

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

BIANCA MARIA RODRIGUES

**Estudo da separação triboeletrostática de resíduos poliméricos pós-consumo para
reciclagem**

Lorena
2021

BIANCA MARIA RODRIGUES

Estudo da separação triboeletrostática de resíduos poliméricos pós-consumo para reciclagem

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais na área de Materiais Convencionais e Avançados.

Orientador: Prof. Dr. Clodoaldo Saron.

Versão Original

Lorena
2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Rodrigues, Bianca Maria
Estudo da separação triboeletrostática de resíduos
poliméricos pós-consumo para reciclagem / Bianca
Maria Rodrigues; orientador Clodoaldo Saron - Versão
Original. - Lorena, 2021.
83 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências - Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Materiais na Área de
Materiais Convencionais e Avançados) - Escola de
Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo.
2021

1. Reciclagem. 2. Polímeros. 3. Separação
triboeletrostática. 4. Tribocarregamento. 5. Resíduos
pós-consumo. I. Título. II. Saron, Clodoaldo, orient.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao orientador Clodoaldo Saron por sua disposição e paciência trabalhando comigo ao longo dos anos de orientação, compartilhando seus conhecimentos e experiências.

Aos meus pais Jussara Guerreiro e Manoel Rodrigues, meu alicerce na vida, que apoiam minhas decisões e escolhas, estando sempre presentes quando precisei.

Ao meu parceiro querido Jhonatan Bastos, que acredita na minha evolução e me faz sempre querer ser alguém melhor.

Aos amigos que conheci na Pós-graduação e levarei um pouco de cada um comigo ao finalizar essa jornada. Me ensinaram muito, compartilharam frustrações e vitórias, além dos cafés nas pausas do dia. Obrigada Denise Luiz, Camila Grillo, Rayane Camargo, Tamires Brekailo, Diego Pinzón, Davison Almeida, Luís Gustavo, Felipe Oliveira, Guilherme Fulop, Thomas Conte, Helder Altassis, e Uirajá Ruschoni.

A todos funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais pela disponibilidade e ajuda durante a pesquisa, em especial ao Sr. Ailton, que proporcionou grande assistência quando foi necessário.

Aos estimados amigos que a vida me trouxe, que foram companhia em diversos momentos, não importasse a distância.

À minha abençoada família.

À Escola de Engenharia de Lorena e Universidade de São Paulo.

À banca julgadora.

À FAPESP por fornecer recursos de auxílio à pesquisa.

À CAPES pela bolsa concedida ao longo deste estudo e por ter fornecido amparo às pesquisas que tiveram que ser prorrogadas devido à pandemia causada pelo Covid-19.

“Graças à impermanência, tudo é possível.”

Thich Nhat Hanh

RESUMO

RODRIGUES, B. M. **Estudo da separação triboeletrostática de resíduos poliméricos pós-consumo para reciclagem**. 2021. 83p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2021.

A crescente produção de polímeros e a geração de resíduos destes materiais têm sido motivo de preocupação em todos os países e, conseqüentemente, gerando a necessidade de encontrar processos viáveis que permitam a reutilização ou reciclagem dos resíduos poliméricos de forma a preservar o meio ambiente. Sendo assim, a reciclagem de resíduos poliméricos é considerada a melhor maneira de tratá-los. À vista disso, uma das etapas importantes neste processo está na separação dos resíduos poliméricos em seus diferentes tipos. Uma técnica altamente promissora que pode ser empregada no processamento de resíduos poliméricos é a separação eletrostática. Quando usada em conjunto com um processo de tribocarregamento, se denomina separação triboeletrostática. Esta técnica apresenta vantagens, pois, em geral, compreende uma separação a seco, não faz uso de substâncias que possam degradar os materiais poliméricos, além de não envolver altos custos para aplicação. Este trabalho visou elaborar um sistema aperfeiçoado de separação triboeletrostática de polímeros e avaliar o desempenho e viabilidade desse método na separação de diversas misturas de resíduos pós-consumo de polímeros termoplásticos. Dois protótipos de sistemas de separação em escala laboratorial foram desenvolvidos a partir de tribocarregadores constituídos de policloreto de vinila (PVC) e de poliestireno (PS), testando a eficiência de separação em misturas binárias e ternárias de resíduos pós-consumo de politereftalato de etileno (PET), polietileno de alta densidade (PEAD), polipropileno (PP), copolímero de acrilonitrila-*co*-butadieno-*co*-estireno (ABS) e PVC. Índices elevados de separação e pureza dos polímeros, atingindo valores acima de 90%, foram alcançados após o controle de parâmetros fundamentais do processo tais como tempo de carregamento, umidade do material, tamanho das partículas, geometria do dispositivo e ciclos de reprocessamento. A técnica de separação triboeletrostática mostrou grande potencial para aplicação em sistemas mecanizados e em larga escala para a segregação de resíduos de polímeros termoplásticos em operações de reciclagem, o que pode contribuir para o avanço da reciclagem de polímeros, levando também a diminuição de danos causados ao meio ambiente

Palavras-chave: Reciclagem. Polímeros. Separação triboeletrostática. Tribocarregamento. Resíduos pós-consumo.

ABSTRACT

RODRIGUES, B. M. **Study of triboelectrostatic separation of post-consumer polymeric waste for recycling**. 2021. 83p. Dissertation (Master of Science) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2021.

The increase in production of polymers as well as the generation of waste from these materials have been a matter of concern in all countries, leading to the search for viable processes for reuse or recycling of polymeric waste in order to preserve the environment. Therefore, the recycling of polymer waste is considered the best alternative to treat it. The separation of polymeric waste into its different types is a fundamental step for polymer recycling and the triboelectrostatic separation has emerged as a promising technique for this purpose since it presents some advantages such as dry separation, absence of chemical products for separation and lower cost for application. This study aimed to elaborate an improved a system for triboelectrostatic separation of polymeric waste and to evaluate the performance and viability of this method in the separation of several mixtures of post-consumption waste from thermoplastic polymers. Two prototypes of triboelectrostatic separation systems were developed in laboratorial scale from tribocharger constituted by polyvinylchloride (PVC) or polystyrene (PS) with the purpose of testing the separation efficiency in binaries and ternaries mixtures of post-consumption waste of polyethyleneterephthalate (PET), high-density polyethylene (HDPE), polypropylene (PP), acrylonitrile-*co*-butadiene-*co*-styrene copolymer (ABS) and PVC. High separation and purity indexes, up to 90 wt%, were achieved for polymers waste after the control of the fundamental parameters in the process such as charging time, material moisture, particles size, geometry of the device and cycles of reprocessing. The triboelectrostatic separation showed high potential for application in mechanized systems as well as in large scale of production for the segregation of thermoplastic polymers waste in recycling processes, that can contribute to the advancement of polymer recycling, leading also to the decrease in damages caused on the environment.

Keywords: Recycling. Polymers. Triboelectrostatic separation. Tribocharger. Post-consumption waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição gravimétrica da coleta seletiva.....	18
Figura 2 – Principais polímeros consumidos no Brasil.	19
Figura 3 - Polímeros de engenharia consumidos no Brasil.	20
Figura 4 - Estrutura química do PEAD.	21
Figura 5 - Estrutura química do PET.....	22
Figura 6 - Estrutura química do ABS.	23
Figura 7 - Estrutura química do PVC.	24
Figura 8 - Estrutura química do PP.	25
Figura 9 - Simbologia de identificação de materiais recicláveis.	26
Figura 10 - Separação por densidade de polímero e impureza.....	30
Figura 11 - Esquema do processo de flotação.	31
Figura 12 - Configuração típica de um espectrômetro.	32
Figura 13 - Processo de separação por tribocarregamento de materiais; (a) partícula-partícula, (b) partícula-superfície.	34
Figura 14 - Fluxograma do processo de separação triboeletrostática das misturas de polímeros	36
Figura 15 - Classificação de equipamentos utilizados na separação triboeletrostática.	37
Figura 16 - Esquema representativo de um tribocarregador com lâminas rotativas.	38
Figura 17 - Esquema representativo de um separador triboeletrostático com carregador de tubo rotativo.....	39
Figura 18 - Esquema experimental de tribocarregador por vibração.	39
Figura 19 - Esquema de tribocarregador do tipo ciclone.....	40

Figura 20 – a) Esquema de leito fluidizado para o estudo de tribocarregamento de polímeros e b) Esquema representativo de um tribocarregador do tipo hélice.....	41
Figura 21 - Esquema representativo de um separador triboeletrostático em queda-livre. 1, 2: eletrodos em forma de chapas; 3, 4: alimentação de alta voltagem; 5: coletor.....	42
Figura 22 – Representação esquemática de separador triboeletrostático tipo cilindro. (1) alimentador vibratório; (2) eletrodo rotativo aterrado; (3) eletrodo estático HV; (4) escova; (5) compartimentos coletores.	43
Figura 23 - Esquema representativo de separador triboeletrostático do tipo leito fluidizado...	43
Figura 24 - Fluxograma dos métodos empregados no trabalho.	48
Figura 25 - Materiais utilizados para os testes a) ABSp; b) ABSg; c) PEADp; d) PEADg; e) PET; f) PP e g) PVC.	50
Figura 26 - Fluxograma esquemático das etapas de desenvolvimento do estudo.....	52
Figura 27 - Esquema representativo do sistema de separação triboeletrostática.	54
Figura 28 – Dispositivo de carregamento triboeletrostático por fluxo de ar utilizado na pesquisa.....	55
Figura 29 – a) Separador eletrostático desenvolvido no trabalho e b) Fonte de alta tensão utilizada nos ensaios.....	56
Figura 30 - Série triboelétrica adotada.....	58
Figura 31 - Resultados da separação da mistura PVC/PEADp com as porcentagens em massa de PVC e PEADp.....	59
Figura 32 - Resultados da separação da mistura PVC/PET com as porcentagens em massa de PVC e PET.....	60
Figura 33 - Resultados da separação da mistura PVC/ABSp com as porcentagens em massa de PVC e ABSg.	61
Figura 34 - Resultados de recuperação na separação da mistura PVC/PEADp/PET com as porcentagens em massa de PVC, PEADp e PET.	62

Figura 35 - Disposição dos materiais após separação da mistura ternária nos coletores:a) eletrodo neutro; b) zona intermediária e c) eletrodo negativo.....	63
Figura 36 - Tribocarregador em PS: a) conexão da mangueira para injeção de ar; b) integração com a câmara de separação.	64
Figura 37 - Efeito do processo de secagem na separação de misturas PET/PP: a) taxa de recuperação e b) pureza dos materiais.	66
Figura 38 - Resultados da separação da mistura PET/PEADp pós secagem com as porcentagens em massa de PET e PEADp.	67
Figura 39 - Série triboelétrica dos materiais proposta na Etapa 2 do estudo.....	68
Figura 40 - Resultados de pureza média obtidos na separação em dois ciclos da mistura PET/PP com as porcentagens em massa de PET e PP.	69
Figura 41 - Resultados de pureza média obtidos na separação em dois ciclos da mistura PET/PEADp com as porcentagens em massa de PET e PEADp.	70
Figura 42 - Resultados de pureza média obtidos na separação em três ciclos das misturas PET/PP e PET/PEADp com as porcentagens em massa de a) PET e PP e b) PET e PEADp.	70
Figura 43 - Resultados de pureza dos materiais em diferentes ciclos de separação, com as porcentagens em massa de PET e PP.	71
Figura 44 - Resultados de pureza dos materiais em diferentes de ciclos de separação, com as porcentagens em massa de PET e PEADp.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Séries triboelétricas de polímeros apresentadas na literatura.	35
Tabela 2 - Tamanho médio das partículas dos polímeros utilizados nos testes de separação triboeletrostática.	49
Tabela 3 - Ensaios com polímeros puros.	57
Tabela 4 - Separação das misturas binárias dos polímeros.	59
Tabela 5 - Separação da mistura ternária de polímeros.	62
Tabela 6 - Separação das misturas binárias dos polímeros na etapa 2.	65
Tabela 7 - Separação das misturas binárias dos polímeros na etapa 2.	67

LISTA DE SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABS	Poli (acrilonitrila- <i>co</i> -butadieno- <i>co</i> -estireno)
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
NIR	Espectroscopia no Infravermelho Próximo
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PELBD	Polietileno linear de baixa densidade
PET	Poli(tereftalato de etileno)
PEUAPM	Polietileno de ultra alta massa molar
PEUBD	Polietileno de ultra baixa densidade
PMMA	Poli(metacrilato de metila)
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Política Nacional de Saneamento Básico
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Poli(cloreto de vinila)
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SAN	Copolímero estireno-acrilonitrila
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SPI	<i>Society of Plastics Industry, Inc.</i>
SUASA	Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária
UR	Umidade relativa do ar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Políticas públicas de resíduos sólidos no Brasil.....	17
2.2	Polímeros como resíduos sólidos	19
2.2.1	Polietileno de alta densidade – PEAD.....	20
2.2.2	Poli (tereftalato de etileno) – PET	21
2.2.3	Poli (acrilonitrila- <i>co</i> -butadieno- <i>co</i> -estireno) – ABS	22
2.2.4	Poli (cloreto de vinila) – PVC	23
2.2.5	Polipropileno – PP.....	25
2.3	Reciclagem de materiais poliméricos.....	26
2.4	Métodos de separação de polímeros pós-consumo	28
2.4.1	Separação manual.....	29
2.4.2	Separação por densidade	30
2.4.3	Separação por flotação	31
2.4.4	Separação por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR).....	32
2.4.5	Separação triboeletrostática.....	33
2.4.6	Tipos de equipamentos para tribocarregamento.....	37
2.4.6.1	Tribocarregador de fase única sólida	37
2.4.6.2	Tribocarregador de fase dupla gás-sólido	40
2.4.7	Tipos de configurações para deflexão eletrostática.....	41
2.4.8	Efeito da umidade relativa na separação triboeletrostática	44
3	OBJETIVO	46
3.1	Objetivo Geral.....	46
3.2	Objetivos Específicos	46
4	METODOLOGIA	47
4.1	Materiais.....	47
4.2	Métodos.....	47
4.2.1	Preparação dos materiais para a separação triboeletrostática.....	48
4.2.1.1	Lavagem.....	48

4.2.1.2	Secagem 1	49
4.2.1.3	Moagem	49
4.2.1.4	Separação granulométrica.....	49
4.2.1.5	Secagem 2	50
4.2.1.6	Secagem 3	50
4.2.2	Sistema de separação triboeletrostática	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
5.1	Etapa 1 – Sistema de separação com tribocarregador de policloreto de vinila (PVC).....	54
5.1.1	Dispositivo de tribocarregamento	54
5.1.2	Dispositivo de separação eletrostática	56
5.1.3	Ensaio de tribocarregamento e desvio em campo elétrico com polímeros puros ..	57
5.1.4	Estudo da separação triboeletrostática de misturas binárias	58
5.1.5	Estudo da separação triboeletrostática de misturas ternárias.....	61
5.2	Etapa 2 - Sistema de separação com tribocarregador de poliestireno (PS)	63
5.2.1	Dispositivo de tribocarregamento	63
5.2.2	Estudo da separação triboeletrostática de misturas binárias	64
5.2.3	Separação triboeletrostática de misturas binárias envolvendo novos ciclos.....	68
6	CONCLUSÕES.....	73
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

A produção de resíduos é uma questão preocupante em todos os países, especialmente nos países desenvolvidos. Dentre os resíduos, os poliméricos têm grande importância devido ao aumento de sua produção nos últimos anos. No passado, os materiais poliméricos não eram reciclados devido aos custos de processamento. No entanto, os problemas gerados com o acúmulo destes resíduos e novas leis ambientais nos obrigam a buscar alternativas em vez de simplesmente depositar estes materiais em aterros controlados ou lixões. Dessa forma, devem ser desenvolvidos processos viáveis que permitam a reutilização ou reciclagem dos resíduos poliméricos de maneira ambientalmente correta (AZNAR *et al.*, 2006).

Dados da Associação Brasileira da Indústria do Plástico - ABIPLAST (2020) indicam que a produção de transformados poliméricos no ano de 2019 atingiu a faixa de 7,1 milhões de toneladas. Quanto ao consumo aparente destes materiais, estimou-se a quantia de 6,5 milhões de toneladas. Em contrapartida, a quantidade de material polimérico pós-consumo reciclado mecanicamente foi de apenas 757,6 mil toneladas (ABIPLAST, 2020).

A reciclagem de resíduos poliméricos é considerada a melhor maneira de tratá-los, porque ela não apenas reduz os resíduos, mas também economiza a energia utilizada na produção de um novo polímero virgem (LI; WU; XU, 2015). À vista disso, uma das etapas importantes no processo de reciclagem é a separação dos resíduos poliméricos em seus diferentes tipos (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005). Diferentes técnicas têm sido desenvolvidas e estudadas para a separação de polímeros, e as mais comuns envolvem separação por densidade, separação por flotação, separação eletrostática e separação ótica, como a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR). No Brasil, a separação de resíduos poliméricos pós-consumo é feita principalmente de forma manual em razão da mão-de-obra barata e pela pluralidade de empresas de reciclagem que apresentam pequeno porte (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005), porém ainda apresenta diversos problemas associados à falta de equipamentos, estrutura física e organizacional, sendo prejudicial para a saúde, além de não possuir alta eficiência.

Deve-se levar em conta que uma separação eficiente dos materiais é essencial para a realização da reciclagem, pois maior se torna a qualidade do produto reciclado. Isso se deve ao fato de que os mais diferentes tipos de polímeros em geral não são compatíveis entre si, devido à sua imiscibilidade característica e às diferentes condições de processamento. Por

conta disso, a mistura de diferentes tipos de polímeros tem influência nas propriedades químicas e físicas do produto final.

Dessa forma, buscando métodos efetivos, diferentes técnicas têm sido estudadas para a segregação de polímeros e uma altamente promissora que pode ser empregada no processamento de resíduos poliméricos é a separação eletrostática. Quando usada em conjunto com um processo de tribocarregamento, se denomina separação triboeletrostática (SILVEIRA *et al.*, 2018). Como materiais isolantes, os polímeros têm as características de carregamento triboelétrico, e suas cargas superficiais podem ser retidas por certo tempo. Assim, a separação triboeletrostática é *recomendada* para separação de polímeros, pois pode preservar as propriedades dos materiais, por ser uma técnica de separação a seco, e aponta pouca interferência em termos de poluição, além de não envolver altos custos para aplicação.

Uma vez que possui muitas vantagens sobre outros métodos de separação, é crescente o número de pesquisas relevantes realizadas nos últimos anos acerca da separação triboeletrostática para reciclagem de polímeros (LI; WU; XU, 2015). Deste modo, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficiência e a viabilidade de reprodução do método de separação triboeletrostática de resíduos poliméricos pós-consumo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Políticas públicas de resíduos sólidos no Brasil

Os fatores que se relacionam com referências legais à limpeza urbana são definidos na Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB), Lei n. 11.445, de 2007, regulamentada pelo Decreto 7.217, de 2010, e na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei 12.305, de 2010, regulamentada por meio do Decreto 7.404, de 2010.

A PNSB estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, de forma a declarar que os serviços públicos prestados se baseiam em princípios fundamentais, nos quais, dentre eles, destacam-se o conjunto dos serviços públicos de limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos, assim como infraestruturas destinadas exclusivamente a cada serviço e que estes sejam efetuados de formas adequadas à saúde pública e à proteção do meio ambiente (BRASIL, 2010a).

Na PNRS são estabelecidos seus princípios, objetivos e instrumentos, como também as diretrizes concernentes à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, aos instrumentos econômicos aplicáveis e à responsabilidade compartilhada – governo, indústria, comércio, importadores, serviços e consumidores – no ato de prover destinação adequada para os resíduos sólidos gerados na produção e pós-consumo de bens variados (BRASIL, 2010b; DEMAJOROVIC; MIGLIANO, 2013).

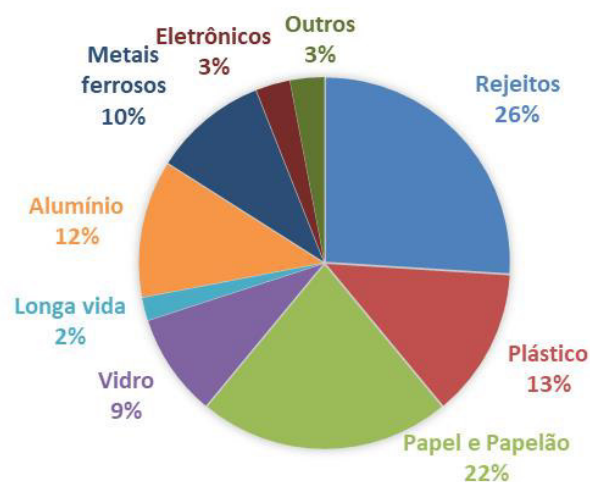
Nos dias atuais, por conta da acentuada urbanização, aliada ao aumento do consumo de novas tecnologias, uma vasta produção de resíduos se sucede. Ao longo da última década, a geração total de RSU aumentou cerca de 19% no País, com aumento da geração per capita de 9% no período (ABRELPE, 2020). Tais indícios deixam claros a necessidade de padrões de produção e consumo mais sustentáveis e um gerenciamento adequado dos resíduos sólidos para que se promova uma redução de seus impactos ao ambiente e à saúde (JACOBI; BESEN, 2011).

Dentre os objetivos inseridos na PNRS, ressaltam-se os propósitos da “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (BRASIL, 2010b). Dados da Abrelpe (2020) demonstram que 59,5% do montante anual de RSU foram adequadamente dispostos em aterros sanitários em 2019, enquanto nas unidades inadequadas como lixões e aterros

controlados foram descartados 40,5% dos resíduos, somando cerca de 29 milhões de toneladas no ano, sendo que as unidades inadequadas para disposição de RSU ainda estão presentes em todas regiões do país. Adicionalmente, um dado mais preocupante indica que houve um crescimento na disposição inadequada dos resíduos em 16% no período de 2010 a 2019. Uma vez acondicionados em lixões e aterros controlados, os resíduos sólidos podem comprometer a qualidade do solo, da água e do ar, além de se tornarem ambientes propícios para a proliferação de vetores e outros agentes transmissores de doenças. De modo geral, os impactos dessa degradação afetam toda a população (GIUSTI, 2009; GOUVEIA, 2012). Por conta disso, dentre as medidas mitigadoras para tais problemas ambientais e de saúde, dá-se ênfase à reciclagem.

