

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**BÁRBARA LAVOURA DÍZERO GIMENES**

**ESTUDO DO POTENCIAL DE REUSO DE APARAS ORIUNDAS DO  
PROCESSAMENTO DE MALHAS DE SOMBREAMENTO BASEADAS EM  
POLIETILENO**

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2024**

**BÁRBARA LAVOURA DÍZERO GIMENES**

**ESTUDO DO POTENCIAL DE REUSO DE APARAS ORIUNDAS DO  
PROCESSAMENTO DE MALHAS DE SOMBREAMENTO BASEADAS EM  
POLIETILENO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rafaela Cristina Sanfelice

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2024**

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Gimenes, Bárbara Lavoura Dízero.

Estudo do potencial de reuso de aparas oriundas do processamento de malhas de sombreamento baseadas em polietileno / Bárbara Lavoura Dízero Gimenes. - Poços de Caldas, MG, 2024.

76 f. : il. -

Orientador(a): Rafaela Cristina Sanfelice.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2024.

Bibliografia.

1. Polietileno. 2. Aparas. 3. Malhas de sombreamento. 4. Reciclagem primária. 5. Polietileno de alta densidade. I. Sanfelice, Rafaela Cristina, orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

**BÁRBARA LAVOURA DÍZERO GIMENES**

**ESTUDO DO POTENCIAL DE REUSO DE APARAS ORIUNDAS DO  
PROCESSAMENTO DE MALHAS DE SOMBREAMENTO BASEADAS EM  
POLIETILENO**

A Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais

Aprovada em: 19 de janeiro de 2024

Profa. Dra. Rafaela Cristina Sanfelice  
Presidente da Banca Examinadora  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Juliano Marini  
Instituição: Universidade Federal de São Carlos

Profa. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Rafaela Cristina Sanfelice, Professor do Magistério Superior**, em 27/02/2024, às 10:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1196256** e o código CRC **79F7FDED**.

---

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pelo dom da vida, por tudo que tenho e sou, por me encorajar e capacitar diariamente a vencer as adversidades ao longo do caminho.

À minha família, meu porto seguro, sou grata pela paciência, pelos ensinamentos, pelo incentivo, amor e apoio incondicional durante toda minha jornada. Tudo que sou e conquistei foi graças a vocês.

À minha orientadora e amiga Rafaela Sanfelice, que por muitas vezes abdicou de seus momentos de descanso para me orientar e acompanhar nas pesquisas e análise de dados. Obrigada pela confiança, pela disponibilidade, pela paciência, pelo encorajamento, pelo empenho, pela dedicação e por ser essa profissional ímpar.

Ao Ricardo Gomes Pereira e ao professor Antonio José Felix de Carvalho, por tornar possível a realização deste projeto, abrindo as portas do Departamento de Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, para realização dos ensaios. Sou grata a vocês pela confiança, pelos ensinamentos, pelo conhecimento compartilhado e pelo auxílio.

À Universidade Federal de Alfenas, por oferecer um curso gratuito e de excelência.

À empresa do ramo agrícola que produz malhas de sombreamento, bem como aos colaboradores da empresa, por fornecer os insumos necessários à execução deste projeto.

A todos aqueles que diretamente - ou indiretamente - contribuíram para a concretização deste ciclo, obrigada!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## RESUMO

