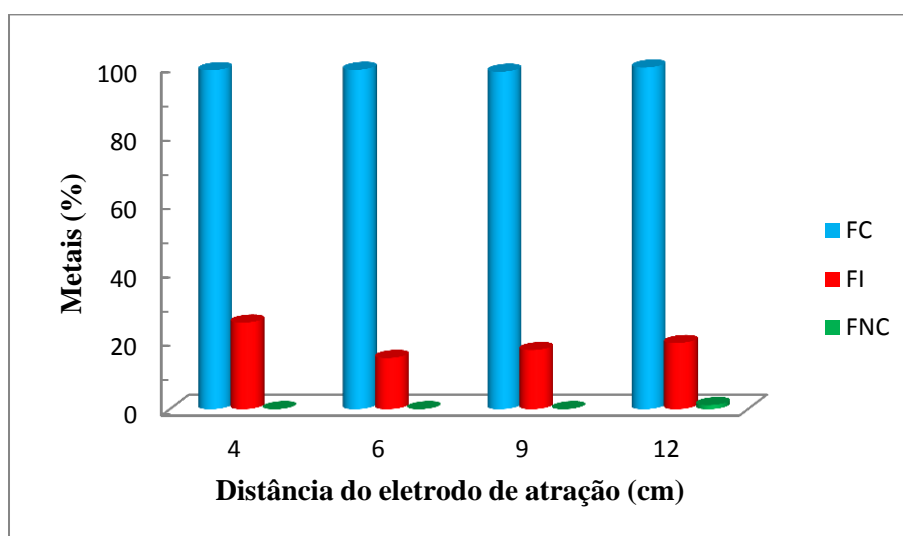
#### 5.2.4.3 Estudo do efeito da distância do eletrodo de atração

Uma vez definida a melhor velocidade de rotação do rolo e a tensão dos eletrodos, se estudou a interferência da distância entre o eletrodo de atração e a superfície do rolo (D2). Este parâmetro é muito importante, uma vez que a distância do eletrodo de atração e a tensão aplicada nos eletrodos estão diretamente relacionadas.

Através da Figura 54 pode-se observar os resultados obtidos. Em todas as distâncias a porcentagem de metais presentes na FC foram maiores que 98,2%, valores muito satisfatórios. Sendo assim, observa-se a quantidade de metais presente na FI, uma vez que quanto menos metais nesta fração, melhor a separação. Em uma distância de 4 cm há uma grande presença de metais, correspondendo a 25,2% da fração, isso ocorre pois com uma distância tão

pequena, as partículas metálicas acabam se chocando contra o eletrodo e caindo no coletor intermediário. Nas demais distâncias, a que obteve o melhor resultado foi a de 6 cm, onde a FI apresenta apenas 14,9% de metais, enquanto que em 9 cm e 12 cm, a FI apresenta uma porcentagem de metais de 17,2% e 19,3%, respectivamente.

Figura 54 - Estudo da influência da distância do eletrodo de atração na separação eletrostática dos componentes de baterias de Li-íon, onde: FC = Fração Condutora, FI = Fração Intermediária e FNC = Fração Não Condutora.



No trabalho de Jiang, Jia e Zhen-ming (2008), os autores fixaram a distância do eletrodo de atração em 9 cm, não sendo estudado a influência desta variável. Assim, após a variação deste parâmetro, define-se que a melhor distância entre o eletrodo de atração e a superfície do rolo é de 6 cm para a separação eletrostática dos componentes de baterias de íon de lítio.

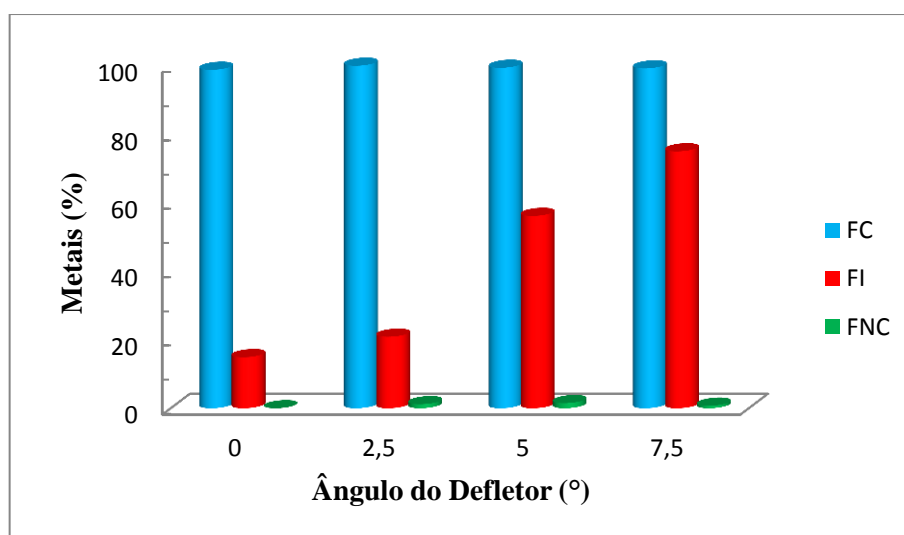
#### 5.2.4.4 Estudo do efeito do ângulo do defletor

Por fim, fixados a velocidade do rolo em 20 rpm, a tensão dos eletrodos em 25 kV e a distância do eletrodo de atração em 6 cm, realiza-se o estudo da influência do ângulo do defletor do coletor ( $\hat{A}$ ). Esta variável tem influência uma vez que dependendo a trajetória das partículas atraídas pelo eletrodo de atração, as mesmas podem cair no coletor destinado a FC ou a FI.



Observa-se na Figura 55, que o aumento do ângulo do defletor tem uma forte influência sobre a quantidade de metais que acabam sendo recolhidas na FI. Para a FC, todos os ângulos obtiveram ótimos resultados, sendo mais de 98,8% desta fração composta por metais. Porém, quanto maior é o ângulo, maior é a quantidade de metais presentes na FI, uma vez que as partículas condutoras (metálicas) não conseguem ultrapassar o defletor do coletor em ângulos maiores, chegando a valores de 75,0% de metais na FI em um ângulo de 7,5°.

Figura 55 - Estudo da influência do ângulo do defletor do coletor na separação eletrostática dos componentes de baterias de Li-íon, onde: FC = Fração Condutora, FI = Fração Intermediária e FNC = Fração Não Condutora.



O ângulo do defletor é uma variável muito importante, porém poucos autores testam a sua influência na separação eletrostática, como é o caso do trabalho de Jiang, Jia e Zhen-ming (2008). Nota-se que a influência desta variável está diretamente ligada ao resultado da separação eletrostática, sendo de suma importância o seu estudo. Dessa forma, no estudo realizado o melhor ângulo obtido foi o de 0°, uma vez que a quantidade de metais na FC foi de 98,8%, enquanto que a quantidade de metais na FI foi apenas de 14,9%.

#### 5.2.4.5 Triplicata dos melhores resultados

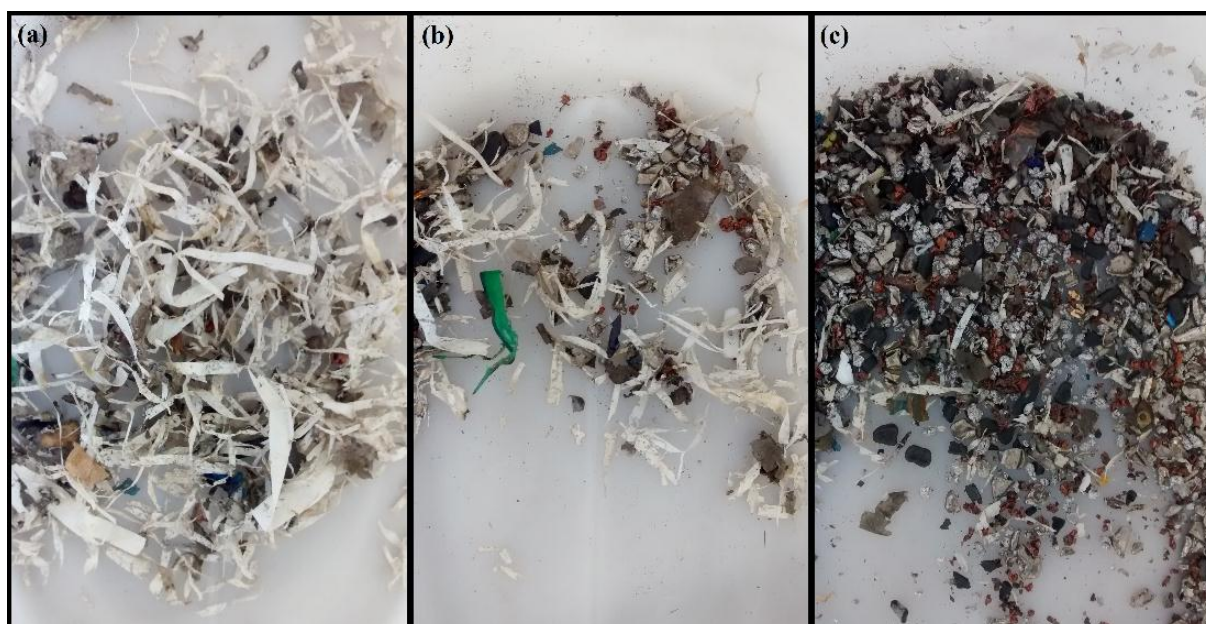
Realizados todos os experimentos, obtiveram-se as melhores condições de separação eletrostática dos componentes das baterias de íon de lítio. Os parâmetros que obtiveram os melhores resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Descrição das melhores condições do processo de separação eletrostática dos componentes das baterias de Li-íon.