Iniciativas como a coleta seletiva e posterior reciclagem para diminuição da quantidade de material descartado em aterros sanitários ou até mesmo em lixões e aterros controlados, que ocorrem de maneira inadequada, ainda caminham lentamente. Segundo pesquisas realizadas pelo Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE, 2019), é demonstrado, de acordo com a Figura 1, que aparas de papel/papelão são os tipos de materiais recicláveis mais coletados por sistemas municipais de coleta seletiva (em massa), seguidos dos polímeros em geral, alumínio, metais e vidro. A porcentagem de rejeito ainda é elevada, com cerca de 26%, e por consequência se nota a necessidade no investimento em educação para que a população separe o lixo corretamente.

Figura 1 - Composição gravimétrica da coleta seletiva.



Fonte: CEMPRE, 2019 (adaptado).

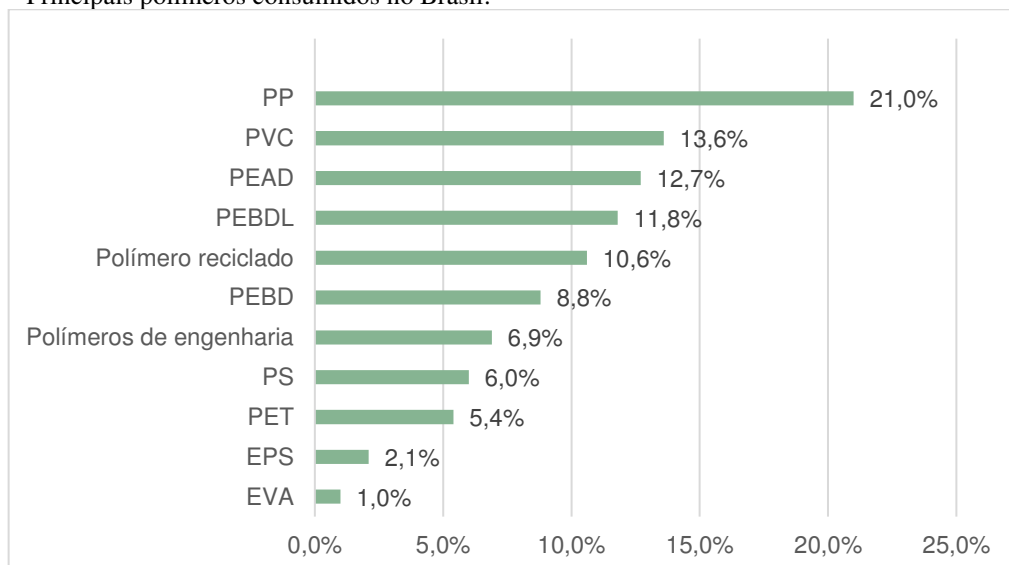
A reutilização de resíduos sólidos como insumos nos processos produtivos gera benefícios tanto na diminuição da poluição ambiental causada pelos aterros e depósitos de

lixo como os relacionados à conservação de energia, além de seu potencial de redução nas emissões de gases responsáveis pelo aquecimento global (GOUVEIA, 2012). Atrelado à isso, é de grande importância ressaltar o papel fundamental dos catadores de materiais recicláveis na gestão de resíduos sólidos no Brasil (DIAS, 2009). Como se pode compreender, é necessário incentivo à coleta seletiva, bem como uma adequada separação dos diversos materiais que compõem os RSU, não só na etapa de geração do resíduo, mas também nas centrais de triagem, uma vez que estes fatores impulsionam o processo de reciclagem (GOUVEIA, 2012).

2.2 Polímeros como resíduos sólidos

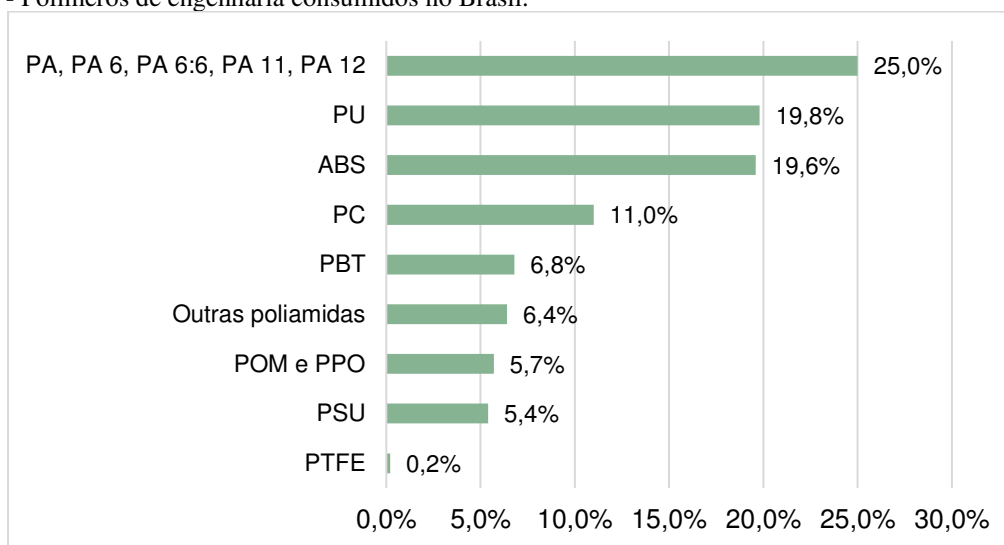
Polímeros são amplamente aplicados em embalagens, construção civil, equipamentos automotivos, elétricos e eletrônicos, sendo que as embalagens apresentam o maior segmento para esses materiais (WU; LI; XU, 2013). Na Figura 2, observa-se uma classificação dos principais polímeros consumidos no Brasil, destacando-se o polipropileno (PP), o policloreto de vinila (PVC), as variações de polietileno (PEAD, PEBD e PEBDL), assim como os polímeros reciclados. Já na Figura 3 destacam-se os principais polímeros de engenharia consumidos no país (ABIPLAST, 2020).

Figura 2 – Principais polímeros consumidos no Brasil.



Fonte: ABIPLAST, 2020 (adaptado).

Figura 3 - Polímeros de engenharia consumidos no Brasil.



Fonte: ABIPLAST, 2020 (adaptado).

Embora produtos poliméricos geralmente apresentem excelente durabilidade, mais da metade deles são descartados como rejeitos a cada ano. O aumento da demanda por polímeros gerou um rápido crescimento na produção, bem como o seu descarte. Dessa forma, os resíduos poliméricos se tornaram uma das maiores categorias de resíduos sólidos urbanos (RSU), especialmente em países industrializados (WU; LI; XU, 2013). Destaca-se então, a importância do estudo voltado aos materiais poliméricos, levando-se em conta a geração, em 2018, de 3,4 milhões de toneladas de resíduos poliméricos pós-consumo no país (ABIPLAST, 2020).

Certamente, uma das grandes vantagens dos materiais produzidos a partir de polímeros está na possibilidade de serem reciclados ou reutilizados diversas vezes de diferentes formas para produzir diferentes materiais (MAZZUCCO, 2008).

2.2.1 Polietileno de alta densidade – PEAD

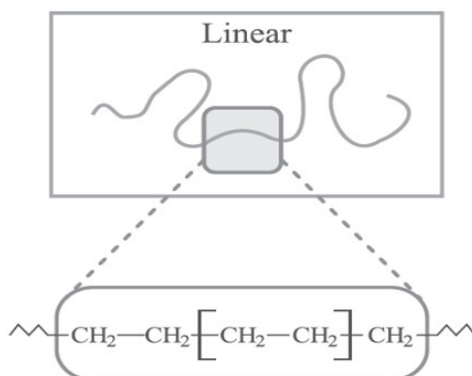
O polietileno é um polímero que pode ser obtido em cinco tipos diferentes de acordo com as condições reacionais e do sistema catalítico empregado na polimerização (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003):

- a) Polietileno de baixa densidade (PEBD);
- b) Polietileno de alta densidade (PEAD);
- c) Polietileno linear de baixa densidade (PELBD);
- d) Polietileno de ultra alta massa molar (PEUAPM);

e) Polietileno de ultra baixa densidade (PEUBD).

O PEAD é o polietileno mais cristalino, já que suas cadeias são lineares e contêm muito pouca ramificação (Figura 4). A porcentagem presente das fases cristalina e amorfa em sua estrutura reflete diretamente na densidade do material, oscilando numa faixa de 0,93 a 0,965 g/cm³ (KÜHL, 2014).

Figura 4 - Estrutura química do PEAD.



Fonte: COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003.

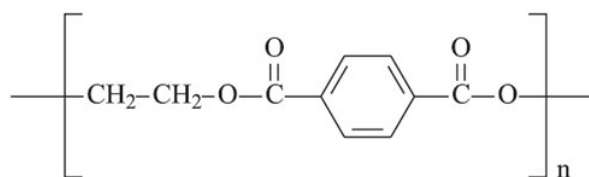
O baixo grau de ramificação deste polímero conduz a alta rigidez e a menor permeabilidade entre os outros tipos de polietileno, sendo favorável seu uso em itens que requerem retenção de líquidos, por exemplo (PEACOCK, 2000). Apresenta também propriedades de média resistência à tração e baixo impacto (ZHANG *et al.*, 2004), com temperatura de fusão na faixa de 125°C a 132°C (PEACOCK, 2000; FREITAS, 2014).

Esse material é utilizado em diferentes segmentos da indústria de transformação de polímeros, englobando os processamentos de moldagem por sopro, extrusão e moldagem por injeção. A utilização do PEAD engloba embalagens para cosméticos e defensivos agrícolas, tubos para redes de saneamento e de distribuição de gás, dutos para mineração e dragagem, sacos para lixo e sacolas de supermercados, dentre tantos outros produtos (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003).

2.2.2 Poli(tereftalato de etileno) – PET

O poli(tereftalato de etileno) (Figura 5) é um polímero de poliéster obtido pela polimerização por condensação entre o etilenoglicol e ácido tereftálico, de modo que os meros se ligam uns aos outros pelos grupos éster (SNYDER, 1995; BANNACH *et al.*, 2011).

Figura 5 - Estrutura química do PET.



Fonte: BANNACH et al.,2011.

O PET foi descoberto em 1946 por Whinfield e Dickson, se destacando pela presença de anéis aromáticos na cadeia principal, com uma temperatura de fusão em torno de 265°C (SCHROEDER; CELLA, 1988; ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009) e temperatura de transição vítrea de aproximadamente 75°C (SANTOS, 2012). O PET possui uma estrutura molecular regular e apresenta polaridade média, favorecendo sua cristalização a partir do estado fundido. Por este motivo, as formas comerciais normalmente são copolímeros, obtidas a partir do uso de comonômeros durante processo de polimerização, como o ácido isoftálico e o dimetanol-ciclohexano. Por outro lado, devido à presença do grupo aromático na sua cadeia principal, ocorre uma redução na velocidade de cristalização do material, obtendo-se produtos amorfos ao se realizar um resfriamento rápido (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009). Além disso, pode-se alcançar uma extensa faixa de cristalinidade (de 50% a 95%) sob condições específicas no processo de cristalização do PET (ISOLDI, 2003).

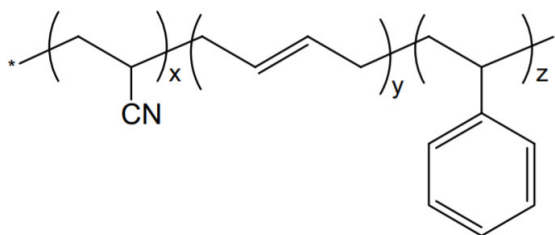
No Brasil, a principal aplicação do PET é direcionada à fabricação de garrafas para bebidas, nas quais o polímero se apresenta translúcido por conta do tamanho dos cristais formados durante a preparação da embalagem, que envolve processos de injeção e sopro. O polímero apresenta um alto percentual de cristalinidade, tendo suas características alteradas nos ciclos de aquecimento/resfriamento (BANNACH *et al.*, 2011). Em escala mundial, possui uma elevada participação na produção de termoplásticos e costuma ser aplicado em fibras têxteis, embalagens processadas por injeção-sopro, filmes biorientados e polímeros de engenharia (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009).

2.2.3 Poli(acrilonitrila-*co*-butadieno-*co*-estireno) – ABS

O copolímero acrilonitrila-butadieno-estireno é formado por dois componentes termoplásticos amorfos e um elastomérico, possuindo diferentes composições químicas entre si e coexistindo em duas fases, de forma que a compatibilidade é controlada pela estrutura e microestrutura química (Figura 6). Os modelos químicos de ABS consistem em uma fase

contínua do copolímero de estireno e acrilonitrila (SAN) e uma fase dispersa de butadieno (BARROS, 1998). A produção do ABS pode ser feita por polimerização em emulsão, polimerização em massa ou pelos dois processos combinados. Sendo produzidas separadamente a matriz de SAN e a borracha, pode-se controlar as propriedades dos componentes de forma independente, além da possibilidade do uso de diferentes processos de produção para ambos (LANDI; SILVA, 2003).

Figura 6 - Estrutura química do ABS.



Fonte: SILVA et al., 2009.

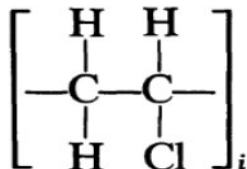
O ABS está entre os polímeros termoplásticos de engenharia de maior volume de produção. Copolímeros ABS são compostos de mais de 40% de estireno e quantidades variáveis de butadieno e acrilonitrila. O estireno proporciona rigidez e facilidade de processamento, o butadieno oferece tenacidade e resistência ao impacto, e a acrilonitrila fornece resistência química e estabilidade térmica (BEN DIFALLAH *et al.*, 2012). Geralmente apresenta temperatura de transição vítrea na faixa de 95°C a 115°C (BIRON, 2018). Devido à sua flexibilidade de composição e estrutura, este polímero pode apresentar uma ampla gama de propriedades, permitindo seu uso em diversas aplicações. Um campo importante é o setor automotivo, possuindo também uma aplicação crescente em eletroeletrônicos, abrangendo inclusive eletrodomésticos e produtos usados no setor de construção civil (BEN DIFALLAH *et al.*, 2012).

2.2.4 Poli(cloreto de vinila) – PVC

A síntese do PVC (Figura 7) mais utilizada mundialmente envolve a polimerização por adição do monômero cloreto de vinila em suspensão, representando em torno de 80% da produção deste material. Outros processos envolvem a polimerização em emulsão e micro-suspensão, que engloba em torno de 10 a 15% da produção, obtendo-se resinas que são empregadas em compostos líquidos. Algumas outras técnicas envolvem polimerização em

massa e em solução, mas estas possuem pouca representatividade no mercado global dessa resina (RODOLFO JR; NUNES; ORMANJI, 2006). Os compostos obtidos variam entre o PVC rígido, flexível e plastisol (BIRON, 2018).

Figura 7 - Estrutura química do PVC.



Fonte: TITOW, 1984.

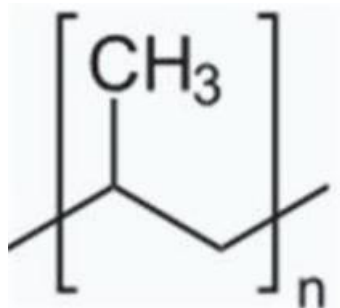
O PVC possui elevada resistência química, particularmente na forma de compostos rígidos. Além disso, o alto teor de cloro intrínseco à estrutura química do PVC, que representa em torno de 57% de sua massa, favorece um baixo índice de inflamabilidade e alta taxa de extinção de chamas na combustão. Tais características tornam o material indicado para aplicações que requeiram alta resistência química, resistência ao fogo, facilidade de pintura e colagem, boa resistência mecânica, além de excelente estabilidade dimensional, sendo empregado em válvulas, luvas, bolsas de sangue, isolamento de fios e cabos elétricos, tubos e conexões, forros, pisos e diversos revestimentos utilizados na construção civil (RODOLFO JR; NUNES; ORMANJI, 2006; FELTRAN; DIAZ, 2007). A faixa de temperatura de transição vítrea para o PVC é de aproximadamente 60°C a 100°C. Após plastificação, pode atingir uma faixa de -5°C até -50°C (BIRON, 2018).

O PVC é considerado a resina termoplástica mais versátil devido à sua capacidade de aceitar uma variedade extremamente ampla de aditivos, e isso se deve principalmente ao seu elevado teor de cloro, tornando-o uma molécula polar, o que aumenta sua afinidade aos aditivos (MARTINS *et al.*, 2004). Por outro lado, o PVC por si só não pode ser processado, deve ser composto com pelo menos um estabilizante, um lubrificante e, se flexível, um plastificante. Ademais, o PVC é defectivo em quesitos ambientais devido a problemas associados ao cloro e também por alguns dos plastificantes dos produtos flexíveis (BIRON, 2018).

2.2.5 Polipropileno – PP

O polipropileno (PP) é um material termoplástico pertencente à classe das poliolefinas, produzido a partir da polimerização por adição de unidades monoméricas de propeno (Figura 8). Há mais de uma forma de promover a ligação entre os monômeros, porém o PP na sua forma mais amplamente usada é obtido com catalisadores que produzem cadeias de polímero cristalizáveis. A partir disso, dá-se origem a um sólido semicristalino com boas propriedades físicas, mecânicas e térmicas, nas formas de PP isotático ou sindiotático (KARIAN, 2003).

Figura 8 - Estrutura química do PP.



Fonte: OLIVEIRA, 2010.

O polipropileno conquistou uma grande parcela do mercado de polímeros por conta de suas propriedades desejáveis quando comparado com outros termoplásticos como polietileno e PVC, pois possui temperatura de fusão mais alta (em torno de 165° C) e menor densidade, com módulo de Young maior e tendo menor custo de produção (GOTSIS; ZEEVENHOVEN; TSENOGLOU, 2004). Além disso, o PP é vulnerável frente ao intemperismo, mas é altamente resistente ao ataque químico, dissolvendo-se apenas em solventes aromáticos em altas temperaturas (LUGÃO, 2004).

Boa parte do PP é aplicada na produção de artigos moldados por injeção, que envolvem peças automotivas, eletrodomésticos, brinquedos, embalagens rígidas e dispositivos médicos. A segunda maior parcela de produtos abrange a utilização de fibras fiadas por fusão, para tapetes e carpetes (KISSIN, 2007; LIMA, 2015).

2.3 Reciclagem de materiais poliméricos

De acordo com a PNRS, a reciclagem é definida como um processo de transformação dos resíduos sólidos caracterizado pela alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, visando a transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama) e, se couber, do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS) e do Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária (Suasa) (BRASIL, 2010b).

A reciclagem se revela como uma das mais vantajosas alternativas de tratamento de resíduos sólidos, reduzindo o consumo de recursos naturais, de energia e água, diminuindo o volume de resíduos, além de proporcionar emprego a milhares de pessoas (MMA, [201-]). Esse tipo de tratamento se destaca particularmente no caso dos polímeros, pois 90% destes materiais que são utilizados nos dias atuais são sintetizados a partir de recursos fósseis não renováveis (AL-SALEM; LETTIERI; BAEYENS, 2009).

Um sistema de código de identificação de resinas foi criado e introduzido em 1988 pela *Society of Plastics Industry, Inc.* (SPI) com o objetivo de facilitar a recuperação dos produtos fabricados com polímeros e descartados como resíduo sólido urbano, visto que auxiliam sua separação e posterior reciclagem e revalorização. Este sistema no Brasil foi estabelecido como base na Norma NBR 13230 da ABNT que apresenta a simbologia observada na Figura 9 e é a mais utilizada atualmente (COLTRO; GASPARINO; QUEIROZ, 2008).

Figura 9 - Simbologia de identificação de materiais recicláveis.



Fonte: ABRE, 2012.

A indústria dos polímeros identificou com sucesso as tecnologias viáveis para tratamento de recuperação e a reciclagem de resíduos de produtos descartados (AL-SALEM; LETTIERI; BAEYENS, 2009). Os processos de tratamento e reciclagem de resíduos sólidos poliméricos podem ser alocados em quatro categorias principais: mecânica (primária e secundária), química (terciária) e recuperação de energia (quaternária). Cada método fornece

um conjunto exclusivo de vantagens que os tornam particularmente benéficos para locais, aplicações ou requisitos específicos (AL-SALEM; LETTIERI; BAEYENS, 2009).

A reciclagem mecânica primária é feita a partir da reintrodução no ciclo de extrusão, de aparas, refugos, bordas ou materiais com defeitos. Esse processo utiliza resíduos de polímeros que possuem características semelhantes às matérias-primas originais, sendo que só se torna viável com o material semi-limpo, e assim, acaba não sendo adotado com frequência pelos recicladores (AL-SALEM, 2009; AL-SALEM; LETTIERI; BAEYENS, 2009).

A reciclagem mecânica secundária se apresenta como o método mais utilizado na indústria, e neste, o material é reprocessado em uma matéria-prima secundária para se obter novos produtos (VILAPLANA; KARLSSON, 2008; HOPEWELL; DVORAK; KOSIOR, 2009; RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017; DELVA *et al.*, 2018). Quanto mais complexo e contaminado o resíduo, mais difícil é reciclá-lo mecanicamente (AL-SALEM; LETTIERI; BAEYENS, 2009). Em geral, o processo da reciclagem mecânica envolve (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005; DELVA *et al.*, 2018):

- a) separação e triagem – consiste na separação baseada em diferenças físicas ou químicas entre os polímeros;
- b) lavagem – após separação, é realizada para remover contaminantes, que são muitas vezes orgânicos;
- c) secagem – após lavagem, realiza-se a secagem do material, que pode ser por processo mecânico ou térmico. Esta etapa é necessária pois alguns polímeros, como os poliésteres ou as poliamidas, podem sofrer hidrólise durante o reprocessamento, e ademais, resíduos de detergente podem agir como catalisadores na hidrólise.
- d) moagem – após a lavagem, é feita a moagem do material para reduzir seu tamanho e se obter um material particulado;
- e) reprocessamento – após a moagem o reprocessamento ocorre por re-extrusão do material, com incorporação de aditivos. O produto passa então pelo processo de peletização, para que forme granulados, que são mais fáceis de usar para conversores. A partir daí poderão ser realizados processos de moldagem, como injeção, sopro, entre outros.