O uso cada vez mais frequente do plástico trouxe diversos benefícios para a humanidade devido à sua ampla versatilidade. No entanto, problemas decorrentes do descarte destes resíduos nos aterros sanitários e no meio ambiente tem levantado preocupações significativas. Esse estudo foca no Polietileno de Alta Densidade (PEAD), um polímero amplamente utilizado devido às suas propriedades notáveis, como resistência química e biológica e alta capacidade de moldagem, o que dificulta a ação de agentes naturais durante o processo de degradação, tornando necessário propor formas de reutilização desse material. Isso requer considerar objetivos econômicos (recursos e rentabilidade), sociais e ambientais. Nesse contexto, o objetivo central do estudo foi avaliar o potencial de reuso de aparas oriundas do processamento de malhas de sombreamento para uso agrícola fabricadas com polietileno (PE), de modo a validar o uso da opção sustentável. A análise abrangeu a caracterização estrutural, reológica, térmica e mecânica dos corpos de prova produzidos com o polietileno virgem (provindo direto da petroquímica), com o polietileno reciclado preto (obtido da reciclagem das malhas de sombreamento de PEAD de cor preta) e com o polietileno reciclado cinza (obtido por meio da reciclagem de mistura de malhas de sombreamento). Os resultados indicam que os materiais são similares quimicamente pois possuem bandas características de polietileno. Com relação a densidade, o PE reciclado preto apresentou valores típicos de PEAD ( $0,959 \text{ g/cm}^3$ ), enquanto que o PE reciclado cinza apresentou valores típicos de PEBDL ( $0,932 \text{ g/cm}^3$ ), reforçando a miscigenação de materiais de *grade* distinto de PE. Quanto às propriedades térmicas, evidenciou-se uma redução na temperatura de fusão para os reciclados ( $T_m = 125 \text{ a } 128^\circ\text{C}$ ), bem como uma  $\Delta H$  indicando menor absorção e liberação de energia comparáveis ao virgem ( $T_m = 137^\circ\text{C}$ ). Por fim, observou-se diferenças significativas nas propriedades mecânicas, sendo a amostra de polietileno virgem a de resistência à tração e módulo de Young superiores aos reciclados preto e cinza, com valores de 23,6 MPa, 19,9 MPa e 16,0 Mpa e 1109,5 MPa; 878,2 MPa e 390,7 Mpa, respectivamente, indicando uma maior capacidade de suportar cargas e manter a integridade estrutural. No entanto, evidenciou-se resultados inferiores do polietileno virgem em relação ao alongamento quando comparados aos materiais reciclados, cujos resultados foram 35,6%;

126,2% e 374,1%, sugerindo maior capacidade de deformação plástica antes do rompimento. Neste contexto, o reciclado preto apresentou potencial para reutilização na fabricação de malhas de sombreamento, embora requeira melhorias nas propriedades mecânicas para atender aos padrões de qualidade exigidos. Por outro lado, o reciclado cinza demonstrou ser proveniente de polietileno linear de baixa densidade devido a mistura de materiais, não tendo potencial para reuso nas malhas de sombreamento objeto do estudo. Por fim, este estudo ressalta a importância de considerar a sustentabilidade no ciclo de vida dos polímeros que resultam de aparas da indústria, destacando o potencial de reutilização destes através de reciclagem primária, contribuindo tanto para a economia circular quanto para a redução do impacto ambiental.

Palavras-chave: polietileno; aparas; malhas de sombreamento; reciclagem primária; PEAD.

## ABSTRACT

The increasingly frequent use of plastic has brought various benefits to humanity due to its wide versatility. However, problems arising from the disposal of these wastes in landfills and the environment have raised significant concerns. This study focuses on High Density Polyethylene (HDPE), a polymer widely used due to its remarkable properties, such as chemical and biological resistance and high molding capacity, which hinders the action of natural agents during the degradation process, making it necessary to propose ways to reuse this material. This requires considering economic (resources and profitability), social and environmental objectives. In this context, the central objective of the study was to evaluate the potential for reusing scraps from the processing of shading nets for agricultural use made with polyethylene (PE), in order to validate the use of the sustainable option. The analysis covered the structural, rheological, thermal and mechanical characterization of the test specimens produced with virgin polyethylene (coming directly from petrochemicals), with black recycled polyethylene (obtained from the recycling of black HDPE shading nets) and with gray recycled polyethylene (obtained by recycling a mixture of shade nets). The results indicate that the materials are chemically similar as they have characteristic polyethylene bands. Regarding density, black recycled PE presented typical HDPE values ( $0.959 \text{ g/cm}^3$ ), while gray recycled PE presented typical LLDPE values ( $0.932 \text{ g/cm}^3$ ), reinforcing the mix of grade materials other than PE. As for thermal properties, there was a reduction in the melting temperature for recycled materials ( $T_m = 125$  to  $128^\circ\text{C}$ ), as well as a  $\Delta H$  indicating lower absorption and release of energy comparable to virgin ( $T_m = 137^\circ\text{C}$ ). Finally, significant differences were observed in the mechanical properties, with the virgin polyethylene sample having higher tensile strength and Young's modulus than the black and gray recycled ones, with values of 23.6 MPa, 19.9 MPa and 16.0 Mpa and 1109.5 MPa; 878.2 MPa and 390.7 Mpa, respectively, indicating a greater capacity to support loads and maintain the structural integrity. However, there were inferior results of virgin polyethylene in relation to elongation when compared to recycled materials, whose results were 35.6%; 126.2% and 374.1%, suggesting greater capacity for plastic deformation before failure. In this context, black recycled material showed potential for reuse in the manufacture of shading nets, although it



requires improvements in mechanical properties to meet the required quality standards. On the other hand, the gray recycled material was shown to come from linear low-density polyethylene due to the mixture of materials and has no potential for reuse in the shading nets object of the study. Finally, this study emphasizes the importance of considering sustainability in the life cycle of polymers resulting from industrial scraps, highlighting the potential for reusing these through primary recycling, contributing both to the circular economy and to the reduction of environmental impact.

