

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

GABRIEL GONTIJO RABELO SANTIAGO

**MAPEAMENTO COMPARATIVO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE POLIETILENO DE
ALTA DENSIDADE RECICLADO NO UNIVERSO ACADÊMICO E INDUSTRIAL**

BELO HORIZONTE

2021

GABRIEL GONTIJO RABELO SANTIAGO

MAPEAMENTO COMPARATIVO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE POLIETILENO DE
ALTA DENSIDADE RECICLADO NO UNIVERSO ACADÊMICO E INDUSTRIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
no Curso de Graduação em Engenharia de
Materiais do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
parcial para obtenção de título de Bacharel em
Engenharia de Materiais

Orientador: Breno Rocha Barrioni

Co-orientador: Aline Bruna da Silva

Coordenador: Carlos Eduardo dos Santos

BELO HORIZONTE

2021

GABRIEL GONTIJO RABELO SANTIAGO

MAPEAMENTO COMPARATIVO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE POLIETILENO DE
ALTA DENSIDADE RECICLADO NO UNIVERSO ACADÊMICO E INDUSTRIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
no Curso de Graduação em Engenharia de
Materiais do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
parcial para obtenção de título de Bacharel em
Engenharia de Materiais

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Breno Rocha Barrioni (orientador)

Prof. Dra. Aline Bruna da Silva (co-orientadora)

Prof. Dr. João Paulo Ferreira Santos

AGRADECIMENTOS

A minha família e todo apoio, dedicação e paciência durante esses cinco anos, sem eles esse momento não seria possível.

Aos meus amigos e colegas, que me acompanharam, ensinaram e incentivaram nessa jornada.

Ao meu professor orientador, Breno, que foi sempre solícito e disponível para me ajudar e discutir sobre esse trabalho.

Aos meus professores e ao CEFET-MG, que me possibilitaram conhecimento e sabedoria necessários para chegar ao fim dessa jornada.

RESUMO

Na atualidade, o Brasil se encontra como um dos maiores produtores de matéria plástica no mundo, sendo responsável direto pelo acúmulo de milhões de toneladas de rejeitos poliméricos no meio ambiente, que aliado a uma má gestão dos resíduos gera uma baixa taxa de reciclagem e elevado descarte em ambientes inadequados, ampliando índices de poluição dos solos, águas e atmosfera. Dentro desse cenário, o polietileno de alta densidade (PEAD) se apresenta como um dos polímeros termoplásticos mais presentes nos resíduos sólidos descartados diariamente na superfície terrestre. Apesar de existirem uma gama de processos de reciclagem de polímeros termoplásticos, estes ainda são pouco difundidos no Brasil, o que limita o maior reaproveitamento desses materiais, de modo a transformá-los em novos produtos. Diante disso, este trabalho baseou-se na metodologia de estudo de caso para, após revisão da literatura e realização de questionário com empresas de reciclagem de PEAD, compreender os processos de reciclagem e a aplicação destes nos resíduos de PEAD, a fim de explorar os universos acadêmico e industrial e compreender as atividades e projetos de reciclagem que são exercidos em ambas vertentes. Ao fim do trabalho, foram conhecidos os principais processos de reciclagem utilizados, sendo a reciclagem mecânica o mais usual para ambos os universos, a procedência dos resíduos coletados, preferencialmente de resíduos pós-consumo no universo acadêmico e resíduos industriais no universo industrial, os principais processos de caracterização e ensaios realizados, como diversos ensaios empíricos e testes mais simplificados no ambiente empresarial e ensaios de caracterização mecânica, morfológica e superficial dentro do âmbito acadêmico, variando de ensaios de tração a ensaios de micrografia e porosidade. Por fim, os produtos finais obtidos em cada um dos universos estudados foram expostos, sendo principalmente compósitos de matriz de PEAD no ambiente acadêmico e pellets reciclados no mundo industrial. Dessa forma, se tornou possível realizar uma análise comparativa entre os dois cenários a fim de interpretar as semelhanças e divergências presentes, e inferir hipóteses que justifiquem as abordagens exploradas e possibilidades a serem trabalhadas, como uma imersão do universo acadêmico no industrial, ou ainda a inviabilidade financeira de realizar um processo mais complexo de reciclagem pelas empresas.

Palavras-chave: Reciclagem. PEAD. Gestão de resíduos. Reaproveitamento

ABSTRACT

Nowadays, Brazil is one of the largest plastic materials producers in the world, being directly responsible for millions of tons of polymeric residue accumulation on the environment, which allied to a bad waste management turns into low recycling tax and high improper disposal, increasing ground, water and atmosphere pollution. In this scenario, high density polyethylene (HDPE) is one of the most common solid waste thermoplastic polymers disposed daily on the earth's surface. Despite the existence of several thermoplastic polymers recycling processes, these processes are still poorly disseminated in Brazil, restricting higher reuse of these materials, in order to transform them into new products. In view of that, this work, after a literature review and survey execution with HDPE recycling industries, based on a case study methodology to understand the recycling process and its application on HDPE wastes, in order to explore the academic and industrial universe and comprehend the recycling activities and projects that are carried out in both aspects. At the end of this work, the main recycling processes applied, being the mechanical recycling the main process in both universes, the capture waste origins, mainly post consumption waste on academics and industrial residue on industries, the main characterization processes applied were known, as several empiric experiments on industrial environment and mechanical, morphological and superficial characterizations, from tensile strength tests to micrography and porosity essays. Then, the final products achieved in each of the studied universes were exposed, the HDPE-based composites in the academic environment and recycled pellets in the industrial world. Then, a comparative analysis of the similarities and differences between both scenarios became possible, providing the inference of hypotheses that justify the exploited approaches.

Key-words: Recycling. HDPE. Waste management. Reuse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura dos principais polímeros termoplásticos	16
Figura 2 – O Mapa do Lixo no Mundo.....	17
Figura 3 – Produção global, uso e destino de resinas, fibras e aditivos poliméricos (1950 à 2015 em kilotoneladas).....	18
Figura 4 – Produção e destinação acumulada de resíduos plásticos no mundo	19
Figura 5 – Estatísticas da geração de resíduos em África (AFR), sul asiático (SAR), meio leste e norte africano (MENA), leste e centro asiático (ECA), America Latina e Caribe (LAC), leste asiático e países do pacífico (EAP) e Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico	20
Figura 6 – Ciclo de vida dos materiais poliméricos	21
Figura 7 – Modelo de economia circular em comparação ao modelo de economia linear	22
Figura 8 - Símbolos de identificação dos materiais plásticos segundo a norma ABNT NBR 13230	24
Figura 9 – Total de resíduos de plástico no planeta gerados ao final de 2018 (esquerda), e percentuais referentes ao gerenciamento de resíduos plásticos no mundo (direita).....	25
Figura 10 – Representações esquemáticas da estrutura do PEAD	26
Figura 11 – Etapas da realização do estudo de caso.....	33
Figura 12 – Condução do estudo de caso	34
Figura 13 – Representação esquemática do fluxo de trabalho realizado neste estudo de caso	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do PEAD	28
Tabela 2 - Numero de publicações em cada ferramenta pesquisada	41
Tabela 3 – Quantidade de caracterizações realizadas em cada publicação	48
Tabela 4 – Empresas selecionadas para desenvolvimento do estudo de caso e seus respectivos dados coletados.....	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Percentual de publicações referentes aos diferentes processos de reciclagem encontrados no universo acadêmico	44
Gráfico 2 – Tipos de resíduos utilizados nas publicações do universo acadêmico	45
Gráfico 3 – Procedência dos materiais coletados em cada uma das publicações do universo acadêmico	46
Gráfico 4 – Percentual de caracterizações realizadas nas publicações do universo acadêmico	49
Gráfico 5 – Caracterizações mecânicas presentes nas publicações do universo acadêmico	50
Gráfico 6 – Caracterizações morfológicas presentes nas publicações do universo acadêmico	51
Gráfico 7 – Caracterizações superficiais presentes nas publicações do universo acadêmico ..	52
Gráfico 8 – Produtos finais alcançados ao fim dos artigos do universo acadêmico.....	53
Gráfico 9 – Tipos de resíduos utilizados nas publicações do universo industrial	55
Gráfico 10 – Ensaio realizados pelas empresas do universo acadêmico	56
Gráfico 11 – Destinação dos produtos finais obtidos pelas empresas do universo industrial..	57

SUMÁRIO

Conteúdo

1.	INTRODUÇÃO.....	11
2.	OBJETIVOS.....	13
2.1	Objetivos Gerais	13
2.2	Objetivos Específicos	13
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1.	O panorama da reciclagem de materiais poliméricos	16
3.2.	Processos de reciclagem de materiais poliméricos	20
3.3.	Polietilenos.....	26
3.3.1.	Polietileno de Alta Densidade	27
3.3.1.1.	Características e Propriedades do Polietileno de Alta Densidade	27
3.3.1.2.	Processamento do Polietileno de Alta Densidade.....	29
3.3.1.3.	Reciclagem de Polietileno de Alta Densidade.....	30
3.4.	Estudo de Caso.....	32
3.4.1.	Definição e Conceitos.....	32
3.4.2.	Metodologia.....	33
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1.	Planejamento.....	37
4.2.	Design	37
4.3.	Coleta.....	38
4.3.1.	Universo acadêmico	38
4.3.2.	Universo industrial	39
4.4.	Análise	40
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1	Coleta.....	41
5.1.1	Universo acadêmico	41
5.1.2	Universo industrial	41
5.2	Análise	42
5.2.1	Universo acadêmico	42

5.2.2	Universo industrial	54
5.2.3	Análise comparativa	58
6.	CONCLUSÕES	60
7.	REFERÊNCIAS	62

1. INTRODUÇÃO

Os polímeros surgiram como uma solução prática e simples para diversos problemas advindos do crescimento populacional e da crescente demanda por bens de consumo que se adequassem aos novos padrões de vida, sendo um produto de fácil produção, manutenção e descarte, com diversas utilidades e uma gama de utilizações atreladas ao cotidiano da população (HAMAD; KASEEM; DERI, 2013).

Tais produtos passaram a ser produzidos em larga escala, principalmente para utilização nos setores de embalagens, por meio do processamento de polímeros termoplásticos. Apesar disso, os materiais plásticos se tornaram, em sua maioria, produtos de ciclo de vida curto e de rápido descarte, muitas vezes sendo utilizados apenas em uma aplicação e descartados logo em seguida. Isso, aliado ao elevado tempo de degradação desses materiais, causou um aumento significativo no percentual de plásticos nos resíduos sólidos municipais, crescendo de 1% para mais de 10% em volume do período de 1960 a 2005 (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Dentre os países com a maior representatividade na geração de resíduos plásticos no mundo, o Brasil situa-se na quarta colocação, atrás apenas de Estados Unidos, China e Índia, tendo produzido um montante total superior a 11 milhões de toneladas até 2015, o equivalente a um quilograma de lixo plástico por habitante a cada semana, sendo que desse total, menos de 2% são efetivamente reciclados no país, abaixo da média mundial, que recicla cerca de 9% de todo rejeito polimérico produzido e consumido. Tamanha quantidade de resíduos impacta diretamente fatores primordiais para a vida na Terra, como a qualidade de solos, ar e água (WWF, 2018). Na linha desses produtos, sua maioria é representada por materiais utilizados para produzir embalagens, sendo os principais os polietilenos, que representam 36% de todo o plástico produzido e consumido no mundo (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Tendo em vista o cenário, métodos de reciclagem de polímeros devem ser mais amplamente difundidos e utilizados no cotidiano. Para tal, os processos de reciclagem podem ser divididos entre quatro tipos: reciclagem primária, secundária, terciária e quaternária. Os dois primeiros tipos de processos são mais utilizados e recomendados no caso dos plásticos de descarte rápido, devido a realizar um reprocessamento nos resíduos termoplásticos, garantindo um reaproveitamento da matéria sem perda significativa de suas características e propriedades, e por um custo relativamente baixo (SINGH et al., 2017).

Considerando os processos de reciclagem possíveis e a necessidade socioambiental de ampliar a reciclagem no mundo, e no Brasil, principalmente, se faz necessário entender como os plásticos reciclados podem ser incorporados na economia e quais os produtos finais podem ser obtidos a partir do seu processamento. O conhecimento mais aprofundado sobre o tema possibilita maior compreensão de como esses métodos estão sendo empregados e formas de estimular a indústria de reciclagem, impactando positivamente, tanto considerando o cenário econômico, quanto o cenário socioambiental.

Com o intuito de estudar o tema mais a fundo e traçar um planejamento para a realização do seguinte trabalho, foi realizado um estudo de caso embasado nas metodologias apresentadas nas obras de Chizotti (2003), André (2014), Yin (2005) e Augusto (2007), aliadas a uma pesquisa aprofundada acerca do tema proposto. A metodologia seguiu um processo que consiste em cinco etapas específicas para estruturação do trabalho: planejamento, design, coleta, análise e compartilhamento.

A fim de garantir melhor determinação dos objetivos e resultados e considerando o cenário dos resíduos de polímeros, foi determinada uma pesquisa focada exclusivamente na reciclagem do polietileno de alta densidade, correlacionando o universo acadêmico de pesquisa e o universo industrial e as aplicações do polímero reciclado.

Para explorar os dois universos estudados, a partir da metodologia pré-definida de estudo de caso, foi construído um questionário aplicável tanto ao universo acadêmico, quanto ao industrial, a fim de compará-los e entender como a reciclagem de PEAD é estudada e trabalhada em cada um dos cenários.

Por fim, após a aquisição, tratamento e análise dos dados, os resultados obtidos foram apresentados, corroborando com os objetivos definidos para o seguinte trabalho, apresentando a metodologia por trás da reciclagem de PEAD e os produtos finais obtidos, além de contribuir para o cenário de sua reciclagem no Brasil e novas possibilidades que podem ser estudadas para sua expansão e aplicação.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Explorar e analisar o panorama da reciclagem de materiais poliméricos no ambiente acadêmico e industrial por meio de um mapeamento, com ênfase na reciclagem do polietileno de alta densidade (PEAD) e na avaliação dos insumos finais gerados a partir desse processo.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar trabalhos acadêmicos, explorando o universo da reciclagem de polímeros no Brasil e no mundo
- Desenvolver uma pesquisa de campo por meio de contato e entrevista com empresas que executam a reciclagem de PEAD no Brasil
- Realizar um comparativo entre o direcionamento seguido pelas pesquisas acadêmicas e o universo industrial

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Polímeros

Os polímeros são uma classe de materiais cuja estrutura química é constituída por unidades que se repetem milhares de vezes, denominadas meros, se unindo a partir de ligações covalentes para a formação de uma macromolécula. Para se produzir um polímero, utiliza-se unidades estruturais menores, denominadas monômeros, que geram a macromolécula a partir de reações de polimerização. Essa classe de materiais pode ser dividida em três tipos básicos: polímeros naturais, semi-sintéticos e sintéticos. Os primeiros estão presentes desde o início da vida no planeta, em estruturas químicas como DNA, proteínas e enzimas, além de constituir a estrutura básica da celulose. No contexto de materiais, esses polímeros começaram a ser utilizados há milênios para a produção de roupas, ferramentas, equipamentos, entre outros. O primeiro contato com resinas poliméricas naturais se deu na antiguidade com civilizações antigas utilizando graxas e resinas como selantes e vedantes, a partir do extrato de plantas e árvores. Com a evolução da ciência e tecnologia, os polímeros passaram a ser produzidos a partir de matérias-primas naturais, e aprimorados com elementos sintéticos, sendo assim denominados polímeros semi-sintéticos. Um exemplo é polímero obtido a partir da vulcanização da borracha natural. A classe dos polímeros sintéticos teve o início do seu desenvolvimento a partir da descoberta da baquelite, obtido a partir de uma reação de polimerização entre o fenol e o formaldeído. A baquelite começou a ser amplamente produzido durante o século XX, onde diversos outros novos polímeros também foram desenvolvidos, principalmente pelo uso de matérias primas obtidas a partir do craqueamento do petróleo, em que são obtidas moléculas insaturadas derivadas das frações gasosas geradas que possuem capacidade de geração de materiais poliméricos. Tendo-se em vista o grande número de materiais poliméricos com diferentes propriedades que foram desenvolvidos desde então, uma nova designação aos polímeros sintéticos surgiu, dividindo-o em quatro classes específicas, dependendo de características estruturais e de suas propriedades físicas e químicas. São elas: termoplásticos, termorrígidos e elastômeros (CANEVAROLO, 2010, p. 17 - 33; EBDON, 1992, p. 3, 4).