Parâmetro	Condição
Ângulo do eletrodo de ionização (fixado)	25°
Distância do eletrodo de ionização (fixado)	6 cm
Ângulo do eletrodo de atração (fixado)	75°
Rotação do rolo	20 rpm
Tensão dos eletrodos	25 kV
Distância do eletrodo de atração	6 cm
Ângulo do defletor	0°

Os parâmetros apresentados na tabela foram aplicados em triplicata, de forma a confirmar a reprodutibilidade do processo realizado. Assim, o resultado obtido nesta etapa foi uma separação com  $98,98\% \pm 0,43\%$  de metais na fração condutora,  $16,26\% \pm 2,61\%$  na fração intermediária e  $0,40\% \pm 0,69\%$  na fração não condutora, a qual é composta por 99,6% de polímeros. Visualmente, a separação pode ser observada através da Figura 56, onde nota-se claramente a separação dos componentes das baterias.

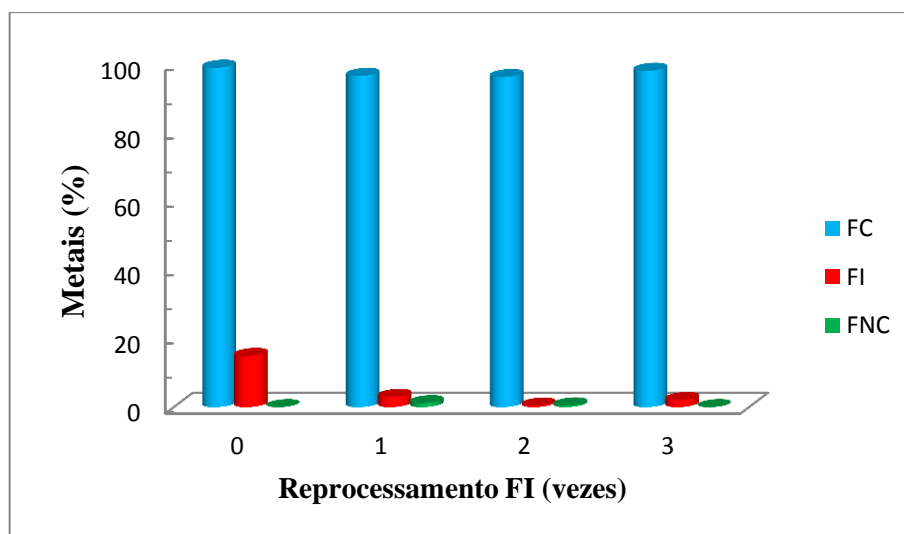
Figura 56 - Separação eletrostática dos componentes das baterias de Li-íon nas melhores condições estudadas, (a) Fração Não Condutora (FNC), (b) Fração Intermediária (FI) e (c) Fração Condutora (FC).



#### 5.2.4.6 Reprocessamento da fração intermediária (FI)

Por fim, foi realizado um estudo do reprocessamento apenas da fração intermediária, para observar o efeito sobre o resultado final. Observa-se através da Figura 57, que reprocessando apenas uma vez a fração intermediária, a quantidade de metais presentes nesta fração já baixa de 14,9% para 2,97%. Realizando o processamento por duas vezes a quantidade de metais cai para 0,46%. Porém, deve-se ter cuidado com o reprocessamento da FI, uma vez que os materiais poliméricos presentes nesta fração podem acabar indo para a fração condutora após o reprocessamento, o que diminui a concentração de metais na fração. Nota-se que inicialmente a FC possui 98,8% de metais, e a mesma baixa para 96,4% após a repassagem uma vez da FI.

Figura 57 - Estudo do reprocessamento da fração intermediária na separação eletrostática dos componentes de baterias de Li-íon, onde: FC = Fração Condutora, FI = Fração Intermediária e FNC = Fração Não Condutora.



Sendo assim, o reprocessamento da FI é uma possibilidade que deve ser estudada conforme o objetivo da planta de reciclagem. Se o objetivo for a recuperação da maior quantidade possível de metais, porém sem ser necessária uma alta pureza, então o reprocessamento deve ser levado em conta. Porém, se o objetivo é obter uma fração metálica com o máximo de pureza possível, o reprocessamento deve ser descartado.

### 5.2.5 Aplicação do processamento mecânico geral

Com o intuito de testar a eficiência do processamento, desde a cominuição até a separação eletrostática, aplicou-se o processamento mecânico geral para os 3 modelos de baterias selecionadas inicialmente. Foram selecionadas 10 unidades de cada modelo, as massas utilizadas podem ser observadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Massa inicial das baterias submetidas ao processamento geral.

	Bateria 1	Bateria 2	Bateria 3
Massa total (g)	275,22	187,19	200,28

A fração obtida após a etapa de separação granulométrica e as três frações obtidas após o processo de separação eletrostática podem ser observadas nas Figuras 58, 59 e 60. Após a cominuição e secagem os materiais passaram por uma separação granulométrica onde se separa o pó, composto de  $\text{LiCoO}_2$  e grafite (a), dos demais componentes. O material restante é levado ao separador eletrostático nas melhores condições já estudadas. Assim, é possível a obtenção de uma fração não condutora composta pelos polímeros (b), uma fração intermediária composta de uma mistura de polímero e metais (c) e uma fração condutora composta pelos metais presentes nas baterias (d).

Figura 58 - Processo geral aplicado a bateria 1, (a) pó (grafite +  $\text{LiCoO}_2$ ), (b) Fração Não Condutora (polímeros), (c) Fração Intermediária (polímeros + metais) e (d) Fração Condutora (metais).

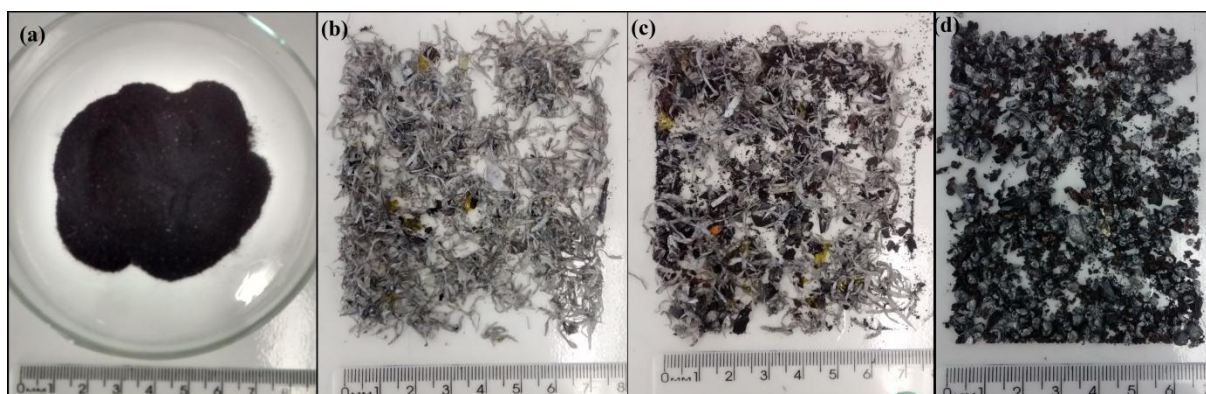


Figura 59 - Processo geral aplicado a bateria 2, (a) pó (grafite +  $\text{LiCoO}_2$ ), (b) Fração Não Condutora (polímeros), (c) Fração Intermediária (polímeros + metais) e (d) Fração Condutora (metais).