No Brasil, esse é o tipo de reciclagem mais abrangente, atingindo um índice de reciclagem de 22% em 2018, o que equivale a mais de 757 mil toneladas de polímero reciclado pós-consumo, tendo em vista que naquele ano a geração desse tipo de resíduo foi de 3,4 milhões de toneladas (ABIPLAST, 2020).

A respeito da reciclagem terciária, ou reciclagem química, se trata de um processo de despolimerização no qual os resíduos poliméricos são fragmentados sob condições controladas, retornando às suas matérias-primas de origem ou gerando outros insumos químicos, que são então purificados. Os monômeros gerados podem ser posteriormente repolimerizados. A partir disso, pode-se produzir polímeros com a qualidade dos materiais virgens ou ainda realizar-se um processo de reaproveitamento, no qual os resíduos poliméricos são convertidos em monômeros para novos materiais com valor agregado (HONG; CHEN, 2017). Alguns processos que envolvem a reciclagem química, que são semelhantes aos empregados na indústria petroquímica, se baseiam na pirólise, gaseificação, hidrogenação líquido-gás, *visbreaker*, craqueamento catalítico ou a vapor e o uso de resíduos sólidos poliméricos como agentes redutores em altos-fornos (AL-SALEM; LETTIERI; BAEYENS, 2009).

A reciclagem quaternária, também chamada de energética, representa a recuperação do conteúdo energético dos resíduos poliméricos por incineração. Quando o processo de coleta, triagem e separação de resíduos poliméricos é difícil ou economicamente inviável, ou os resíduos são tóxicos e perigosos de manusear, a melhor opção de gerenciamento dos resíduos se encontra na incineração, que recupera a energia química armazenada nos resíduos poliméricos na forma de energia térmica (BARTOLOME *et al.*, 2012).

2.4 Métodos de separação de polímeros pós-consumo

Tendo em vista a reciclagem mecânica, seu desafio crucial se encontra na necessidade de os resíduos poliméricos serem separados de forma eficaz. A reciclagem mecânica é altamente sensível às impurezas e os diferentes tipos de polímeros geralmente não são compatíveis entre si. Todos eles têm diferentes características físicas como ponto de fusão, densidade e dureza, e dessa forma, polímeros misturados não apresentam suas características originais. Mais significativamente, a imiscibilidade das misturas os torna estreitamente sensíveis à pureza. Por exemplo, mesmo uma pequena quantidade de PVC misturado a outro polímero diminui a taxa de reciclagem, formando compostos ou deteriorando a natureza de outros materiais (WEY; YU; JOU, 1998). Portanto, pode-se obter um valor agregado maior após separação dos polímeros em componentes puros (WU; LI; XU, 2013). Levando-se em conta a importância desta etapa para o processo de reciclagem, nas

próximas seções são discutidos os métodos mais utilizados para a separação de resíduos poliméricos pós-consumo.

2.4.1 Separação manual

Ao longo dos anos, houve um aumento significativo no processo de organização de catadores em cooperativas e associações. Tais iniciativas passaram a ter papéis importantes na economia ambiental e recuperação de pessoas que participam dos empreendimentos. Seus processos produtivos consistem geralmente nas atividades de coleta, transporte, triagem, prensagem e comercialização dos materiais, porém formas diferentes de produzir e organizar o trabalho são estabelecidas por cada grupo (OLIVEIRA; PARREIRA; LIMA, 2009).

Em princípio, o produto que é proveniente do processo de triagem abastece as indústrias de reciclagem e estas os transformam em bens de consumo ou matérias primas para indústrias afins, sendo que grande parte do processo se dá nas cooperativas, que costumam ser responsáveis ora pela coleta e triagem, ora somente pela triagem dos materiais recicláveis (SOUZA; FONTES; SALOMÃO, 2014).

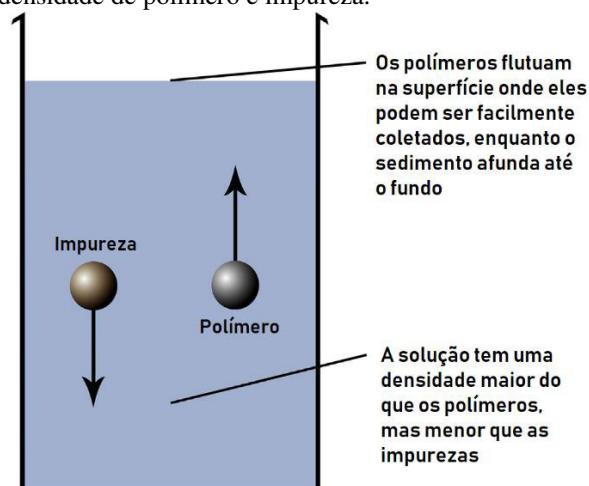
A separação manual, que abrange a grande maioria dos processos de separação no Brasil, é feita em alguns grupos por meio de esteiras móveis, outros utilizam silos, mesas ou boxes. Os arranjos organizacionais e a produtividade de cada empreendimento podem ser bem diversificados, mas se baseiam, sobretudo, no princípio da separação dos materiais em diferentes tipos, formas, cores, entre outros critérios, de forma que se agregue valor aos materiais, viabilizando a comercialização destes (OLIVEIRA; PARREIRA; LIMA, 2009).

Por outro lado, a separação manual, mesmo que com grande atuação no país, ainda apresenta diversos problemas associados à falta de equipamentos, estrutura física e organizacional. Além disso, a ausência de uso de equipamentos de proteção individual e o próprio contato com os resíduos convergem para que os cooperados sejam submetidos a sobrecargas físicas e mentais no trabalho (SOUZA; FONTES; SALOMÃO, 2014). Assim, este método não é apenas prejudicial para a saúde, como também tem baixa eficiência (LI *et al.*, 2014).

2.4.2 Separação por densidade

Esse tipo de separação é baseado em um processo nas quais partículas de diferentes densidades são inseridas em um meio que possui uma densidade intermediária e, dessa forma, partículas de densidade mais baixa flutuam, enquanto aquelas de maior densidade afundam, de acordo com as taxas correspondentes à sua flutuabilidade relativa no meio, com ação da força gravitacional (GENT *et al.*, 2009). Desse modo, o processo pode explorar o fato de que os materiais poliméricos possuem uma gama de diferentes densidades. Como tal, quando há uma mistura de materiais com diferentes densidades, tais como impurezas ou mesmo polímeros distintos, os flutuantes podem ser coletados decantando as impurezas que ficam na camada de sedimento (sobrenadante), como representado no exemplo da Figura 10, na qual há separação entre impureza e polímero (CRAWFORD; QUINN, 2017).

Figura 10 - Separação por densidade de polímero e impureza.



Fonte: CRAWFORD; QUINN, 2017 (adaptado).

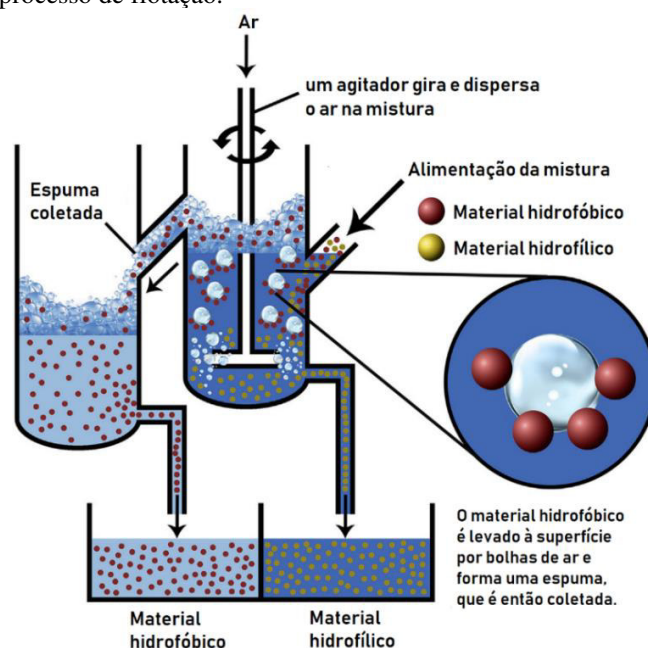
Alguns fatores podem afetar a eficiência da separação de dois ou mais tipos de polímeros de diferentes densidades em processos industriais como: a forma das partículas, tamanho e textura da superfície, viscosidade do meio, contraste da densidade com o meio, aderência de partículas, bem como aglomeração de bolhas nas partículas do polímero, resistência hidrofóbica dos polímeros quando em uma interface ar-água e a taxa na qual eles devem ser separados para que o processo seja economicamente viável (GENT *et al.*, 2009). A vantagem é que a mistura de polímeros é exposta primeiramente à moagem úmida, onde partículas de impurezas podem ser removidas e a desvantagem é que a separação pode ser lenta, difícil de controlar e gerar produtos de baixa pureza (RUJ *et al.*, 2015).

2.4.3 Separação por flotação

O método baseia-se na modificação seletiva da superfície das partículas de polímeros, criando um ambiente físico-químico adequado que conduz à separação física dos diferentes polímeros, assim como é realizado na flotação de minerais. Sua vantagem está em poder separar polímeros misturados que têm pequenas diferenças de carga e densidade (GUO *et al.*, 2016). O processo de flotação não depende apenas da densidade do material; também depende de sua natureza hidrofóbica (CRAWFORD; QUINN, 2017). A maioria dos polímeros são materiais naturalmente hidrofóbicos. A separação entre seus diferentes tipos pode ser alcançada se a molhabilidade da superfície polimérica estiver apta a ser seletivamente modificada (CARVALHO *et al.*, 2012). Os reagentes utilizados na flotação são geralmente modificadores da tensão superficial interfacial, modificadores químicos da superfície e floculantes (BASAROVÁ *et al.*, 2005).

Nesta técnica, as partículas de interesse são separadas fisicamente de uma fase líquida como resultado de diferenças na capacidade das bolhas de ar aderirem seletivamente à superfície das partículas, com base na sua hidrofobicidade. As partículas hidrofóbicas com as bolhas de ar ligadas são levadas para a superfície, formando assim uma espuma que pode ser removida, enquanto os materiais hidrofílicos permanecem na fase líquida, como se pode observar no esquema da Figura 11.

Figura 11 - Esquema do processo de flotação.



Fonte: CRAWFORD; QUINN, 2017 (adaptado).

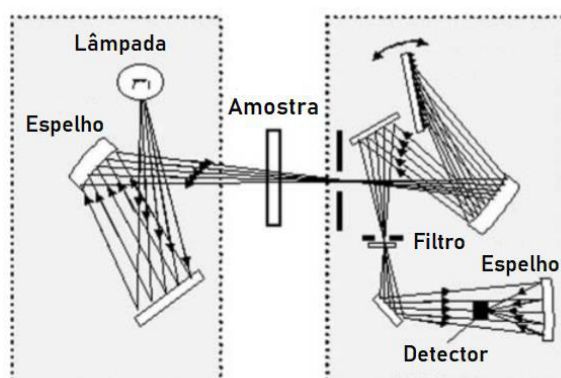
Tomando como exemplo dois materiais poliméricos que flutuam numa fase líquida específica e que podem ser separados um do outro pela adição de um agente molhante, que adsorve seletivamente a um dos polímeros e não ao outro. O agente molhante age como um depressor de flotação por adsorção seletiva na superfície de um polímero específico, tornando-o assim hidrofílico. No entanto, a adsorção ao outro polímero é bem menos pronunciada. Conseqüentemente, o polímero hidrofóbico continuará a flutuar, enquanto o polímero hidrofílico afundará como resultado da flotação deprimida. O polímero flutuante pode então ser recuperado da superfície da mistura (MARQUES; TENÓRIO, 2000; CRAWFORD; QUINN, 2017).

Uma dificuldade importante na flotação de polímeros reside em encontrar agentes umectantes adequados, juntamente com o estabelecimento das condições para tal, como concentração de reagente, pH, tempo de condicionamento e tamanho de partícula (MARQUES; TENÓRIO, 2000).

2.4.4 Separação por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)

De acordo com Nisgoski (2005), “a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é a medição do comprimento de onda e intensidade da absorção de luz infravermelha próxima realizada por uma amostra, na faixa de 800 a 2500 nm”. O espectrômetro de infravermelho próximo é um grande equipamento com funções de medição e análise. Consiste em uma parte de transmissão de luz, incluindo uma lâmpada e lente condensadora, e uma parte de recepção de luz que possui uma grade, um filtro espacial como uma fenda e um fotodetector (Figura 12). Como resultado, requer sistemas ópticos e de controle grandes e complexos (INADA *et al.*, 2001).

Figura 12 - Configuração típica de um espectrômetro.



O espectro de NIR de polímeros possui bandas de absorção na faixa de 350 a 2500 nm, devido ao movimento de estiramento da ligação C–H, comumente encontrada em todos os polímeros (INADA *et al.*, 2001). A NIR dos polímeros é influenciada pela presença de aditivos, quer por suas estruturas químicas, concentrações e, portanto, a absorção do infravermelho (BEIGBEDER *et al.*, 2013).

Um sistema para separação por NIR pode ser instalado, assim como foi proposto por Masoumi *et al.*, no qual é constituído por três unidades principais, que inclui unidades de identificação dos materiais, controle e projeção. Neste processo, a mistura de polímeros, que no caso envolvia PET, PVC, PEAD e PP, foi alimentada em uma esteira a alta velocidade, de forma espalhada, para ser identificada pelos sensores ópticos nas unidades de identificação e controle. Os polímeros de interesse identificados por *software* de aquisição de dados na unidade de controle são posteriormente ejetados do fluxo de material assim que o comando é recebido pelas válvulas. O material é arremessado por bicos de ejeção, usando ar comprimido, para uma esteira adicional e os produtos restantes são direcionados para outra esteira por ação da gravidade, segregando os materiais (MASOUMI; SAFAVI; KHANI, 2012).

A NIR tem como vantagens as medições remotas de alta velocidade, uma importante relação sinal-ruído e também por não haver necessidade de um pré-tratamento da amostra (BEIGBEDER *et al.*, 2013), caracterizando os materiais de forma não destrutiva.

A técnica tem requisitos mais rigorosos no desempenho de tecnologia e equipamentos, enquanto também apresenta um desenvolvimento relativamente lento (LI *et al.*, 2014). Além do mais, é um procedimento de superfície óptica. Qualquer interferência que leve a uma leitura falsa, como por exemplo, no caso de o sensor analisar uma etiqueta em vez da garrafa que estaria contida abaixo, em situações nas quais os produtos estão contidos um dentro do outro, ou mesmo o fato da luz não poder refletir devido à sujeira, resultará em um dado falso. Produtos constituídos de mais de um polímero, como as embalagens de multicamadas, serão detectados como aquele que é apresentado ao sensor no momento da detecção, e além disto, a NIR não pode identificar produtos pretos ou escuros (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017).

2.4.5 Separação triboeletrostática

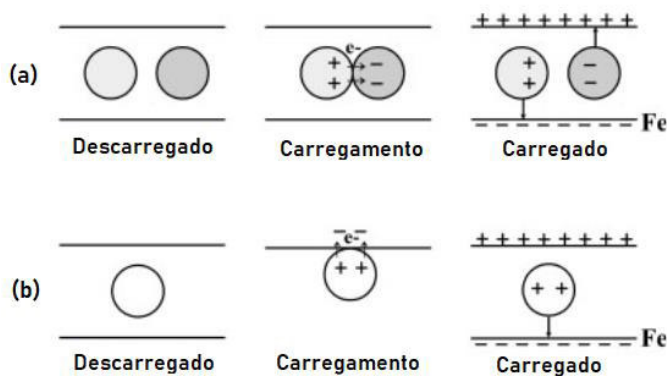
O efeito triboelétrico (triboeletrificação) consiste no aparecimento de cargas elétricas com sinais opostos no contato de duas superfícies pertencentes a materiais diferentes. A

eletrificação por contato pode ocorrer nas interfaces sólido-sólido, líquido-líquido ou sólido-líquido. Para sólidos distintos, que não estão carregados inicialmente e normalmente com potencial de terra, ocorre a transferência de uma pequena carga elétrica de um material para o outro à medida que eles entram em contato, e conseqüentemente ficam carregados de maneira oposta. As superfícies adquirem uma carga elétrica, que tem como resultado um campo elétrico formado entre elas. Esse método de carregamento é geralmente chamado de triboeletrificação, tribocarregamento ou carregamento por atrito (LUNGU, 2004).

O efeito triboelétrico ou de eletrificação por contato já foi muito estudado, porém devido às variações que a estrutura e morfologia dos materiais isolantes apresentam, até então não há conclusões que desvendem totalmente o fenômeno tribo-elétrico. O mecanismo de troca de carga entre duas superfícies em contato, quando pelo menos uma delas é isolante, é um dos mais antigos problemas não resolvidos em física (ELSDON; MITCHELL, 1976; MCCARTY; WHITESIDES, 2008; VASANDANI *et al.*, 2017). Pesquisas propõem mecanismos envolvendo transferência de elétrons, transferência de íons e transferência de material (LEE, 1994; WILLIAMS, 2012; VASANDANI *et al.*, 2017).

A separação triboeletrostática utiliza o fenômeno de tribocarregamento para obter diferentes materiais carregados em polaridades opostas e depois alimentá-los no campo elétrico para separá-los por suas diferentes polaridades de carga, como apresentado na Figura 13. As trajetórias das partículas são desviadas no campo elétrico de acordo com as polaridades e quantidades de carga obtidas. Após o contato, dois sólidos com diferentes polaridades de carga são separados por campo elétrico e então coletados (WU; LI; XU, 2013).

Figura 13 - Processo de separação por tribocarregamento de materiais; (a) partícula-partícula, (b) partícula-superfície.



Fonte: PARK *et al.*, 2007 (adaptado).

No século passado, os métodos de separação triboeletrostática passaram por um desenvolvimento contínuo e são bem demonstrados na indústria de processamento para separação de minerais, beneficiamento de carvão ou minério bruto (BAN *et al.*, 1997; KWETKUS, 1998; LI *et al.*, 1999; WU; LI; XU, 2013). Desde a década de 1970, essa técnica é estudada para a separação de misturas de polímeros (PEARSE; HICKEY, 1978). A partir da década de 1990, verificou-se que esse progresso poderia ser adequado para separar materiais poliméricos misturados, especialmente os resíduos e polímeros de sucata de automóveis ou cabos (STAHL; BEIER, 1996). Como possui muitas vantagens sobre outros métodos de separação, pesquisas cada vez mais relevantes sobre a separação triboeletrostática para reciclagem de polímeros foram realizadas nos últimos anos (WU; LI; XU, 2013).

Um indicador importante para a separação é a série triboelétrica dos polímeros (PARK *et al.*, 2008). Esta série descreve as polaridades adquiridas das partículas poliméricas carregadas. Porém, existem algumas controvérsias sobre a série triboelétrica geral (LI; WU; XU, 2015). É difícil obter uma medida precisa devido aos efeitos das condições da superfície, contaminantes e aditivos (PARK *et al.*, 2008).

Algumas das principais séries triboelétricas de polímeros encontradas na literatura estão apresentadas na Tabela 1. Dessa forma, é possível prever a polaridade da carga para a reciclagem de resíduos poliméricos, utilizando este método de separação (SILVEIRA *et al.*, 2018). A apresentação na Tabela 1 demonstra a tendência dos polímeros em adquirir cargas negativas quando situados mais à direita da série e cargas positivas à esquerda da série.

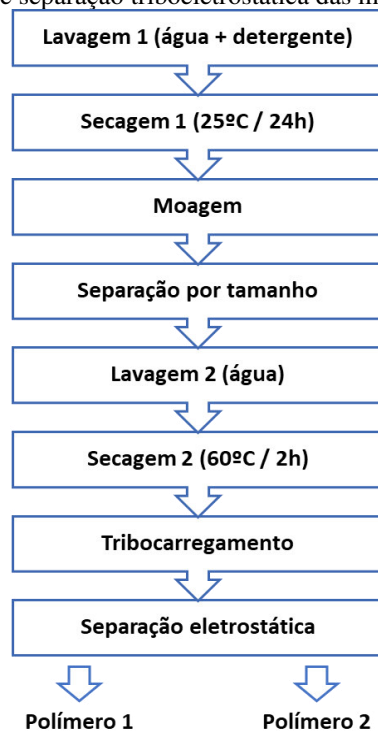
Tabela 1 - Séries triboelétricas de polímeros apresentadas na literatura.

Autor	(+)	Séries triboelétricas	(-)
Matsushita <i>et al.</i> (1999)		PS – PET – PE – PP – PVC	
Dodbiba <i>et al.</i> (2003)		ABS – PC – PET – PS – PE – PP – PVC	
Iuga <i>et al.</i> (2005)		PMMA – PE – PET – PP – PVC	
Park <i>et al.</i> (2007)		PMMA – ABS – PET – PEAD – PP – PVC – PTFE	
Park <i>et al.</i> (2008)		PMMA – ABS – HIPS – PET – PEAD – PEBD – PP – PVC	
Li <i>et al.</i> (2015)		PP – ABS – PVC – PC – PS – PE	
Freitas (2018)		ABS – PEAD – PS – PET – PVC	

Fonte: própria da autora.