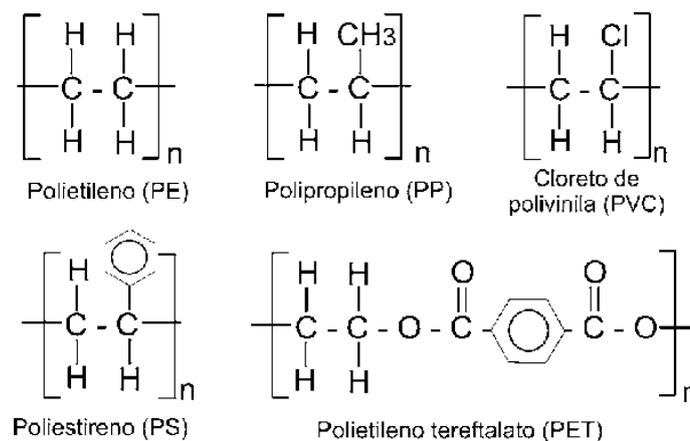
Polímeros termoplásticos podem ser definidos como uma macromolécula de cadeia carbônica que em condições específicas de temperatura e pressão apresentam condições

relativas a estas, ou seja, ao ser aquecido até uma dada temperatura ou pressurizados até uma dada pressão, as cadeias carbônicas amolecem, tornando esse material moldável, e enrijecem quando resfriado, devido a um emaranhamento das cadeias poliméricas, sendo assim essa classe é considerada reciclável. Tal processo é reversível em função da existência de interações secundárias entre as cadeias poliméricas, que podem ser rompidas e reestabelecidas, se tornando irreversível apenas quando as condições máximas de temperatura e pressão suportadas pelo material são extrapoladas, levando assim à degradação térmica de suas cadeias. Já os polímeros termorrígidos, ou termofixos, são materiais que, no momento de seu processamento, passam por um processo de reticulação, no qual suas cadeias reagem quimicamente formando ligações entre elas, obtendo-se assim uma rede composta por uma vasta quantidade de ligações cruzadas, gerando uma estrutura mais rígida. Devido à presença dessas ligações cruzadas, esses produtos apresentam melhores propriedades mecânicas e térmicas. Além disso, essa classe de polímeros não sofre modificações estruturais mediante aquecimento como ocorre com os termoplásticos, sendo assim, esses materiais são infusíveis e podem ser utilizados pós-consumo apenas como unidades de reforço em compósitos quando triturados ou moídos. Os elastômeros podem ser definidos como polímeros com elevada resistência elástica, sendo assim classificados os materiais com deformação superior ou igual a 200% do seu comprimento inicial, além de apresentarem recuperação elástica após estiramento. São produzidos a partir de um processo de reticulação específico, denominado vulcanização, cujo qual produz um polímero com baixa densidade de ligações cruzadas e elevada flexibilidade das cadeias. Em função da presença das ligações cruzadas, essa classe de polímeros possui melhores propriedades mecânicas que os termoplásticos, mas pela menor densidade de reticulações, suas resistências mecânicas são inferiores às dos termofixos (CANEVAROLO, 2010, p. 53, 54; CALLISTER, p. 368, 393, 399).

As espécies de polímeros mais consumidas no mundo atualmente são denominadas *commodities*, produzidos em larga escala e com diversificada aplicação, além de um preço acessível ao mercado. Apesar da vasta quantidade de materiais poliméricos existentes no mercado, existem cinco termoplásticos que são consumidos em maior quantidade pela indústria: são eles os polietilenos (PE), os polipropilenos (PP), os policloreto de vinila (PVC) e os poliésteres (PET) e os poliestirenos (PS), que possuem as estruturas apresentadas na Figura 1. Esses polímeros apresentam vasta aplicação nas situações do cotidiano da sociedade, sendo encontrados em diferentes produtos como sacolas plásticas, garrafas,

embalagens, filmes, tubulações e encanamentos, carcaças de eletrodomésticos e eletroeletrônicos, entre outros (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005). Devido ao alto consumo desses polímeros, eles também são amplamente encontrados nos resíduos sólidos das cidades, necessitando de estratégias para a sua correta destinação e reciclagem.

Figura 1 – Estrutura dos principais polímeros termoplásticos



Fonte: (AZEREDO et al., 2012)

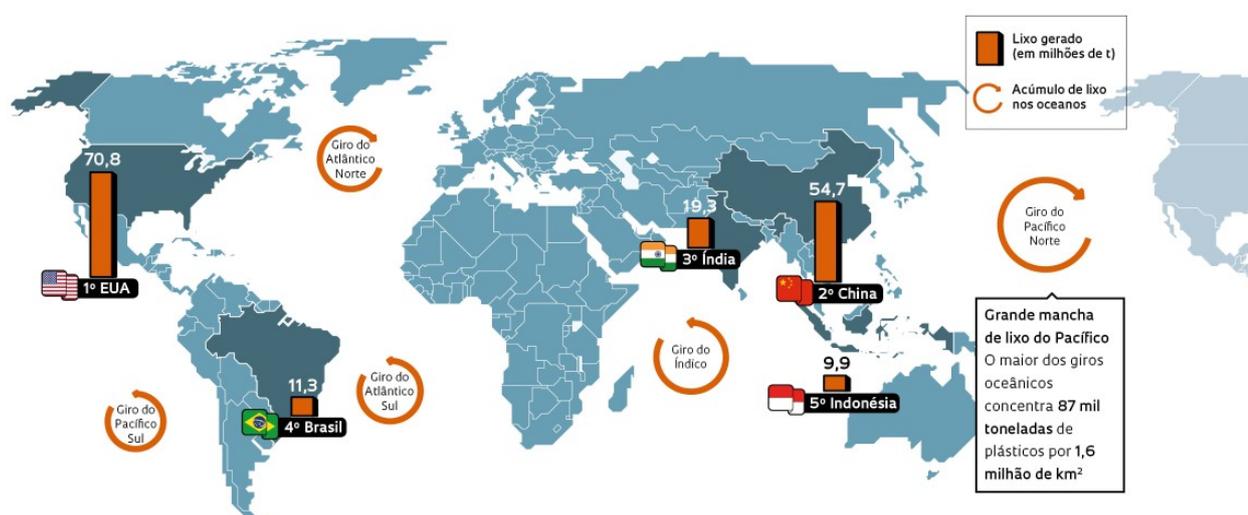
3.2. O panorama da reciclagem de materiais poliméricos

O aumento significativo na população mundial aliada à necessidade de mudanças nos padrões de vida e bens de consumo levou os polímeros a serem a solução mais simples e prática para produção de objetos de uso cotidiano, com possibilidade de descarte prático e rápido, se tornando um bem primordial para os seres humanos. Sendo assim, esses materiais começaram a substituir outros em diversas aplicações, culminando em um excesso de plástico residual, tornando necessário o interesse e estudo na reciclagem e reutilização desses insumos (HAMAD; KASEEM; DERI, 2013).

Segundo dados da World Wide Fund for Nature Brasil (WWF-Brasil) (2019), a produção anual de plásticos no Brasil remete a um total de 11,3 milhões de toneladas, tornando o país o quarto que mais gera lixo plástico no mundo, precedido dos Estados Unidos, China e Índia. Os quatro países juntos são responsáveis por cerca de 160 milhões de toneladas de produzidas no planeta, conforme panorama apresentado na Figura 2. Apesar do

alto volume de material polimérico produzido no país, apenas 145 mil toneladas são efetivamente recicladas, mesmo com uma coleta de lixo plástico alcançando valores superiores a 90%. Além disso, em todo o planeta, estima-se que 10 milhões de toneladas de materiais poliméricos são despejadas anualmente nos oceanos. A poluição causada por esses resíduos sem reaproveitamento ou destinação correta afeta diretamente a qualidade do ar por meio da contaminação proveniente da queima ou incineração, além de contaminar os solos e de sistemas de fornecimento de água pela liberação de microplásticos e nanoplásticos.

Figura 2 – O Mapa do Lixo no Mundo

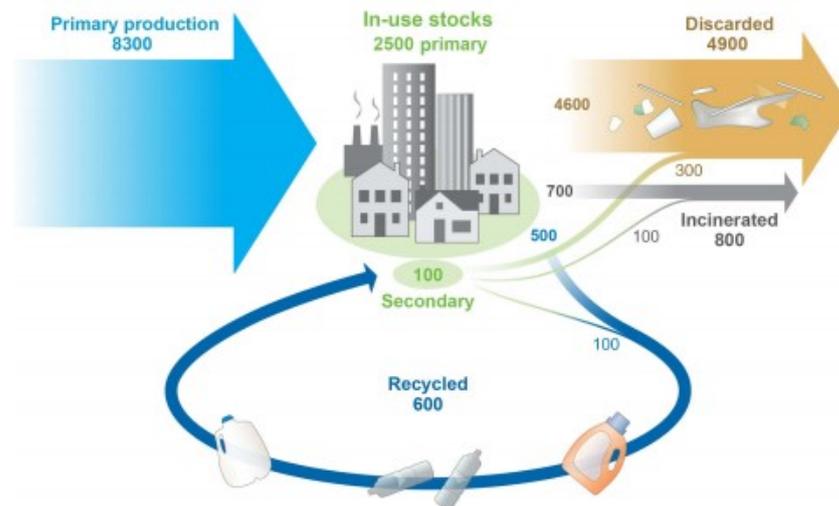


Fonte: (WWF-Brasil, 2019)

No período do início da produção de plásticos, na década de 1950, até o ano de 2015, foram produzidos mais de oito bilhões de toneladas de plástico (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017), sendo que desses, mais de 100 milhões de toneladas estão depositadas nos oceanos do planeta (ERIKSEN et al., 2014). Com base em dados da revista *The New Plastics Economy*, a produção de insumos plásticos aumentou em mais de 290 milhões de toneladas anuais em um período de 50 anos, o que representa um crescimento de mais de 2000% na fabricação desses materiais. Em tal âmbito, vale destacar a produção e consumo de embalagens plásticas, que representa mais de $\frac{1}{4}$ da fabricação de plásticos no planeta e possuem um percentual de reciclagem e reaproveitamento extremamente baixo em comparação a outros materiais como metais e papel.

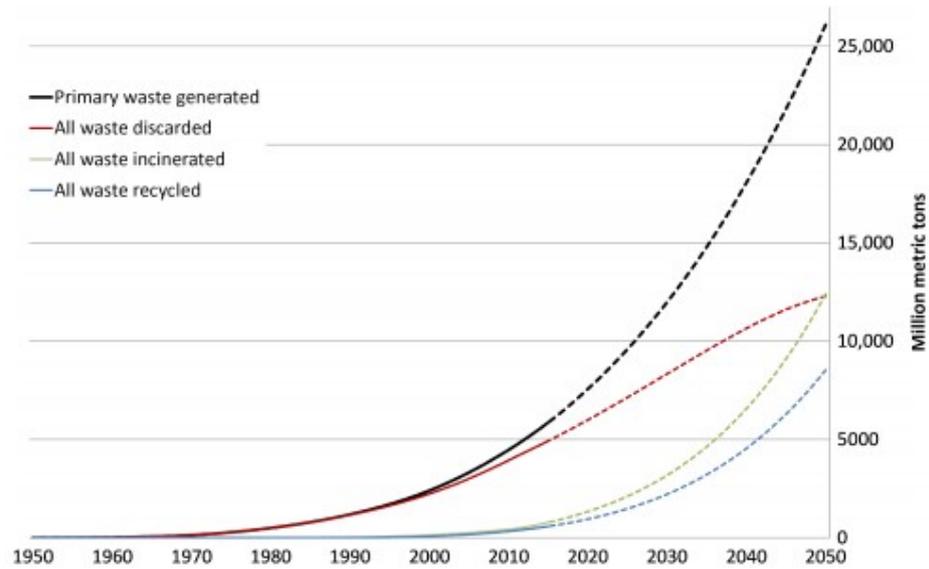
Considerando esse cenário e as vias de destinação do resíduo polimérico já utilizado, existe um desequilíbrio nítido entre o descarte, incineração e reciclagem, em que aproximadamente 55% de todo plástico produzido é despojado sem nenhum tratamento de reaproveitamento ou pirólise, deixando um total de 4,6 bilhões de toneladas de resíduos plásticos depositados na superfície terrestre, enquanto apenas uma parcela de 600 milhões de toneladas passam efetivamente pelo processo de reciclagem e retornam ao ciclo de utilização, conforme apresentado na Figura 3. Tendo em vista o cenário atual desafiador e os percentuais de reciclagem e reaproveitamento, estima-se que até meados do século XXI a produção de polímeros superará a marca de 26 bilhões de toneladas e apenas 9 bilhões terão sido reciclados, enquanto ainda teremos um total de 12 bilhões de rejeitos poliméricos descartados de forma incorreta no meio ambiente. Tais impactos são apresentados na Figura 4 (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Figura 3 – Produção global, uso e destino de resinas, fibras e aditivos poliméricos (1950 a 2015 em quilotoneladas)



Fonte: (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)

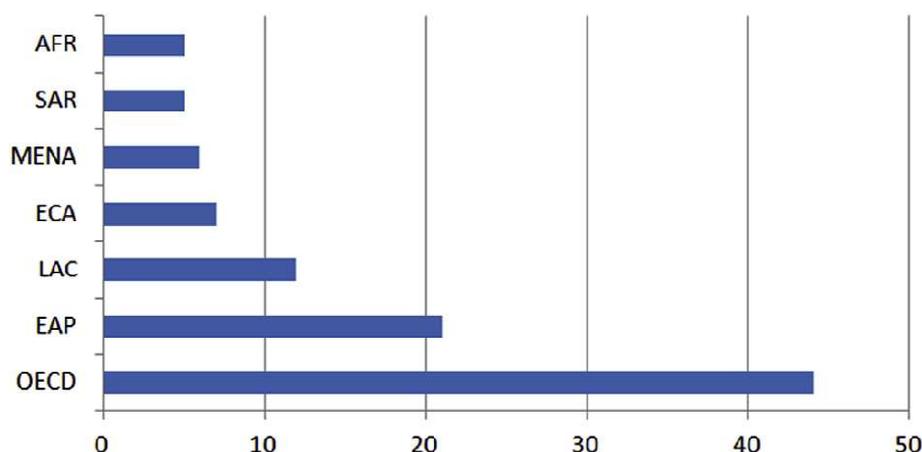
Figura 4 – Produção e destinação acumulada de resíduos plásticos no mundo



Fonte: (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)

A Figura 5 apresenta um panorama da geração de polímeros por região no planeta. Regiões como o leste asiático e países do pacífico (EAP) são os que mais geram resíduos plásticos no mundo, com uma diferença significativa para as demais regiões, sendo que a região na qual o Brasil se encontra (LAC) é a segunda com maior impacto no mercado de polímeros. Vale também ressaltar que a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) engloba 34 países situados em todas as regiões e foi fundada com o intuito de estimular o progresso econômico e as trocas comerciais (SINGH et al., 2017)

Figura 5 – Estatísticas da geração de resíduos em África (AFR), sul asiático (SAR), meio leste e norte africano (MENA), leste e centro asiático (ECA), América Latina e Caribe (LAC), leste asiático e países do pacífico (EAP) e Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico



Fonte: (SINGH et al., 2017)

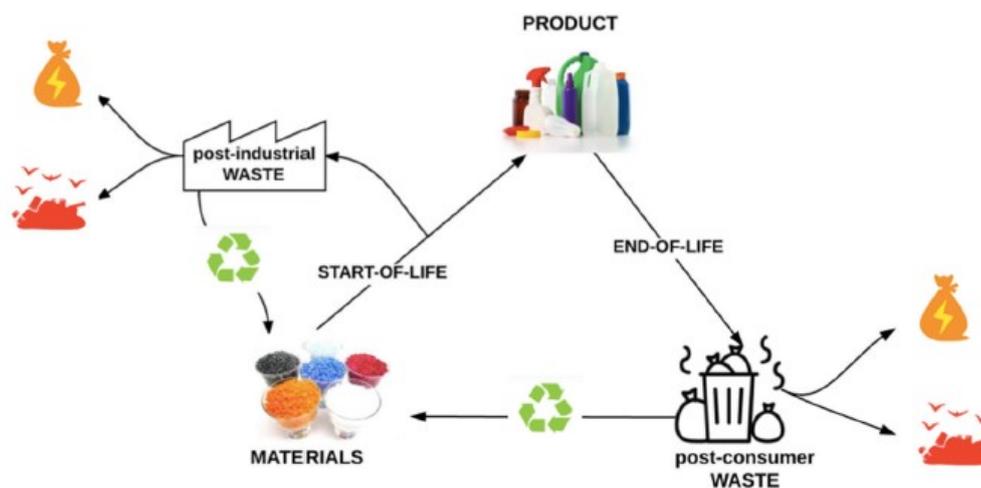
3.3. Processos de reciclagem de materiais poliméricos

Os materiais poliméricos possuem características mecânicas, químicas, térmicas e elétricas que favorecem sua utilização em substituição a alguns materiais metálicos e cerâmicos (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005). Diante dessas características de produção e consumo acelerado, diversos estudos foram realizados a fim de encontrar uma destinação correta para os polímeros e uma forma de reaproveitá-los em novas aplicações, garantindo ganhos econômicos, ambientais e sociais. As principais maneiras de tratamento dos resíduos plásticos são por meio da queima direta, aterramento e reciclagem, sendo que os dois primeiros processos são inviáveis devido aos altos custos e liberação de altas taxas de gases poluentes. Além disso, os polímeros são materiais não biodegradáveis, ou seja, demandam de um elevado tempo para sua decomposição. Sendo assim, a reciclagem, atualmente é o meio mais viável, tanto economicamente quanto ambientalmente, para proporcionar um descarte correto aos polímeros (ALI et al., 2002).