Keywords: polyethylene; scraps; shading nets; primary recycling; HDPE.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representações das estruturas do polietileno e algumas de suas possibilidades de aplicações.....	21
Figura 2 – Micrografias eletrônicas por varredura dos cristais de PEAD (a) 90°C, (b) 100°C e (c) 110° por 3 horas.....	22
Figura 3 – Exemplos de malhas de sombreamento.....	36
Figura 4 – Imagens dos pellets de polietileno A) virgem com aditivos; B) preto com aditivos; C) cinza com aditivos, antes do processo de extrusão, e D) virgem com aditivos; E) preto com aditivos; F) cinza com aditivos, depois do processo de extrusão.....	38
Figura 5 – Representação das etapas da produção de pellets do polietileno reciclado.....	39
Figura 6 – Imagem da extrusora utilizada nos ensaios, localizada no departamento de Engenharia de materiais da USP São Carlos.....	40
Figura 7 – Fluxograma do processo de extrusão dos corpos de prova.....	41
Figura 8 – Imagem da Injetora Battenfeld Plus 35 utilizada localizada no departamento de Engenharia de materiais da USP São Carlos.....	41
Figura 9 – Fluxograma do processo de injeção dos corpos de prova.....	43
Figura 10 – Imagem do equipamento Spectrum 100 para o ensaio de FTIR, localizado no departamento de Engenharia de materiais da USP São Carlos.....	44
Figura 11 – Fluxograma do ensaio FTIR.....	44
Figura 12 – Imagem do Plastômetro MI-2, localizada no departamento de Engenharia de materiais da USP São Carlos.....	45
Figura 13 – Fluxograma do ensaio de Índice de fluidez.....	46
Figura 14 – Ilustração da base para testes de densidade utilizando uma balança de precisão.....	47
Figura 15 – Imagem do equipamento DSC 8000 e Intracooler 2, do departamento de Engenharia de materiais da USP São Carlos.....	48
Figura 16 – Fluxograma do ensaio de DSC.....	49
Figura 17 – Imagem do equipamento Pyris 1 TGA, do departamento de Engenharia de materiais da USP São Carlos.....	50
Figura 18 – Fluxograma do ensaio de TGA.....	50

Figura 19 – Imagem do equipamento HDT 3 VICAT para o ensaio de HDT e VICAT, localizado no departamento de Engenharia de materiais da USP São Carlos.....	51
Figura 20 – Imagem do equipamento de ensaio universal Instron 5969, localizado no departamento de Engenharia de materiais da USP São Carlos.....	52
Figura 21 – FTIR das amostras de polietileno virgem, reciclado preto e reciclado cinza.....	54
Figura 22 – Índice de fluidez das amostras de polietileno.....	55
Figura 23 – Curva DSC das amostras de polímero virgem, reciclado preto e reciclado cinza.....	58
Figura 24 – Curva de decomposição termogravimétrica das amostras de polietileno virgem, reciclado preto e reciclado cinza.....	61