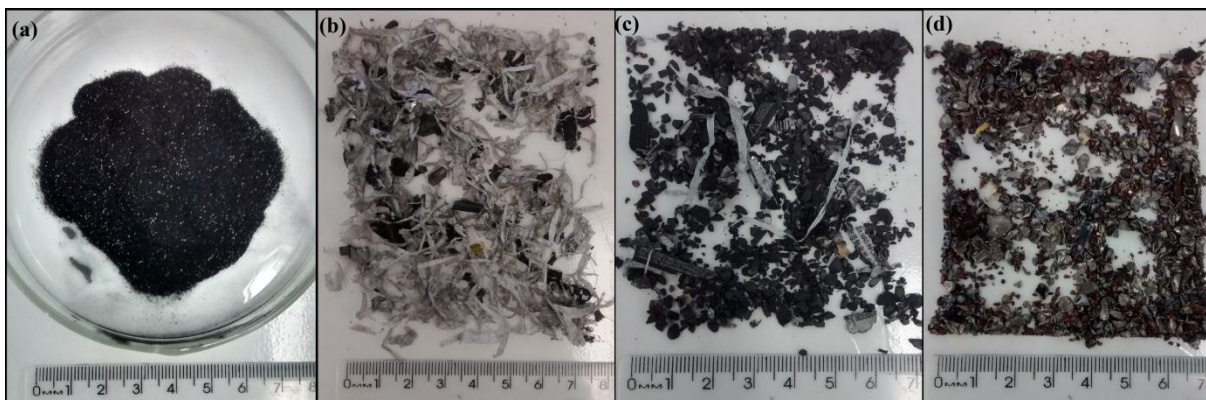
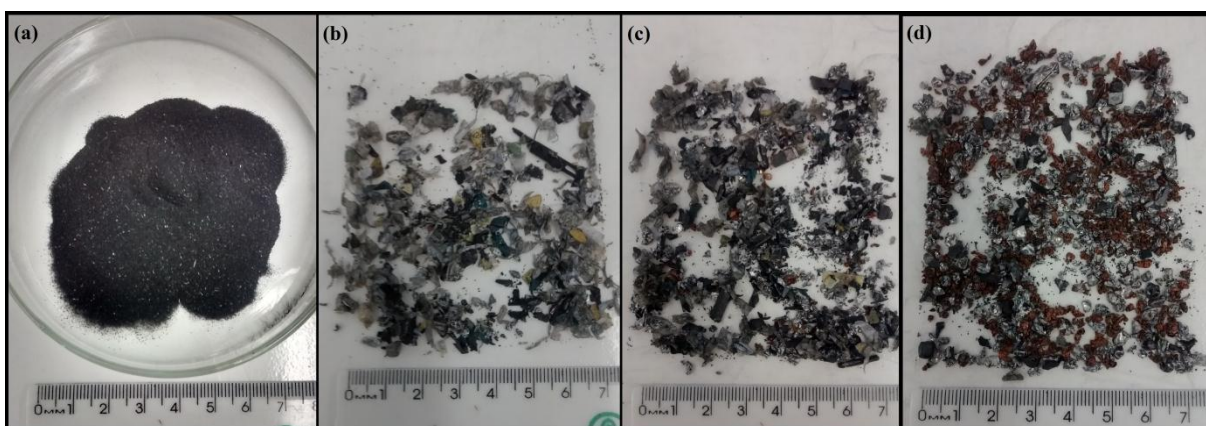
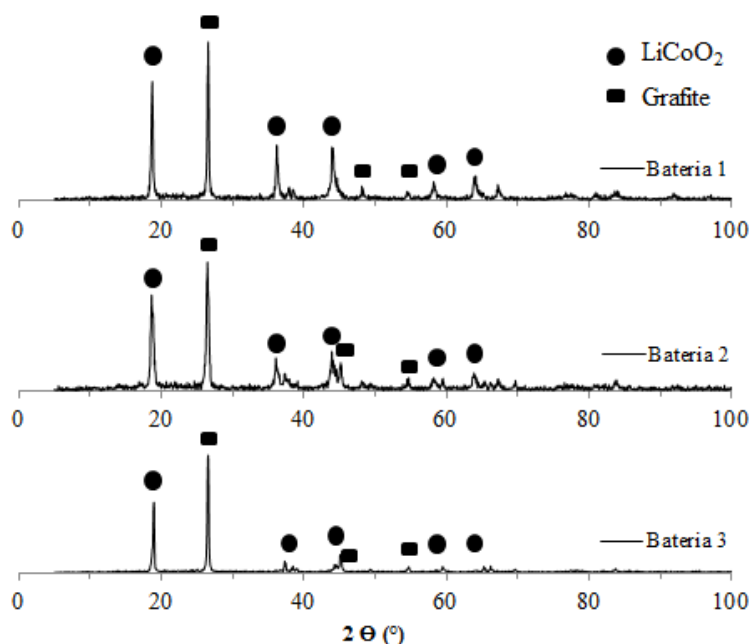


Figura 60 - Processo geral aplicado a bateria 3, (a) pó (grafite +  $\text{LiCoO}_2$ ), (b) Fração Não Condutora (polímeros), (c) Fração Intermediária (polímeros + metais) e (d) Fração Condutora (metais).



Para comprovar a composição da fração mais fina, a mesma foi submetida a uma análise de DRX. Através da Figura 61, nota-se que a separação desta fração foi realizada de forma eficiente. Observa-se que os picos representam exatamente os materiais ativos do cátodo e do ânodo das baterias, o qual representa a fração mais fina presente em sua composição. Os picos de  $\text{LiCoO}_2$  e grafite são nítidos e bem distinguíveis entre si, facilitando sua identificação.

Figura 61 - Difratoograma da fração fina das baterias de íon de lítio após processamento mecânico.



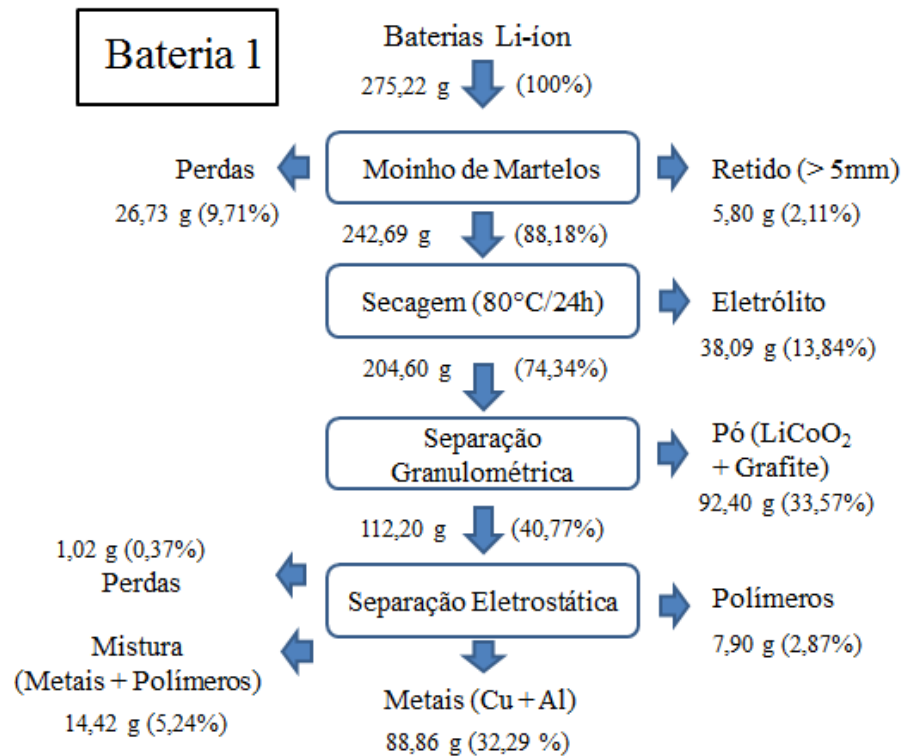
### 5.2.6 Balanço de massa

A partir das melhores condições de separação eletrostática e da aplicação do processamento mecânico geral com as baterias selecionadas, realizaram-se os balanços de massa para cada modelo de bateria. Os valores obtidos podem ser observados nas Figuras 61, 62 e 63. Os balanços compreendem todas as etapas do processo, a cominuição, secagem, separação granulométrica e separação eletrostática.