A Figura 6 representa o ciclo de vida útil dos materiais poliméricos virgens ou reciclados. A cadeia produtiva dos polímeros segue um processo cíclico no qual a matéria prima, em forma de pellets ou pó, é processada e moldada a fim de dar formato ao produto

final. Ao fim do processamento, o material pode apresentar defeitos como rebarba, falta de penetração ou galhos. Esses produtos defeituosos podem ser reaproveitados como resíduo pós-industrial, retornando ao processo produtivo, normalmente misturados a uma porcentagem de material virgem a fim de manter suas propriedades, ou então são descartados em aterros. As peças não defeituosas são comercializadas e, após o fim da vida comercial, são descartadas como polímero pós-consumo. Nesse momento, o material pode encontrar diversas vias, dependendo, principalmente, do tratamento recebido após o descarte. Em casos onde há separação e controle dos resíduos gerados, ocorre um processo de coleta seletiva e o produto retorna a cadeia como matéria-prima. Em caso negativo, a solução mais viável economicamente é a incineração controlada dos rejeitos, garantindo que parte da energia gasta no momento da síntese seja recuperada. A outra via é o descarte em aterros, opção mais agressiva ao meio ambiente e que, preferencialmente, deve ao máximo ser evitada (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017).

Figura 6 – Ciclo de vida dos materiais poliméricos

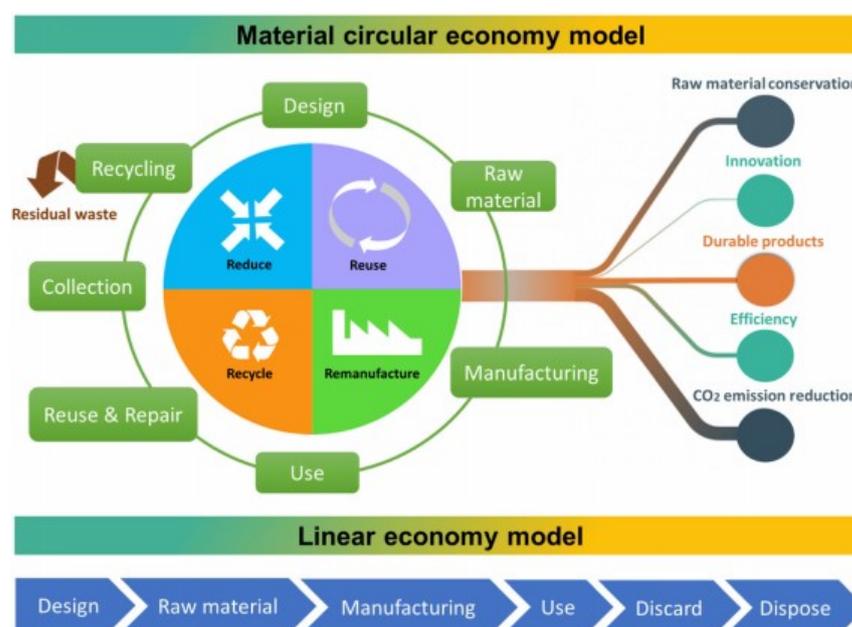


Fonte: (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017)

Uma das possíveis alternativas para reduzir impactos gerados pela alta produção e consumo de polímeros está no modelo de estudo denominado economia circular, que consiste na recuperação e aproveitamento da matéria, mantendo-se as características e propriedades dentro de um limite aceitável e o material com um valor de mercado ativo, minimizando o volume de resíduos gerados. Esse modelo de gestão e reaproveitamento de resíduos é amplamente apoiado em função de manter uma rotatividade rápida e lucrativa para o

mercado, além de apresentar uma conotação sustentável e ambientalmente correta (SHANMUGAM et al., 2020). Atualmente, os polímeros de uso cotidiano, como os utilizados em embalagens, sacolas, garrafas e filmes são, materiais que possuem a vida útil minimizada, sendo muitas vezes utilizados em uma única ocasião e logo em seguida descartados. Dados mostram que cerca de 40% de todo o plástico consumido e descartado no mundo são provenientes de embalagens e materiais de descarte rápido (JUAN et al., 2020). Conforme apresentado na Figura 7, a utilização do modelo de economia circular pode ser utilizada para o reaproveitamento de resíduos, consistindo em uma série de etapas a partir da manufatura que garantem reuso e reparo, reciclagem, redução, design e remanufatura, produzindo assim um novo material, com uma taxa menor de CO₂ sendo emitida na atmosfera em sua produção devido ao reprocessamento do material, e obtendo-se produtos duráveis e com características e propriedades que garantem a qualidade do produto final. Essa metodologia é uma alternativa ao modelo linear de produção, onde as etapas seguem o processo clássico da indústria de design, manufatura, uso, descarte e eliminação, sendo que os materiais poliméricos possuem um elevado tempo de degradação e afetam diretamente o meio ambiente (SHANMUGAM et al., 2020).

Figura 7 – Modelo de economia circular em comparação ao modelo de economia linear



Fonte: (SHANMUGAM et al., 2020)

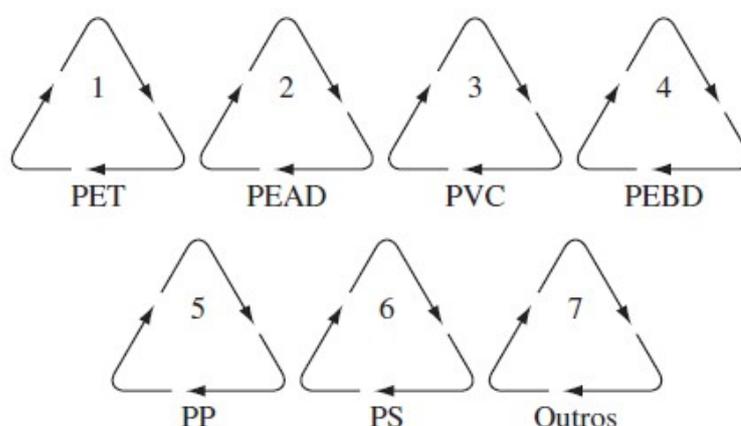
Apesar de ser o método mais viável, outros problemas e limitações decorrem da reciclagem. Devido à aparência do produto reciclado, muitas empresas temem a rejeição dos materiais pós-consumo se inseridos no mercado. Mas há espaço e possibilidades para que esse cenário seja revertido a fim de otimizar a utilização desses produtos. Como exemplo, cerca de 15% de todo o plástico em forma de filmes ou rígidos produzidos no Brasil são reciclados e retornam ao processo produtivo, sendo que 60% provém de processos industriais e 40% são plásticos pós-consumo. Porém, para que o processo seja lucrativo para as empresas, o procedimento de reciclagem deve igualar ou ser menor que o preço para produzir o material virgem, somado à energia gasta para descartá-lo, sendo que, para a maior parte das indústrias, a questão ambiental não é considerada como fator relevante. (ÁVILA; DUARTE, 2003).

Os segmentos industriais mais interessados na reciclagem são os setores de embalagem e o automotivo, sendo que o preço desses materiais pós-consumo varia de acordo com a região de oferta, condições e origem do resíduo. Para se reciclar esses materiais a principal forma é por meio da reciclagem primária ou secundária, que se diferenciam de acordo com a origem do resíduo polimérico, sendo a primeira responsável pelo reuso de materiais pós-industrial, enquanto a segunda reutiliza polímeros pós-consumo. Esse processo consiste no reprocessamento do material por meio, principalmente, de reextrusão do polímero não contaminado após etapas de trituração, separação de contaminantes, flotação de partículas de impureza, moagem, lavagem e secagem, a fim de eliminar resíduos de cola. Após essas etapas, o material fica disponível para ser moldado em produto acabado. Deve-se levar em conta a quantidade de reprocessamentos na qual o polímero ainda mantém suas propriedades, sendo que os estudos atuais visam a obtenção de características finais próximas às do polímero virgem, garantindo a viabilidade de utilização (SINGH et al., 2017). Outras formas são a reciclagem terciária, que consiste na produção de resíduos químicos ou combustíveis a partir da conversão dos resíduos poliméricos em derivados petroquímicos para ser reutilizados como combustível ou matéria-prima por meio de combustão térmica ou catalítica (ALI et al., 2002) e a quaternária, cuja qual gera energia a partir da incineração dos insumos poliméricos inviáveis devido à perda de propriedades proveniente de diversos ciclos de reprocessamento (SINGH et al., 2017).

A fim de facilitar a identificação do polímero e proporcionar maior consciência quanto a separação, reciclagem e controle de qualidade dos polímeros, foi instaurado em 1998 pela Sociedade das Indústrias de Plásticos – *Society of Plastics Industry, Inc* (SPI), um sistema de identificação de resinas poliméricas condicionando um número para cada um dos principais

polímeros consumidos no mundo, conforme apresentado na Figura 8. Porém, o método foi apenas aplicado em embalagens, ignorando outras vertentes de materiais como pastas, bandejas entre outros. Além disso, muitas das embalagens são demarcadas de maneira equivocada, prejudicando o processo de reaproveitamento do material (COLTRO; GASPARINO; QUEIROZ, 2008).

Figura 8 - Símbolos de identificação dos materiais plásticos segundo a norma ABNT NBR 13230



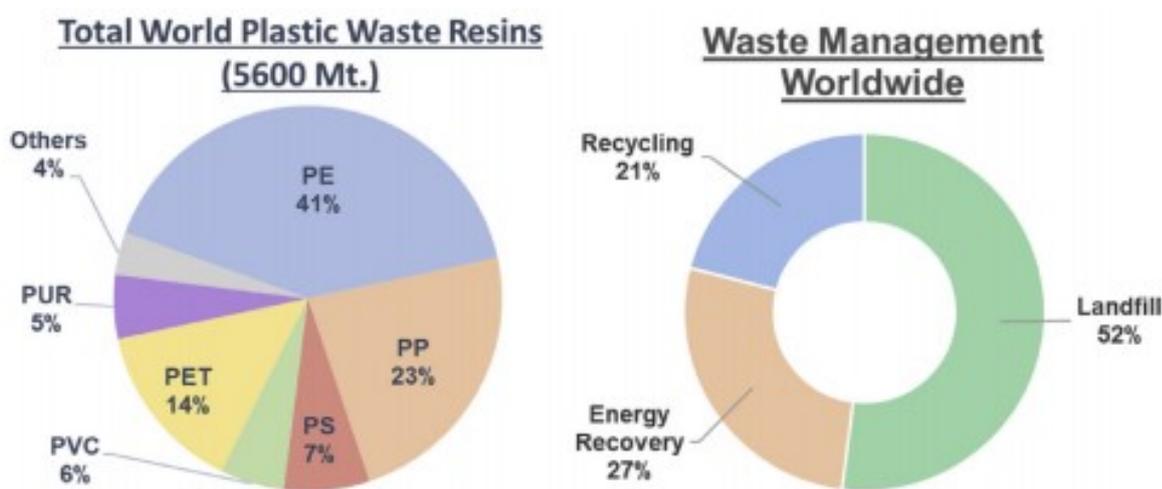
- 1- PET - Polietileno tereftalato
- 2 - PEAD - Polietileno de alta densidade
- 3 - PVC - Policloreto de vinila
- 4 - PEBD - Polietileno de baixa densidade
- 5 - PP - Polipropileno
- 6 - PS - Poliestireno
- 7 - Outros

Fonte: (COLTRO; GASPARINO; QUEIROZ, 2008)

As poliolefinas são os polímeros mais produzidos e consumidos no mundo atualmente, sendo o PE o polímero mais abundante, seguido por PP, PET, PS, PVC e outros tipos, que englobam não só polímeros termoplásticos, mas também elastômeros e termofixos. Esses materiais são responsáveis pela produção de 5,6 bilhões de toneladas de resíduos plásticos no planeta desde o início de sua produção, conforme apresentado na figura 9(esquerda). É necessária uma atenção especial a esse grupo de polímeros, principalmente considerando que

a taxa de reciclagem desses materiais vem crescendo bastante, com a evolução das tecnologias e maior consciência ambiental, tanto da população geral, quanto de empresas e lideranças. No entanto, como mostrado na Figura 9(direita), a reciclagem estimada desses materiais ainda é baixa quando ainda comparada com a quantidade descartada sem tratamento, o qual representa mais da metade do gerenciamento de resíduos plásticos, enquanto a reciclagem representa apenas 21% desse total (JUAN et al., 2020)

Figura 9 – Total de resíduos de plástico no planeta gerados ao final de 2018 (esquerda), e percentuais referentes ao gerenciamento de resíduos plásticos no mundo (direita)



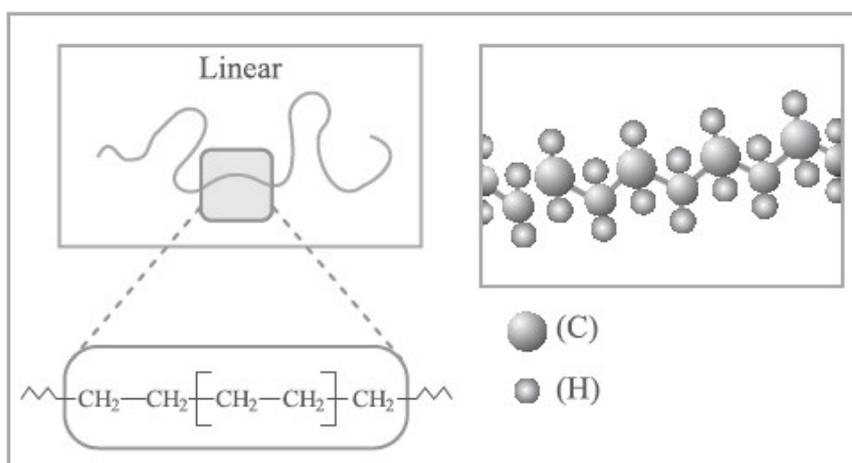
Fonte: (JUAN et al., 2020)

Diante do cenário em que se apresenta o Brasil, sendo o quarto maior produtor de plásticos no mundo e responsável por uma reciclagem efetiva inferior a 2% do total, se faz importante ressaltar os impactos econômicos provenientes da baixa taxa de utilização de polímeros reciclados no Brasil, que poderia reduzir a produção de resíduos plásticos em quase 60% e criar novas oportunidades empregatícias (WWF, 2019). Sendo assim, se faz necessário um aprofundamento no tema, criando um elo com os principais polímeros presentes, considerando suas propriedades quando virgem e após um novo processamento a fim de entender a viabilidade dos processos de reciclagem dentro do universo industrial.

3.4. Polietilenos

Os polietilenos são uma classe de polímeros semicristalinos com propriedades variáveis de acordo com o grau de cristalinidade e da massa molar. São classificados como poliolefinas devido ao monômero de polimerização desse material (etileno), sendo esta a estrutura molecular mais simples entre os monômeros, e a mesma para diferentes polietilenos, como apresentado na figura 10. É uma classe de materiais não tóxicos, pouco solubilizados na presença de solventes, apolares e propensos a aditivação. Além disso, tende a iniciar um processo de degradação das suas cadeias se trabalhado acima de temperaturas próximas a 300°C (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003).

Figura 10 – Representações esquemáticas da estrutura do PEAD



Fonte: (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003)

Os polietilenos são classificados em cinco grandes grupos, que são obtidos em função do tipo de catálise e condições de polimerização, sendo essas:

- a) Polietileno de baixa densidade (PEBD ou LDPE)
- b) Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou LLDPE)
- c) Polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE)
- d) Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM ou UHMWPE)
- e) Polietileno de ultra baixa densidade (PEUBD ou ULDPE)

A diferença de cada tipo se deve, principalmente, na presença ou não de ramificações na estrutura e sua massa molar específica. No caso do PEBD e do PEUBD, a cadeia polimérica possui uma grande quantidade de ramificações, muitas vezes em tamanhos próximos ao comprimento da cadeia principal. Isso afeta diretamente a cristalinidade do polímero, que se torna amorfo, impactando diretamente suas propriedades mecânicas e térmicas, reduzindo sua temperatura de fusão, sua densidade e sua resistência mecânica, porém aumentando sua resistência ao impacto e facilitando o processamento, visto que o material se torna mais flexível. Já o PEAD, em teoria, não possui ramificações em sua estrutura devido à utilização de um iniciador no momento de sua polimerização, que impede o crescimento de ramificações longas no contorno da cadeia principal, o que garante um maior empacotamento e organização das macromoléculas, gerando um elevado grau de cristalinidade ao polímero. Porém, para que o material possa ser processado, um catalizador é utilizado a fim de garantir a interação de monômeros de etileno ao longo da cadeia polimérica, permitindo assim a formação de ligações secundárias entre as cadeias poliméricas, O PEAD apresenta também maior módulo de elasticidade e densidade. O PELBD apresenta características intermediárias ao PEBD e ao PEAD, com a presença de ramificações de cadeia curtas e longas, o que permite melhor empacotamento da molécula quando comparado ao PEBD, mas, devido ao impedimento estérico causado pelas ramificações longas, impede um empacotamento perfeitamente ordenado das cadeias. O PEUAPM é um polímero altamente linear, infusível e com propriedades mecânicas muito superiores às dos demais polietilenos devido a um aumento significativo em seu peso molecular. Além disso, possui menor cristalinidade que os demais e é produzido e processado na forma de pó (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003).