No sistema elaborado por Silveira *et al.* (2018) pode-se compreender as etapas indicadas para um modelo de metodologia possível de ser empregado para a separação triboeletrostática de misturas de polímeros, como demonstra a Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma do processo de separação triboeletrostática das misturas de polímeros.



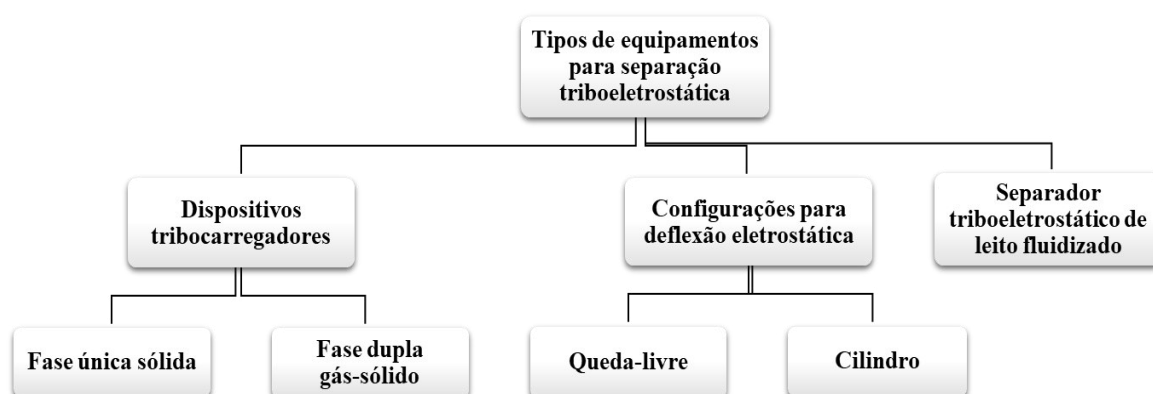
Fonte: SILVEIRA *et al.*, 2018 (adaptado).

Nos procedimentos, os polímeros são submetidos a um processo de lavagem para evitar interferência de contaminantes. A moagem também se apresenta como uma etapa fundamental do processo, visto que estudos mostraram que o tamanho das partículas tem efeito direto na separação triboeletrostática (DODBIBA *et al.*, 2005; TILMATINE *et al.*, 2010). Os processos mecânicos são então realizados, seguidos pela separação triboeletrostática, a fim de se obter altas recuperações dos polímeros com elevados graus de pureza.

A separação triboeletrostática tem se demonstrado como um método eficaz para a separação de resíduos poliméricos devido às taxas de recuperação e graus de pureza obtidos com os estudos ao longo dos anos (SILVEIRA, 2016). Apresenta vantagens também por ser um processo a seco, estando livre do problema do descarte de águas residuais, além de ser facilmente operado (WU; LI; XU, 2013). Por outro lado, este método apresenta suas limitações, motivo para constantes pesquisas, que se fundamentam principalmente nas dificuldades para encontrar os parâmetros ideais do processo de separação triboeletrostático. Os parâmetros de estudo incluem “[...] o tamanho ideal das partículas a serem separadas, controle da umidade do ambiente, carregamento das partículas (tempo de residência), campo elétrico para separação, entre outros” (FREITAS, 2018).

Nas seções seguintes, 2.4.6 e 2.4.7, serão discutidos os tipos de equipamentos para tribocarregamento e configurações para deflexão eletrostática encontrados na literatura, como estão classificados no fluxograma da Figura 15.

Figura 15 - Classificação de equipamentos utilizados na separação triboeletrostática.



Fonte: própria da autora.

2.4.6 Tipos de equipamentos para tribocarregamento

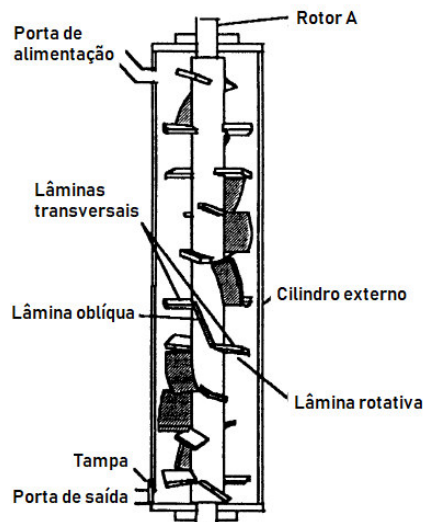
Inúmeros dispositivos foram investigados nos últimos anos para o carregamento de partículas poliméricas na separação triboeletrostática. De acordo com o mecanismo de carregamento, esses dispositivos são classificados em “fase única sólida” ou “fase dupla gás-sólido”. O mecanismo de carregamento “fase única sólida” significa que as interações só existem entre partículas sólidas durante o processo de carregamento. Enquanto o mecanismo de carregamento “fase dupla gás-sólido” emprega interações entre gás e sólido para carregar as partículas sólidas misturadas. Os dispositivos de fase única sólida podem consistir em tubo rotativo, pás rotativas e dispositivos vibratórios. Os dispositivos de fase dupla gás-sólido podem ser compostos por ciclone, leito fluidizado e tribocarregador tipo hélice (WU; LI; XU, 2013).

2.4.6.1 Tribocarregador de fase única sólida

Um dos tipos de dispositivos empregados no tribocarregamento de fase única sólida pode ser constituído por pás ou lâminas rotativas, que favorecem o atrito com os materiais. Nesse processo, como se pode observar na Figura 16, o misturador é alimentado com uma

mistura polimérica na unidade de separação. O rotor A é composto por lâminas rotativas, ou seja, lâminas transversais montadas em posições helicoidais em um eixo de rotação e uma lâmina oblíqua. A mistura de polímeros entra no misturador através da porta de alimentação e é agitada continuamente até que a tampa da porta de saída seja aberta. As partículas dos polímeros são friccionadas umas contra as outras ou contra o cilindro externo e o rotor A durante esse processo até serem carregadas (MATSUSHITA; MORI; SOMETANI, 1999).

Figura 16 - Esquema representativo de um tribocarregador com lâminas rotativas.

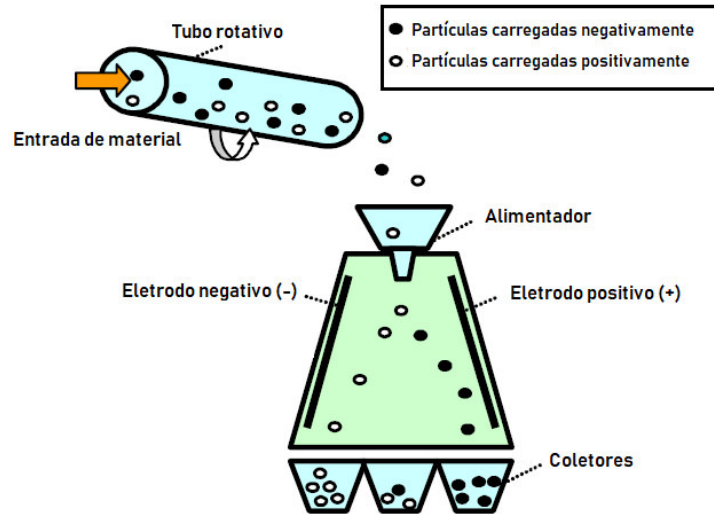


Fonte: MATSUSHITA; MORI; SOMETANI, 1999 (adaptado).

Um esquema adicional de um carregador triboelétrico pode ser obtido pelo sistema de tubo rotativo, como é representado na Figura 17. Primeiro, as partículas entram em um cilindro girando com uma velocidade ajustável. Dentro do tubo, as partículas sofrem várias colisões entre si (colisão partícula-partícula) e contra a parede do cilindro (colisão partícula-parede). Assim, as partículas carregadas pelo efeito triboelétrico saem do cilindro rotativo e podem ser expelidas para o sistema de separação escolhido (TILMATINE *et al.*, 2009). Como se observa neste caso, se trata de um separador vertical em queda-livre, que será visto com mais detalhes na seção 2.4.7.

A escolha do material para o tubo rotativo pode desempenhar um papel crítico na triboeletrificação dos polímeros na mistura. As superfícies internas do tubo rotativo acabam colidindo com as partículas rotativas em maior frequência e intensidade do que as placas porosas da base e as paredes de um tribocarregador de leito fluidizado (INCULET; CASTLE; BROWN, 1998).

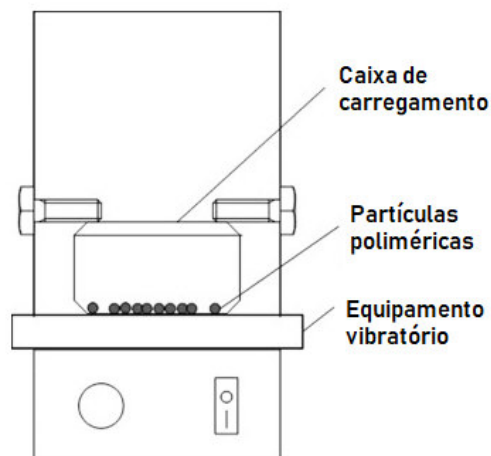
Figura 17 - Esquema representativo de um separador triboeletrostático com carregador de tubo rotativo.



Fonte: TILMATINE et al., 2010 (adaptado).

O tribocarregamento também pode ser realizado com dispositivos vibratórios (Figura 18). Durante o processo de vibração, as partículas se movem constantemente para cima e para baixo. Existem dois mecanismos de atrito, um é gerado entre diferentes partículas e o outro entre a partícula e o material da parede. A troca de energia ocorre durante os atritos e as partículas são carregadas (LI; WU; XU, 2015).

Figura 18 - Esquema experimental de tribocarregador por vibração.

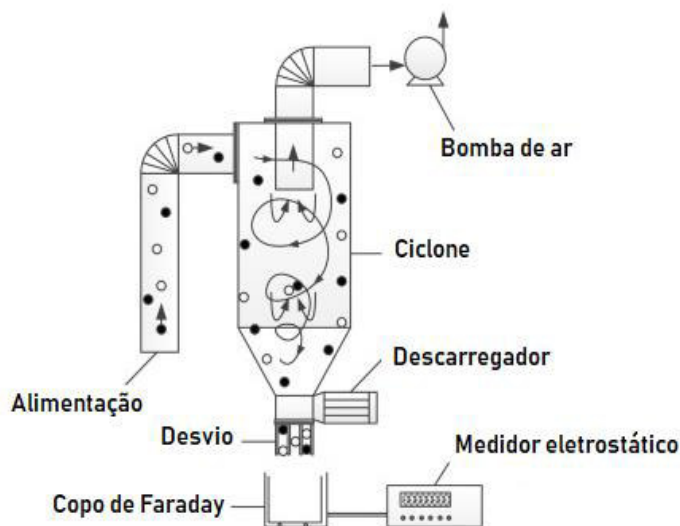


Fonte: LI; WU; XU, 2015 (adaptado).

2.4.6.2 Tribocarregador de fase dupla gás-sólido

Nos dispositivos do tipo ciclone como no exemplo da Figura 19, a partícula é introduzida no ciclone a partir da entrada lateral, o fluxo de ar é ascendente do fundo para a zona central e a partícula se move para baixo ao longo da parede do cilindro. Em alguns casos, como representado neste exemplo, pode ser acoplado ao dispositivo um copo de Faraday, no qual será responsável por medir o valor da carga nas partículas, com o auxílio de um medidor eletrostático (LI; WU; XU, 2015).

Figura 19 - Esquema de tribocarregador do tipo ciclone.

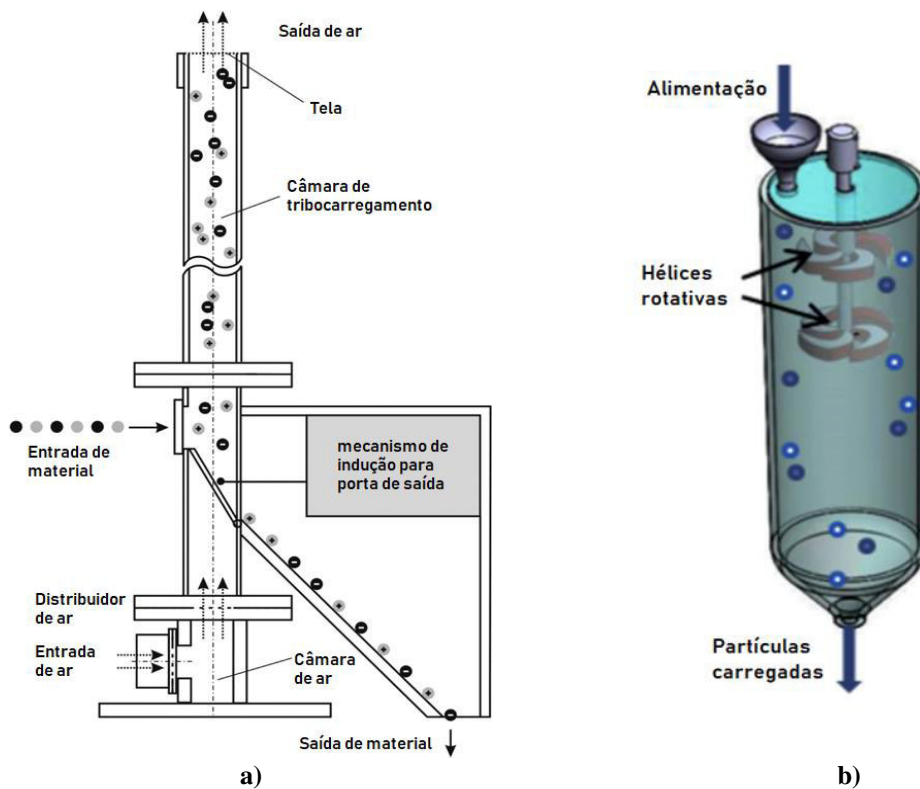


Fonte: LI; WU; XU, 2015 (adaptado).

Os sistemas de leitos fluidizados, também já provaram sua eficácia como dispositivos de tribocarregamento. Assim como é feito no tipo ciclone, um fluxo de ar comprimido é necessário para realizar a colisão entre as partículas. Nos dispositivos padrões de leito fluidizado (Figura 20a), o material granulado é depositado em um distribuidor de ar com uma tela, que dispersa o ar quase uniformemente por toda a seção transversal da câmara de tribocarregamento. Os grânulos são mantidos em um estado fluidizado pelo ar ascendente, de modo a experimentar múltiplas colisões entre si e com as paredes do dispositivo (IUGA *et al.*, 2005). Os grânulos carregados podem então cair livremente entre os eletrodos de um separador eletrostático (IUGA *et al.*, 2016).

O dispositivo do tipo hélice como na Figura 20b, agita a mistura polimérica e as partículas são carregadas por rotação. As lâminas rotativas, que podem ser operadas em velocidade elevada, podem ser feitas de vários materiais para facilitar o tribo-carregamento dos constituintes da mistura (DASCALESCU; ZEGHLOUL; IUGA, 2016). Esse dispositivo agita os materiais particulados em um movimento helicoidal que favorece seu carregamento triboeletrostático por colisões partícula-hélice, parede-partícula e colisões partícula-partícula (MILOUDI *et al.*, 2011).

Figura 20 – a) Esquema de leito fluidizado para o estudo de tribo-carregamento de polímeros e b) Esquema representativo de um tribo-carregador do tipo hélice.



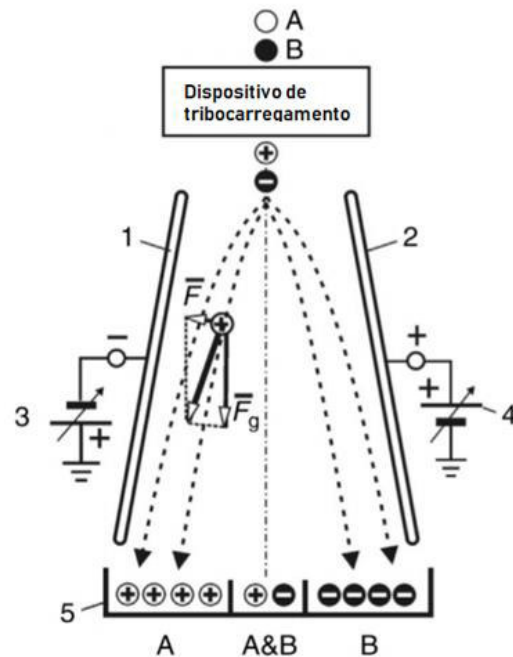
Fonte: IUGA et al., 2016 (adaptado); DASCALESCU; ZEGHLOUL; IUGA, 2016 (adaptado).

2.4.7 Tipos de configurações para deflexão eletrostática

Para que ocorra a apropriada separação triboeletrostática, a mistura granulada deve ser introduzida em um dispositivo tribo-carregador, nos quais os grânulos de um tipo de material recebem uma carga positiva, enquanto os outros adquirem uma carga negativa. Logo, eles podem ser separados em uma configuração do tipo queda-livre (Figura 21). Neste sistema, os grânulos caem livremente em um campo elétrico horizontal, criado entre dois

eletrodos de placas verticais, que são conectados a duas fontes de alimentação CC de alta tensão de polaridades opostas (BENDIMERAD *et al.*, 2009) ou até mesmo fornecendo alimentação de alta tensão a apenas uma das placas.

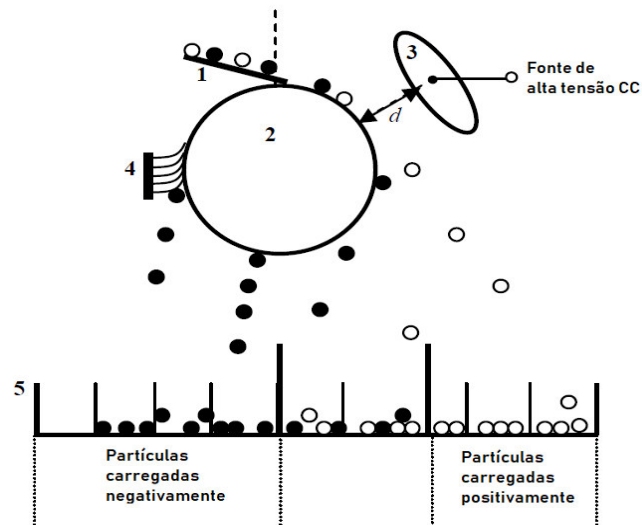
Figura 21 - Esquema representativo de um separador triboeletrostático em queda-livre. 1, 2: eletrodos em forma de chapas; 3, 4: alimentação de alta tensão; 5: coletor.



Fonte: DASCALESCU; ZEGHLOUL; IUGA, 2016 (adaptado).

Há uma configuração comum também nos estudos para a deflexão eletrostática que envolve o separador tipo cilindro (TILMATINE *et al.*, 2010). Neste modelo de dispositivo, como demonstrado na Figura 22, a força centrífuga associa-se positivamente à força do campo elétrico para separar as partículas carregadas positivamente do cilindro, enquanto as partículas carregadas negativamente aderem ao eletrodo do cilindro até que sejam varridas por uma escova (WU; LI; XU, 2013).

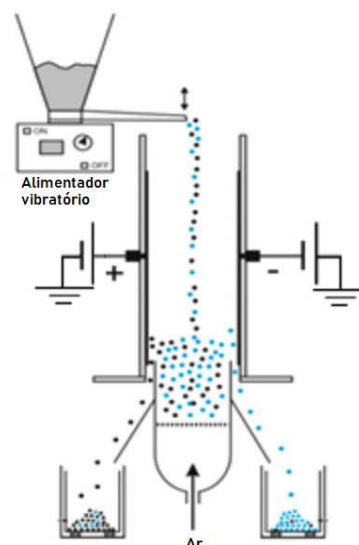
Figura 22 – Representação esquemática de separador triboeletrostático tipo cilindro. (1) alimentador vibratório; (2) eletrodo rotativo aterrado; (3) eletrodo estático HV; (4) escova; (5) compartimentos coletores.



Fonte: TILMATINE et al., 2010 (adaptado).

Uma configuração de sistema de separação proposta por Bilici *et al.* (2011) faz uso simultâneo do efeito triboeletrostático e da força de Coulomb, compondo um separador triboeletrostático de leito fluidizado (Figura 23). Em tais separadores, o carregamento e a separação são combinados em uma única operação, de forma que os grânulos são carregados e separados simultaneamente. A vantagem desta solução reside no fato de que as partículas menos carregadas não deixarão a zona ativa do separador até que adquiram carga suficiente para as forças elétricas conduzi-las ao eletrodo de polaridade oposta (DASCALESCU; ZEGHLOUL; IUGA, 2016).

Figura 23 - Esquema representativo de separador triboeletrostático do tipo leito fluidizado.



Fonte: DASCALESCU; ZEGHLOUL; IUGA, 2016 (adaptado).

Experimentos demonstraram a superioridade deste equipamento na separação de misturas poliméricas. No entanto, há restrições, como a maioria dos sistemas. Como uma espécie de partículas na mistura pode ser carregada e coletada mais rapidamente que as outras, a composição da mistura no leito fluidizado pode variar no tempo. É importante ressaltar que a composição da mistura tem provado ter uma grande influência no resultado do processo de tribocarregamento, portanto, pode impor restrições à integração deste sistema de separação no caso de um processo industrial contínuo (DRAGAN *et al.*, 2011; WU; LI; XU, 2013).

Nos sistemas de separação triboeletrostática, à medida que as partículas passam pelo processo de deflexão, são desviadas em direção a um eletrodo ou outro, dependendo de sua carga. Um sistema de coleta é disponibilizado na base do sistema escolhido para a separação, compondo caixas com divisórias. As caixas de um lado recolhem o material carregado negativamente, enquanto as caixas laterais opostas coletam o material positivamente carregado. O material que possui carga insuficiente para a separação é coletado na área central. Esse material é chamado de "intermediário" e pode ser reprocessado (INCULET; CASTLE; BROWN, 1998).