A Figura 62 apresenta o balanço de massa para a bateria de modelo 1. Observa-se que as perdas envolvidas no processo somam 10,08% da massa inicial. No processo de cominuição, 2,11% da massa fica retida na malha de 5 mm, deste total, 72,7% são polímeros e 27,3% são metais. Após, 13,84% são eliminados através do processo de secagem, massa a qual é atribuída ao eletrólito orgânico volátil presentes nas baterias. No processo de separação granulométrica, 33,57% da massa inicial corresponde a fração  $< 212 \mu\text{m}$ , a qual refere-se a fração fina formada por  $\text{LiCoO}_2$  e grafite. Assim, 40,77% da massa inicial chegam ao processo de separação eletrostática, onde após a separação 2,87% corresponde a fração não condutora formada por polímeros, 32,29% corresponde a fração condutora formada pelos metais e 5,24% correspondem a fração intermediária composta por uma mistura de metais e

polímeros. Nesse processo ainda há uma pequena perda de material, o qual corresponde a 0,37% da massa inicial.

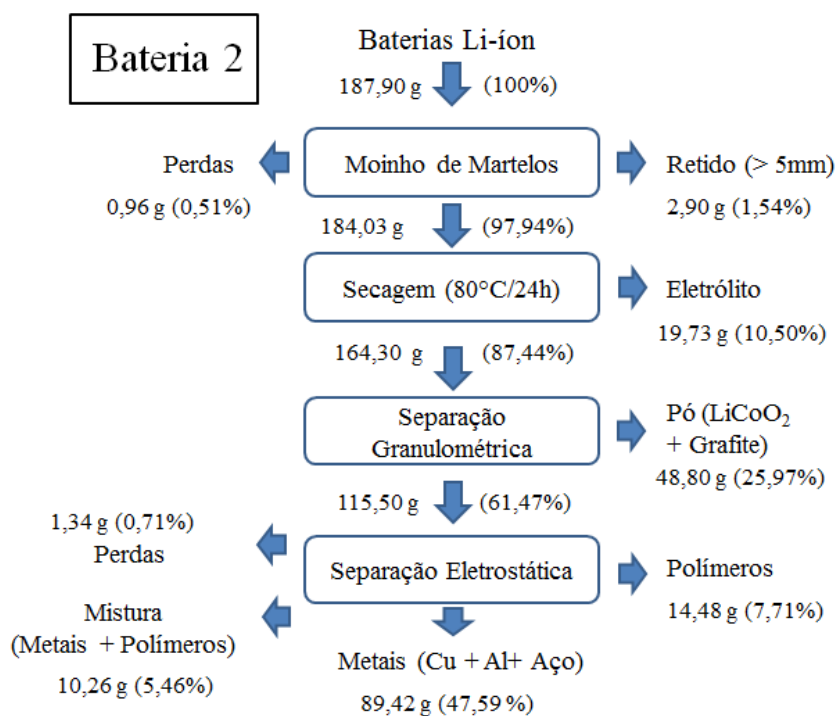
Figura 62 - Balanço de massa do processamento geral para a bateria 1.



Em seguida, realizou-se o balanço de massa para o modelo 2 das baterias. A Figura 63 apresenta os resultados obtidos, onde se observa que no processo de cominuição ocorre uma pequena perda de 0,51% de massa. Também, nesta etapa 1,54% da massa fica retida na malha de 5 mm, do qual 54,7% são polímeros e 45,3% são metais. Seguindo o processo, 10,5% são eliminados através do processo de secagem, massa a qual é atribuída ao eletrólito orgânico. Já no processo de separação granulométrica para obtenção da fração fina, foram separados 25,97% da massa inicial, a qual é formada por  $\text{LiCoO}_2$  e grafite. Para o processo de separação eletrostática, 61,47% da massa foi enviada. Assim, foram separados 7,71% correspondente à fração não condutora formada pelos polímeros, 5,46% corresponde à fração intermediária composta por uma mistura de metais e polímeros, e por fim, 47,59% correspondem a fração condutora formada pelos metais. A grande percentagem correspondente a fração metálica é explicada pelo fato do case metálico corresponder a uma grande massa desta bateria,

aumentando assim a quantidade de metais presentes em sua composição. Também, nesta etapa foi contabilizada uma perda de material de 0,71% da massa inicial.

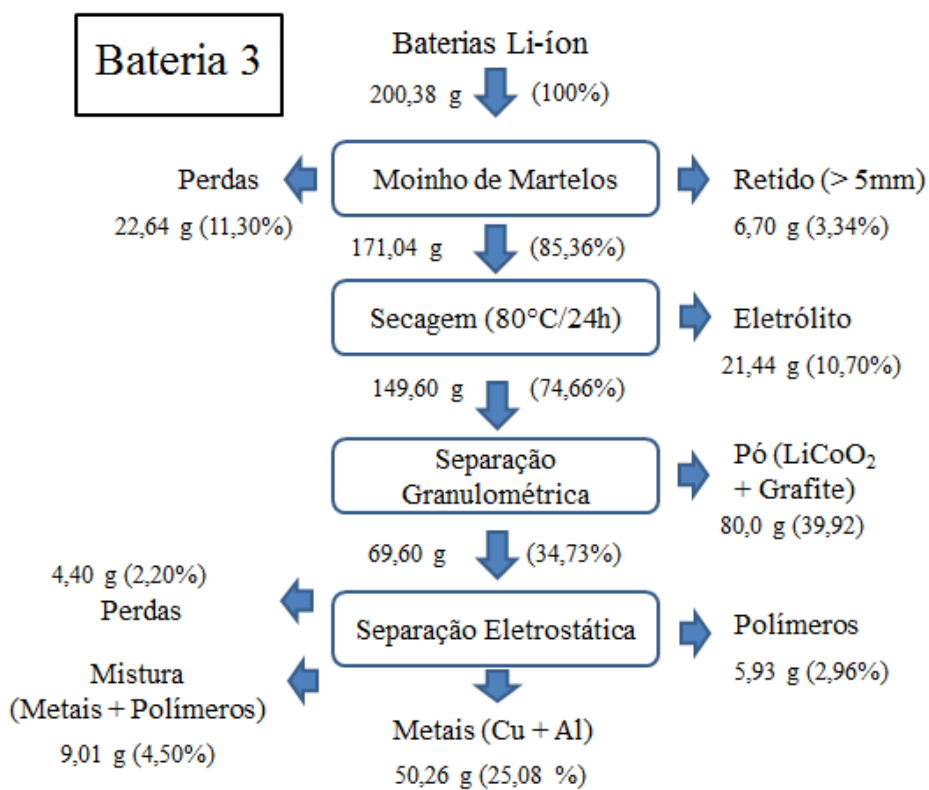
Figura 63 - Balanço de massa do processamento geral para a bateria 2.



Por fim, a Figura 64 apresenta-se o balanço de massa para a bateria de modelo 3. Observa-se que a perda envolvida no processo de cominuição foi de 11,30% da massa inicial. Nesse processo, 3,34% da massa fica retida na malha de 5 mm, deste total, 65,0% são polímeros e 35,0% são metais. Após, 10,70% são eliminados através do processo de secagem, massa a qual é atribuída ao eletrólito orgânico volátil presentes nas baterias. No processo de separação granulométrica, a fração fina, correspondente as partículas < 212  $\mu\text{m}$ , correspondem a 39,92%, a qual é formada por  $\text{LiCoO}_2$  e grafite. Assim, 34,73% da massa inicial chegam ao processo de separação eletrostática, onde após a separação 2,96% corresponde a fração não condutora formada por polímeros, 25,08% corresponde a fração condutora formada pelos metais e 4,5% correspondem a fração intermediária composta por uma mistura de metais e polímeros. Nesse processo ainda ocorreu a maior perda entre os 3 modelos, a qual corresponde a 2,2% da massa inicial.



Figura 64 - Balanço de massa do processamento geral para a bateria 3.





## 6. CONCLUSÃO

Através do trabalho realizado, pode-se concluir que o melhor tipo de tribocarregador para a separação de uma mistura de PP e PEAD é um leito fluidizado, quando comparado com o processo de vibração. A umidade relativa do ar deve ser mantida em baixos patamares, em torno de 42%. O tempo de tribocarregamento em leito fluidizado deve ser de 5 minutos, tempo suficiente para que as partículas adquiram a carga necessária para que sejam separadas no separador eletrostático. Nesse processo, entre vários parâmetros que podem ser estudados, foi definido que ao melhor ângulo do defletor é de  $2,5^\circ$ , a melhor distância do eletrodo de atração é 3 cm, a melhor tensão é a de 30 kV e a melhor velocidade de rotação do rolo é de 10 rpm.