3.4.1. Polietileno de Alta Densidade

3.4.1.1. Características e Propriedades do Polietileno de Alta Densidade

Dentre os polímeros, o PEAD é um dos materiais mais utilizados na indústria plástica devido a sua matéria-prima barata e abundante, além de facilidade de processamento para produção de objetos de uso cotidiano, como embalagens e sacolas. É um polímero altamente cristalino, podendo ultrapassar 90% de cristalinidade devido à presença de poucas ramificações na sua estrutura, o que garante translucidez ao material que possui temperatura

de fusão cristalina de aproximadamente 132°C e densidade entre 0,95g/cm³ e 0,97g/cm³. O peso molecular típico encontrado nesse material fica em torno de 80.000g/mol e 1.200.000g/mol, sendo que, para valores mais elevados, as cadeias apresentam alta resistência ao impacto, e para menores valores o material se torna frágil (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003). Além disso, é resistente a solventes, devido à proximidade de suas cadeias, gerando interações intermoleculares fortes. É quimicamente inerte, possui ótimas propriedades dielétricas, sendo excelente como isolante elétrico, e possui temperatura de transição vítrea inferior a -100°C (MARINHO, 2005). Sua síntese se dá por meio de polimerização em cadeia a partir do rompimento da ligação dupla carbono-carbono (C=C) presente no monômero de etileno, por meio de um processo exotérmico que ocorre continuamente devido à reação sucessiva entre a energia liberada e os demais monômeros presentes, não produzindo nenhum resíduo além do próprio polímero ao fim do processo.(CANEVAROLO, 2010). Suas principais características mecânicas e térmicas são encontradas na tabela 1

Tabela 1 – Propriedades do PEAD

Propriedades	Altamente Linear	Baixo grau de ramificação
Densidade, g/cm³	0,962 - 0,968	0,950 - 0,960
Temperatura de fusão, °C	128 - 135	125 - 132
Ponto de escoamento, MPa	28 - 40	25 - 35
Módulo de tração, MPa	900 - 1200	800 - 900
Resistência à tração, MPa	25 - 45	20 - 40
Alongamento, %		
No ponto de escoamento	5 – 8	10 - 12
No ponto de ruptura	50 - 900	50 - 1200
Dureza Brinell, MPa	60 - 70	50 - 60

Fonte: Adaptado de (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003)

3.4.1.2. *Processamento do Polietileno de Alta Densidade*

A forma final dos produtos de PEAD pode ser adquirida por meio de diversos processamentos diferentes. O processo de extrusão é o principal método utilizado para manipulação de polímeros. Consiste na adição do material, alimentando a extrusora, onde ele é aquecido, misturado e pressionado até uma saída ou molde por meio de um parafuso arquimediano para tomar forma final. A extrusão pode acontecer utilizando rosca simples ou rosca dupla, sendo o primeiro processo o mais usual. Dependendo do polímero, anteriormente ao processo ele pode ser aditivado, misturado com pigmentos ou lubrificantes ou ainda ser secado. Após o fim do processo, o produto é resfriado até solidificar e retirado da extrusora em velocidade constante. Esse processo é utilizado para produzir materiais com secção transversal constante (WAGNER; MOUNT; GILES, 2014). Outro processo muito importante é a moldagem por injeção, que se fundamenta em duas unidades básicas: uma unidade de injeção e uma de moldagem. A unidade de injeção é responsável pela fusão e deslocamento do material por meio de aquecimento e rotação da rosca, e também pressurizá-lo até a região do molde. Já a unidade de moldagem garante o formato final da peça enquanto o material ainda está fundido e sua ejeção assim que resfriado (GRELLE, 2006). Outro processo amplamente utilizado é a moldagem por sopro, utilizado na produção de objetos ocos a partir de uma pré-forma produzida por meio de injeção, denominada *parison*. Esse material é aquecido entre duas superfícies com um molde no formato da peça final, e em seguida soprado a fim de alcançar as dimensões desejadas para o produto. Em seguida é resfriado e retirado do molde (LEE, 2006)

Os principais produtos adquiridos por extrusão de polietileno são tubos elétricos e para drenagem, revestimentos de cabos e fios, redes para embalagens e sacolas de supermercado e de lixo. Nos moldados por sopro, se destacam tanques e tambores, frascos e embalagens. A moldagem por injeção garante produtos com superfícies mais detalhadas, como baldes e bacias, brinquedos, vasilhames, engradados, embalagens, tampas, entre outros (LONTRA, B. G. F, 2011). Além disso, esse polímero pode sofrer influência de parâmetros externos tais como presença de plastificantes, cargas, elastômeros, reforço com fibras e monômero residual. Essas variáveis que podem ser adicionadas ao processo garantem mudanças diretas em seu comportamento mecânico e térmico, sendo que, a partir dessa inclusão, o polietileno pode ganhar novas aplicações que demandem maiores esforços (CANEVAROLO, 2010). A aditivação pode garantir, também, uma viabilidade ambiental, ao possibilitar um menor gasto

energético para que o polímero seja produzido demandando menores quantidades de combustível, utilizando produtos residuais de outros processos ou garantindo um maior tempo de vida para uma determinada aplicação (RABELO; DE PAOLI, 2013).

3.4.1.3. Reciclagem de Polietileno de Alta Densidade

Ao se falar de reciclagem, diversos estudos são voltados para o PEAD em função da sua demanda de mercado ser muito elevada. A fim de se reaproveitar esse material, a principal forma é por meio da mistura com material virgem em diferentes concentrações. Cruz et al. (2008) avaliou as propriedades reológicas em regime permanente, transiente e dinâmico após a incorporação de PEAD reciclado no material virgem em diferentes proporções e em três temperaturas distintas. A preparação do material pós-consumo seguiu os processos de reciclagem mecânica e em seguida foi reprocessado por extrusão para, posteriormente, ser misturado à resina virgem nas proporções de 25, 50 e 75%. Os autores chegaram à conclusão de que a inclusão leva a um aumento na distribuição de massa molar, redução na pseudoplasticidade e na massa molar, e o polímero reciclado possui menos tensões residuais do que o virgem, sendo, portanto, mais facilmente deformado.

Indo além, estudos foram feitos a fim de avaliar as propriedades mecânicas de blendas de PET/PEAD reciclados com o objetivo de encontrar uma possível solução para o desperdício de plástico urbano (ÁVILA; DUARTE, 2003). O trabalho analisou o comportamento mecânico do compósito 100% reciclado sem adicionar nenhum tipo de estabilizante, compatibilizante ou aditivo, com o intuito de ser aplicado em ramos da engenharia. Inicialmente, após a aquisição e seleção dos materiais, foram realizados pré-tratamentos para garantir melhor compatibilização e menor presença de impurezas. Em seguida, os materiais passaram por um processo de homogeneização em extrusora nas proporções de 20, 30, 40% de PEAD. Após os ensaios realizados, os resultados obtidos garantiram um potencial para uso não apenas em aplicações de engenharia, mas também no cotidiano, com valores relativamente elevados de resistência à tração, apesar de uma redução na dureza. Além disso, as conclusões possibilitam avaliar ganhos ambientais provenientes da substituição de produtos virgens e reduzindo os rejeitos em aterros (ÁVILA; DUARTE, 2003).

Lontra (2011) realizou um projeto de pesquisa com intuito de avaliar a viabilidade do reaproveitamento de resíduos provenientes de sacolas plásticas de PEAD realizando assim, um novo reprocessamento do material, aditivando-o com resina virgem, em diferentes concentrações (0%, 30%, 50%, 100% m/m) de PEAD. Os autores realizaram processos de coleta, separação, lavagem e corte do polímero reciclado para em seguida misturá-lo, via extrusão, com o material puro. Em seguida, os materiais foram prensados em formatos de corpo de prova e foram realizados testes de caracterização como Espectroscopia na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) a fim de garantir que os grupos funcionais do polímero se mantiveram após processamento de e propriedades mecânicas, a partir de ensaios de tração, onde foi observado que nenhuma das amostras de PEAD, mesmo as recicladas, romperam durante a prática do ensaio, mas que o módulo de tração máximo atingido foi inferior para as amostras que continham polímero reciclado, além disso, o limite de resistência à tração das amostras demonstrou propriedades adequadas e dentro dos limites exigidos, concluindo que a reciclagem mecânica é uma alternativa viável para reuso desses polímeros residuais.

Juan et al. (2020) se embasaram na economia circular para adicionar PEAD reciclado ao processo comum de produção de PEAD, a fim de produzir tubos . A partir de materiais reciclados provenientes de processos de injeção e sopro, os autores realizaram a extrusão do material conjuntamente com o polímero virgem em proporções de 0%, 5%, 10%, 15%, 25%, 50% e 75% m/m. Para garantir resultados mais satisfatórios e embasados, os autores realizaram ensaios de cromatografia de permeação em gel (GPC), calorimetria exploratória diferencial (DSC) e ensaios mecânicos. Os resultados alcançados demonstraram uma capacidade da incorporação do polímero reciclado na extrusão do polímero virgem, dependendo principalmente da qualidade do PE utilizado, em função da contaminação presente no material.

Outra vertente de utilização de insumos de PEAD reciclado advém da incorporação de fibras na matriz do polímero a fim de adquirir características específicas e melhorias de propriedades para os materiais. Foulk et al. (2006) analisou as propriedades físicas e mecânicas de um compósito híbrido de fibras naturais e PEAD reciclado por meio de moldagem por compressão. As fibras utilizadas foram linho e algodão de tecidos comerciais. Para a incorporação dessas fibras à matriz da poliolefina foram utilizados tratamentos com anidrido maleico, silano, enzimas ou polietileno graftado com anidrido maleico. Ao avaliar os resultados do compósito gerado, os autores alcançaram propriedades muito superiores às do

PEAD reciclado, sendo a resistência mecânica de 40% à 220% superior e o módulo de elasticidade de 1,4 a 2,3 vezes maior. Além disso, vale ressaltar que após a produção do compósito, a absorção de água se elevou de forma substancial devido à presença das fibras naturais. Outro ponto importante foi a baixa variação na deformação do material ao se comparar o polietileno reciclado e o compósito produzido, comprovando a viabilidade do material, que aprimora muito as propriedades mecânicas e mantém bom percentual de estiramento.

Considerando o cenário da reciclagem no Brasil e os níveis de produção de polietileno de alta densidade anualmente fabricados e descartados sem um viés de reutilização, percebe-se que os processos de reciclagem ainda são pouco difundidos no ambiente industrial e social brasileiro. Portanto, enxerga-se a necessidade de um estudo aprofundado referente a como as indústrias de reciclagem se comportam, e como o universo acadêmico e informativo vem auxiliando no avanço desse setor.

3.5. Estudo de Caso

3.5.1. Definição e Conceitos

Os estudos de caso são classificados como uma metodologia de pesquisa com intuito de entender e interpretar diversos paradigmas encontrados nos mais diversos campos das ciências sociais e antropológicas, a fim de investigar um fenômeno a partir da coleta de informações retiradas de um meio específico, podendo esses serem comparados dentro de diferentes universos, garantindo resultados para embasar ou não uma conclusão para tal cenário (CHIZZOTTI, 2003). Essa metodologia de pesquisa é estudada nos mais distintos campos disciplinares da sociedade, sendo encontradas em áreas como sociologia e antropologia, psicanálise, administração, engenharia, educação, entre outros, produzindo um *case* que gera resultados a partir dos quais um desempenho ou comportamento pode ser analisado, desenvolvido, descrito ou ainda aprimorado (ANDRE, 2014).

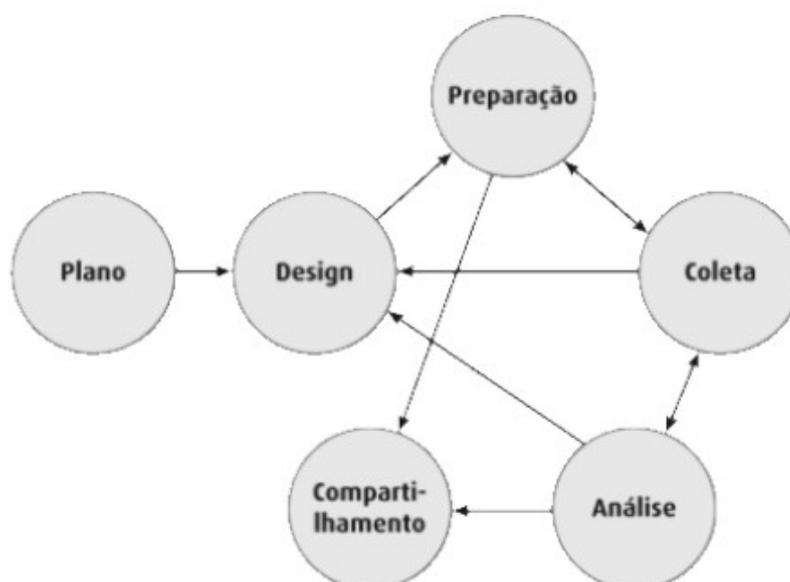
Em suma, um estudo de caso pode ser definido como uma metodologia de pesquisa pautada em uma base de dados referentes a um indivíduo ou um grupo de indivíduos de forma simultânea, sendo que o material de estudo pode ser selecionado seguindo três parâmetros específicos: um modelo de trabalho intrínseco, cujo estudo se baseia em compreender algo

pontual; instrumental, que tende a basear em dados amplos; ou ainda coletivo, que advém da tentativa de entender comportamentos específicos a partir de uma pesquisa qualitativa (CHIZZOTTI, 2003).

3.5.2. Metodologia

A metodologia de estudo de caso pode ser demonstrada a partir de um fluxograma simples que identifica e traça um planejamento estruturado, e a partir desse modela um design a ser preparado, gerando uma coleta de resultados, que devem ser analisados, e, caso necessário, remodelados, para enfim serem compartilhados, conforme apresentado na figura 11 (YIN, 2005).

Figura 11 – Etapas da realização do estudo de caso

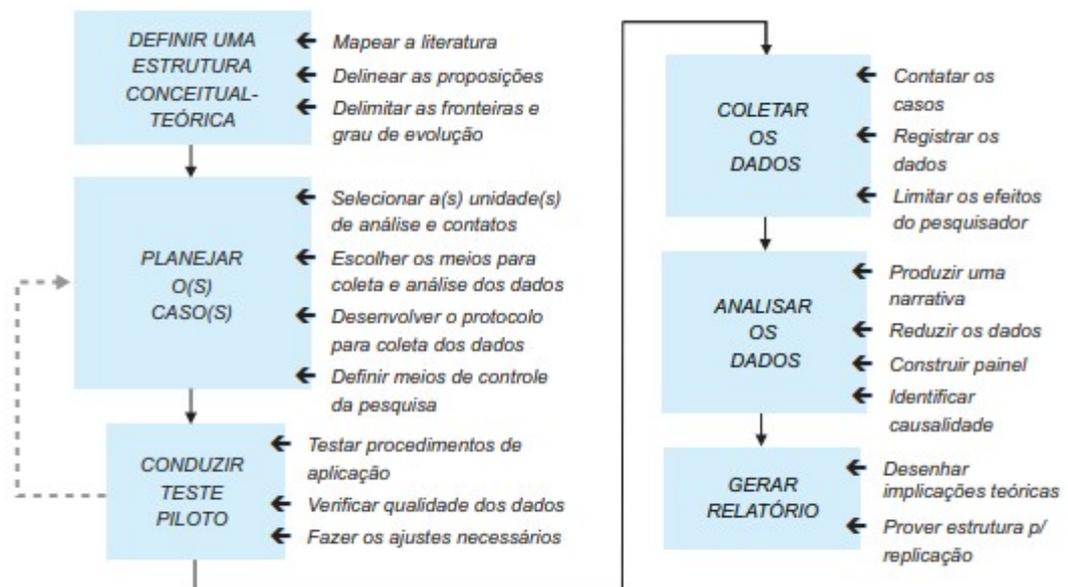


Fonte: (YIN, 2005).