2.4.8 Efeito da umidade relativa na separação triboeletrostática

A literatura descreve que há uma interferência significativa da umidade relativa (UR) na separação triboeletrostática de materiais poliméricos. Em estudo realizado por Park *et al.* (2008), foi relatado o efeito da UR na densidade de carga do poli(metacrilato de metila) (PMMA) e PVC quando as partículas são carregadas em um tribocarregador composto por PEAD. Os testes foram realizados com uma variação de UR de 20 a 70%, demonstrando que a densidade de carga de PMMA e PVC diminui à medida que a UR aumenta e vice-versa. Os autores acreditam que a influência da umidade relativa no comportamento de carga e descarga dos polímeros pode ser explicada pela formação de filmes de água nas superfícies poliméricas. Foi discutido por Németh *et al.* (2003), que as moléculas de água na atmosfera podem descarregar o polímero à medida que adsorve ou forma uma camada na superfície do polímero. A densidade de carga é alterada pela UR, porque a água perturba a polarização da superfície entre as partículas ou reduz a densidade de carga descarregando as partículas. Nos estudos de Li, Wu e Xu (2015) também foram expostos dados da influência da umidade em um sistema de separação com tribocarregador do tipo ciclone constituído por PMMA. Foram feitos ensaios com ABS, PS e PVC com valores de umidade relativa do ar que variaram de 35

a 65% e foi observado que valores ideais de trabalho estavam em torno de 45 a 55% de UR na configuração utilizada, com quedas bruscas na relação carga-massa das partículas a partir de 65% de UR. Demonstrando, portanto, que a umidade relativa pode ser um fator muito importante para o carregamento triboelétrico e a segregação de partículas na separação triboeletrostática.

3 OBJETIVO

3.1 Objetivo Geral

Este trabalho visou elaborar um sistema aperfeiçoado de separação triboeletrostática de resíduos poliméricos e avaliar o desempenho e viabilidade desse método na separação de diversas misturas de resíduos pós-consumo de polímeros termoplásticos.

3.2 Objetivos Específicos

- Projetar e produzir um sistema para a separação de resíduos poliméricos pós-consumo de termoplásticos para ensaios, baseando-se em modelos e informações contidos na literatura;
- Estudar e testar geometrias e composições para dispositivos de tribocarregamento e condições mais adequadas de tempo de carregamento triboeletrostático;
- Testar e avaliar a eficiência do dispositivo gerador de carga triboeletrostática no carregamento de resíduos poliméricos isolados, em misturas binárias e ternárias;
- Testar e considerar as melhores condições do separador eletrostático, que envolvem as variações de potencial elétrico, distância e posição dos eletrodos, tamanho das partículas poliméricas e umidade relativa;

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais

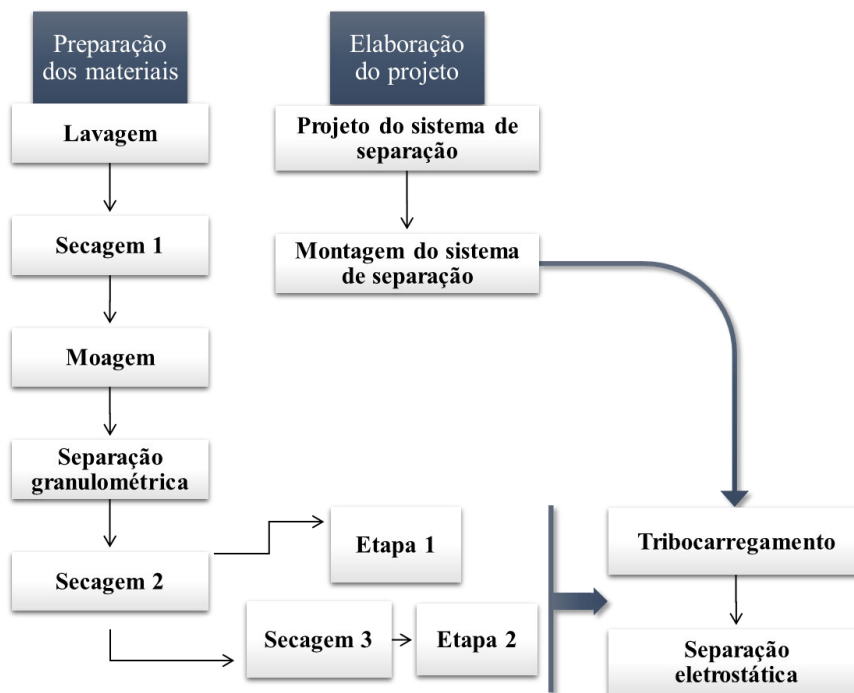
Os materiais poliméricos empregados no estudo são constituídos por resíduos de polietileno de alta densidade (PEAD), polipropileno (PP), politereftalato de etileno (PET), policloreto de vinila (PVC) e copolímero acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS). O ABS obtido é procedente de resíduos de equipamentos eletrônicos, principalmente mouses, teclados, gabinetes, monitores e copiadoras. Os polímeros PET e PEAD foram obtidos de embalagens estruturadas pós-consumo (filmes poliméricos não estão inclusos) de produtos de limpeza, produtos alimentícios e produtos de beleza. O PVC foi proveniente de forros utilizados na construção civil. Por fim, o PP foi obtido a partir de brinquedos, embalagens pós-consumo de produtos alimentícios e de beleza.

Para a construção do sistema de separação triboeletrostática, foram utilizados um aparelho compressor de ar, uma fonte de alta tensão com ajuste de 0 a 60 kV, chapas isolantes de poliestireno (PS), tubo de PVC flexível, termo-higrômetro e demais dispositivos e materiais secundários para a montagem do sistema. A fonte de alta tensão, as chapas isolantes e materiais de consumo foram adquiridos com recursos do auxílio à pesquisa (Proc. 2017/05851-0) da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

4.2 Métodos

O método experimental desenvolvido neste trabalho está apresentado na forma de fluxograma na Figura 24 e será descrito nas próximas seções (RODRIGUES; SARON, 2021).

Figura 24 - Fluxograma dos métodos empregados no trabalho.



Fonte: Própria da autora.

4.2.1 Preparação dos materiais para a separação triboeletrostática

A etapa de preparação dos materiais para a separação se baseou no estudo previamente realizado por Freitas (2018) que também envolveu um sistema de separação triboeletrostática realizado no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena (EEL/USP).

4.2.1.1 Lavagem

Foi necessário promover uma preparação prévia dos polímeros empregados no estudo para que pudesse se realizar o processo de separação triboeletrostática. Primeiramente, os polímeros coletados tiveram as tampas e rótulos segregados e passaram pela etapa de lavagem com água para remoção de possíveis contaminantes aderidos à superfície do material.

4.2.1.2 Secagem 1

Após o processo de lavagem, os materiais foram expostos à secagem ao ar livre por 2 dias.

4.2.1.3 Moagem

Em seguida, os materiais foram submetidos à moagem em um moinho de facas piloto da marca RONE, modelo MR-150-R, para se obter partículas na forma de escamas (*flakes*).

4.2.1.4 Separação granulométrica

Após a moagem, os materiais foram peneirados em peneira de 30 mesh para retirada de partículas de pó e também em peneira com abertura de 5 mm para maior homogeneidade do tamanho das partículas. Destes materiais, foram separadas amostras de cada tipo de material para medição do tamanho de partículas, que foi realizada a partir de análises de imagens fotográficas dos materiais com o auxílio do software ImageJ. Para cada material foram feitas 50 medidas, obtendo-se valores médios de tamanho de partícula, bem como o desvio padrão, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Tamanho médio das partículas dos polímeros utilizados nos testes de separação triboeletrostática.

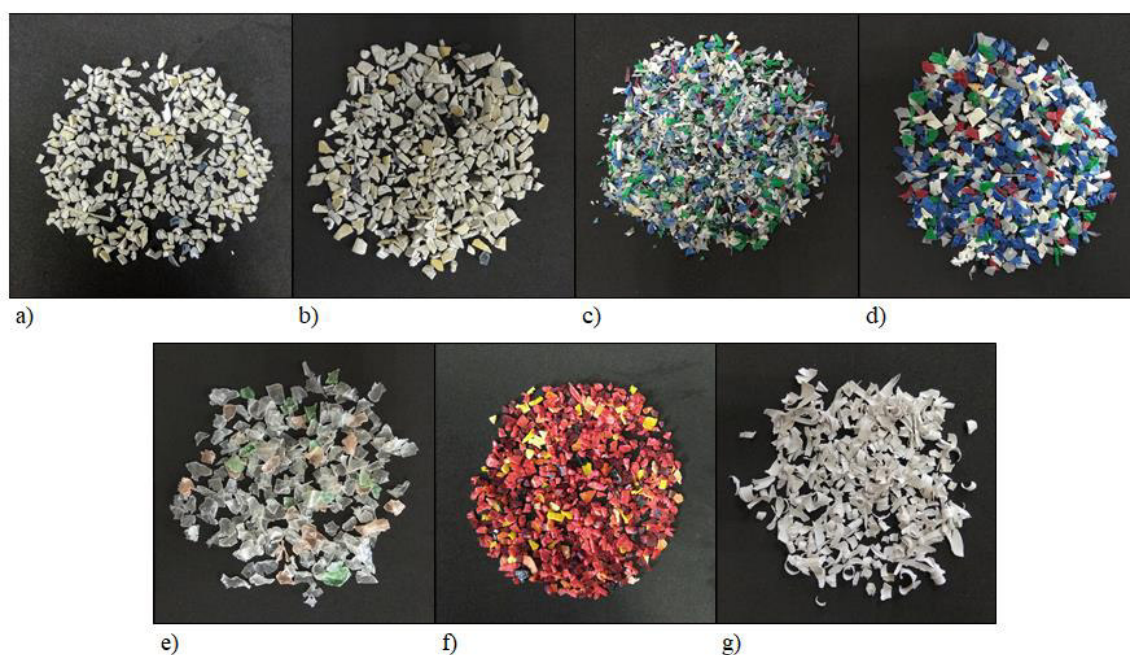
Polímero	Tamanho médio de partícula (mm)
ABSp	$3,8 \pm 1,2$
ABSG	$6,8 \pm 2,5$
PEADp	$3,6 \pm 1,8$
PEADg	$6,6 \pm 2,5$
PET	$8,4 \pm 2,9$
PP	$4,3 \pm 1,5$
PVC	$6,1 \pm 2,3$

Fonte: Própria da autora.

As partículas de ABS e PEAD que ficaram retidas na peneira de 5 mm passaram a ser denominadas ABSg e PEADg e a parcela de material que passou pela peneira foi intitulada como ABSp e PEADp.

Na Figura 25 são apresentadas imagens dos materiais com suas diferentes granulometrias.

Figura 25 - Materiais utilizados para os testes a) ABSp; b) ABSg; c) PEADp; d) PEADg; e) PET; f) PP e g) PVC.



Fonte: Própria da autora.

4.2.1.5 Secagem 2

Uma nova etapa de secagem foi realizada no material, a fim de que se retirasse a umidade residual em sua superfície para realização dos ensaios na etapa seguinte. O processo foi feito em uma estufa microprocessada com circulação forçada de ar, da marca Quimis, modelo Q314M242, 220V, 1750W de potência, com temperatura fixada em 80°C por um período de 12 horas.

4.2.1.6 Secagem 3

Para a Etapa 2 do estudo, os materiais utilizados foram submetidos novamente a uma secagem na estufa para retirada de possível umidade residual adquirida pelo polímero entre os

ensaios, e então, ser promovida uma separação triboeletrostática imediatamente posterior a esse processo. A temperatura para secagem foi fixada em 100°C por um período de 4 horas, realizada a cada nova separação.

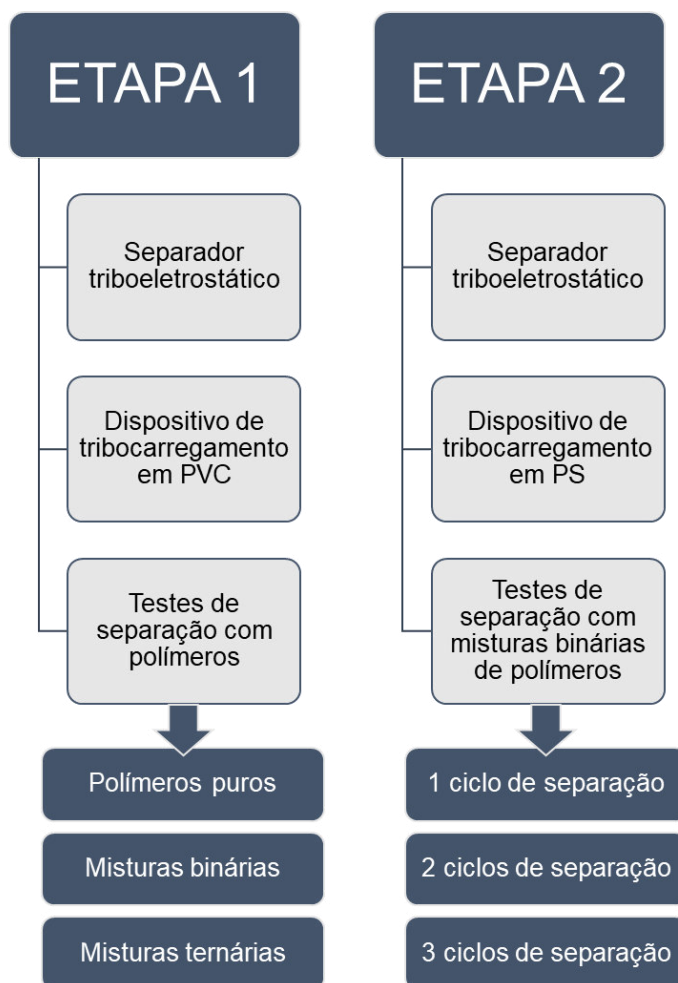
4.2.2 Sistema de separação triboeletrostática

Para a elaboração do projeto do sistema de separação triboeletrostática foram estudados alguns trabalhos encontrados na literatura e posteriormente foi projetado um equipamento que atendesse aos objetivos em escala laboratorial. O equipamento dispõe de duas partes conectadas entre si; o tribocarregador e o separador eletrostático. Para o tribocarregamento, foi utilizado um tubo de PVC flexível e transparente e com seção transversal retangular na etapa 1 do projeto. Já na etapa 2, foi projetado um tubo de poliestireno (PS) também com seção transversal retangular, além de um compressor de ar e um suporte de ferro para apoio do tubo inclinado em ambas etapas. Para o separador, foram utilizadas chapas de PS que compõem a caixa do separador e dos coletores. Possui também chapas de alumínio que funcionam como eletrodos, os quais são conectados a uma fonte de alta tensão da marca HYPOT, modelo HY 60 kV – 5 mA CC, 300 W de potência, com polaridade de saída negativa. Para a montagem do sistema obteve-se auxílio dos servidores das oficinas mecânicas do Departamento de Engenharia de Materiais da EEL/USP.

A execução do método experimental foi dividida em duas etapas, como ilustrado no fluxograma da Figura 26.

Foram realizados testes preliminares a fim de se avaliar a capacidade em massa dos polímeros mais adequada para o tubo de carregamento, assim como a inclinação angular deste. A partir da experimentação realizada previamente com os polímeros individualmente, para a etapa 1 do projeto, estipulou-se uma massa fixa de 20 g para cada material. Para os ensaios de misturas binárias, a mistura obedecia à proporção de 1:1 em massa de cada polímero, assim como na mistura ternária que manteve a proporção de 1:1:1. Para o carregamento triboelétrico, o fluxo de ar utilizado nos testes foi de 1,4 kgf/cm² e o tempo de carregamento estipulado foi de 3 min para todos materiais. Na etapa 2, a massa das amostras utilizadas nos ensaios foi de 12 g, respeitando a proporção de 1:1 nas misturas binárias. No carregamento triboelétrico nesta etapa, o fluxo de ar utilizado nos testes foi de 4,2 kgf/cm² e o tempo de carregamento dos materiais foi de 8 min.

Figura 26 - Fluxograma esquemático das etapas de desenvolvimento do estudo.



Fonte: própria da autora.

Seguindo para a separação eletrostática, foram dispostos dois eletrodos de forma que estivessem com uma distância superior de 4 cm e distância inferior de 27 cm, com uma altura para queda do material de 70 cm. A fonte ligada a um lado dos eletrodos foi utilizada com tensão de 25 kV em todos ensaios. Durante os ensaios também foram realizadas medidas de umidade relativa do ar com um termo-higrômetro da marca Incoterm, modelo 7666.02.0.00, para observação de temperatura e umidade relativa durante os testes.

Os experimentos com cada polímero e com as misturas binárias foram realizados em maioria em triplicata, posto que a cada experimento variou-se o lado do eletrodo ligado à fonte, a modo de comparação. Sendo assim, a cada mistura foram obtidos dois dados para o eletrodo direito negativo e um para o eletrodo esquerdo negativo. Os materiais foram separados em caixas coletoras, que foram confeccionadas também em PS, apresentando três divisões para deposição do material.

Para complementar as análises, na etapa 2, foi elaborado um método para observação dos resultados com a introdução de mais etapas de ciclos de separação. Ou seja, o material era alimentado no carregador, passava pelo separador e o montante despejado em cada coletor era retirado e reprocessado em uma nova segregação. Na primeira separação, uma mistura de 12 g era alimentada no equipamento e passava pelo processo padrão já explicado. Antes que os materiais dos coletores fossem retirados, um novo processamento era promovido, com uma amostra também de 12 g, resultando em um montante de 24 g ao final. A partir daí, o material residente no coletor intermediário seria descartado para novos ensaios em processos futuros, sendo de interesse o coletor esquerdo e direito. Ambos coletores tinham seus resíduos retirados e em processos diferentes de separação, eram novamente carregados e defletidos eletrostaticamente. Tal processo foi realizado em dois e três ciclos.

Para se avaliar a eficácia da separação dos materiais foram feitos cálculos de recuperação e pureza com as misturas binárias. Para isso, analisou-se as frações em massa obtidas em cada compartimento da caixa coletora separando-se manualmente os polímeros, resultando em dois grupos de partículas em cada coletor. Cada grupo de partículas dos coletores foi individualmente pesado em uma balança digital (precisão de $\pm 0,01$ g). Para o cálculo da recuperação de cada polímero foi utilizada a equação 1:

$$\text{Recuperação (\%)} = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \times 100 \quad (1)$$

Em que, m_{ic} corresponde à massa de material i coletada no compartimento destinado a ele e m_{it} é a massa total do material i que foi alimentada no sistema. A pureza de cada material em cada compartimento foi calculada pela equação 2:

$$\text{Pureza (\%)} = \frac{m_{ic}}{m_{tc}} \times 100 \quad (2)$$

Em que, m_{ic} é a massa do material i coletada no compartimento destinado a ele e m_{tc} corresponde à massa total de partículas poliméricas neste mesmo coletor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

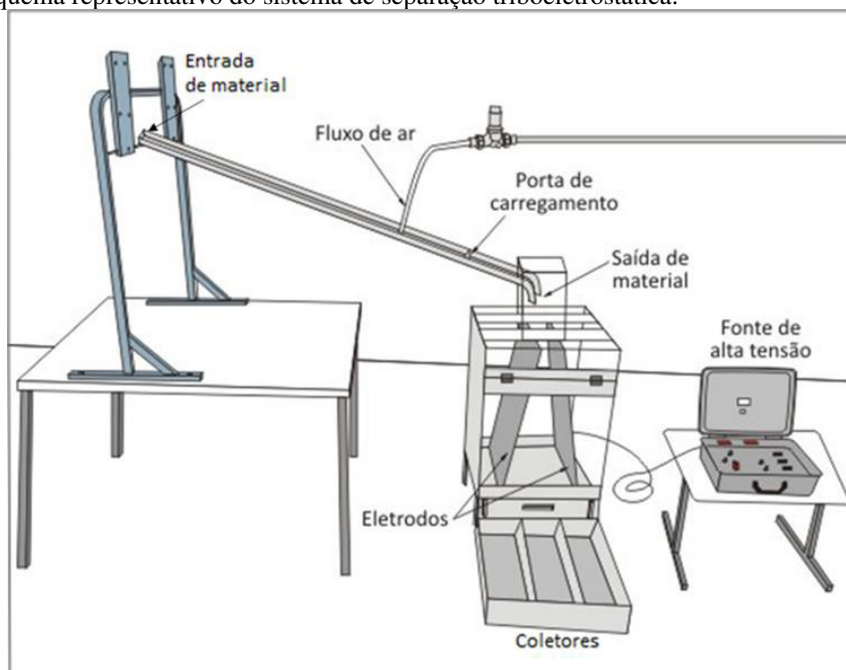
Primeiramente, reuniu-se informações obtidas na literatura para que se tivesse parâmetros aplicáveis neste projeto (DODBIBA *et al.*, 2002; PARK *et al.*, 2008; BENDIMERAD *et al.*, 2009; WU; LI; XU, 2013; BENABBOUN *et al.*, 2014; LI; WU; XU, 2015; BOUKHOULDA *et al.*, 2017). Visto isso, o sistema de separação triboeletrostática foi planejado e construído. O equipamento pode ser dividido em dispositivo de tribocarregamento e de separação eletrostática e será apresentado em detalhes juntamente com os resultados obtidos ao longo dos testes nas etapas 1 e 2 de desenvolvimento experimental.

5.1 Etapa 1 – Sistema de separação com tribocarregador de policloreto de vinila (PVC)

5.1.1 Dispositivo de tribocarregamento

O sistema elaborado para a primeira etapa do estudo teve sua configuração planejada e construída de acordo com o esquema representativo da Figura 27 (RODRIGUES; SARON, 2021).

Figura 27 - Esquema representativo do sistema de separação triboeletrostática.



Fonte: Própria da autora.