Através do conjunto dos melhores resultados, obteve-se uma separação satisfatória dos polímeros, recuperando 92,8 % de PP (pureza de 95,7%), e 95,9% de PEAD (pureza de 93,1%). Os melhores parâmetros foram aplicados em outras misturas poliméricas, as quais também obtiveram bons resultados. Na separação de PP e PEBD, foi possível a recuperação de PP de 90,2% (pureza de 93,8%), e uma recuperação de PEBD de 94,2% (pureza de 90,8%). Já na separação de uma mistura de PET e PVC a obteve-se uma recuperação de PET de 96,8% (pureza de 95,9%), e uma recuperação de PVC de 95,9% (pureza de 96,8%). Assim, o processo de separação triboeletrostática se mostra totalmente viável na recuperação de polímeros provenientes da coleta seletiva, sendo possível a obtenção de frações com uma alta pureza, além de uma alta recuperação.

Considerando o processo de reciclagem de baterias de íon de lítio, a separação eletrostática foi eficiente para separar os diferentes componentes presentes. As melhores condições de operação do equipamento foram: velocidade de rotação do rolo de 20 rpm, tensão dos eletrodos de 25 kV, distância do eletrodo de atração de 6 cm e ângulo do defletor do coletor de  $0^\circ$ . Através deste processamento, obteve-se a fração condutora com 98,98% de metais e a fração não condutora com 99,6% de polímeros, além de uma fração intermediária contendo apenas 16,26% de metais, valor que cai para 2,97% quando reprocessada no equipamento.

A caracterização das baterias apresenta uma pequena diferença na composição dos modelos, demonstrando a heterogeneidade das baterias de íon de lítio. Assim, a aplicação do processo de separação eletrostática em diferentes modelos de baterias comprova a eficiência do mesmo apesar das diferentes composições. Através das análises realizadas, comprova-se que a separação eletrostática conseguiu promover a separação dos componentes metálicos, dos componentes não metálicos. Sendo assim, esta operação constitui-se como uma boa alternativa para a reciclagem mecânica de baterias de íon de lítio.



## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aplicação do processo de separação triboeletrostática utilizando outros polímeros tais como PS, PC, PA, PU, PMMA, HIPS, etc;
- Utilização das demais configurações possíveis do equipamento (tela e placa) comparando com os resultados obtidos na configuração de rolo;
- Aplicação do processo de pirólise dos polímeros separados por separação triboeletrostática;
- Aplicação de processos químicos de reciclagem nas frações obtidas após a separação eletrostática de baterias de íon de lítio;
- Aplicação do processo de separação eletrostática para outros modelos de baterias de íon de lítio;
- Aplicação do processo para outros tipos de resíduos eletrônicos;



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/noticias/com282.htm>>. Acesso em: 15 jan 2016.

ABIPLAST. Conceitos básicos sobre materiais plásticos. Disponível em: <[http://file.abiplast.org.br/download/links/links%202014/materiais\\_plasticos\\_para\\_site\\_vf\\_2.pdf](http://file.abiplast.org.br/download/links/links%202014/materiais_plasticos_para_site_vf_2.pdf)>. Acesso em: 06 maio 2015.

ABIPLAST. **Perfil 2013 – Indústria brasileira de transformação de material plástico.** Associação Brasileira da Indústria Plástica, São Paulo – Brasil, 2013.

ABIPLAST. **Perfil 2014 – Indústria brasileira de transformação de material plástico.** Associação Brasileira da Indústria Plástica. São Paulo – Brasil, 2014. ABNT, 2014.

AKSA, W.; MEDLES, K.; REZOUQ, M.; BOUKHOULDA, M. F.; BILICI, M.; DASCALESCU, L. Two stage electrostatic separator for the recycling of plastic from waste electrical and electronic equipment. *Journal of Electrostatics*. v. 71, p. 681 – 688, 2013.

ALBRECHT, V.; SIMON, F.; SCHUBERT, G.; NÉMETH, E. Einflußfaktoren auf die Wasserdampfadsorption an Polymeren. *Chemie-Ingenieur-Technik*, v. 74, p. 1425 – 1428, 2002.

AL-SALEM, S.M.; LETTIERI, P.; BAYENS, J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): a review. *Waste Management*, v. 29, p. 2625 – 2643, 2009.

AL-SALEM, S.M.; LETTIERI, P.; BAYENS, J. The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: Form re-use to energy and chemicals. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 36, p. 103 - 129, 2010.

AL-THYABAT, S.; NAKAMURA, T.; SHIBATA, E.; LIZUKA, A. Adaptation of minerals processing operations for lithium-ion (LIBs) and nickel metal hydride (NiMH) batteries recycling: Critical review. *Minerals Engineering*. v. 45, p. 4 – 17, 2013.

ALVES, M. Procedimento de comissionamento: Separador eletrostático de laboratório modelo ESP-14/01S. **INBRAS-ERIES Equipamentos Magnéticos e Vibratórios Ltda.**, Departamento de Engenharia, Diadema – SP, p. 26 – 28, 2015.

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/dados/index.php/component/content/article?id=283>> Acesso em: 15 jan 2016.

ANDERSON, J. M.; PAROBK, L.; BERGOUGNOU, M. A.; INCULET, I. I. 1979. Electrostatic separation of coal macerals. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 15, p. 291 - 293, 1979.

ANULF, T. **SAB-NIFE RECYCLING CONCEPT FOR NICKELCADMIUM BATTERIES: AN INDUSTRIALISED AND ENVIRONMENTALLY SAFE PROCESS.**

In: Proceedings of the Sixth International Cadmium Conference, Cadmium Association, p. 161–163, 1990.

ARVANITOYANNIS, I.S.; BOSNEA, L.A. Recycling of polymeric materials used for food packaging: current status and perspectives. **Food Rev. Int.**, v. 17, p. 291–346, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13230**: Embalagens e acondicionamento plásticos recicláveis - Identificação e simbologia. Rio de Janeiro, RJ:

ASTRUP, T.; FRUERGAAARD, T.; CHRISTENSEN, T.H. Recycling of plastic: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. **Waste Management**, v. 27, p. 763–772, 2009.

AZNAR, M.P.; CABALLERO, M.A., SANCHO, J.A., FRANCS, E. Plastic waste elimination by co-gasification with coal and biomass in fluidized bed with air in pilot plant. **Fuel Processing Technology**, v. 87, n. 5, p. 409 – 420, 2006.

BASEL CONVENTION. Disponível em: <<http://www.basel.int>>. Acesso em: 31 jan. 2016.

BERNARDES, A. M.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S Recycling of batteries: A review of current processes and technologies. **Journal of Power Sources**, v. 130, n. 1-2, p. 291-298, 2004.

BERTUOL, D. A. **RECUPERAÇÃO DE NÍQUEL, COBALTO E TERRAS-RARAS DE BATERIAS DE NÍQUEL METAL HIDRETO - NIMH**. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2007.

BERTUOL, D. A.; TONIASSO, C.; JIMÉNEZ, B. M.; MEILI, L.; DOTTO, G. L.; TANABE, E. H.; AGUIAR, M. L. Application of spouted bed elutriation in the recycling of lithium ion batteries. **Journal of Power Sources**. v. 275, p. 627 – 623, 2015.

BODSWORTH, C; **THE EXTRACTION AND REFINING OF METALS**. CRC.1994.

BRAISL. LEI FEDERAL Nº 9.795, “Dispõe sobre a educação ambiental, institui a política nacional de educação ambiental e dá outras providências”, Brasil, 27 de abril de 1999.

BRANDRUP, J.; BITTNER, M.; MICHAELI, W.; MENGES, G. In: **Recycling and recovery of plastics**. WILLENBERG, B., Hanser Publishers, Munique – Alemanha, 1996.

BRASIL. LEI FEDERAL 12.305, “Política Nacional de Resíduos Sólidos”, de 2 de agosto de 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)> Acesso em: 10 abr. 2015.

BRASIL. LEI FEDERAL Nº 6.938, “Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências”, Brasil, 31 de agosto de 1981.



BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)> Acesso em: 10 abr. 2015.

BRAUN, D. Simple methods for identification of plastics. **Macmillan Publishing Co.**, Hanser Publishers, New York, 1982.

BRIASSOULIS, D.; HISKAKIS, M.; BADOU, E. Technical specifications for mechanical recycling of agricultural plastic waste. **Waste Management**, v. 33, p. 1516 – 1530, 2013.

BURAT, F.I.; GÜNEY, A.; KANGAL, M. O. Selective separation of virgin and postconsumer polymers (PET and PVC) by flotation method. **Waste Manage.**, v. 29, p. 1807 – 1813, 2009.

BURAT, F.I.; GÜNEY, A.; OLGAE\_KANGAL, M. Selective separation of virgin and postconsumer polymers (PET and PVC) by flotation method. **Waste Manage.**, v. 29, p. 1807–1813, 2009.

BUSNARDO, N. G.; PAULINO, J. F.; AFONSO, J. C. Processamento de pilhas Li/MnO<sub>2</sub> usadas. **Química Nova**, v.30, p.995-1000, 2007.