Segundo Yin (2005), a metodologia para o estudo de caso se baseia em premissas básicas que se direcionam a responder questionamentos específicos referentes à definição do caso de estudo, à determinação da relevância dos dados coletados e ao tratamento adequado para esses dados.

A estruturação do estudo de caso pode ser dividida em um cenário de decisões estratégicas, que englobam o tipo de abordagem adequado para o sequenciamento do trabalho, e outro de decisões operacionais, que são baseados no método como a pesquisa será desenvolvida. O primeiro modelo apresenta uma abordagem metodológica, cujo qual estabelece ações e os parâmetros a serem seguidos, gerando assim um estudo de caso prévio para que este seja trabalhado dentro das decisões operacionais, ou seja, para que se alcance os objetivos desejados ao fim do estudo. A estrutura operacional pode ser definida como o planejamento de como o estudo irá ser sequenciado, onde inicialmente é definido uma estrutura conceitual-teórica a partir de um mapeamento dos casos e definição dos questionamentos, seguido do planejamento do caso, onde são selecionados os grupos de análise, delimitados os métodos de coleta de dados, modelado o formato como os dados serão coletados e definidos os meios pelos quais a pesquisa irá se nortear. Após, deve ser realizado um projeto piloto, ou teste a fim de entender a qualidade dos dados e, caso necessário, realizar ajustes e calibrações para em seguida realizar a coleta, análise e tratamento dos dados, e por fim desenvolver um relatório com base nas análises (AUGUSTO; MIGUEL, 2007). Tal modelo é apresentado na figura 12.

Figura 12 – Condução do estudo de caso



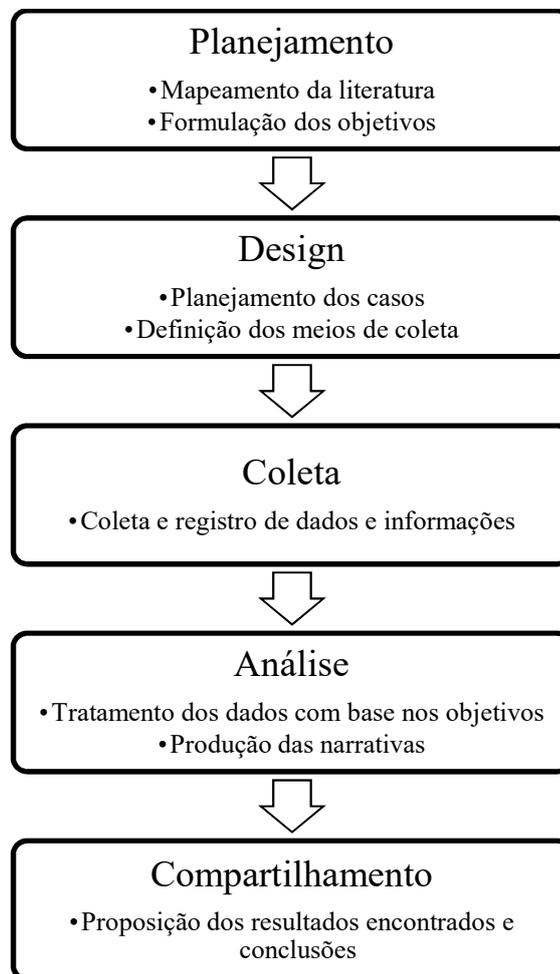
Fonte: (AUGUSTO; MIGUEL, 2007)

André (2014) criou uma subdivisão do estudo de caso em diferentes estágios: exploração, delimitação e coleta de dados e, por fim, análise sistemática dos dados. O estágio exploratório é o momento no qual as premissas são definidas, ou seja, todas as variáveis do processo são delimitadas e designadas, sendo essas definidas ao longo do processo, de modo a restringir o amplo campo de possibilidades inicialmente levantadas, traçando um panorama palpável e possível de ser analisado. A delimitação e coleta de dados parte do princípio de que a etapa de exploração já foi bem definida e estruturada, e, conseqüentemente, é possível se analisar quais as melhores diretrizes a serem tomadas. Para se coletar os dados, o foco do projeto deve estar bem definido e estruturado. Para tal, os eventos a serem estudados devem ser observados, questionados e embasados a partir de uma teoria sólida que fundamente o caso. Por fim, a análise dos dados deve ser sistemática e não se apresentar apenas ao fim da pesquisa, sendo necessário um olhar crítico ao longo de toda a experimentação, possibilitando assim a melhor estruturação e uma análise final que gere resultados satisfatórios de acordo com os objetivos definidos previamente.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A partir do embasamento teórico apresentado na revisão bibliográfica, considerando os materiais produzidos por Yin (2005), Augusto e Miguel (2007) e André (2014), e os objetivos propostos, foi definida um direcionamento pelo qual as etapas do projeto são descritas, conforme fluxograma abaixo.

Figura 13 – Representação esquemática do fluxo de trabalho realizado neste estudo de caso



Fonte: Autoria própria

4.1. Planejamento

Com o intuito de aprofundar no tema proposto pelo trabalho e entender, além do cenário da reciclagem de polímeros com ênfase no PEAD, as características e propriedades dos polímeros e como eles se apresentam na cadeia de processos produtivos foi desenvolvida a revisão bibliográfica apresentada no corpo do trabalho a partir de segmentos externos como revistas, livros, artigos científicos, monografias e reportagens, as quais embasaram e levantaram, no autor, questionamentos sobre o cenário da reciclagem no Brasil e como o mercado proveniente desse insumo está dialogando com o universo acadêmico.

A partir disso, foram levantadas as seguintes proposições acerca do tema:

- Qual a procedência do material e quais processos de separação e coleta utilizados?
- Quais caracterizações são realizadas?
- Quais são os produtos finais obtidos?
- Qual o direcionamento é dado ao produto reciclado?

A partir das questões levantadas, se tornou possível entender mais a fundo os processos realizados e o direcionamento do produto final pós-reciclado e suas finalidades no mercado atual.

4.2. Design

Considerando as questões levantadas no planejamento e os vieses apresentados por meio delas, foram condicionados dois universos de pesquisa para desenvolvimento da etapa de design, sendo eles um universo teórico, ou acadêmico, norteado e embasado em referências da literatura, como artigos, matérias e livros, e um universo prático, ou industrial, cujo qual advém do contato direto com empresas do setor, a fim de entender os procedimentos realizados por elas e os resultados obtidos. Ambas as pesquisas foram desenvolvidas com o intuito de atender aos objetivos propostos pelo projeto e responder os questionamentos apresentados na etapa de planejamento.

Para mapear a literatura e aprofundar no universo teórico, foram utilizadas duas fontes de pesquisa específicas:

- Periódicos Capes;
- Google Scholar;

Para mapear o universo prático e encontrar empresas do setor de reciclagem de polímeros, focadas na reciclagem de PEAD, foi realizada uma pesquisa na plataforma Google a partir de títulos específicos voltados ao ramo industrial de reciclagem de polietileno.

A partir dos dados coletados, foi realizada uma análise comparativa dentro de cada universo e, em seguida, entre os dois universos com auxílio de ferramentas para confecção de tabelas e gráficos. Os resultados observados durante a etapa de análise foram dispostos e possibilitaram a confecção da conclusão acerca do tema proposto.

4.3. Coleta

4.3.1. Universo acadêmico

Para realizar o mapeamento e coleta de informações provenientes do ambiente acadêmico, de forma a abordar os temas propostos por esse trabalho e responder aos questionamentos apresentados, foram utilizadas as bases de dados de dois mecanismos de busca específicos, Google Scholar e Periódicos Capes por meio de parâmetros específicos de busca, a fim de afunilar e direcionar os materiais de estudo acerca do tema proposto.

Inicialmente, foram selecionadas palavras-chave e expressões condicionadas ao tema nos idiomas português e inglês, sendo essas, “reciclagem de PEAD” (HDPE recycling), “reaproveitamento de PEAD” (HDPE reuse), “PEAD reciclado” (recycled HDPE), “resíduos de PEAD” (HDPE waste). A fim de abordar o cenário atual e a forma como esses resíduos estão sendo tratados, foi selecionado um período específico entre 2017 e 2021. Ambas as ferramentas de pesquisa foram utilizadas com intuito de encontrar publicações nacionais e internacionais acerca do tema proposto.

Para a pesquisa na ferramenta Periódicos Capes, foram utilizados parâmetros específicos de pesquisa a fim de restringir os resultados e garantir maior coerência com os objetivos propostos pelo trabalho. Para tal, foram utilizadas segmentações de dados a partir das palavras-chave “reciclagem de PEAD” e “reciclagem de resíduos de PEAD”, utilizando-

se filtros de data de 2017 a 2021 e filtros de tópico, sendo inclusos “HDPE”, “Plastics Industry”, “Polyethylens”, “Waste Management”, “Mechanical Properties”, “Polyethylene”, “Plastics”, “Polymers” e “Recycling”, e excluídos “Packing” e “Engineering”.

Para a pesquisa na ferramenta Google Scholar, foram utilizadas mais de uma palavra-chave a fim de restringir a quantidade de resultados encontrados, visto que a ferramenta é vasta e ampla, sendo assim, foram realizadas combinações entre as palavras chave e aplicado o filtro de data “Desde 2017”.

4.3.2. Universo industrial

A fim de encontrar uma amostra significativa de empresas do ramo de reciclagem de polímeros, mais especificamente as que trabalham com a reciclagem de polietileno de alta densidade, foi realizada uma pesquisa na plataforma Google a partir de títulos específicos, sendo eles:

- Fabricantes de PEAD reciclado;
- Reciclagem de PEAD no Brasil;
- Empresas de reciclagem de PEAD;
- Empresas de produção de PEAD reciclado;
- Empresas de produção de polietileno reciclado;

A partir dessas pesquisas, foi realizado um filtro manual de seleção das quais se adequavam ao perfil procurado pelos objetivos desse trabalho, sendo assim, foram selecionadas um total de 17 empresas e, por meio de contato via e-mail, comunicando os temas e objetivos do trabalho, foi realizado um breve questionário contendo as seguintes questões:

- Qual a procedência dos diferentes tipos de PEAD coletados pela empresa para a reciclagem?
- Quais processos de separação do polímero são realizados?
- São realizados testes/caracterizações no material? Se sim, quais?
- Quais são os produtos finais obtidos?
- Qual a destinação dos produtos finais?

Para os casos sem resposta ou retorno após o período de uma semana, foi realizada uma nova tentativa de contato, se baseando nos mesmos propósitos apresentados nos objetivos e explicando a motivação final do trabalho, a fim de obter uma resposta para os questionamentos apresentados. Ao fim, foram alcançadas 13 respostas coerentes com o tema apresentado.

4.4. Análise

Após a etapa de coleta, os dados foram selecionados e tratados a fim de garantir a aquisição de resultados referentes a ambos os universos estudados, primeiramente, tratando ambos os universos separadamente, de forma a gerar conclusões relativas as diferentes abordagens e resultados obtidos dentro de um mesmo referencial, e em seguida, num comparativo entre ambos, a fim de compreender e assumir conclusões acerca dos objetivos abordados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Coleta

5.1.1 *Universo acadêmico*

A partir das pesquisas realizadas nas duas ferramentas de busca acadêmicas utilizadas, utilizando as palavras-chave selecionadas, os filtros de data e tópicos específicos, foi construída a Tabela 2, na qual são representadas o número de publicações encontradas para cada base de dados.

Tabela 2 - Numero de publicações em cada ferramenta pesquisada

Base de Dados	Publicações Selecionadas
Periódicos Capes	834
Google Scholar	6200

Considerando a grande quantidade de resultados encontrados, foram selecionadas 50 publicações de maior relevância a partir dos objetivos propostos considerando os títulos das publicações, sendo divididas em 8 publicações da base de dados Periódicos Capes e 42 publicações da base de dados Google Scholar.

A partir dessa classificação, os artigos foram explorados de forma a compreender se estavam de acordo com o tema foco do trabalho, ou não. Sendo assim, foram definidos 17 artigos que se enquadravam ao tema proposto, correspondiam aos objetivos definidos e respondiam aos questionamentos levantados.

5.1.2 *Universo industrial*

Após o contato e apresentação da idéia do trabalho para as empresas selecionadas, foi possível alcançar as respostas para os questionamentos propostos e, a partir de tal, analisar os resultados obtidos em planilha contendo os dados coletados.

5.2 Análise

5.2.1 *Universo acadêmico*

A partir da etapa de coleta, considerando as 17 publicações definidas dentro do escopo do estudo de caso, foi realizada uma pré-análise sobre o tema abordado em cada artigo, classificando-os de modo a responder os questionamentos propostos na etapa de planejamento. Para tal, foi confeccionada a Tabela 2, na qual são apresentados os dados referentes a autor e ano de publicação, processo de reciclagem utilizado, classificação do resíduo, procedência do material utilizado e produto final obtido ao fim do desenvolvimento do periódico.

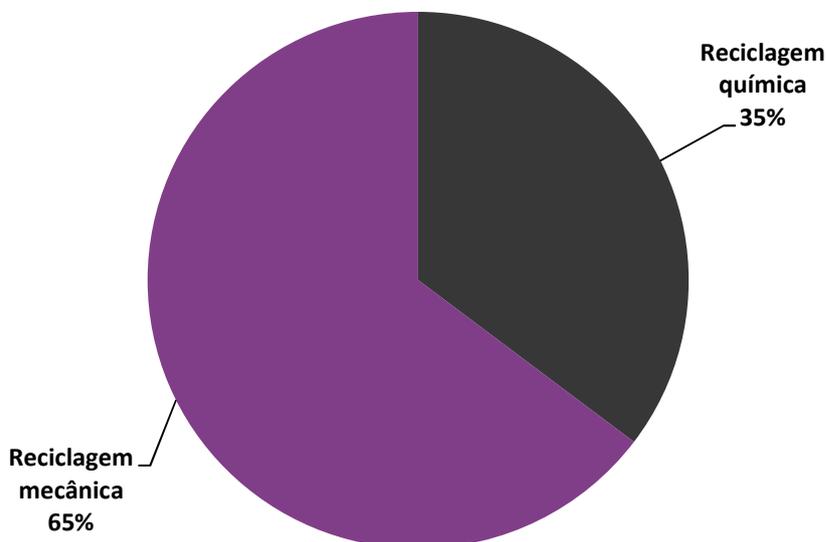
Tabela 2 – Publicações selecionadas para desenvolvimento do estudo de caso e seus respectivos dados coletados

Autor	Processo de Reciclagem	Tipo de Resíduo	Procedência do Material	Produto Final
AUXILIO et al. (2017)	Reciclagem química	Resíduos industriais	Insumos industriais	Combustível
ZAMAN (2020)	Reciclagem mecânica	Resíduos industriais	Insumos industriais	Compósito
MURAT et al. (2020)	Reciclagem mecânica	Resíduos pós-consumo	Embalagens de detergente	Blenda
RODRIGUEZ ANDA et al. (2020)	Reciclagem mecânica	Resíduos pós-consumo	Embalagens diversas	Compósito
SATAPATHY (2018)	Reciclagem mecânica	Resíduos pós-consumo	Embalagens farmacêuticas	Compósito
JOSHI; NAGARAJ (2021)	Reciclagem mecânica	Resíduos pós-consumo	Embalagens diversas	Compósito
SIMON-STÖGER; VARGA (2021)	Reciclagem mecânica	Resíduos pós-consumo	Embalagens diversas	Compósito
RYKUSOVA et al. (2019)	Reciclagem mecânica	Resíduos industriais	Bombonas de água	Compósito
ABD EL-FATTAH; ELKADER (2017)	Reciclagem mecânica	Resíduos industriais	Insumos industriais	Compósito
JUAN et al. (2020)	Reciclagem mecânica	Resíduos industriais	Insumos industriais	Blenda
DIAZ-SILVARREY et al. (2018)	Reciclagem química	Resíduos pós-consumo	Embalagens diversas	Combustível
RODRÍGUEZ-LUNA et al. (2021)	Reciclagem química	Resíduos pós-consumo	Insumos industriais	Combustível
ZUROHAINA et al. (2021)	Reciclagem química	Resíduos pós-consumo	Embalagens diversas	Combustível
DE CASTRO et al. (2020)	Reciclagem mecânica	Resíduos pós-consumo	Embalagens diversas	Compósito
SINGH et al. (2019)	Reciclagem mecânica	Resíduos pós-consumo	Embalagens diversas	Compósito
CAZAN et al. (2019)	Reciclagem mecânica	Resíduos pós-consumo	Embalagens diversas	Compósito
BADACHE et al. (2018)	Reciclagem mecânica	Resíduos industriais	Tubos corrugados	Compósito

Fonte: Autoria própria

Inicialmente, foi realizada uma análise a fim de entender a tendência do processo de reciclagem utilizado, possibilitando uma compreensão mais estruturada de como a reciclagem está sendo estudada no universo acadêmico. Os dados foram compilados no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Percentual de publicações referentes aos diferentes processos de reciclagem encontrados no universo acadêmico



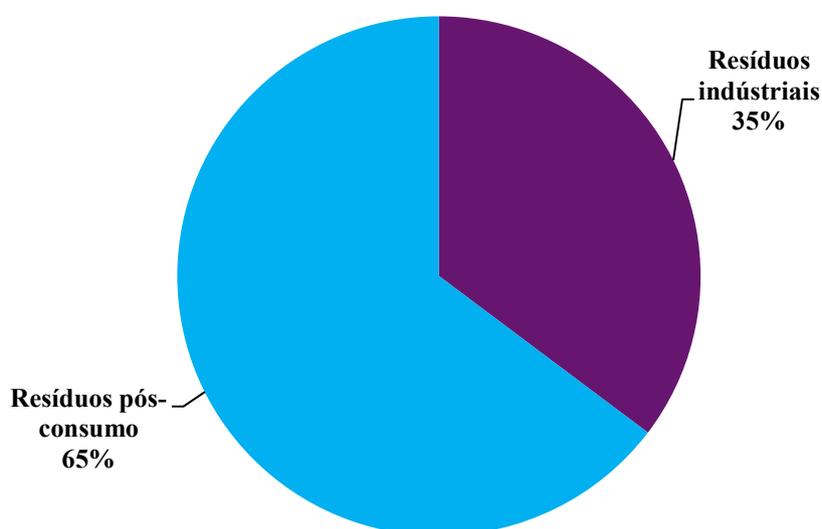
Fonte: Autoria própria

A partir do Gráfico 1, fica perceptível que a reciclagem mecânica é o processo mais usual dentro do universo acadêmico e de pesquisa, devido a maior praticidade em seu processo e menos variáveis envolvidas, representando um total de 76,4% dentre as publicações selecionadas. Em seguida se apresenta a reciclagem química, com 23,4% do total de publicações encontradas, normalmente aplicadas em processos de reversão pirolítica, como em Rodriguez-Luna et. al. (2021), que realizou um processo de valorização dos resíduos de PEAD em duas etapas a fim de maximizar a fração de voláteis gerados. Não foram encontrados resultados referentes a reciclagem energética, a qual se configura como o processo de combustão parcial ou completa da matéria, recuperando-se parte da energia utilizada no seu processo de polimerização (FORLIN; FARIA, 2002). Sendo assim, se torna nítido como os processos químicos e energéticos ainda são pouco difundidos como forma de reciclagem, em função, possivelmente, de um processo mais complexo e que envolve uma quantidade maior de variáveis, componentes químicos e mão de obra especializada, enquanto a reciclagem mecânica se dá como um processo mais simples e manual.