O sistema pode ser dividido em duas partes principais, que compõem a etapa de tribocarregamento e a de separação eletrostática. Na etapa de tribocarregamento, o polímero passa por um carregamento triboeletrostático, sucedendo-se a transferência de uma pequena carga elétrica de um material para o outro à medida que ocorrem as colisões entre as partículas. Neste projeto, desenvolveu-se um tribocarregador do tipo tubo, que recebe alimentação de fluxo de ar comprimido como auxílio para promover o atrito entre as partículas. Dessa forma, nesta configuração, as colisões ocorrem entre partícula-partícula e partícula-parede do tubo carregador. Na etapa 1 do estudo o tribocarregador é construído por PVC.

Para que o processo seja efetivo, o tubo foi disposto em um ângulo de 30° em relação ao eixo horizontal, favorecendo um efeito ciclone de ar no material e ao mesmo tempo, possibilitando a saída deste para o separador eletrostático no estágio seguinte. O tubo de PVC flexível possui seção transversal de 6,5 cm de largura por 3,5 cm de altura. O comprimento útil da seção de carregamento é de 130 cm, no qual está conectada com um bico injetor de ar comprimido, que foi confeccionado com duas aberturas, a fim de se promover um direcionamento do ar em duas direções, como mostrado na Figura 28. Ademais, para possibilitar o carregamento do material antes de deixar o dispositivo, uma porta de bloqueio foi instalada, confeccionada com o mesmo material do tubo, que é retirada quando o processo é finalizado. Na extremidade oposta do tubo, onde também se realiza a alimentação, há uma fenda de abertura para favorecer o alívio da pressão do fluxo de ar durante o carregamento. Para direcionar o material até o separador, o tubo foi projetado com uma curvatura ao final para que não houvesse desvio na trajetória de saída das partículas dos polímeros em direção a um dos eletrodos. Por fim, as partículas são direcionadas a uma fenda de abertura no separador, de 1,5 cm de largura.

Figura 28 – Dispositivo de carregamento triboeletrostático por fluxo de ar utilizado na pesquisa.



Fonte: própria da autora.

5.1.2 Dispositivo de separação eletrostática

No estágio da separação eletrostática, focou-se no princípio de se projetar um separador que trabalhasse em um sistema fechado (Figura 29a), na tentativa de minimizar possíveis interferências de efeitos ambientais na separação dos materiais. Foi então construída uma caixa em poliestireno (PS) com 70 cm de altura, 40 cm de profundidade e 35 cm de largura, equipada com uma porta frontal. Esta configuração permite também o isolamento elétrico do sistema. Em seu interior foram posicionadas duas chapas de alumínio de 66 cm de comprimento e 36 cm de largura que atuam como eletrodos e são conectados à fonte de alta tensão (Figura 29b). Após separação, o material é direcionado à caixa coletora que se posiciona na base do separador, provida de 3 divisões móveis, nas quais estipulou-se uma medida do coletor central com 4 cm de largura, destinada ao material que não obteve um carregamento efetivo e, conseqüentemente, não sofreu ação do campo elétrico. Os coletores situados à esquerda e direita são destinados aos materiais que adquirem cargas positivas e negativas, não necessariamente nessa ordem.

Figura 29 – a) Separador eletrostático desenvolvido no trabalho e b) Fonte de alta tensão utilizada nos ensaios.



a)



b)

Fonte: própria da autora.

5.1.3 Ensaios de tribocarregamento e desvio em campo elétrico com polímeros puros

Testes preliminares foram realizados em triplicata com os polímeros puros a fim de se ajustar as variáveis envolvidas no processo (Tabela 3). Para o estágio de carregamento, o tempo de 3 minutos foi definido com base em observações feitas nos ensaios, tendo em vista a transparência do tubo. Este detalhe possibilitou uma análise visual do comportamento dos polímeros. Notou-se nos primeiros testes que, em geral, a partir de 2 minutos os materiais passavam a apresentar um comportamento que se atribui carregamento destes, pois demonstravam certa aderência às paredes do tubo. Ainda definindo o tempo de residência, estipulou-se então, um tempo ótimo de 3 minutos, pois excedendo esse tempo, notou-se que não havia mais um carregamento significativo dos polímeros, podendo causar uma saturação de carga no material.

Na etapa de passagem das partículas carregadas no campo elétrico do dispositivo de separação, ajustou-se o espaçamento entre os eletrodos em 4 cm na parte superior e em 27 cm na parte inferior, enquanto a tensão na fonte de alimentação elétrica conectada aos eletrodos foi mantida em 25 kV. Essa configuração no separador baseou-se em estudos nos quais indicavam que uma tensão ajustada a partir dessa faixa proporcionava resultados satisfatórios nos sistemas desenvolvidos (PARK *et al.*, 2007; BILICI *et al.*, 2011b; AKSA *et al.*, 2013; BOUKHOULDA *et al.*, 2017).

Tabela 3 - Ensaios com polímeros puros.

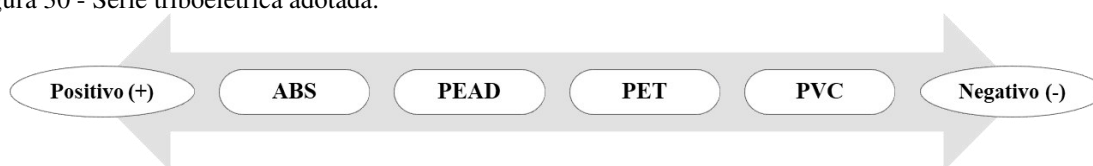
	Massa no coletor do eletrodo neutro (%)	Massa no coletor intermediário (%)	Massa no coletor do eletrodo negativo (%)
PEADg	5,35	5,65	89,00
	9,34	13,41	77,25
	12,44	14,35	73,21
	10,18	14,19	75,63
ABSg	10,33	12,77	76,90
	9,31	11,48	79,21
PVC	31,61	36,98	31,41
	28,89	47,14	23,97
	27,63	38,01	34,36
PET	1,36	1,91	96,74
	3,88	8,01	88,12
	1,86	3,12	95,02

Fonte: própria da autora.

Nota-se que o dispositivo de tribocarregamento de PVC tende a atribuir um carregamento positivo aos polímeros. Por conta da sua posição nas séries triboelétricas (Tabela 1), o PVC possui grande capacidade de se carregar negativamente a partir do atrito com outros materiais, levando ao carregamento positivo das partículas dos demais resíduos poliméricos em estudo. Assim, as partículas dos resíduos de PEADg, ABSg e PET são desviadas principalmente em direção ao coletor do eletrodo negativo, destacando-se o PET com recuperação neste coletor em valores que atingem acima de 95% da massa inicial inserida no sistema. Por outro lado, as próprias partículas do resíduo de PVC não são preferencialmente carregadas positiva ou negativamente e se distribuem de forma quase que igualitária entre os coletores, com ligeira prevalência no coletor intermediário.

A partir destes resultados, convencionou-se usar como base para as próximas análises e propostas de ensaios, de forma qualitativa, a série triboelétrica proposta por Freitas (2018) e adaptada, tendo em vista o estudo dos mesmos tipos de resíduos poliméricos utilizados em seu trabalho (Figura 30).

Figura 30 - Série triboelétrica adotada.



Fonte: FREITAS, 2018.

5.1.4 Estudo da separação triboeletrostática de misturas binárias

Para avaliar a eficiência do sistema na separação de resíduos poliméricos, foram realizados ensaios com misturas binárias dos polímeros na proporção de 1:1 em massa. Na mistura de PET com o PEADg, ambos polímeros foram desviados para o coletor do eletrodo negativo e os resultados deixaram claro que a separação não foi possível. Este foi um resultado plausível, uma vez que ambos se apresentam à esquerda do PVC na série triboelétrica. A partir disso, concluiu-se que o meio de carregamento dos materiais possui influência crítica no processo. Por fim, combinações possíveis de separação foram então determinadas, nas quais todas possuíam o PVC, o elemento mais negativo na série e que poderia carregar os outros materiais positivamente por ação do tubo e do material de alimentação, sendo elas: PVC/PEADp, PVC/PET e PVC/ABSg. Os resultados da separação destas misturas são apresentados na Tabela 4.

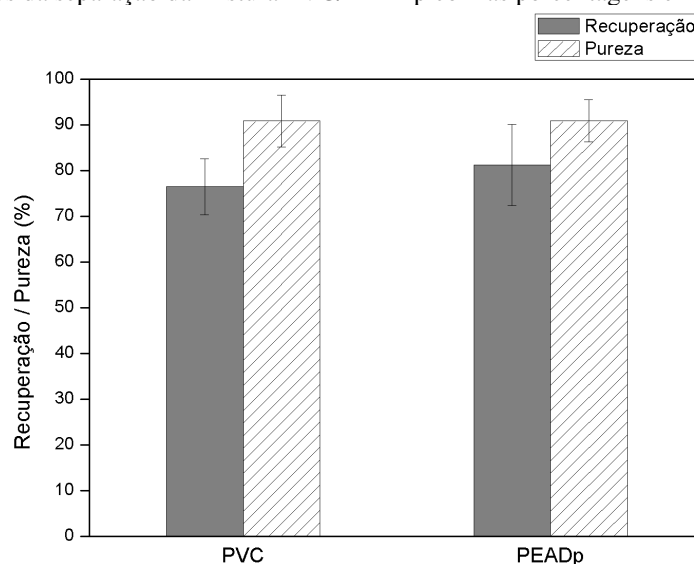
Tabela 4 - Separação das misturas binárias dos polímeros.

Mistura	Massa no eletrodo neutro (%)			Massa na zona Intermediária (%)		Massa no eletrodo negativo (%)		
	PVC	PEADp	Pureza	PVC	PEADp	PVC	PEADp	Pureza
PVC + PEADp	76 ± 6	8 ± 5	91 ± 6	16 ± 2,5	11 ± 4	8 ± 4	81 ± 9	91 ± 5
PVC + PET	68 ± 6	1 ± 1	98 ± 2	10 ± 6	3 ± 2	22 ± 1	96 ± 3	81 ± 1
PVC + ABSg	84 ± 3,5	9 ± 2	90 ± 2	10 ± 3	15 ± 6	6 ± 2	76 ± 4	93 ± 2

Fonte: própria da autora.

Para a separação de PVC e PEAD foi determinado que o PEADp seria utilizado nesta etapa por conta das características visuais similares que ambos polímeros apresentam, que dificultaria o processo de separação manual para a medição de massa ao final dos ensaios. Assim, fez-se uso do PEADp que apresentava menor granulometria, facilitando a identificação visual e ao mesmo tempo proporcionando uma análise complementar do efeito do tamanho das partículas. Na separação da mistura PVC e PEADp, atingiu-se o valor de recuperação do PVC em $76 \pm 6 \%$ com pureza de $91 \pm 6 \%$, enquanto para o PEADp a recuperação foi de $81 \pm 9 \%$ e pureza de $91 \pm 5 \%$. A Figura 31 apresenta os resultados de recuperação e pureza dos resíduos de PVC e PEADp nos eletrodos neutro e negativo, respectivamente.

Figura 31 - Resultados da separação da mistura PVC/PEADp com as porcentagens em massa de PVC e PEADp.



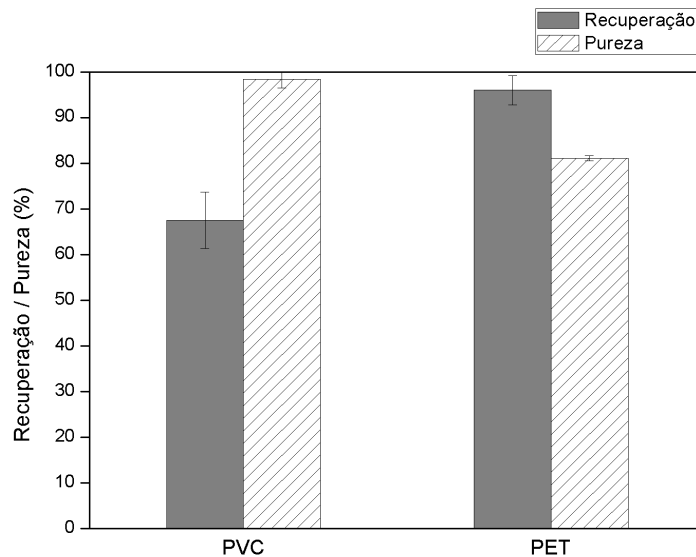
Fonte: própria da autora.

O ensaio de separação com o sistema PVC/PEADp demonstrou que o PVC presente na mistura pode ser carregado negativamente quando em combinação a outro polímero à sua

esquerda na série triboelétrica, e ser efetivamente separado, possibilitando a continuidade dos ensaios. Foi possível também obter bons resultados de segregação mesmo com a diferença granulométrica média presente nesta mistura (3,6 μ m do PEADp e 6,1 μ m do PVC), demonstrando que não é estritamente necessária a igualdade de tamanho de partículas para o ensaio. Ademais, obteve-se maior recuperação do PEADp em relação ao PVC, explicando possivelmente um melhor comportamento de tribocarregamento e separação para as partículas de menor tamanho neste sistema.

Na mistura PVC/PET obteve-se resultados de recuperação do PVC em 68 ± 6 % com uma pureza de 98 ± 2 %, enquanto para o PET a recuperação foi de 96 ± 3 % com pureza de 81 ± 1 % (Figura 32). A separação foi possível de ser realizada, demonstrando boas taxas de recuperação do PET e alta pureza do PVC. Neste caso, também foi presenciado na etapa de tribocarregamento uma tendência do PET em aderir às paredes do tubo carregador e acredita-se que seja por conta da baixa massa das partículas, pois o material possuía pequena espessura. Por outro lado, também foi visível a eficácia em promover seu carregamento triboeletrostático.

Figura 32 - Resultados da separação da mistura PVC/PET com as porcentagens em massa de PVC e PET.

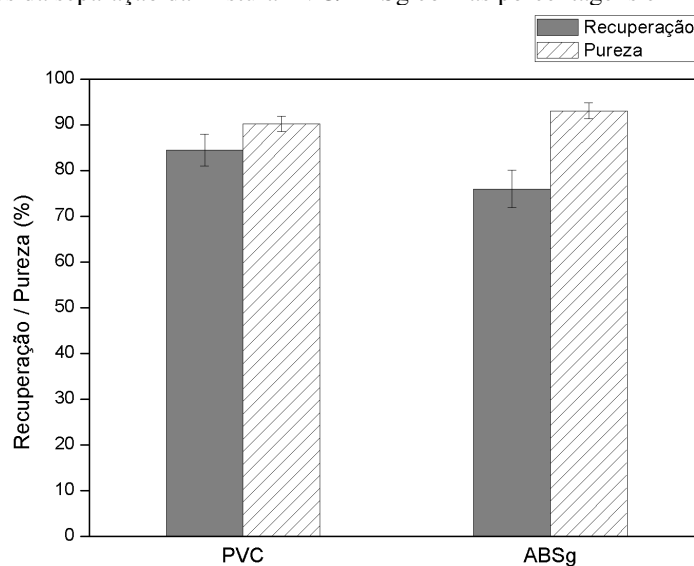


Fonte: própria da autora.

A separação da mistura PVC/ABSg obteve porcentagens de recuperação em $84 \pm 3,5$ % de PVC com uma pureza de 90 ± 2 % e o ABS apresentou recuperação de 76 ± 4 % com 93 ± 2 % de pureza (Figura 33). Neste caso, também foi possível realizar a separação, mas notou-se que o carregamento não foi tão efetivo como nas misturas anteriores. Logo, supõe-se que o

tamanho de partícula não foi o mais adequado, pois comparando-se os materiais, nota-se que as partículas de ABSg possuem espessura média maior, influenciando na massa das partículas. Assim, acredita-se que a massa maior das partículas de ABSg poderia dificultar a deflexão destas no campo elétrico. Nos ensaios posteriores realizados na Etapa 2 desta pesquisa, foi realizada a cominuição do ABS em partículas ainda menores com o propósito de melhorar a eficiência de separação.

Figura 33 - Resultados da separação da mistura PVC/ABSg com as porcentagens em massa de PVC e ABSg.



Fonte: própria da autora.

5.1.5 Estudo da separação triboeletrostática de misturas ternárias

Tendo em vista a capacidade do sistema em segregar misturas binárias, foram realizados testes para avaliar também a aplicabilidade do separador com misturas ternárias. Para estas novas misturas, os materiais seguiram a proporção em massa de 1:1:1, totalizando amostras com 21g no total. No novo método, obedeceu-se à condição de utilizar o PVC como um dos materiais componentes da amostra, com adição do PET e PEADg, que demonstraram um bom comportamento de separação nos testes anteriores. Os resultados obtidos estão expressos na Tabela 5, de acordo com as porcentagens em massa de material recuperado em cada coletor. Nesse teste, os cálculos de pureza não foram determinados devido à mistura de mais de dois tipos de polímeros em cada coletor.

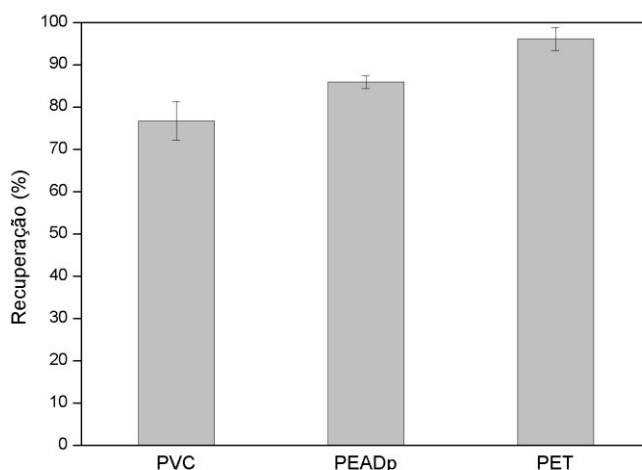
Tabela 5 - Separação da mistura ternária de polímeros.

Mistura	Massa no eletrodo neutro (%)			Massa na zona Intermediária (%)			Massa no eletrodo negativo (%)		
	PET	PEADp	PVC	PET	PEADp	PVC	PET	PEADp	PVC
PET + PEAD + PVC	1 ± 1	6 ± 1	77 ± 5	3 ± 2	8 ± 2	11 ± 3	96 ± 3	86 ± 2	13 ± 3

Fonte: própria da autora.

Os valores médios de recuperação de cada material ficaram na faixa de $77 \pm 5 \%$ para o PVC, $86 \pm 2 \%$ para o PEADp e $96 \pm 3 \%$ para o PET (Figura 34). A mistura apresentou comportamento que vai de acordo com a série triboelétrica, visto que o PET e o PEADp tenderam a carregar positivamente, enquanto o PVC carregou negativamente (Figura 35).

Figura 34 - Resultados de recuperação na separação da mistura PVC/PEADp/PET com as porcentagens em massa de PVC, PEADp e PET.

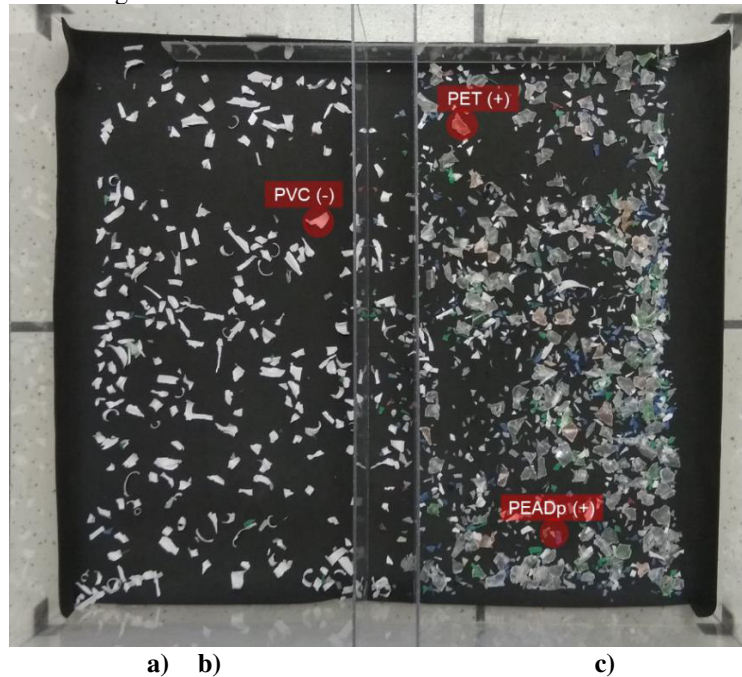


Fonte: própria da autora.

O método se demonstrou tão eficaz para misturas ternárias quanto binárias, possibilitando seu estudo futuro para uma série de combinações. Como já discutido, o PVC apresentou taxas de recuperação um pouco abaixo dos outros polímeros presentes na amostra, por conta da semelhança com o material do tubo carregador. Vale ressaltar que na mistura ternária PVC/PEADp/PET houve uma separação majoritária do PVC no eletrodo neutro, enquanto ambos PEADp e PET foram recuperados em grande proporção no eletrodo negativo. Assim, a posterior separação dos resíduos PEADp e PET deverá ser feita em outra etapa, empregando um tribocarregador diferente e capaz de carregar o PEADg e o PET com cargas elétricas opostas ou até mesmo com o uso de outra técnica de separação. A Figura 36

apresenta a imagem dos coletores do eletrodo neutro, da zona intermediária e do eletrodo negativo após um ensaio de separação triboeletrostática.

Figura 35 - Disposição dos materiais após separação da mistura ternária nos coletores: a) eletrodo neutro; b) zona intermediária e c) eletrodo negativo.



Fonte: própria da autora.