CALIN, L.; CALIAP, L.; NEAMTU, V.; MORAR, R.; IUGA, A.; SAMUILA, A.; DASCALESCU, L. Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation. **IEEE Trans. Ind. Appl.**, v. 44, p. 1045 – 1051, 2008.

CALLISTER JR., W. D. **CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS: UMA INTRODUÇÃO**, LTC, Rio de Janeiro, 2002.

CARELLI, G. **ESTE SAL É O COMBUSTÍVEL DO FUTURO**. Revista Veja, São Paulo, 11 de mar. de 2009.

CEMPRE - Compromisso Empresarial para a Reciclagem. CICLOSOFT 2014. Radiografando a Coleta Seletiva. Disponível em: <<http://cempre.org.br/ciclosoft/id/2>>. Acesso em: 21 fev. 2016.

CHANG, J.S.; KELLY, A. J.; CROWLEY, J. M. **Handbook of Electrostatic Processes**. Marcel Dekker Inc, New York, USA, p. 39 – 45, 1995.

CHRISTOPHER, M. **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos**. Pioneira Thomson Learning, São Paulo - Brasil, 2001.

COLTRO, L.; GASPARINA, B. F.; QUEIROZ, G. D. Reciclagem de Materiais Plásticos: A Importância da Identificação Correta. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 18, n. 2, p. 119 - 125, 2008.

CONTESTABILE, M.; PANERO, S.; SCROSATI, B. A laboratoryscale lithium-ion battery recycling process. **Journal of Power Sources**, v. 92, n.1-2, p. 65-69, 2001.

COSTA, A. J.; MATOS, J. F.; BERNARDES, A. M.; MULLER, I. L. Beneficiation of cobalto, copper and aluminum from wasted lithium-ion batteries by mechanical processing. **International Journal of Mineral Processing**. v. 145, p. 77 – 82, 2015.

COSTA, R. C. RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO POR PROCESSAMENTO MECÂNICO. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2010.

CUI J.; ERIC FORSSBERG. Mechanical Recycling of waste electric and electronic equipment: a review. **Journal of Hazardous Materials**, B99, p. 243-263, 2003.

CUI, J.; FORSSBERG, E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. **Journal of Hazardous Materials**, p. 243–263, 2003.

DASCALESCU, L.; MORAR, R.; IUGA, A.; SAMUILA, A.; NEAMTU, V.; SUARASAN, I. Charging of particulates in the corona field of roll-type electroseparators. **J. Phys.** v. 27, p. 1242 – 1251, 1994.

DASCALESCU, L. 2011. Factors that influence the efficiency of a fluidized-bed-type tribo-electrostatic separator for mixed granular plastics. **J. Phys.: Conf. Ser.**, v. 301, n. 1, 2011.

DASCALESCU, L.; URS, A.; BENTE, S.; HUZAU, M.; SAMUILA, A. Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices. **J. Electrostat.**, v. 63, p. 705 – 710, 2005.

DASCALESCU, L.; FATI, O.; BILICI, M.; RAHOU, F.; DRAGAN, C.; SAMUILA, A.; IUGA, A. Factors that influence the efficiency of a fluidized-bed-type tribo-electrostatic separator for mixed granular plastics. **J. Phys.: Conf. Ser.**, v. 301, p. 120 - 128, 2011.

DEMIREL, B.; YARAS, A.; ELÇIÇEK, H. Crystallization behavior of PET materials. **BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi Cilt.** v. 13, p. 26 – 35, 2011.

DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, E. T. G. **Princípios e aplicações de análise térmica.** Instituto de química de São Carlos - Universidade Federal de São Carlos, SP, 2012.

DODBIBA, G.; SADAKI, J.; OKAYA, K.; SHIBAYAMA, A.; FUJITA, T. The use of air tabling and triboelectric separation for separating a mixture of three plastics. **Miner. Eng.**, v. 18, p. 1350 – 1360, 2005.

DODBIBA, G.; SHIBAYAMA, A.; MIYAZAKI, T.; FUJITA, T. Separation performance of PVC and PP plastic mixture using air table. **Phys. Separat. Sci. Eng.**, v. 12, p. 71–86, 2003a.

DODBIBA, G.; SHIBAYAMA, A.; MIYAZAKI, T.; FUJITA, T. Triboelectrostatic separation of ABS, PS and PP plastic mixture. **Mater. Trans.**, v. 44, p. 161 – 166, 2003b.

DODBIBA, G.; SHIBAYAMA, A.; MIYAZAKI, T.; FUJITA, T. **Electrostatica separation of the shredded plastic mixtures using a tribo-cyclone.** Taylor e Francis Group. v. 11, n. 1 – 2, p. 63 – 92, 2001.

DORELLA, G.; MANSUR, M.B. A study of the separation of cobalt from spent Li-ion battery residues. **Journal of Power Sources**. v. 170, p. 210–215, 2007.

DRAGAN, C.; FATI, O.; RADU, M.; CALIN, L.; SAMUILA, A.; DASCALESCU, L. Tribocharging of Mixed Granular Plastics in a Fluidized-Bed Device. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Houston, USA, p. 1 – 6, 2010.

DWARI, R.; HANUMANTHA, R. K. Fine coal preparation using novel triboelectrostatic separator. **Miner. Eng.**, v. 22, p. 119–127, 2009.

EUROPEAN COMMISSION. (2012). **Recast of the WEEE Directive**. Disponível em: <[http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index_en.htm)>. Acesso em: 31 jan. 2016.

FERREIRA, D. A.; PRADOS, L. M. Z.; MAJUSTE, D.; MANSUR, M. B. Hydrometallurgical separation of aluminium, cobalt, copper and lithium from spent Li-ion batteries. **J. Power Sources**. v. 187, p. 238 – 246, 2009.

FREITAS, M.B.J.G.; GARCIA, E.M. Electrochemical recycling of cobalt from cathodes of spent lithium-ion batteries. **J. Power Sources**. v. 171, n. 2, p. 953 – 959, 2007.

GAUDIN, A. M. Principles of electrical processing. **Minerals Science and Engineering**, p. 46 – 57, 1971.

GEORGI-MASCHLER, T.; FRIEDRICH, B.; WEYHE, R.; HEEGN, H.; RUTZ, M. Development of a recycling process for Li-ion batteries. **Journal of Power Sources**. v. 207, p. 173 – 182, 2012.

GOMIDE, R. **Operações Unitárias: Separações Mecânicas**. Ed. Autor, v.3, 197 p., 1980.

GONG, F.; FENG, M.; ZHAO, C.; ZHANG, S.; YANG, M. Thermal properties of poly(vinyl chloride) / montmorillonite nanocomposites. **Polymer Degradation and Stability**. v. 84, p. 289 – 294, 2004.

HAMAD, K.; KASEMM, M.; DERI, F. Recycling of waste from polymer materials: Na overview of the recent works. **Polymer Degradation and Stability**., v. 98, p. 2801 – 2812, 2013.

HARPER, W. R. Contact and Frictional Electrification: Nonographs on the Physics and Chemistry of Materials. **Clarendon Press**, Oxford, UK, 1967.

HARPER, W. The Volta effect as a cause of static electrification. **Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. A. Math. Phys. Sci.**, v. 205, p. 83 – 103, 1951.

HAYES, P. C. PROCESS PRINCIPLES IN MINERALS AND MATERIALS PRODUCTION. **Hayes Publishing Co.**, Austrália, 1993.

HIGASHIYAMA, Y.; UJIIE, Y.; ASANO, K. Triboelectrification of plastic particles on a vibrating feeder laminated with a plastic film. **J. Electrostat.**, v. 42, p. 63 – 68, 1997.

HOBBS, G.; S. HALLIWELL, A. Recycling of Plastics and Polymer Composites. **Polymer Recycling**, v. 5, p. 23 – 29, 2000.

HORVAT, N.; FLORA, N. T. Tertiary Polymer Recycling: Study of Polyethylene Thermolysis as a First Step to Synthetic Diesel Fuel. **Fuel**, v. 78, p. 459 – 470, 1999.

HU, X.; CALO, J.M. Plastic particle separation via liquid-fluidized bed classification. **AIChE J.**, v. 52, p. 1333 – 1342, 2006.

HUANG, K.; GUO, J.; XU, Z. Review - Recycling of waste printed circuit boards: A review of current technologies and treatment status in China. **Journal of Hazardous Materials**, v.164, p. 399–408, 2009.