Em seguida, foi analisada a classificação dos polímeros quanto ao tipo de resíduo coletado. Conforme presente no Gráfico 2, a amostragem se divide em duas classes

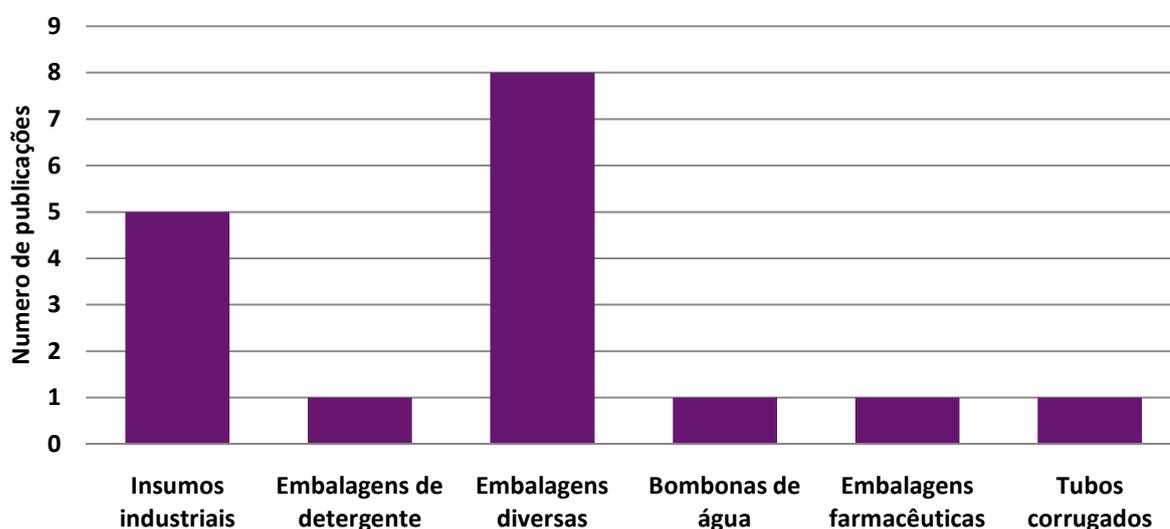
específicas de resíduos: refugos industriais, utilizados como material de estudo em 35,2% das publicações, e pós-consumo, utilizados em 64,8% dos artigos, o que evidencia um apelo maior para a reciclagem de resíduos gerados após descarte pela comunidade, ou seja, aqueles presentes no lixo residencial ou de estabelecimentos comerciais. Dentro dessas duas grandes classes, os autores ainda classificaram os resíduos recolhidos de acordo com a procedência do material, como apresentado no Gráfico 3.

Gráfico 2 – Tipos de resíduos utilizados nas publicações do universo acadêmico



Fonte: A autoria própria

Gráfico 3 – Procedência dos materiais coletados em cada uma das publicações do universo acadêmico



Fonte: Autoria própria

Um total de 12 entre as 17 publicações não utilizaram um resíduo específico de PEAD para a confecção dos artigos. Dentre essas, 8 utilizaram embalagens pós-consumo diversas, que independiam da procedência e eram encontradas em resíduos domésticos, como em Singh et. al. (2019), Rodriguez-Anda et. al. (2020) e Cazan et. al. (2019) ou disponibilizados por empresas terceiras no ramo de reciclagem, como Castro et. al. (2020) e Díaz-Silvarrey et. al. (2018). Outros cinco autores utilizaram insumos industriais como matéria para produção dos artigos, advindos diretamente de indústrias poliméricas, mas sem especificação do tipo de material utilizado, casos de Zaman (2020) e El-Fattah e Elkader (2017). Joshi e Nagaraj. (2021) e Zurohaina et. al. (2021) não citaram a origem do material adquirido, apenas citando “embalagens diversas”. Quatro autores especificaram o tipo de produto reutilizado para produção do artigo: Satapathy (2018), que focou sua pesquisa em insumos da indústria farmacêutica pós-consumo; Rykusova et. al. (2019), os quais utilizaram resíduos industriais de bombonas de água; Badache et. al (2018), que utilizaram resíduos da indústria de tubos corrugados recolhidos de uma empresa específica do ramo; e Murat et. al. (2020), que realizou uma pesquisa voltada especificamente para embalagens de detergente, porém não citaram a procedência das embalagens em questão.

Após a análise das especificações dos resíduos utilizados em cada uma das publicações selecionadas foi realizado um processo de análise dos métodos de caracterização utilizados pelos autores. Para isso, foi feita uma pré-classificação relativa aos resultados obtidos a partir de cada tipo de ensaio, sendo assim divididos em três classes:

- Caracterizações mecânicas;
- Caracterizações morfológicas;
- Caracterizações superficiais;

Dentro das caracterizações mecânicas se englobaram todos os ensaios do tipo físico e mecânico que foram realizados durante a metodologia dos artigos, se enquadrando ensaios de tração, compressão, impacto e flexão, entre outros. Os ensaios morfológicos compreenderam testes referentes a caracterizações estruturais e à configuração química ou atômica dos materiais utilizados, dentro dessa se enquadraram ensaios como FTIR, DSC e análise termogravimétrica (TGA), entre outros. Já a classe de caracterizações superficiais abarcou ensaios e testes relativos à superfície dos produtos finais obtidos e o comportamento microestrutural destes, nessa classe foram adicionados ensaios como absorção de água, diferentes tipos de microscopia e ângulo de contato. Os resultados referentes a cada publicação estão expostos na Tabela 3, representando a quantidade de ensaios realizados para cada tipo de classe abordada.

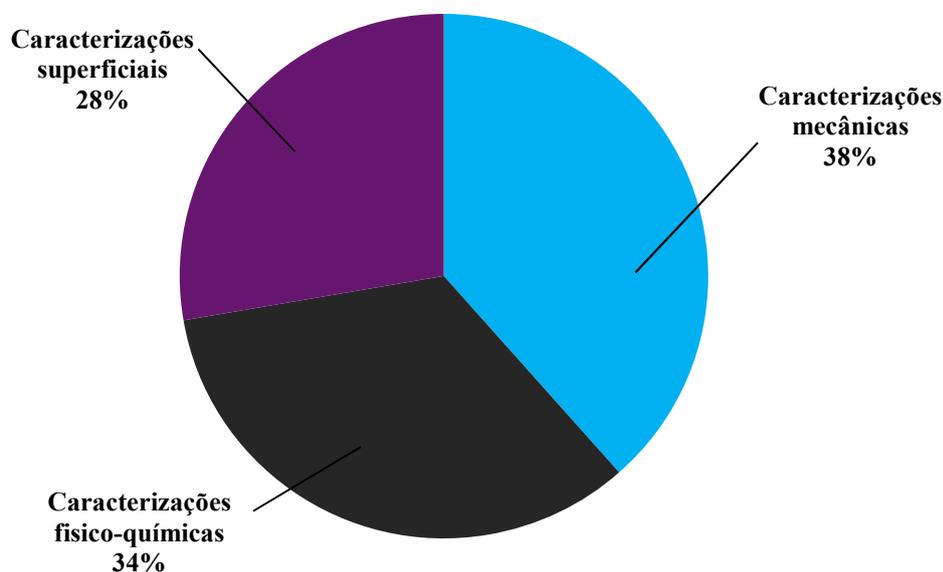
Tabela 3 – Quantidade de caracterizações realizadas em cada publicação

Autor	Caracterizações mecânicas	Caracterizações morfológicas	Caracterizações superficiais
AUXILIO et al. (2017)	-	-	-
ZAMAN (2020)	1	1	2
MURAT et al. (2020)	2	-	1
RODRIGUEZ ANDA et al. (2020)	3	1	2
SATAPATHY (2018)	4	2	2
JOSHI; NAGARAJ (2021)	3	-	-
SIMON-STÖGER; VARGA (2021)	2	2	1
RYKUSOVA et al. (2019)	1	-	2
ABD EL-FATTAH; ELKADER (2017)	1	4	1
JUAN et al. (2020)	2	2	1
DIAZ-SILVARREY et. al. (2018)	-	-	-
RODRÍGUEZ-LUNA et. al. (2021)	-	4	-
ZUROHAINA et al. (2021)	-	-	-
DE CASTRO et al. 2020)	1	-	1
SINGH et al. (2019)	1	1	2
CAZAN et. al. (2019)	3	3	2
BADACHE et al. (2018)	1	2	1

Fonte: Autoria própria

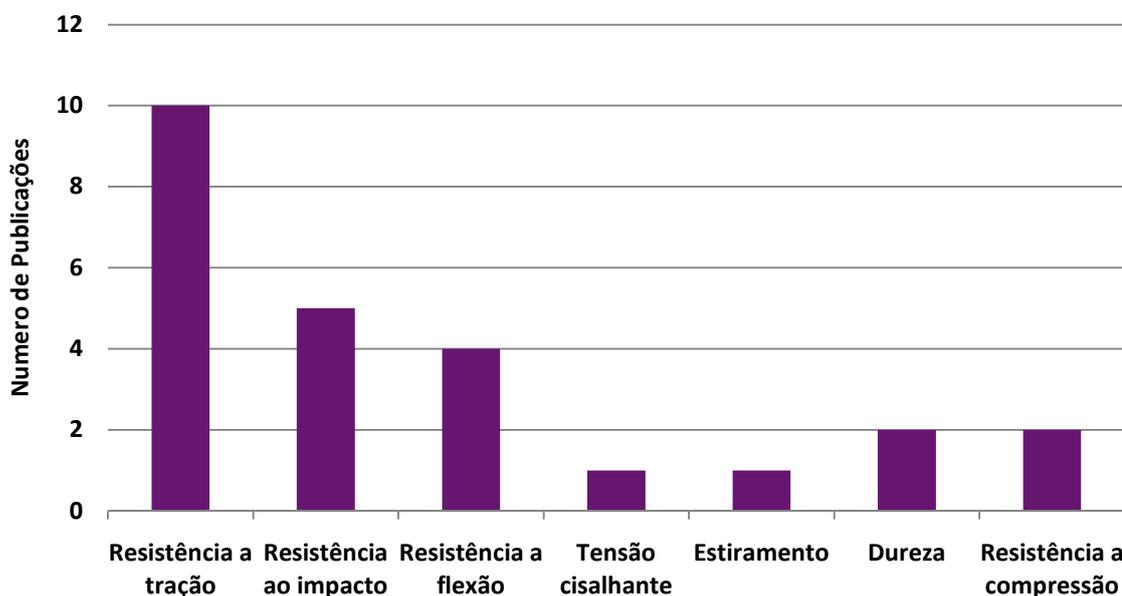
Na maioria das publicações os autores utilizaram ao menos um dos processos de caracterização existentes. Conforme apresentado no Gráfico 3, a preferência dos autores se dá pelos ensaios mecânicos, que estiveram presentes em um total de 13 artigos representados por ao menos um tipo de teste. Apesar disso, a presença de pelo menos um ensaio de cada classe ocorreu em 53% dos trabalhos citados, como em Simon-Stoger e Varga (2021) e Rodrigues Anda et. al. (2020). As publicações de Auxílio et. al. (2017), Diaz-Silvarrey et. al. (2018) e Zurohaina et. al. (2021), todas de cunho de reciclagem química, foram as únicas que não realizaram algum tipo de ensaio de caracterização polimérica, o que representa fato relevante em consideração a esse processo, sugerindo a não necessidade de testes em processos de pirólise catalítica. Apesar disso, Rodríguez-Luna et al. (2021), que também trabalharam a reciclagem química, realizaram quatro ensaios de análise estrutural, sendo eles TGA, DSC, FTIR e cromatografia de gás, a fim de compreender o comportamento térmico e a quantidade de energia liberada pelo polímero reciclado e a veracidade de sua estrutura química a fim de compreender o potencial energético dos produtos finais obtidos.

Gráfico 4 – Percentual de caracterizações realizadas nas publicações do universo acadêmico



Fonte: Autoria própria

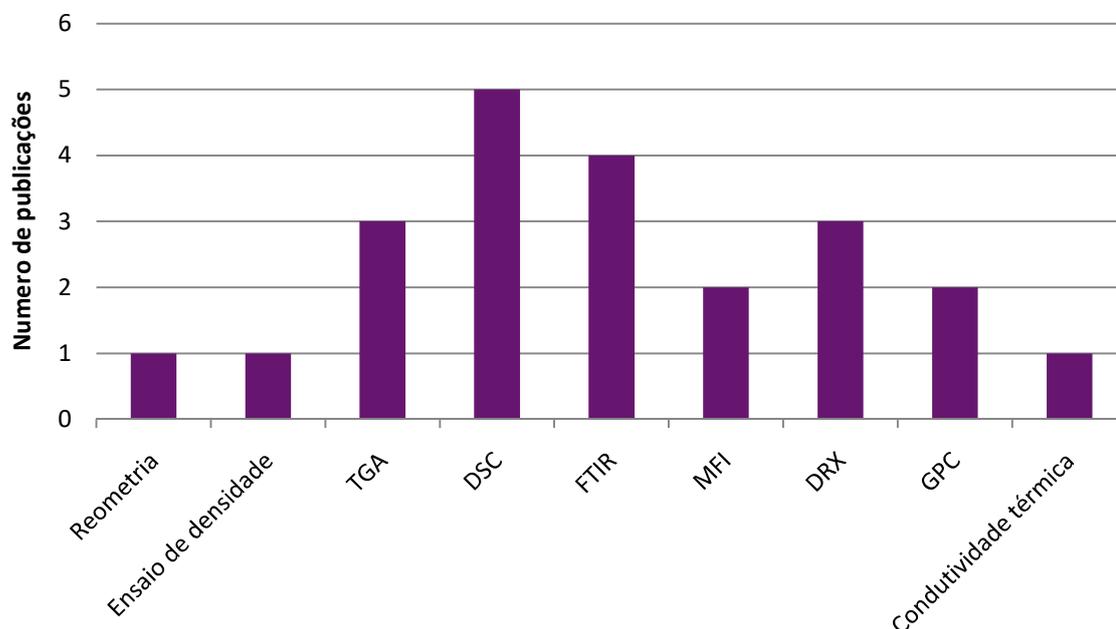
Dentro da classe de ensaios mecânicos, o principal utilizado foi o ensaio de resistência à tração, presente em 77% das publicações que realizaram caracterizações mecânicas. Esse percentual pode ser explicado devido ao fato de o ensaio de resistência a tração ser capaz de testar as propriedades mínimas de resistência mecânica suportadas por um corpo quando submetidos ao esforço e ser capaz de avaliar diversas características e propriedades do material estudado, como módulo de elasticidade, tensão de escoamento, tensão limite de ruptura e alongamento máximo (CANEVAROLO, 2010). Os ensaios de flexão, presentes em 5 publicações, foram amplamente utilizados em trabalhos que obtiveram compósitos reforçados com fibras como produto final, como em Rodriguez Anda et. al. (2020) e Satapathy (2018), enquanto os ensaios de impacto, presentes em 4 publicações, tiveram maiores aparições em artigos cujo produto final apresentava uma fase composta por elastômeros, como em Stoger e Varga (2021) e Cazan et. al. (2019). Já os ensaios de dureza, encontrados em 2 publicações, apareceram em artigos cuja fase reforço era composta por materiais cerâmicos rígidos, caso de Singh et. al. (2019).