5.2 Etapa 2 - Sistema de separação com tribocarregador de poliestireno (PS)

5.2.1 Dispositivo de tribocarregamento

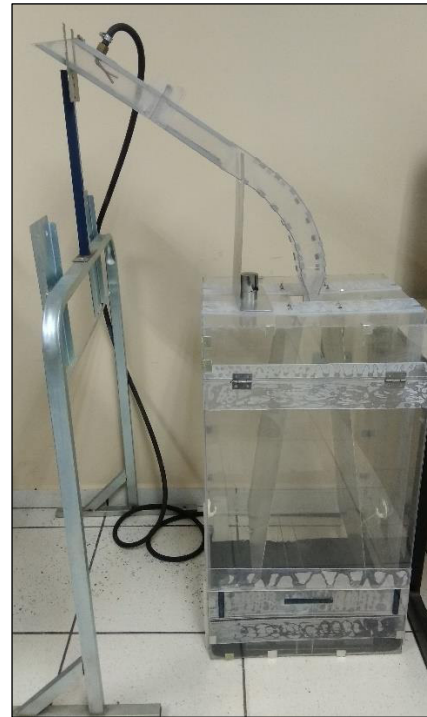
Na etapa 2 do estudo, optou-se pela confecção de um novo dispositivo para o tribocarregamento dos materiais, de forma a avaliar a interferência na troca de cargas com um material diferente. Este novo tribocarregador com seção retangular e construído com chapas de poliestireno (PS) com espessura de 2 mm, portanto, foi também disposto em um ângulo de 30° em relação ao eixo horizontal e fixado em dois apoios metálicos. O tribocarregador de PS possui seção transversal de 6,5 cm de largura por 5 cm de altura. O comprimento útil de carregamento é de 24 cm, conectado a um bico injetor de ar comprimido, como apresentado na Figura 36. Além disso, para possibilitar o carregamento do material antes de acessar o campo elétrico na câmara de separação, foi instalada a porta de bloqueio, confeccionada com o mesmo material do dispositivo, que é aberta quando o tempo de carregamento de 8 min. é atingido. Para o direcionamento do material até o campo elétrico, uma mangueira auxiliar de

ar comprimido é utilizada, de forma a retirar qualquer partícula que pudesse aderir no tribocarregador após o carregamento. Na extremidade oposta do tribocarregador, é realizada a alimentação e para que o material seja direcionado até o separador, a extremidade final do dispositivo foi projetada com uma curvatura. Por fim, as partículas carregadas são direcionadas a uma fenda de abertura no separador, de 1,5 cm de largura.

Figura 36 - Tribocarregador em PS: a) conexão da mangueira para injeção de ar; b) integração com a câmara de separação.



a)



b)

Fonte: própria da autora.

5.2.2 Estudo da separação triboeletrostática de misturas binárias

Na etapa 2 do estudo, o novo desafio na separação se daria pela mudança do material utilizado para proporcionar o carregamento triboeletrostático dos polímeros. Segundo as séries triboelétricas encontradas na literatura, e levando-se em consideração principalmente a proposta de Freitas (2018), o PS é um material mais frequentemente encontrado numa posição central da série, o que levou à escolha deste para compor o tribocarregador do sistema. Tal conclusão foi baseada no fato de uma possível ampliação do espectro de combinações entre as misturas de polímeros para separação, diferentemente do que ocorreu na etapa 1, com o PVC. Ademais, o PS possui como característica física sua transparência, sendo compatível com o que foi realizado na etapa anterior e favorecendo observações mais detalhadas do processo.

Após a montagem do novo sistema deu-se início aos testes preliminares para avaliação de misturas binárias. No primeiro grupo de ensaios, as misturas que foram submetidas ao carregamento haviam seguido a metodologia que envolvia apenas até a segunda secagem dos materiais. Sendo assim, foram testadas as misturas PEAD/ABS_p e PET/ABS_p. O ABS_g passou por um processo de moagem para novas análises e nesta etapa foi utilizado o ABS_p. Para ambas tentativas, as separações não demonstraram resultados conclusivos quanto ao carregamento adquirido pelas partículas. Os testes com o ABS_p foram descartados, dando-se foco a novas combinações.

É válido acrescentar que algumas particularidades foram levadas em consideração na escolha das combinações. Primeiramente, o PVC não foi incluído no novo estudo por já ter sido apresentada uma proposta bem sucedida de separação anteriormente. Em segundo, foi decidido direcionar os ensaios empregando os polímeros PET, PP e PEAD, estes de grande interesse para reciclagem.

A princípio foram realizados testes com a mistura PP e PEAD, sendo esta incapaz de indicar uma tendência de carregamento diferenciado entre os polímeros e consequente separação, impedindo a continuidade dos experimentos para essa combinação. Além disso, esse comportamento indicou uma grande proximidade entre os dois polímeros na série triboelétrica, dando-se prioridade a partir daí às misturas com PET. Procedeu-se testes entre o PET e PP, em que foi estipulado um tempo de carregamento de 8 minutos, pois notou-se que o poliestireno não atribuía um carregamento tão rápido entre as partículas quanto o PVC.

A partir dos testes efetuados com a mistura PET/PP, foi possível explorar uma tendência de separação entre os dois polímeros. Em seguida, foi apresentada a proposta para promover uma nova secagem destes materiais, de forma que esta fosse realizada seguindo-se diretamente à posterior separação, supondo-se que beneficiaria o processo, e assim, auxiliando a promover um estudo do efeito da umidade residual das partículas poliméricas no processo de separação. Os resultados dos materiais sem a secagem (PET/PP) e após secagem (PETs/PPs) são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Separação das misturas binárias dos polímeros na etapa 2.

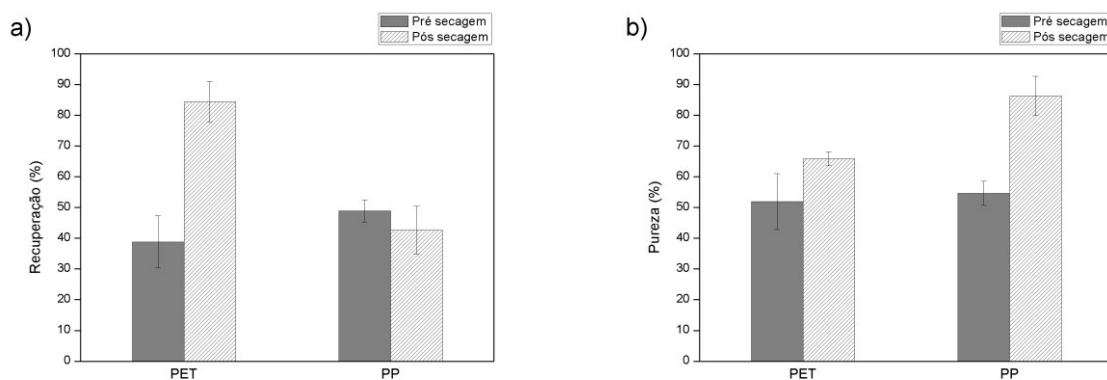
Mistura	Massa no eletrodo neutro (%)			Massa na zona Intermediária (%)		Massa no eletrodo negativo (%)		
	PET	PP	Pureza	PET	PP	PET	PP	Pureza
PET + PP	39 ± 8	36 ± 5	52 ± 9	21 ± 5	15 ± 1	41 ± 4	49 ± 4	55 ± 4
PETs + PPs	84 ± 7	44 ± 8	66 ± 2	8 ± 2,5	14 ± 2	5 ± 3	43 ± 8	86 ± 6

Fonte: própria da autora.

Nota-se que na mistura PET/PP (sem a secagem) não se verifica uma tendência clara de carregamento do PET, uma vez que a sua recuperação nos eletrodos neutro e negativo é igual, considerando o desvio padrão das medidas. Por outro lado, o PP foi defletido preferencialmente em direção ao eletrodo negativo, sugerindo que tenha adquirido cargas positivas. A recuperação do PET no coletor do eletrodo neutro foi de 39 ± 8 % com pureza de 52 ± 9 %, enquanto do PP no coletor do eletrodo negativo foi de 49 ± 4 % com pureza de 55 ± 4 %.

Após o processo de secagem do material da mistura (PETs/PPs) verifica-se um nítido incremento nos valores médios de recuperação e pureza dos polímeros, de forma que o PET atingiu níveis de recuperação de 84 ± 7 % com uma pureza de 66 ± 2 % e o PP teve uma massa recuperada de 43 ± 8 % com 86 ± 6 % de pureza. O aumento de eficiência no processo de separação após a secagem dos materiais pode ser verificado com maior clareza na comparação de resultados ilustrado na Figura 37.

Figura 37 - Efeito do processo de secagem na separação de misturas PET/PP: a) taxa de recuperação e b) pureza dos materiais.



Fonte: própria da autora.

Os resultados deixam claro que a secagem dos polímeros é um fator decisivo para melhorar a eficiência do processo de separação triboeletrostática em misturas PET/PP. É de conhecimento que o PET é um polímero muito higroscópico devido à presença de grupos químicos ésteres, carbonilas e hidroxilas em sua estrutura química (MARTIN; BRANDAU, 2012). A presença de umidade na superfície das partículas deve dificultar o carregamento elétrico e ajudar a dissipar as cargas formadas.

Em termos de implementação em processos produtivos em larga escala, o processo de secagem dos materiais não deve ser considerado como uma grande dificuldade técnica, haja vista que sistemas de secagem do PET são utilizados pelas indústrias de transformação e

necessários para evitar a degradação do polímero por processos hidrolíticos durante o seu processamento termomecânico.

A secagem dos polímeros passou a ser utilizada nos ensaios subsequentes utilizando a mistura PET/PEADp. Na Tabela 7 estão apresentados os resultados obtidos nos experimentos. Os ensaios foram realizados em triplicata, invertendo-se a polaridade dos eletrodos.

Tabela 7 - Separação das misturas binárias dos polímeros na etapa 2.

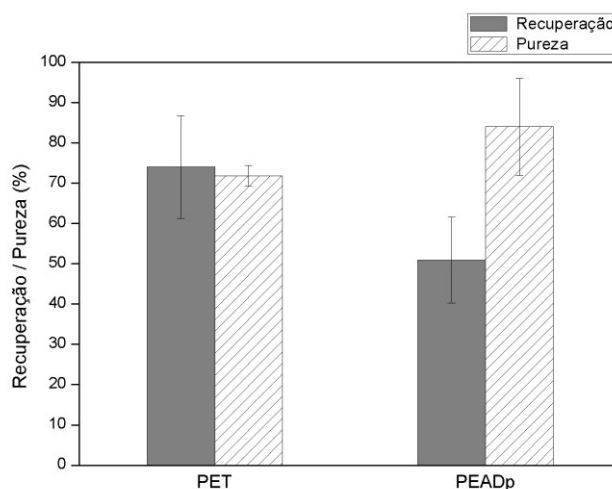
Amostra	Massa no eletrodo neutro (%)			Massa na zona Intermediária (%)		Massa no eletrodo negativo (%)		
	PET	PEADp	Pureza	PET	PEADp	PET	PEADp	Pureza
PET + PEADp	74 ± 13	35 ± 10	72 ± 2,5	16 ± 5	14 ± 1	10 ± 8	51 ± 11	84 ± 12

Fonte: própria da autora.

A separação realizada com a mistura PET/PEADp também atingiu bons índices de pureza dos materiais separados, como se pode observar na Figura 38, nos quais obteve-se uma recuperação de 74 ± 13 % e pureza de 72 ± 3 % para o PET, enquanto o PEADp atingiu um índice de 51 ± 11 % de recuperação com pureza de até 84 ± 12 %. O PEAD, assim como o PP, é uma poliolefina e a semelhança da estrutura química destes polímeros também se reflete no comportamento próximo de carregamento e de separação triboeletrostática.

Dessa forma, os resultados apresentaram índices relevantes de separação entre diferentes misturas, estas com diferentes tamanhos médios de partículas (PET com 8,4 mm e PEADp com 3,6 mm) em um tribocarregador de poliestireno.

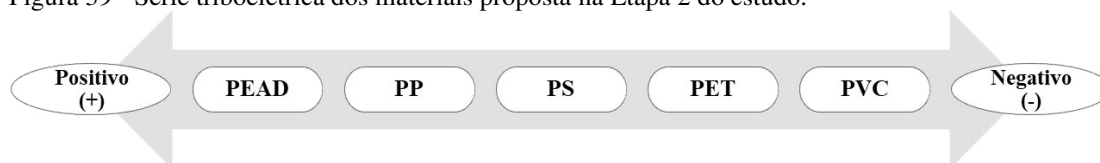
Figura 38 - Resultados da separação da mistura PET/PEADp pós secagem com as porcentagens em massa de PET e PEADp.



Fonte: própria da autora.

Com as informações obtidas, foi possível reuni-las para propor um novo comportamento dos polímeros na troca de cargas promovida por atrito, desta vez em presença do PS. A proposta é apresentada de forma qualitativa (Figura 39), visto que não foram realizadas medições das cargas adquiridas pelas partículas. De acordo com os testes da Etapa 2, notou-se uma tendência do PET em obter cargas negativas, dispendo-o à direita da série triboelétrica. Como PEAD e PP tiveram comportamentos similares, apresentam-se alocados à esquerda, estando o PS mais ao centro da série. O PVC foi adicionado à direita dos outros materiais com base nos estudos da primeira etapa, pois o polímero apresentou tendências em carregar negativamente na presença de ABS, PEAD e PET em contato com o tribocarregador de PVC. Como o PS apresenta a tendência em estar no meio da série, a característica do PVC se mantém. Por fim, por não ter sido obtido resultados concisos a respeito do ABS, optou-se por não o apresentar.

Figura 39 - Série triboelétrica dos materiais proposta na Etapa 2 do estudo.



Fonte: própria da autora.

5.2.3 Separação triboeletrostática de misturas binárias envolvendo novos ciclos

Embora tenham sido alcançados índices consideráveis de separação das misturas poliméricas em uma única etapa do processo triboeletrostático, a pureza dos polímeros reciclados é diretamente relacionada com o desempenho de inúmeras propriedades do material. Neste sentido, o método de separação triboeletrostático proposto permite o reprocessamento do material no sistema, ou seja, a reinserção do material não segregado em uma nova etapa de triboseparação, favorecendo um maior índice de recuperação e, possivelmente, pureza dos materiais. Tendo em vista a viabilidade de aplicação do método, foram realizados ensaios para comparar os resultados obtidos no primeiro ciclo de separação com novos ciclos de duas e três etapas.

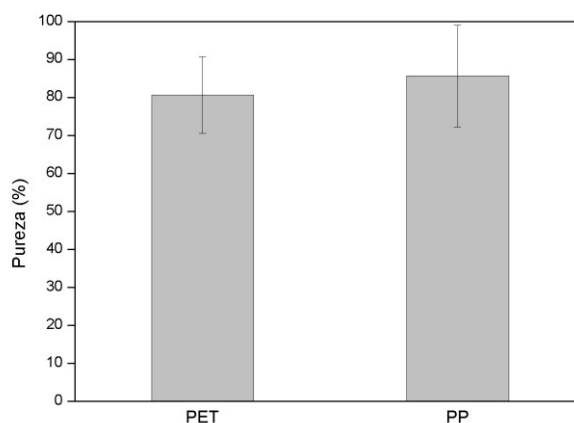
Para a execução dos testes, foram selecionadas as misturas binárias de PET/PP e PET/PEADp. Primeiro, a combinação PET/PP foi submetida à separação em primeiro ciclo conforme previamente realizado na seção 5.2.2. Em seguida, foram selecionados os coletores

destinados a cada um dos materiais, sendo coletor do eletrodo neutro para o PET, que apresenta maior tendência de segregação em direção a este, e o eletrodo negativo para o PP que tende a ser defletido em direção oposta ao PET. Assim, o material recolhido do eletrodo neutro e considerado como resíduo de PET de primeiro ciclo foi inserido novamente na alimentação do tribocarregador para o segundo ciclo de separação. Procedimento similar foi realizado para o resíduo de PP coletado no eletrodo negativo. O material do coletor da zona intermediária não foi utilizado, sendo considerado como não separado e devendo ser reinserido no sistema, em condições de aplicação da técnica.

Foram realizados ensaios em duplicata com a inversão da polaridade dos eletrodos ligados à fonte de alta tensão. Os resultados do segundo ciclo de separação dos materiais são apresentados na Figura 40.

Nota-se que a pureza do PET e do PP após o segundo ciclo de separação foi de $81 \pm 10 \%$ e $86 \pm 13 \%$, respectivamente. Assim, ambos polímeros apresentaram ganho de pureza após um ciclo adicional de separação.

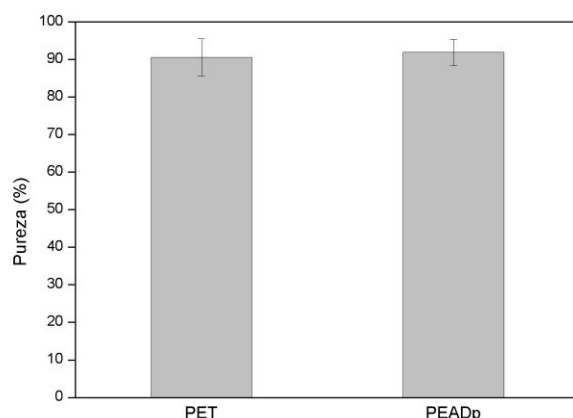
Figura 40 - Resultados de pureza média obtidos na separação em dois ciclos da mistura PET/PP com as porcentagens em massa de PET e PP.



Fonte: própria da autora.

Posteriormente, o processo foi inteiramente replicado, desta vez com a mistura PET/PEADp. É válido destacar que o comportamento dessa combinação possui a mesma tendência de troca de cargas da mistura anterior, com um carregamento negativo do PET e para o PEADp, o contrário. Nos testes, a mistura atingiu níveis de pureza de PET de $91 \pm 5 \%$ em massa e para o PEADp foi de até $92 \pm 3,5 \%$ (Figura 41). Para esta combinação também foi possível observar um grande acréscimo nos índices de pureza dos resíduos poliméricos.

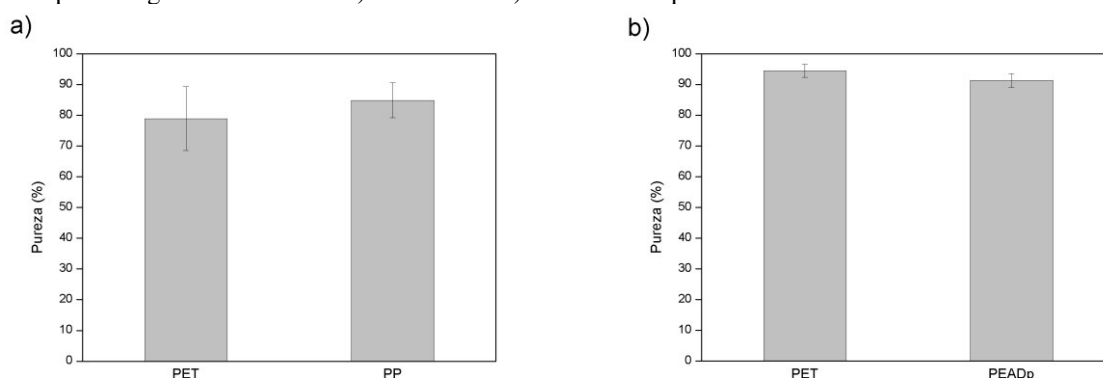
Figura 41 - Resultados de pureza média obtidos na separação em dois ciclos da mistura PET/PEADp com as porcentagens em massa de PET e PEADp.



Fonte: própria da autora.

Após a realização do segundo ciclo de separação a adição de mais um ciclo de segregação dos materiais foi realizada a fim de se avaliar o beneficiamento das misturas de resíduos poliméricos e propor novos métodos que possam vir a ser otimizados. O terceiro ciclo de separação foi realizado de forma análoga ao procedimento do segundo ciclo. Além da metodologia ser replicada, foram escolhidas as mesmas misturas para dar seguimento às comparações. Sendo assim, foram feitos testes em duplicata para a mistura PET/PP primeiramente, seguida da mistura PET/PEADp. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 42.

Figura 42 - Resultados de pureza média obtidos na separação em três ciclos das misturas PET/PP e PET/PEADp com as porcentagens em massa de a) PET e PP e b) PET e PEADp.



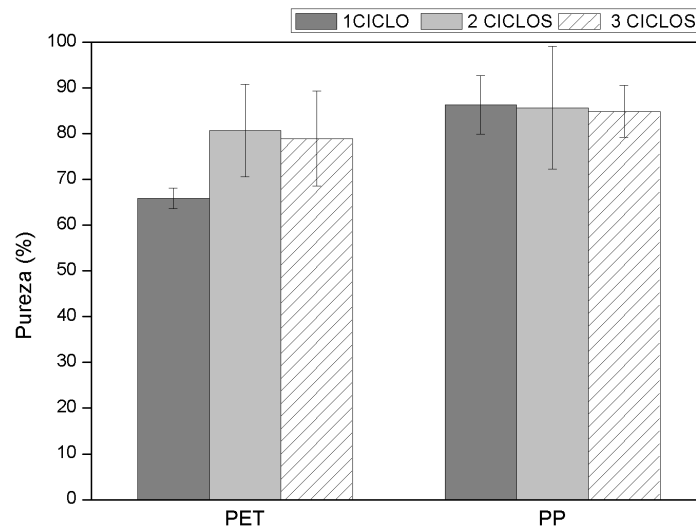
Fonte: própria da autora.

A primeira mistura apresentou taxa de pureza de $79 \pm 10 \%$ para o PET e $85 \pm 6 \%$ para o PP. Já a segunda combinação alcançou níveis de pureza de $94,5 \pm 2 \%$ de massa do

PET e 91 ± 2 % para o PEADp, demonstrando altos níveis de pureza com pequenas variações entre os testes.

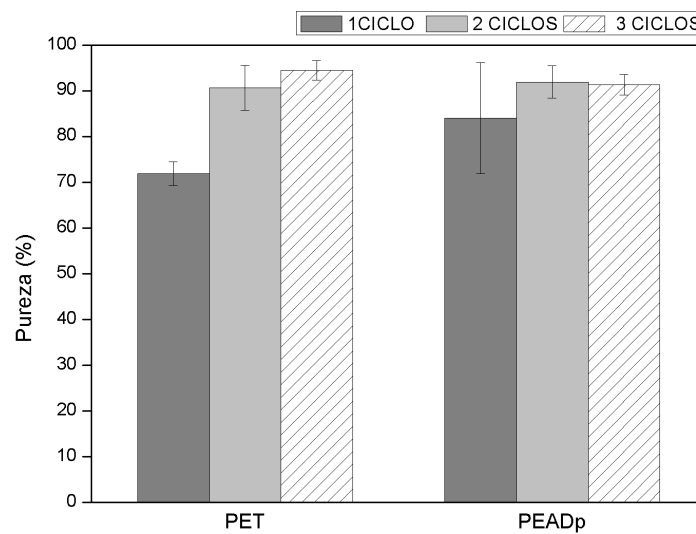
Para melhor comparação entre os resultados, as Figura 43 e Figura 44 apresentam os valores de pureza dos três ciclos de separação para os materiais.