HUTH-FEHRE, T.; FELDHOFF, R.; KANTIMM, T.; QUICK, L.; WINTER, F.; CAMMANN, K.; VAN DEN BROEK, W.; WIENKE, D., MELSSEN, W., BUYDENS, L. NIR – remote sensing and artificial neural networks for rapid identification of post consumer plastics. **J. Mol. Struct.**, v. 348, p. 143–146, 1995.

INBRAS-ERIEZ. Procedimento de comicionamento. Separador eletrostático de laboratório modelo EPS-14/01S. Departamento de Engenharia. Inbras – Eriez, 2015.

INCULET, I.I.; CASTLE, G.S.P.; BROWN, J.D. Electrostatic separation of plastics for recycling. **Particul. Sci. Technol.**, v. 16, p. 91 – 100, 1998.

INCULET, I.I.; CASTLE, G.S.P.; BROWN, J.D. Tribo-electrification system for electrostatic separation of plastics. In: **Anon (Ed.)**. IEEE, Denver, USA, p. 1397 – 1399, 1994.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos** – Relatório de Pesquisa, 2012. Disponível em: <[http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009\\_relatorio\\_res\\_iduos\\_solidos\\_urbanos.pdf](http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_res_iduos_solidos_urbanos.pdf)>. Acesso em: 11 maio 2015.

IUGA, A.; CALIN, L.; NEAMTU, V.; MIHALCIOIU, A.; DASCALESCU, L. Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device. **J. Electrostat.**, v. 63, p. 937–942, 2005.

JEON, H.S.; PARK, C.H.; CHO, B.G.; PARK, J.K. Separation of PVC and rubber from covering plastics in communication cable scrap by tribo-charging. **Sep. Sci. Technol.**, v. 44, p. 190 –202, 2009.

JHA, M. K.; AMRITA, A. K.; JHA, A. K.; KUMAR, V.; HAIT, J.; PANDEY, B. D. Recovery of lithium and cobalto from waste lithium ion batteries of mobile phone. **Waste Management**. v. 33, p. 1890 – 1897, (2013).

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, p. 1209-1212, 2012.

JIANG, W.; JIA, L.; ZHEN-MING, X. Optimization of key factors of the electrostatic separation for crushed PCB wastes using roll-type separator. **Journal of Hazardous Materials**. v. 154, p. 161 – 167, 2008.

KAMINSKY, W. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. **VHC Verlags Publishes Inc**, v. 21, cap. 2, 1992.

KASPER, A. C., BERSELLI, G. B. T., FREITAS, B. D., TENÓRIO, J. A. S., BERNARDES, A. M., VEIT, H. M. Printed wiring boards for mobile phones: Characterization and recycling of copper. **Waste Management**, v. 31, n. 12, p. 2536 - 2545, 2011.

LAWVER, J. E. State of the art of electrostatic separation of minerals. **Journal of the Electrochemical Society**, v. 116, p. 57 - 60, 1969.

LEE, C.; TANG, L.; POPURI, S. R. A study on the recycling of scrap integrated circuits by leaching. **Waste Management Research**, v. 29, p. 677-685, 2010.

LEE, J. K.; SHIN, J. H. Triboelectrostatic separation of PVC materials from mixed plastics for waste plastic recycling. **Korean J. Chem. Eng.**, v. 19, n. 2, p. 267-272, 2002.

LEITE, P. R. **Logística Reversa: meio ambiente e competitividade**. Prince Hall, São Paulo - Brasil, 2003.

LI, J.; WU, G.; XU, Z. Tribo-charging properties of waste plastic granules in process of triboelectrostatic separation. **Waste Management**, v. 35. p. 36 – 41, 2015.

LI, L.; DUNN, J. B.; ZHANG, X. X.; GAINES, L.; CHEN, R. J.; WU, F.; AMINE, K. Recovery of metals from spend lithium-ion batteries with organic acids as leaching reagents and environmental assessment. **Journal of Power Sources**. v. 233, p. 180 – 189, 2013.

LINDEN, D.; REDDY, T. B. **HANDBOOK OF BATTERIES**, McGraw-Hill Handbooks, cap. 34-35, 2008.

LOWELL, J.; ROSE-INNES, A.C. Contact electrification. **Adv. Phys.**, v. 29, p. 947 – 1023, 1980.

LUNGU, M. Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect. **Miner. Eng.**, v. 17, p. 69 – 75, 2004.

LUPI, C.; PASQUALI, M.; DELL'ERA, A. Nickel and cobalt recycling from lithium-ion batteries by electrochemical processes. **Waste Management**. v. 25, n. 2, p. 215 – 220, 2005.

MALCOLM, G. R.; MARIO, M.; JAVIER, T.; SUSANA, T. Optimization of the recovery of plastics for recycling by density media separation cyclones. **Resources Conserv. Recycl.**, v. 55, p. 472–482, 2011.

MANIVANNAN, A. e SEEHRA, M. S. Identification and quantification of polymers in waste plastics using differential scanning calorimetry. Em: Preprints of symposia-division of fuel chemistry American chemical society. v. 42, p. 2028 – 1032, 1997.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros**. Edgard Blücher Ltda, 2 ed., São Paulo - Brasil, 1999.

MANRICH, S., FRATTINI, G., ROSALINI, A. C. **Identificação de Plásticos: uma ferramenta para a reciclagem.** EDUFSCar, São Carlos – Brasil, 1997.

MANTUANO, D.P.; DORELLA, G.; ELIAS, R.C.A.; MANSUR, M.B. Analysis of a hydrometallurgical route to recover base metals from spent rechargeable batteries by liquid–liquid extraction with Cyanex 272. **J. Power Sources**, v. 159, n. 2, p. 1510 - 1518, 2006.

MASTELLONE, M. L. **Thermal treatments of plastic wastes by means of fluidized bed reactors.** 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Segunda Universidade de Nápoles, Itália, 1999.

MATSUSHITA, Y.; MORI, N.; SOMETANI, T. Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades. **Electr. Eng. Japan**, v. 127, p. 33 – 40, 1999.

MILOUDI, M.; MEDLES, K.; TILMATINE, A.; BENDAOU, A.; DASCALESCU, L. Optimization of Belt-Type Electrostatic Separation of Triboaerodynamically Charged Granular Plastic Mixtures. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 49, n. 4, p. 1781 – 1786, 2013.

MILOUDI, M.; MEDLES, K.; TILMATINE, A.; BRAHAMI, M.; DASCALESCU, L. Optimisation of belt-type electrostatic separation of granular plastic mixtures ribocharged in a propeller-type device. **J. Phys: Conf. Ser.**, v. 301, 2011b.

MOHAN, V. M.; HU, B.; QIU, W.; CHEM, W. Synthesis, structural, and electrochemical performance of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanotubes as cathode material for lithium battery. **Appl. Electrochem.** v. 39, p. 2001 - 2006, 2009.

MUKHERJEE, R.; KRISHNAN, R.; LU, T. M.; KORATKAR, N. Nanostructured electrodes for high-power lithium ion batteries. **Nano Energy**, v. 1, p. 518 - 533, 2012.

NAZRI, G. A.; PISTOIA, G. Lithium batteries: Science and Technology. **Springer Science Business Media**, Estados Unidos, p. 1-35; 315-442; 545-617, 2003.

NÉMETH, E.; SCHUBERT, G.; ALBRECHT, V.; SIMON, F. Polymer tribo-electric charging: dependence on thermodynamic surface properties and relative humidity. **Journal of Electrostatics**, v. 58, p. 3 – 16, 2003.

OLIVEIRA, M. C. B. R. **Gestão de Resíduos Plásticos Pós-consumo: Perspectiva para a reciclagem no Brasil.** Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

ORTEGA-RIVAS, E. **Unit Operations of Particulate Solids – Theory and Practice.** New York: CRC Press, 2012.

PARENTE, R. A. **Elementos estruturais de plástico reciclado.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2006.

PARFITT, J. **Analysis of household waste composition and factors driving waste increases, WRAP for strategy unit.** Government Cabinet Office, London, U.K, 2000.

PARK, C.H.; JEON, H.S.; PARK, J.K. PVC removal from mixed plastics by triboelectrostatic separation. **J. Hazard. Mater.**, v. 144, p. 470 – 476, 2007b.

PARK, C.H.; JEON, H.S.; CHO, B.G.; PARK, J.K. Triboelectrostatic separation of covering plastics in chopped waste electric wire. **Polym. Eng. Sci.**, v. 47, p. 1975 – 1982, 2007a.

PARK, C.H.; JEON, H.S.; YU, H.S.; HAN, O.H.; PARK, J.K. Application of electrostatic separation to the recycling of plastic wastes: separation of PVC, PET and ABS. **Environ. Sci. Technol.**, v. 42, p. 249–255, 2008a.