Gráfico 5 – Caracterizações mecânicas presentes nas publicações do universo acadêmico

Fonte: Autoria própria

Na classe de caracterizações físico-químicas, fica nítida a tendência a ensaios de identificação do tipo de polímero, sendo os mais presentes o DSC, aparecendo em 5 artigos, e FTIR, sendo utilizado em 4 publicações, como em Cazan. et. al. (2019), Rodriguez-Luna et. al. (2021) e Abd El-Fattah e Elkader (2017) que utilizaram ambas as caracterizações em seus trabalhos. Outros ensaios com consideráveis aparições foram ensaios de TGA, a fim de entender o comportamento termo-degradativo do polímero reciclado, como em Sataapathy (2018), e DRX, amplamente utilizado em estudos com a presença de uma fase cerâmica, casos de Abd El-Fattah e Elkader (2017) e Cazan. et. al. (2019). Além desses, podem ser citados os ensaios de índice de fluidez (MFI), cromatografia de permeação em gel (GPC) e ensaios de densidade. A presença dos ensaios por artigo está exposta no Gráfico 6 abaixo.

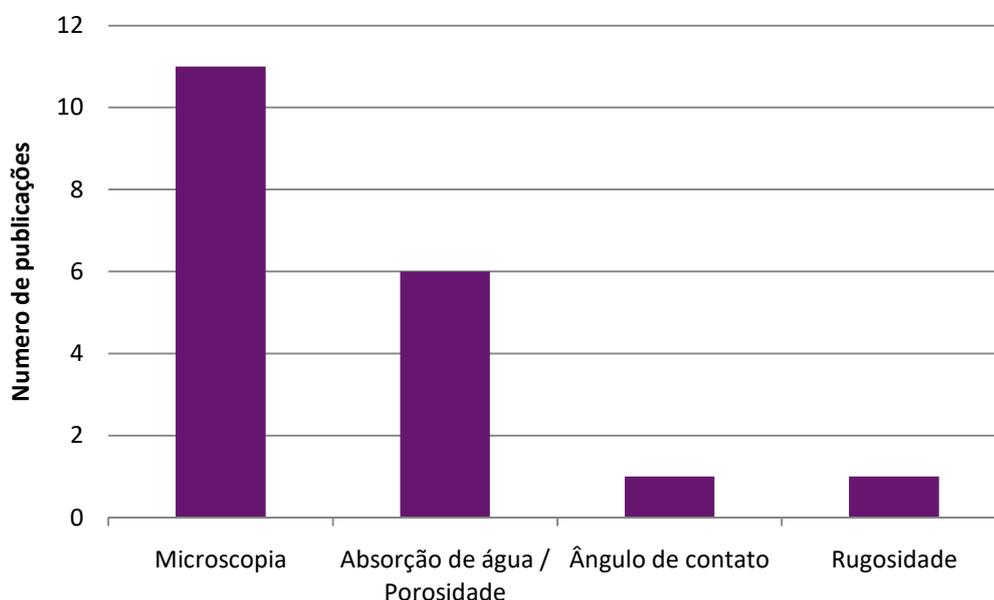
Gráfico 6 – Caracterizações físico-químicas presentes nas publicações do universo acadêmico



Fonte: Autoria própria

Por fim, entre os ensaios de caracterização superficial, destacam-se os ensaios de microscopia, presentes em 92% das publicações que realizaram algum tipo de análise superficial. Entre esses, destaca-se a utilização da microscopia eletrônica de varredura (MEV), presente em casos como Zaman et. al. (2020), Stoger e Varga (2021) e Rodriguez Anda et. al.(2020). Além dela, Rykusova et. al (2019) utilizaram a microscopia digital (MD) e Cazan et. al. (2019) utilizaram a microscopia de força atômica (MFA). A presença tão significativa dos ensaios de microscopia pode ser explicada por sua funcionalidade, garantindo uma visão ampliada da microestrutura dos materiais, facilitando a compreensão das fases presentes e garantindo que a interação entre os componentes utilizados seja satisfatória. Além disso, notou-se a utilização em 6 casos de ensaios de absorção de água ou porosidade aparente, tais ensaios auxiliaram a compreensão do impacto dos poros tanto nas propriedades mecânicas dos produtos finais obtidos, quanto da avaliação da interação entre os componentes utilizados. Os dados referentes as caracterizações superficiais foram expostos no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Caracterizações superficiais presentes nas publicações do universo acadêmico

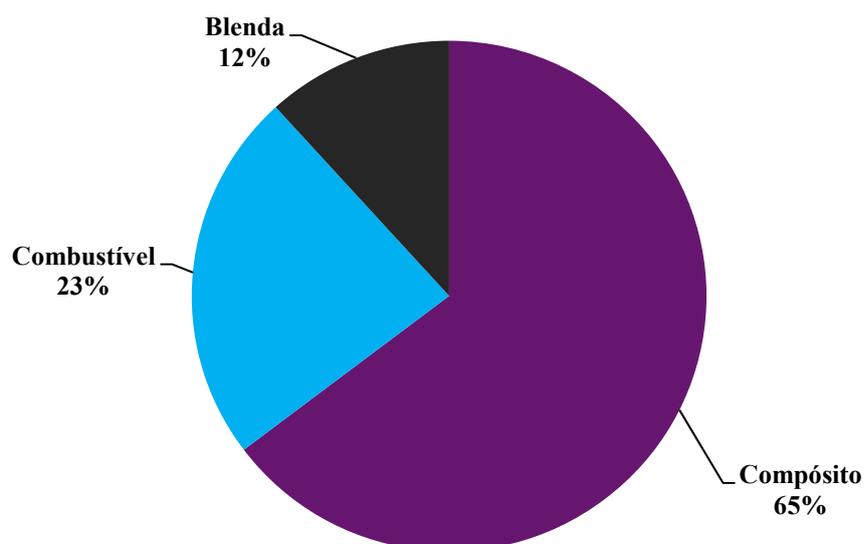


Fonte: Autoria própria

Após as análises relativas à procedência do material e aos ensaios de caracterização realizados pelos autores dos trabalhos do universo acadêmico, foi possível compreender quais os resultados finais obtidos. Conforme expresso no Gráfico 8, os principais produtos gerados foram compósitos de matriz de PEAD reciclado assistido de uma fase reforço. Essa segunda fase se apresentou a partir de materiais de cunho natural, como em Murat et. al. (2020), que obtiveram um material reforçado por serragem, Rykusova et. al. (2019), os quais produziram um compósito reforçado com resíduos sólidos de lama, e Abd El-Fattah e Elkader (2017), que produziram um compósito misto reforçado com pó de madeira e diferentes argilas, ou reforços a partir de compostos sintéticos, como Singh et. al. (2019), que preparou compósitos de PEAD reciclado reforçado por alumina (Al_2O_3) e carbetto de silício (SiC), e Cazan et. al. (2019), que testou a performance de uma borracha a base de resíduos de PEAD e PET reforçados com diferentes partículas inorgânicas, como óxido de titânio (TiO_2) e óxido de zinco (ZnO). Os resultados das reciclagens químicas foram, em suma, a reprodução de combustíveis fósseis, Auxilio et. al. (2017) e Zuroaina et. al. (2021) conseguiram produzir, consecutivamente, diesel combustível e gasolina a partir da pirólise dos resíduos de PEAD, Rodriguez-Luna et. al. (2021) recuperaram ceras e óleos a base de etileno após valorização do

PEAD, e Diaz-Silvarrey et. al. (2018) realizou o processo contrário a polimerização, alcançando, ao fim do processo, o monômero de etileno. Outros resultados obtidos foram blendas poliméricas entre o PEAD reciclado e PEAD virgem, caso de Juan et. al. (2020), e ainda uma mescla de PEAD e PET reciclados, resultados alcançados por Zaman (2020).

Gráfico 8 – Produtos finais alcançados ao fim dos artigos do universo acadêmico



Fonte: Autoria própria

Após a análise dos resultados obtidos pelos autores do universo acadêmico, fica clara uma tendência a reutilização dos polímeros a partir da reciclagem mecânica com intuito de produzir um compósito ou blenda com nova aplicação, dando viabilidade a um novo produto final, reduzindo assim o percentual de rejeitos inúteis na superfície da Terra. Além disso, a pirólise e recuperação de um combustível com elevado potencial energético se mostraram uma alternativa bastante estudada dentro das pesquisas acadêmicas, possibilitando uma nova fonte de atuação para produção de combustíveis, reduzindo a necessidade de craqueamento de petróleo e, conseqüentemente, diminuindo a emissão de gases poluentes na atmosfera terrestre.

5.2.2 *Universo industrial*

Após a coleta das informações compiladas das 13 empresas que retornaram o questionário, foi iniciado o processo de tratamento e análise dos dados relativos a fim de enquadrá-los dentro do escopo quantitativo desejado pelo projeto. A fim de responder os questionamentos levantados na etapa de planejamento, foi confeccionada a Tabela 4 de forma a apresentar as empresas, nomeadas de 1 à 13 a fim de não comprometer seu nome comercial e razão social, segmentando-as pelo processo de reciclagem utilizado, classificação do resíduo, produto final obtido e destinação do material.

Tabela 4 – Empresas selecionadas para desenvolvimento do estudo de caso e seus respectivos dados coletados

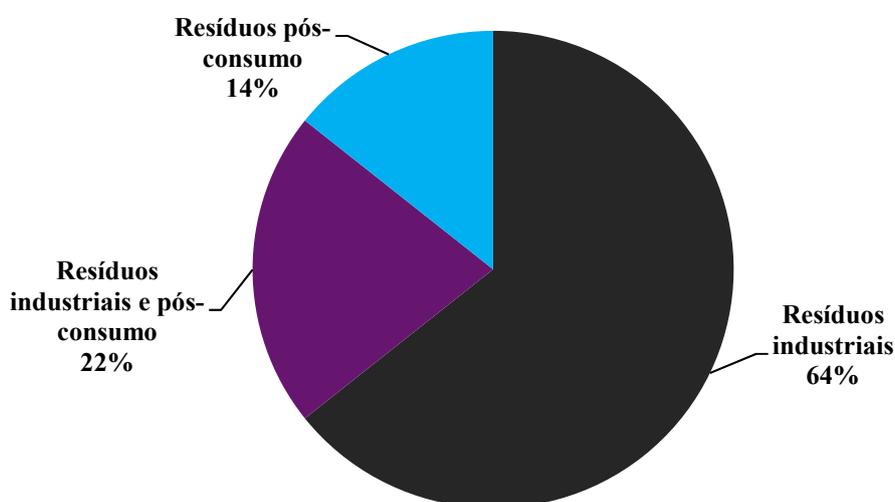
Empresa	Processo de reciclagem	Procedência do material	Produto final	Destinação
Empresa 1	Reciclagem mecânica	Resíduos pós-consumo	Pellets	Matéria-prima para outras empresas
Empresa 2	Reciclagem mecânica	Resíduos industriais e pós-consumo	Pellets	Matéria-prima para outras empresas
Empresa 3	Reciclagem mecânica	Resíduos industriais	Embalagens, frascos, brinquedos, caixas, engradados	Consumidor final
Empresa 4	Reciclagem mecânica	Resíduos industriais	Pellets	Matéria-prima para outras empresas
Empresa 5	Reciclagem mecânica	Resíduos industriais	Pellets	Matéria-prima para outras empresas
Empresa 6	Reciclagem mecânica	Resíduos industriais e pós-consumo	Pellets	Matéria-prima para outras empresas
Empresa 7	Reciclagem mecânica	Resíduos pós-consumo	Pellets	Matéria-prima para outras empresas
Empresa 8	Reciclagem mecânica	Resíduos industriais	Pellets	Matéria-prima para outras empresas
Empresa 9	Reciclagem mecânica	Resíduos industriais	Pellets; pisos intertravados; suportes; madeira plástica	Consumidor final
Empresa 10	Reciclagem mecânica	Resíduos industriais	Pellets	Matéria-prima para outras empresas
Empresa 11	Reciclagem mecânica	Resíduos industriais e pós-consumo	Pellets	Matéria-prima para outras empresas
Empresa 12	Reciclagem mecânica	Resíduos industriais	Pellets	Matéria-prima para outras empresas
Empresa 13	Reciclagem mecânica	Resíduos industriais	Pellets	Matéria-prima para outras empresas

Fonte: Autoria própria

Seguindo o escopo definido para o universo acadêmico, foi, inicialmente, realizada uma análise referente ao tipo de reciclagem utilizada na amostra do universo industrial selecionado. Todos os resultados obtidos indicaram o procedimento de reciclagem mecânica como processo de reciclagem adotado pelas empresas. Tal resultado pode ser explicado pelo fato do reuso da matéria descartada ser um processo mais viável, com menos restrições e variáveis e garantir um resultado prático e rápido na realocação do polímero no mercado, enquanto as reciclagens química e energética dependem de equipamentos e aparatos mais desenvolvidos e mão de obra mais qualificada para serem realizadas, além de serem processos mais complexos, o que culmina em maior custo agregado, tornando-as muito pouco difundidas e exploradas no universo industrial.

Com relação à procedência dos materiais, foi plotado o Gráfico 9 para avaliar a presença de cada tipo de resíduo coletado dentro do processo de reciclagem de cada uma das empresas. Os resíduos industriais, provenientes de refugos de empresas terceiras, apareceram com maior percentual no universo industrial, em 64% das amostras, em função da maior facilidade em selecionar, segregar e separar os materiais coletados, enquanto 14% das empresas utilizam resíduos pós-consumo e 22% se baseiam nos dois tipos de matéria no processo produtivo. Em linhas gerais, as empresas não citaram o tipo de resíduo recolhido nem classificaram de acordo com o material residual.

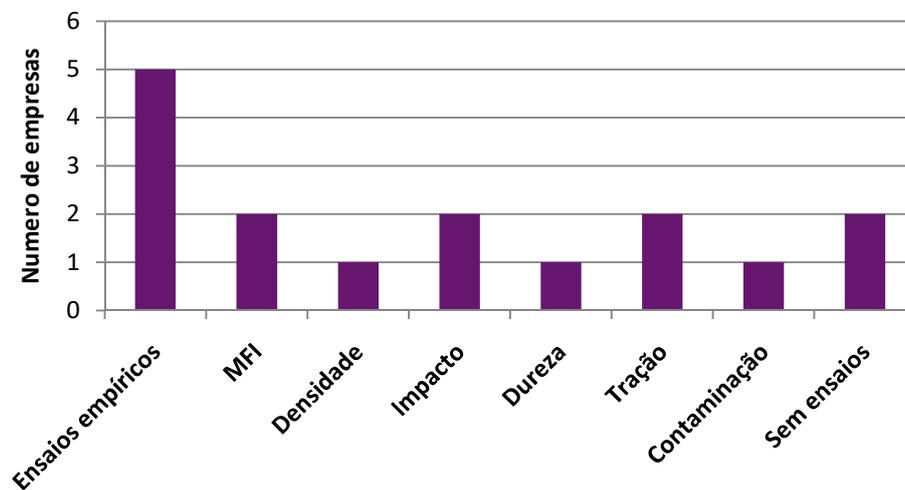
Gráfico 9 – Tipos de resíduos utilizados nas publicações do universo industrial



Fonte: Aatoria própria

Após a análise relativa às especificações das empresas e a procedência dos resíduos coletados para reciclagem, foi realizado um processo de análise dos métodos de caracterização, testes e ensaios realizados pelas empresas. Os resultados estão expostos no Gráfico 10.