Figura 43 - Resultados de pureza dos materiais em diferentes ciclos de separação, com as porcentagens em massa de PET e PP.



Fonte: própria da autora.

Figura 44 - Resultados de pureza dos materiais em diferentes de ciclos de separação, com as porcentagens em massa de PET e PEADp.



Fonte: própria da autora.

Dispondo de uma exposição mais precisa dos efeitos de novos ciclos de carregamento dos materiais, nota-se o ganho em desempenho no sistema de separação. Para ambas misturas, a ocorrência foi mais significativa principalmente entre o primeiro e o segundo ciclo, com o PET demonstrando um destaque maior em tal característica. Já encaminhados ao terceiro ciclo, o acréscimo não se sobressaiu demasiadamente pois os resíduos já haviam adquirido altos valores de pureza. Dessa forma, a metodologia se demonstrou eficaz no beneficiamento dos resíduos poliméricos em estudo, podendo ser utilizada como tópico para futuros sistemas otimizados de separação triboeletrostática de materiais.

6 CONCLUSÕES

O dispositivo desenvolvido para separação de resíduos poliméricos e baseado em tribocarregador constituído de material polimérico, o qual promove o carregamento eletrostático das partículas dos resíduos por meio fluxo de ar e com separador eletrostático de queda livre, demonstrou eficiência na separação de resíduos de PVC, PET, ABS, PEAD e PP.

A capacidade e efetividade de carregamento positivo ou negativo das partículas dos polímeros em uma mistura foram condições fundamentais para alcançar níveis elevados de separação dos materiais. Fatores como o tipo do material do tribocarregador, tempo de carregamento, tamanho de partícula e umidade do material foram decisivos para o carregamento das partículas e eficiência do processo.

O sistema com tribocarregador de PVC mostrou que este polímero é altamente eficaz para promover o carregamento positivo nas partículas dos resíduos poliméricos em estudo, com exceção do próprio PVC, que se carrega negativamente em misturas binárias. Assim, a separação triboeletrostática com tribocarregador de PVC é muito eficiente para a segregação de resíduos de PVC em mistura com outros polímeros. Entretanto, este sistema não é viável para a separação de misturas de outros resíduos poliméricos.

A utilização do tribocarregador confeccionado com poliestireno (PS) mostrou ser menos eficaz no carregamento das partículas dos resíduos poliméricos, necessitando de maior tempo de carregamento para alcançar resultados satisfatórios. Entretanto, o PS demonstrou estar na região central da série triboeletrostática, considerando os resíduos dos polímeros em estudo. Isto permitiu o carregamento negativo do PET em misturas PET/PP e PET/PEAD, enquanto os polímeros PP e PEAD foram carregados positivamente. Assim, foi possível a separação destas misturas com o uso do tribocarregador de PS.

A presença de umidade residual no PET afetou de forma significativa a capacidade de carregamento eletrostático no sistema com tribocarregador de PS. A secagem imediatamente anterior ao processo de separação foi efetiva para melhorar a separação do PET em misturas PET/PP e PET/PEAD.

A pureza dos resíduos segregados foi melhorada submetendo o material a novos ciclos de separação, sendo que valores de pureza acima de 90% foram alcançados após o segundo ciclo de processamento do material.

A separação triboeletrostática, foco da presente pesquisa, apresentou características e vantagens que se mostram como promissoras para o desenvolvimento de sistemas mecanizados e em larga escala para a separação de resíduos pós-consumo de materiais

poliméricos. Tais sistemas combinados ou não com outras técnicas tradicionais de segregação podem gerar avanços e redução de custos dos processos de reciclagem de polímeros, gerando materiais reciclados com maior qualidade. Estes fatores são essenciais para contribuir para o gerenciamento de resíduos sólidos e diminuir os danos ambientais causados por estes materiais.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Ampliar o estudo em suas diversas análises possíveis dos parâmetros variáveis envolvidos no processo, como tamanho de partículas, distância entre eletrodos, etc.
- Fazer avaliações quantitativas de cargas adquiridas pelos materiais durante o processo de separação, favorecendo séries triboelétricas mais precisas e enriquecendo os dados acerca dos materiais envolvidos no estudo.
- Elaborar dispositivos tribocarregadores com novos materiais.

REFERÊNCIAS

- ABIPLAST. **Perfil 2019**. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil2019/>. Acesso em: 15 jan. 2021.
- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 18 jan. 2021.
- AKSA, W. *et al.* Two Stage Electrostatic Separator for the Recycling of Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment. **Journal of Electrostatics**, v. 71, n. 4, p. 681–688, ago. 2013.
- AL-SALEM, S. M. Establishing an integrated databank for plastic manufacturers and converters in Kuwait. **Waste Management**, v. 29, n. 1, p. 479–484, 1 jan. 2009.
- AL-SALEM, S. M.; LETTIERI, P.; BAEYENS, J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. **Waste Management**, v. 29, n. 10, p. 2625–2643, 1 out. 2009.
- AZNAR, M. P. *et al.* 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, 1 maio 2006.
- BAN, H. *et al.* Dry triboelectrostatic beneficiation of fly ash. **Fuel**, v. 76, n. 8, p. 801–805, 1997.
- BANNACH, G. [UNESP *et al.* Efeitos da história térmica nas propriedades do polímero PET: um experimento para ensino de análise térmica. **Química Nova**, p. 1825–1829, 1 jan. 2011.
- BARROS, B. C. **Estudo do comportamento físico e morfológico da blenda poliamida 6.6 e acrilonitrila butadieno estireno**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1998.
- BARTOLOME, L. *et al.* Recent developments in the chemical recycling of PET. In: **Material Recycling - Trends and Perspectives**. [s.l: s.n.]
- BASAŘOVÁ, P. *et al.* The influence of flotation agent concentration on the wettability and flotability of polystyrene. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 286, n. 1, p. 333–338, 1 jun. 2005.
- BEIGBEDER, J. *et al.* Study of the physico-chemical properties of recycled polymers from waste electrical and electronic equipment (WEEE) sorted by high resolution near infrared devices. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 78, p. 105–114, 2013.
- BEN DIFALLAH, B. *et al.* Mechanical and tribological response of ABS polymer matrix filled with graphite powder. **Materials & Design**, v. 34, p. 782–787, fev. 2012.
- BENABBOUN, A. *et al.* Experimental investigation of electrostatic separators of plastic particles using different charging devices. **Separation Science and Technology**, v. 49, 17 jan. 2014.

BENDIMERAD, S. *et al.* Plastic wastes recovery using free-fall triboelectric separator. **International Journal of Environmental Studies**, v. 66, n. 5, p. 529–538, out. 2009.

BILICI, M. *et al.* Experimental modeling of the tribo-aero-electrostatic separation of mixed granular plastics. In: 2011 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Orlando, FL, USA. **Anais...** In: 2011 IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL MEETING. Orlando, FL, USA: IEEE, out. 2011a. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6074273/>. Acesso em: 26 ago. 2019.

BILICI, M. *et al.* Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 18, n. 5, p. 1476–1483, out. 2011b.

BIRON, M. Detailed accounts of thermoplastic resins. In: **Thermoplastics and Thermoplastic Composites**. [s.l.] Elsevier, 2018. p. 203–766.

BOUKHOULDA, M. F. *et al.* Triboelectrostatic separation of granular plastics mixtures from waste electric and electronic equipment. **Particulate Science and Technology**, v. 35, n. 5, p. 621–626, 3 set. 2017.

BRASIL. Decreto nº 11.445. Regulamenta a Lei no 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências. Decreto Nº 7.217, de 21 de Junho de 2010. 2010 a.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. 2 ago. 2010 b.

CARVALHO, M. T. *et al.* Optimization of froth flotation procedure for poly(ethylene terephthalate) recycling industry. **Polymer Engineering & Science**, v. 52, n. 1, p. 157–164, 1 jan. 2012.

CEMPRE. **Review 2019**. São Paulo, SP: Braspor, 2019.

COLTRO, L.; GASPARINO, B. F.; QUEIROZ, G. de C. Plastic materials recycling: the importance of the correct identification. **Polímeros**, v. 18, n. 2, p. 119–125, jun. 2008.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. de. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros**, v. 13, n. 1, p. 01–13, jan. 2003.

CRAWFORD, C. B.; QUINN, B. Microplastic separation techniques. In: **Microplastic Pollutants**. [s.l.] Elsevier, 2017. p. 203–218.

DASCALESCU, L.; ZEGHLOUL, T.; IUGA, A. Electrostatic separation of metals and plastics from waste electrical and electronic equipment. In: **WEEE Recycling**. [s.l.] Elsevier, 2016. p. 75–106.

DELVA, L. *et al.* On the role of flame retardants in mechanical recycling of solid plastic waste. **Waste Management**, v. 82, p. 198–206, 1 dez. 2018.

DEMAJOROVIC, J.; MIGLIANO, J. E. B. Política nacional de resíduos sólidos e suas implicações na cadeia da logística reversa de microcomputadores no Brasil. **Gestão & Regionalidade**, v. 29, n. 87, p. 64–80, 2013.

DIAS, S. L. F. G. **Catadores: uma perspectiva de sua inserção no campo da indústria de reciclagem**. 2009. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/90/90131/tde-25102010-231013/>. Acesso em: 16 jul. 2019.

DODBIBA, G. *et al.* Electrostatic separation of the shredded plastic mixtures using a tribo-cyclone. **Magn. Electr. Sep.**, v. 11, 1 fev. 2002.

DODBIBA, G. *et al.* Separation performance of PVC and PP plastic mixture using air table. **Physical Separation in Science and Engineering**, 2003. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/psse/2003/737121/abs/>. Acesso em: 24 ago. 2019.

DODBIBA, G. *et al.* The use of air tabling and triboelectric separation for separating a mixture of three plastics. **Minerals Engineering**, v. 18, n. 15, p. 1350–1360, 2005.

DRAGAN, C. *et al.* Tribocharging of mixed granular plastics in a fluidized-bed device. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 47, n. 4, p. 1922–1928, jul. 2011.

FELTRAN, M. B.; DIAZ, F. R. V. Compósitos de PVC reforçados com fibra de vidro: utilização de técnicas de processamento convencionais da indústria brasileira. **Polímeros**, v. 17, n. 4, p. 276–283, dez. 2007.

FREITAS, D. T. de. **Estudo da separação triboeletrostática de resíduos poliméricos pósconsumo e determinação do limite de contaminação entre PET e PEAD**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, 2018.

FREITAS, R. L. M. **Efeito da temperatura de resfriamento sobre as propriedades de polímeros amorfos e semicristalinos**. 2014. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais) - UFRJ, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2014.

GENT, M. *et al.* Recycling of plastic waste by density separation: Prospects for optimization. **Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA**, v. 27, p. 175–87, 2009.

GIUSTI, L. A review of waste management practices and their impact on human health. **Waste Management**, v. 29, n. 8, p. 2227–2239, ago. 2009.

GOTSIS, A. D.; ZEEVENHOVEN, B. L. F.; TSENOGLOU, C. Effect of long branches on the rheology of polypropylene. **Journal of Rheology**, v. 48, n. 4, p. 895, 24 jun. 2004.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, p. 1503–1510, jun. 2012.

GUO, J. *et al.* Research on flotation technique of separating PET from plastic packaging wastes. **Procedia Environmental Sciences**, Selected Proceedings of the Tenth International Conference on Waste Management and Technology. v. 31, p. 178–184, 1 jan. 2016.

HONG, M.; CHEN, E. Y.-X. Chemically recyclable polymers: a circular economy approach to sustainability. **Green Chemistry**, v. 19, n. 16, p. 3692–3706, 14 ago. 2017.

HOPEWELL JEFFERSON; DVORAK ROBERT; KOSIOR EDWARD. Plastics recycling: challenges and opportunities. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 364, n. 1526, p. 2115–2126, 27 jul. 2009.

INADA, K. *et al.* Identification of plastics by infrared absorption using InGaAsP laser diode. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 33, n. 2, p. 131–146, 1 set. 2001.

INCULET, I. I.; CASTLE, G. S. P.; BROWN, J. D. Electrostatic separation of plastics for recycling. **Particulate Science and Technology**, v. 16, n. 1, p. 91–100, jan. 1998.

ISOLDI, A. B. G. **Estudo do efeito da dose de rádioesterilização sobre as propriedades do poli(tereftalato) de etileno - PET reciclado**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

IUGA, A. *et al.* Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device. **Journal of Electrostatics**, v. 63, n. 6, p. 937–942, 2005.

IUGA, A. *et al.* Tribocharging techniques for the electrostatic separation of granular plastics from waste electric and electronic equipment. **Particulate Science and Technology**, v. 34, n. 1, p. 45–54, 2 jan. 2016.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos Avançados**, v. 25, n. 71, p. 135–158, abr. 2011.

KARIAN, H. **Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites, Revised and Expanded**. [s.l.] CRC Press, 2003.

KISSIN, Y. Chapter 1 The beginner's course: general description of transition metal catalysts and catalytic polymerization reactions. In: **Studies in Surface Science and Catalysis**. [s.l.] Elsevier, 2007. 173p. 1–34.

KÜHL, A. **Uma formulação viscoelastoplástica não linear aplicada ao polietileno de alta densidade (PEAD)**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2014. Disponível em: <http://200.19.105.133/handle/tede/1860>. Acesso em: 20 ago. 2018.

KWETKUS, B. A. Particle triboelectrification and its use in the electrostatic separation process. **Particulate Science and Technology**, v. 16, n. 1, p. 55–68, 1 jan. 1998.

LANDI, T. R. L.; SILVA, L. G. A. e. Estudo do efeito da radiação ionizante com feixe de elétrons sobre o terpolímero acrinolitrila butadieno estireno- ABS. **Revista Mackenzie de engenharia e computação**, n. 4, p. 107–117, 2003.

LEE, L.-H. Dual mechanism for metal-polymer contact electrification. **Journal of Electrostatics**, v. 32, n. 1, p. 1–29, 1994.

LI, J.; WU, G.; XU, Z. Tribo-charging properties of waste plastic granules in process of tribo-electrostatic separation. **Waste Management**, v. 35, p. 36–41, 1 jan. 2015.

LI, T. X. *et al.* Dry triboelectrostatic separation of mineral particles: a potential application in space exploration. **Journal of Electrostatics**, v. 47, n. 3, p. 133–142, 1999.

LI, X. *et al.* Impact of different sorting media on the waste plastics separation. **Applied Mechanics and Materials**, v. 692, p. 84–89, nov. 2014.

LIMA, A. F. **Síntese e caracterização de polipropilenos modificados com diolefinas**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro., Rio de Janeiro, 2015.

LUGÃO, A. B. **Estudos da síntese por irradiação, da estrutura e do mecanismo de formação de polipropileno com alta resistência do fundido**. 2004. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

LUNGU, M. Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect. **Minerals Engineering**, v. 17, n. 1, p. 69–75, 2004.

MARQUES, G. A.; TENÓRIO, J. A. S. Use of froth flotation to separate PVC/PET mixtures. **Waste Management**, v. 20, n. 4, p. 265–269, 1 jul. 2000.

MARTIN, L.; BRANDAU, O. Chapter 2 - PET Preforms. In: BRANDAU, O. (Ed.). **Bottles, Preforms and Closures**. Plastics Design Library. Oxford: William Andrew Publishing, 2012. p. 47–77.

MARTINS, G. S. *et al.* Caracterização mecânica e térmica de compósitos de poli (cloreto de vinila) reforçados com fibras de sisal. **Polímeros**, v. 14, n. 5, p. 326–333, dez. 2004.

MASOUMI, H.; SAFAVI, S. M.; KHANI, Z. A. Identification and classification of plastic resins using near infrared reflectance spectroscopy. **Mechanical and Mechatronics Engineering**, v. 6, n. 5, p. 877–884, 2012.

MATSUSHITA, Y.; MORI, N.; SOMETANI, T. Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades. **Electrical Engineering in Japan**, v. 127, n. 3, p. 33–40, 1999.

MILOUDI, M. *et al.* Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials. **Journal of Electrostatics**, v. 69, n. 6, p. 631–637, 2011.

MMA. **Reciclagem**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/destaques/item/7656-reciclagem>. Acesso em: 16 jun. 2019.

NÉMETH, E. *et al.* Polymer tribo-electric charging: dependence on thermodynamic surface properties and relative humidity. **Journal of Electrostatics**, v. 58, n. 1, p. 3–16, 1 maio 2003.

NISGOSKI, S. **Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de Pinus taeda L**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/2224>. Acesso em: 23 ago. 2019.

OLIVEIRA, C. F. de P. **Melhoria da resistência no estado fundido do polipropileno através da adição de nanoargilas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica

e de Materiais) - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-20082010-162643/>. Acesso em: 23 fev. 2021.

OLIVEIRA, F. G.; PARREIRA, G. F.; LIMA, F. de P. A. Desafio da produtividade no setor de triagem de materiais recicláveis. In: ENEGEP, Salvador, BA. **Anais... In: XXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. Salvador, BA: Abepro, 2009.

PARK, C. H. *et al.* Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger. **Journal of Electrostatics**, v. 66, n. 11, p. 578–583, 1 nov. 2008.

PARK, C.-H. *et al.* Triboelectrostatic separation of covering plastics in chopped waste electric wire. **Polymer Engineering & Science**, v. 47, n. 12, p. 1975–1982, 2007.

PEACOCK, A. **Handbook of polyethylene: structures: properties, and applications**. [s.l.] CRC press, 2000.

PEARSE, M. J.; HICKEY, T. J. The separation of mixed plastics using a dry, triboelectric technique. **Resource Recovery and Conservation**, v. 3, n. 2, p. 179–190, 1978.

RAGAERT, K.; DELVA, L.; VAN GEEM, K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. **Waste Management**, v. 69, p. 24–58, nov. 2017.

RODOLFO JR, A.; NUNES, L. R.; ORMANJI, W. Tecnologia do PVC. **Proeditores/Braskem, São Paulo**, v. 2, p. 447, 2006.

RODRIGUES, B. M.; SARON, C. Electrostatic separation of polymer waste by tribocharging system based on friction with PVC. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 4 mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03229-x>. Acesso em: 5 abr. 2021.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M.-A. D. Poli(tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros**, v. 19, n. 2, p. 121–132, jun. 2009.

RUJ, B. *et al.* Sorting of plastic waste for effective recycling. **Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research**, v. 4, n. 4, p. 564–571, 2015.

SANTOS, R. P. de O. **Compósitos baseados em PET reciclado, fibras de sisal e plasticizantes oriundos de fontes renováveis: estudo do processamento e propriedades destes materiais**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-26072012-163329/>. Acesso em: 17 ago. 2018.

SCHROEDER, H.; CELLA, R. J. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering: Polyesters, Elastomeric**. [s.l.] John Wiley & Sons, 1988.

SILVA, C. M. D. *et al.* Conductivity and thermal behaviour of sulfonated ABS membranes for fuel cell application. **ECS Trans**, v. 25, n. 1, p. 881–889, 2009.

SILVEIRA, A. V. M. **Aplicação da separação eletrostática na reciclagem de resíduos poliméricos e baterias de íon lítio**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2016.

SILVEIRA, A. V. M. *et al.* Application of tribo-electrostatic separation in the recycling of plastic wastes. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 114, p. 219–228, fev. 2018.

SNYDER, C. H. **The extraordinary chemistry of ordinary things**. 2. ed. New York: John Wiley, 1995.

SOUZA, R. L. R. de; FONTES, A. R. M.; SALOMÃO, S. A triagem de materiais recicláveis e as variabilidades inerentes ao processo: estudo de caso em uma cooperativa. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19, n. 10, p. 4185–4195, out. 2014.

SPINACÉ, M. A. da S.; DE PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 65–72, fev. 2005.

STAHL, I.; BEIER, P.-M. Sorting of plastics using the electrostatic separation process. **Erzmetall**, v. 49, p. 46–49, 1996.

TILMATINE, A. *et al.* Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures. **Waste Management**, v. 29, n. 1, p. 228–232, 1 jan. 2009.

TILMATINE, A. *et al.* Roll-type versus free-fall electrostatic separation of tribocharged plastic particles. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 46, p. 1564–1569, 1 set. 2010.

TITOW, M. V. **PVC Technology**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 1984.

VASANDANI, P. *et al.* Relationship between triboelectric charge and contact force for two triboelectric layers. **Journal of Electrostatics**, v. 90, p. 147–152, dez. 2017.

VILAPLANA, F.; KARLSSON, S. Quality concepts for the improved use of recycled polymeric materials: A Review. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 293, n. 4, p. 274–297, 2008.

WEY, M.-Y.; YU, L.-J.; JOU, S.-I. The influence of heavy metals on the formation of organics and HCl during incinerating of PVC-containing waste. **Journal of Hazardous Materials**, v. 60, n. 3, p. 259–270, 1 jul. 1998.

WILLIAMS, M. W. Triboelectric charging of insulating polymers—some new perspectives. **AIP Advances**, v. 2, n. 1, p. 010701, 8 fev. 2012.

WU, G.; LI, J.; XU, Z. Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review. **Waste Management**, Special Thematic Issue: Urban Mining. v. 33, n. 3, p. 585–597, 1 mar. 2013.

ZHANG, X. M. *et al.* Oriented structure and anisotropy properties of polymer blown films: HDPE, LLDPE and LDPE. **Polymer**, v. 45, n. 1, p. 217–229, 1 jan. 2004.