PARK, C.H.; PARK, J.K.; JEON, H.S.; CHUN, B.C. Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger. **J. Electrostat.**, v. 66, p. 578 – 583, 2008b.

PARK, Y. J.; FRAY, D. J. Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. **Journal of Hazardous Materials**, v. 164, p. 1152–1158, 2009.

PASCOE, R.D.; HOU, Y.Y. Investigation of the importance of particle shape and surface wettability on the separation of plastics in a larcodem separator. **Miner. Eng.**, v. 12, p. 423 – 431, 1999.

PERDON, S. Sustainable development in practice: case studies for engineers and scientists. In: AZAPAGIC, A.; PERDON, S., CLIFT, R. **Introduction to Sustainable Development**. Wiley, 1 ed., cap. 1, 2004.

PLASTIC EUROPE, 2013. Plastics – the facts 2013. Disponível em: <<http://www.plasticseurope.org>>. Acesso em: 05 abr. 2015.

PLASTIVIDA – Instituto Socioambiental dos Plásticos. **Monitoramento dos índices de reciclagem mecânica de plástico no Brasil (IRmP) 2011**. Disponível em: <[http://www.plastivida.org.br/2009/pdfs/IRmP/Apresentacao\\_IRMP2011.pdf](http://www.plastivida.org.br/2009/pdfs/IRmP/Apresentacao_IRMP2011.pdf)>. Acesso em: 11 maio 2015.

RICHARD, G. M.; MARIO, M.; JAVIER, T.; SUSANA, T. Optimization of the recovery of plastics for recycling by density media separation cyclones. **Resources Conserv. Recycl.**, v. 55, p. 472 – 482, 2011.

RICK, U.; JENNY, T.; RUSTER, U. Autopeças: Projeto comprova a viabilidade do uso de resina reciclada em módulos de airbag. **Plástico Industrial**. v. 46, p. 26, 2002.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente. Lei 11.187. **Dispõe sobre o descarte e destinação final de pilhas que contenham mercúrio metálico, lâmpadas fluorescentes, baterias de telefone celular e demais artefatos que contenham metais pesados no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 07 de julho de 1998.

SANTOLERI, J. J. **Pollution Issues**: Incineration. Disponível em <<http://www.pollutionissues.com/Ho-Li/Incineration.html>> Acesso em: 01 jun. 2015.

SCHWEERS, M. E.; ONUSKA, J. C.; HANEWALD, R. K. **A PYROMETALLURGICAL PROCESS FOR RECYCLING CADMIUM CONTAINING BATTERIES.** In: Proceedings of HMC-South'92, New Orleans, EUA, p. 333–335, 1992.

SCOTT, D. A two-colour near-infrared sensor for sorting recycled plastic waste. **Meas. Sci. Technol.**, v. 6, p. 156, 1995.

SHEN, H.; PUGH, R.J.; FORSSBERG, E. Floatability, selectivity and flotation separation of plastics by using a surfactant, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Aspects*, v. 196, p. 63 – 70, 2002.

SHEN, L.; WORRELL, E. Plastic Recycling. In: WORRELL, E.; REUTER, M. A. **Handbook of Recycling: State-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists.** Elsevier, 1 ed., Utrecht – Holanda, p. 179-189, 2014.

SHENT, H.; PUGH, R. J.; FORSSBERG, E. A review of plastics waste recycling and the flotation of plastics. **Resources Conserv. Recycl.**, v. 25, p. 85 – 109, 1999.

SHIBATA, J.; MATSUMOTO, S.; YAMAMOTO, H.; KUSAKA, E.; PRADIP. Flotation separation of plastics using selective depressants. **Int. J. Miner. Process.**, v. 48, p. 127 – 134, 1996.

SHIN, M. S.; KIM, N. H.; SOHN, J. S.; YANG, D. H.; KIM, Y. H. Development of a metal recovery process from Li-ion battery wastes. **Hydrometallurgy.** v. 79, p. 172 - 181, 2005.

SIDDIQUE, R.; KHATIB, J.; KAUR, I. Use of recycled plastic in concrete: a review. **Waste Manage.**, v. 28, 1835–1852, 2008.

SILVEIRA, A. V. M.; FUCHS, M. S.; PINHEIRO, D. K.; TANABE, E. H.; BERTUOL, D. A. Recovery of indium from LCD screens of discarded cell phones. **Waste Management.** v. 45, p. 334 – 342, 2015.

SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Quim. Nova**, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005.

SPITZCOVSKY, D. ONU lança primeiro mapa global de lixo eletrônico. *Planeta sustentável*, 17 dez, 2013.

StEP. StEP E-waste WorldMap. Disponível em: <http://www.step-initiative.org>. Acesso em: 26 jan. 2016.

TILMATINE, A.; MEDLES, K.; YOUNES, M.; BENDAOU, A.; DASCALESCU, L. Roll-type versus free-fall electrostatic separation of tribocharged plastic particles. **IEEE Trans. Ind. Appl.**, v. 46, p. 1564 – 1569, 2010.

TILMATINE, A.; MEDLES, K.; YOUNES, M.; BENDIMERAD, S. E.; BOUKHOLDA, F. A.; DASCALESCU, L. Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures. **Waste Management**, v. 29, p. 228 – 232, 2009.



TRIGWELL, S.; GRABLE, N.; YUTERI, C.U.; SHARMA, R.; MAZUMDER, M.K. Effects of surface properties on the tribocharging characteristics of polymer powder as applied to industrial processes. **IEEE Trans. Ind. Appl.**, v. 39, p. 79 – 86, 2003.

UMICORE, Materials Technology Group. Disponível em: <<http://www.unicore.com>> Acesso em: 25 jan 2016.

VARELA, H.; HUGUENIN, F.; MALTA, M.; TORRESI, R. M. Materiais para cátodos de baterias secundárias de Lítio. **Química Nova**, v. 25, n. 2, p. 287-299, 2002.

VEIT, H. M.; DIEHL, T.; SALAMI, A.; RODRIGUES, J. S.; BERNARDES, A. M.; TENÓRIO, J. A. S. Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit board scrap. **Waste Management**, v. 25, p. 67-74, 2005.

WIDMER, R.; OSWALD-KRAPF, H.; SINHA-KHETRIWAL, D.; SCHNELLMANN, M.; BÖNI, H. Global perspectives on e-waste. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 25, p. 436– 458, 2005.

WU, J.; QIN, Y.; AHO, Q.; XU, Z. Impact of nonconductive powder on electrostatic separation for recycling crushed waste circuit board. **Journal of Hazardous Materials**. v. 164, p. 1352 – 1358, 2009.

WU, G.; LI, J.; XU, Z. Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review. **Waste Management**. v. 33, p. 585 – 597, 2013.

XU, J.; THOMAS, H. R.; FRANCIS, R. W.; LUM, K. R.; WANG, J.; LIANG, B. A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries. **J. Power Sources**. v. 177, p. 512 - 527, 2008.

ZANG, P.; YOKOYAMA, T.; ITABASHI, O.; SUZUKI, T.M.; INOUE, K. Hydrometallurgical process for recovery of metal values from spent lithium ion secondary battery. **Hydrometallurgy**. v. 47, p. 259 – 271, 1998.

ZHANG X.; XIE, Y.; CAO, H.; NAWAZ, F.; ZHANG, Y. A novel process for recycling and resynthesizing  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$  from the cathode scraps intended for lithium-ion batteries. **Waste Manag.** v. 34, p. 1715 – 1724, 2014.

ZHANG, P.; YOKOYAMA, T.; ITABASHI, O.; SUZUKI, T. M.; INOUE, K. Hydrometallurgical process for recovery of metal values from spent lithium-ion secondary batteries. **Hydrometallurgy**. v. 47, p. 259 - 271, 1998.

ZHANG, S.S. XU, K.; JOW, T. R. The low temperature performance of Li-ion batteries. **Journal of Power Sources**, v. 115. p.137–140, 2003.

ZHANG, S.S.; XU, K.; JOW. Low temperature performance of graphite electrode in Li-ion cells. **Electrochimica Acta**, v. 48. p.241-246, 2002.

ZHANG, T.; HE, Y.; WANG, F.; GE, L.; ZHU, X.; LI, H. Chemical and process mineralogical characterizations of spent lithium-ion batteries: An approach by multi-analytical techniques. **Waste Manag.** v. 34, n. 6, p. 1051 – 1058, 2014.

ZHANG, T.; HE, Y.; GE, L.; FU, R.; ZHANG, X.; HUANG, Y. Characteristics of wet and dry crushing methods in the recycling process of spent lithium-ion batteries. **J. Power Sources.** v. 240, p.766 – 771, 2013.