Gráfico 10 – Ensaios realizados pelas empresas do universo acadêmico



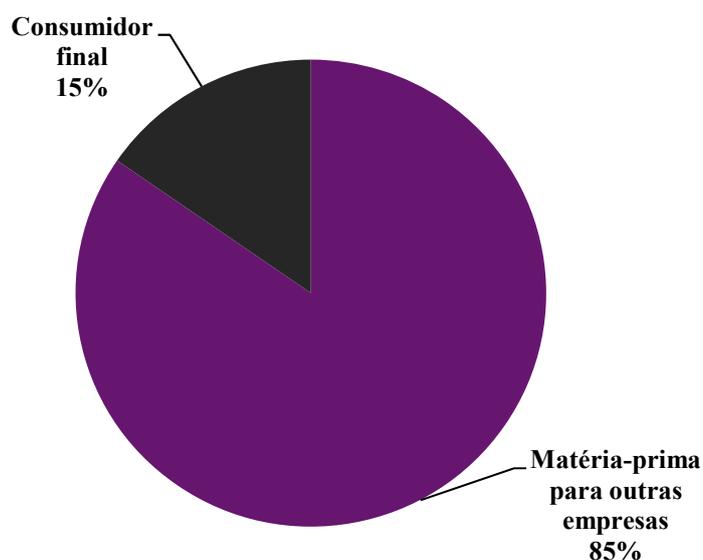
Fonte: Aatoria própria

Dentre os testes realizados, destacam-se o que as empresas denominaram como ensaios empíricos, que representam 31% de todos os ensaios mencionados. Essa classe de caracterizações engloba diversos testes de reconhecimento do material e de suas propriedades a partir de conhecimento e experiência dos técnicos responsáveis pelos setores de qualidade das empresas, dentro desses, alguns exemplos são testes de chama, cheiro e cor, para identificação correta do polímero e ensaios durante o processamento do material em extrusora para garantir que as propriedades desejadas sejam alcançadas. Além disso, algumas indústrias realizam caracterizações mais complexas e que demandam equipamentos mais qualificados, porem geram resultados mais assertivos, como as empresas que realizaram ensaios de fluidez, impacto, dureza e tração. Duas empresas relataram que não realizam ensaios nos materiais

coletados, apenas fazem o reprocessamento do material e redirecionam o produto final novamente para a indústria de confecção.

Por fim, foi realizada uma classificação referente aos produtos finais obtidos em cada uma das empresas e a destinação direcionada dos produtos produzidos. Conforme exposto no Gráfico 11, o principal direcionamento do universo industrial se dá para a produção de matéria-prima reciclada com destino a outras empresas que dão forma ao produto final, representando 85% do total pesquisado, enquanto apenas 15% das empresas realizam o processo de reciclagem completo e produzem o insumo para venda ao consumidor final. Dentro do universo de indústrias que destinam seu produto final para outras empresas interessadas no material reciclado, todas realizam o processo de confecção de pellets de cores específicas de acordo com a necessidade do comprador, para que esse material seja processado e tome forma final. Já as empresas que destinam seus produtos ao consumidor final, desenvolvem produtos específicos para ramos de clientes diferentes. Em um dos casos, a matéria-prima é transformada em embalagens, frascos, brinquedos, caixas e engradados de PEAD reciclado, enquanto outra empresa desenvolve produtos utilizados na construção civil, como pisos intertravados, suportes mecânicos e madeira plástica.

Gráfico 11 – Destinação dos produtos finais obtidos pelas empresas do universo industrial



Fonte: Autoria própria

5.2.3 *Análise comparativa*

Ao fim das análises dos universos acadêmico e industrial, se faz necessário realizar um comparativo entre os resultados obtidos para os dois universos a fim de compreender as similaridades, diferenças e particularidades apresentadas em cada um dos cenários.

Com relação ao processo de reciclagem, nota-se uma semelhança com relação à preferência geral pelo processo de reciclagem mecânica em ambos os universos, possivelmente, em função da maior praticidade e facilidade em se realizar esse tipo de reciclagem quando comparado aos demais, que demandam uma mão de obra mais qualificada e aparatos de maior complexidade.

Ao se analisar o tipo de resíduo utilizado, tem-se uma diferença clara entre os dois universos. Enquanto as publicações acadêmicas possuem uma tendência maior à reciclagem de resíduos pós-consumo, embasada em um cenário de redução dos impactos ambientais e ampliação da sustentabilidade nos vários setores da sociedade, o universo industrial possui maior enfoque em produtos provenientes da indústria, o que pode ser explicado pela praticidade de se separar esses materiais e a facilidade de classificar os diferentes tipos de resíduos coletados para o consequente processamento.

Com relação aos ensaios realizados, fica nítida a diferença das caracterizações envolvidas e no nível de aprofundamento desejado e alcançado em cada um dos universos. Para o universo industrial, a principal forma de teste dos resíduos de PEAD se dá por caracterizações empíricas a partir de conhecimentos e experiências dos técnicos responsáveis pelos processos; por outro lado, devido à maior especificidade dos artigos citados, têm-se uma gama maior de caracterizações morfológicas, mecânicas e superficiais, em função de alcançar resultados mais exatos e maior precisão no produto final obtido. Tal diferença pode ser explicada pelo custo necessário envolvido na aquisição dos equipamentos utilizados para realizar as caracterizações aplicadas no universo acadêmico, o que inviabilizaria o processo realizado pelas empresas de reciclagem. Além disso, não se tem uma legislação específica que fundamente as técnicas e caracterizações necessárias para os processos de reciclagem no âmbito industrial.

Por fim, os produtos finais obtidos se diferem, no geral, entre os dois universos, sendo os compósitos os principais produtos produzidos no universo acadêmico, enquanto no universo industrial tem-se a pelletização como o principal foco das empresas de reciclagem, não aprofundando-se em produtos acabados ou misturas com outros materiais para produção de blendas ou compósitos.

6. CONCLUSÕES

A realização do estudo de caso relativo à utilização do PEAD reciclado nos universos acadêmico e industrial apresentou questionamentos acerca do tema que puderam ser solucionadas a partir da confecção do próprio estudo, garantido assim, que os objetivos propostos fossem alcançados.

Foi possível entender a participação do mercado de reciclagem no Brasil, como ela se dá, principalmente pela reciclagem mecânica e, no geral, é desenvolvida de modo empírico, sem muitas caracterizações e ensaios. Por meio de informações obtidas através de empresas que realizam esse procedimento, tornou-se mais claro como esse processo é realizado e o quão difundido ele é, compreendendo as possibilidades de reciclagem existentes hoje e, comparando-se ao universo acadêmico, as lacunas que podem ser preenchidas e novas oportunidades de atuação da indústria de reciclagem, como melhor aproveitamento do PEAD reciclado como fase reforço, ou ainda como matriz de compósitos com aplicações semelhantes as quais as empresas de reciclagem hoje abordam. Para tal, se faz necessário um aprofundamento na capacidade do mercado de incorporar equipamentos capazes de produzir compósitos e testar suas características.

A utilização do modelo de estudo de caso como base científica para a realização do seguinte trabalho possibilitou compreender e coletar informações relativas aos dois universos observados e analisar as tendências seguidas em cada um dos universos. Tal metodologia permitiu a percepção de como os dois universos estão desalinhados no atual cenário da reciclagem de polímeros, demonstrando um universo acadêmico mais focado em protótipos não acessíveis à estrutura encontrada nas empresas, em função da utilização de equipamentos de elevado custo, mão de obra qualificada e necessidade de testes mais assertivos. Uma maior proximidade entre ambos os universos pode proporcionar maiores soluções para os problemas de reciclagem enfrentados pelo país hoje, ampliando os percentuais de reciclagem de insumos plásticos. Duas hipóteses podem ser levantadas, sendo a primeira a de que o universo acadêmico está trabalhando em uma linha distante do que hoje as indústrias de reciclagem podem oferecer como solução para os resíduos plásticos, com ênfase no PEAD, necessitando, portanto de uma revisão nos direcionamentos abordados pelos autores, e uma segunda relativa à defasagem do setor industrial em conseguir alcançar resultados e trabalhar com procedimentos que são estudados pelo universo teórico. Uma abordagem interessante se

baseia em uma maior presença do universo acadêmico no meio industrial, melhor interpretando a realidade presente no chão das fábricas de reciclagem e aprimorando suas pesquisas para melhor atender esse meio. Outro ponto a ser estudado advém da possibilidade de ampliar a capacidade das empresas em trabalhar em uma linha mais assertiva, garantindo novas aplicações para o produto final gerado, para isso, se faz necessário um incentivo financeiro no mercado da reciclagem, possibilitando uma melhor interação entre esses universos. Apesar disso, um grande dilema assola a reciclagem do PEAD, um material de baixo custo e propriedades mecânicas e térmicas inferiores a outras classes de materiais e até mesmo outros polímeros, o que pode justificar a falta de investimento em novas pesquisas industriais nesse setor e outras formas de aplicação do polímero, ou seja, o custo agregado do material inviabiliza uma maior difusão de suas vertentes de reciclagem.

Por fim, a realização deste trabalho possibilitou a definição de parâmetros utilizados nos processos de reciclagem e o cenário da reciclagem do polietileno de alta densidade no Brasil, comparando-o a publicações e artigos presentes no universo acadêmico, contribuindo para a realização de futuros trabalhos na área, que podem complementar os dados e hipóteses levantados e obtidos a partir da presente pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- ABD EL-FATTAH, A.; ELKADER, E. Influence of different clays on the mechanical, thermal, and water absorption properties of recycled high-density polyethylene/wood flour hybrid composites. **Journal of Composite Materials**, v. 52, p. 002199831772318, 26 jul. 2017.
- ALI, S. et al. Polymer waste recycling over “used” catalysts. **Catalysis Today**, v. 75, n. 1, p. 247–255, 2002.
- ANDRE, M. O QUE É UM ESTUDO DE CASO QUALITATIVO EM EDUCAÇÃO? **Revista da FAEBA- Educação e Contemporaneidade**, v. 22, 29 maio 2014.
- AUGUSTO, P.; MIGUEL, C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Produção**, v. 17, 1 abr. 2007.
- AUXILIO, A. R. et al. An experimental study on thermo-catalytic pyrolysis of plastic waste using a continuous pyrolyser. **Waste Management**, v. 67, p. 143–154, 2017.
- ÁVILA, A. F.; DUARTE, M. V. A mechanical analysis on recycled PET/HDPE composites. **Polymer Degradation and Stability**, v. 80, n. 2, p. 373–382, 2003.
- AZEREDO, H. et al. **Fundamentos de estabilidade de alimentos**. [s.l: 2012].
- BADACHE, A. et al. Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE). **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 40–52, 2018.
- BENOIT, N.; GONZALEZ-NUNEZ, R.; RODRIGUE, D. High density polyethylene degradation followed by closed-loop recycling. **Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology**, v. 33, p. 17+, 6 mar. 2017.
- BRASIL é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico. **World Wide Fund for Nature**, 2019.
- CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução**. [s.l: 2007].
- CANEVAROLO, S. **Ciência dos Polímeros—Um Texto Básico Para Tecnólogos e Engenheiros**. [s.l: 2003].
- CAZAN, C.; COSNITA, M.; ISAC, L. The influence of temperature on the performance of rubber - PET-HDPE waste -based composites with different inorganic fillers. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 1030–1040, 2019.
- CHIZZOTTI, A. A pesquisa qualitativa em ciências humanas e sociais: evolução e desafios. **Revista Portuguesa de Educação**, v. 16, 1 jan. 2003.
- COLTRO, L.; GASPARINO, B. F.; QUEIROZ, G. DE C. **Reciclagem de materiais plásticos: a importância da identificação correta Polímeros scielo** , , 2008.
- COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. DE. **Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações Polímeros scielo** , , 2003.

CRUZ, S. A. et al. **Avaliação das propriedades reológicas de blendas de PEAD virgem/PEAD reciclado** *Polímeros sciELO* , , 2008.

DE CASTRO, B. D. et al. Recycled Green PE Composites Reinforced with Woven and Randomly Arranged Sisal Fibres Processed by Hot Compression Moulding. **Acta Technologica Agriculturae**, v. 23, n. 2, p. 81–86, [2020].

DIAZ-SILVARREY, L. S.; ZHANG, K.; PHAN, A. N. Monomer recovery through advanced pyrolysis of waste high density polyethylene (HDPE). **Green Chemistry**, v. 20, n. 8, p. 1813–1823, 2018.

EBDON, J. R. **Introduction to polymers (second edition)** R. J. Young and P. A. Lovell **Chapman and Hall, London, 1991. pp. 443, price £16.95. ISBN 0-412-30640-9 (PB); ISBN 0-412-30630-1 (HB).** [s.l.] John Wiley & Sons, Ltd, 1992. v. 27

ERIKSEN, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. **PLOS ONE**, v. 9, n. 12, p. e111913, 10 dez. 2014.

FORLIN, F. J.; FARIA, J. DE A. F. **Considerações Sobre a Reciclagem de Embalagens Plásticas** *Polímeros sciELO* , , 2002.

FOULK, J. et al. Analysis of Flax and Cotton Fiber Fabric Blends and Recycled Polyethylene Composites. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 14, p. 15–25, 1 jan. 2006.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, v. 3, n. 7, p. e1700782, 1 jul. 2017.

GRELLE, P. F. **Injection Molding Handbook of Plastic Processes:** Wiley Online Books., 21 abr. 2006.

HAMAD, K.; KASEEM, M.; DERI, F. Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, n. 12, p. 2801–2812, 2013.

JOSHI, A.; NAGARAJ, A.; S, P. **Experimental Study on Utilization of Recycled HDPE Aggregate as A Partial Replacement for Coarse Aggregate in Conventional Concrete.** [s.l: s.n.]. v. 7

JUAN, R. et al. Incorporation of recycled high-density polyethylene to polyethylene pipe grade resins to increase close-loop recycling and Underpin the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 124081, 2020.

LONTRA, B. G. F. **Reciclagem Mecânica de Polietileno de Alta Densidade Obtido a Partir de Sacolas Plásticas**, UFRJ, RJ, 2011.

LEE, N. C. **Blow Molding Handbook of Plastic Processes:** Wiley Online Books., 21 abr. 2006.

MIKULA, K. et al. 3D printing filament as a second life of waste plastics-a review. **Environmental science and pollution research international**, v. 28, 1 mar. 2021.

MURAT, B. I. S. et al. Assessment of Mechanical Properties of Recycled HDPE and LDPE

Plastic Wastes. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 957, p. 12046, 2020.

RABELLO, M., & DE PAOLI, M.-A. (2013). **Aditivação de termoplásticos**. São Paulo: Artliber.

RETHINKING the future of plastics & catalysing action. **The New Plastic Economy**, 2017.

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

RODRÍGUEZ-LUNA, L.; BUSTOS-MARTÍNEZ, D.; VALENZUELA, E. Two-step pyrolysis for waste HDPE valorization. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 149, p. 526–536, 2021.

RODRIGUEZ ANDA, R. et al. COMPOSITE BASED ON RECYCLED HIGH-DENSITY POLYETHYLENE-SUGARCANE BAGASSE-TIRE RUBBER WASTE: FORMULATION, MECHANICAL AND WORKABILITY EVALUATION. **Interciencia**, v. 45, p. 80–103, 5 nov. 2020.

RYKUSOVA, N. et al. Identification of properties of recycled high-density polyethylene composites when filled with waste mud solids. **Eastern-European Journal of Enterprise Technologies**, v. 2, p. 55–60, 12 abr. 2019.

SATAPATHY, S. Development of value-added composites from recycled high-density polyethylene, jute fiber and flyash cenospheres: Mechanical, dynamic mechanical and thermal properties. **International Journal of Plastics Technology**, v. 22, 16 out. 2018.

SHANMUGAM, V. et al. Polymer Recycling in Additive Manufacturing: an Opportunity for the Circular Economy. **Materials Circular Economy**, v. 2, n. 1, p. 11, 2020.

SIMON-STÓGER, L.; VARGA, C. PE-contaminated industrial waste ground tire rubber: How to transform a handicapped resource to a valuable one. **Waste Management**, v. 119, p. 111–121, 2021.

SINGH, N. et al. Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 115, p. 409–422, 2017.

SINGH, N. et al. Recycled HDPE reinforced Al₂O₃ and SiC three dimensional printed patterns for sandwich composite material. **Engineering Research Express**, v. 1, n. 1, p. 15007, 2019.

SPINACÉ, M. A. DA S.; DE PAOLI, M. A. **A tecnologia da reciclagem de polímeros** *Química Nova* scielo , , 2005.

WAGNER, J. R.; MOUNT, E. M.; GILES, H. F. 1 - Extrusion Process. In: WAGNER, J. R.; MOUNT, E. M.; GILES, H. F. B. T.-E. (SECONDO E. (Eds.). . **Plastics Design Library**. Oxford: William Andrew Publishing, 2014. p. 3–11.

YIN, R. K. Introdução. In: YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. **Porto Alegre: Bookman**, p. 1–38, 1 jan. 2005.

ZAMAM H. U. Effects of compatibilizers on properties of recycled HDPE/PET blends for the production of automobile bumper. **International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science**, v. 2, n. 12, p. 944–950, 2020.

ZUROHAINA et al. **Catalytic Pyrolysis of High Density Polyethylene (HDPE) and Polystyrene Plastic Waste Using Zeolite Catalyst to Produce Liquid Fuel BT - 4th Forum in Research, Science, and Technology (FIRST-T1-T2-2020)**. Atlantis Press, 2021