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Definição do tipo de material utilizado no estudo.....	37
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre propriedades dos PE's.....	26
Tabela 2 – Perfis de temperatura e parâmetros de processo na extrusora.....	40
Tabela 3 – Perfis de temperatura e parâmetros de processo injetora.....	42
Tabela 4 – Valores obtidos com os ensaios para determinação da densidade das amostras de polietileno virgem, reciclado preto e reciclado cinza.....	56
Tabela 5 – Comparativo entre resultados DSC.....	58
Tabela 6 – Interpretação curva TGA das amostras de polietileno virgem, reciclado preto e reciclado cinza.....	61
Tabela 7 – Comparativo entre resultados de resistência mecânica.....	62
Tabela 8 – Comparativo entre resultados de HDT e VICAT.....	64
Tabela 9 – Resumo e breve discussão dos resultados.....	65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABS	Acrilonitrila-butadieno estireno
ASTM	American Society for Testing and Materials
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DTA	Análise Térmica Diferencial
EVA	Copolímero de etileno e acetato de vinila
FTIR	Fourier Transform Infrared
MFI	Melt Flow Index
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PELBD	Polietileno Linear de Baixa Densidade
PEUAMM	Polietileno de Ultra Alta Massa Molar
PICPlast	Plano de Incentivo à Cadeia do Plástico
PP	Polipropileno
PVC	Cloreto de polivinila
TG	Termogravimetria
TMA	Análise Termomecânica
UNIFAL-MG	Universidade Federal de Alfenas
USP	Universidade de São Paulo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	20
2.1 POLIETILENO.....	20
2.1.1 Tipos de polietileno.....	23
2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	25
2.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	26
2.3.1 Espectroscopia no infravermelho (FTIR) .....	26
2.3.2 Reometria capilar - índice de fluidez.....	27
2.3.3 Densidade.....	27
2.3.4 Calorimetria exploratória diferencial (DSC) e termogravimetria (TGA).....	28
2.3.5 Temperatura de deflexão térmica (HDT) e temperatura de amolecimento (VICAT).....	29
2.3.6 Ensaio de tração uniaxial.....	30
2.4 TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE POLÍMEROS.....	31
2.5 CULTIVO PROTEGIDO.....	34
2.6 MALHAS DE SOMBREAMENTO.....	35
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	37
3.1 MATERIAIS .....	37
3.2 OBTENÇÃO DOS <i>PELLETS</i> DE POLIETILENO RECICLADO.....	38
3.3 OBTENÇÃO DOS <i>PELLETS</i> COM FORMULAÇÃO USUAL PARA FINS AGRÍCOLA.....	39
3.4 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	41
3.5 CARACTERIZAÇÕES.....	43
3.5.1 Espectroscopia no infravermelho (FTIR) .....	43
3.5.2 Reologia capilar - índice de fluidez.....	44
3.5.3 Densidade.....	46
3.5.4 Calorimetria exploratória diferencial (DSC) .....	47
3.5.5 Análise termogravimétrica (TGA) .....	49

3.5.6 Temperatura de deflexão térmica (HDT) e temperatura de amolecimento (VICAT) .....	51
3.5.7 Ensaio de tração uniaxial .....	52
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>53</b>
4.1 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) .....	53
4.2 ÍNDICE DE FLUIDEZ.....	54
4.3 DENSIDADE.....	56
4.4 ANÁLISES TÉRMICAS .....	57
4.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO UNIAXIAL.....	62
4.6 TEMPERATURA DE DEFLEXÃO TÉRMICA (HDT) E TEMPERATURA DE AMOLECIMENTO (VICAT) .....	63
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>68</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>70</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Com base em uma pesquisa realizada por (Geyer; Jambeck; Lavanda, 2017) publicada pela Science Advances, nos últimos 65 anos observa-se que a produção de plásticos ultrapassou a produção de qualquer outro material fabricado; isso ocorre devido às propriedades do material que permitem sua aplicação para diversos fins. O plástico é o tipo mais conhecido de material polimérico, que são macromoléculas formadas pela união de unidades repetitivas, que pode ser sintetizado a partir do gás natural, do petróleo ou de compostos naturais (biopolímeros) (Baranwal *et al.*, 2022; Habitzreuter *et al.*, 2022). As propriedades e aplicações desse material dependem da natureza química e física, que são determinadas pela estrutura química do monômero, pelo arranjo e massa molar das cadeias e pelo nível e forma de interação entre as macromoléculas (Natarelli *et al.*, 2022).

O aumento na produção de plástico nas últimas décadas foi impulsionado pelas características versáteis desse material e pela capacidade de obter propriedades específicas por meio de diferentes combinações. No entanto, esse crescimento também resultou em um aumento na geração de resíduos, o que levanta a necessidade urgente de encontrar alternativas para mitigar os impactos ambientais causados por esses resíduos (Geyer; Jambeck; Lavanda, 2017; Wang; Zhang; Li, 2023).

Estima-se que 2.500 milhões de toneladas métricas (Mt) de plásticos – ou 30% de plásticos produzidos – estão em uso. Entre os anos de 1950 e 2015, o acúmulo de resíduos plásticos primários e secundários (reciclados) totalizou 6.300 Mt e, deste total, tem-se que 800 Mt (12%) de plásticos foram incinerados e 600 Mt (9%) foram reciclados, sendo que somente 10% desse montante passaram pelo processo de reciclagem mais de uma vez. (Geyer; Jambeck; Lavanda, 2017). Deste modo, cerca de 4.900 Mt – 60% de todos os plásticos já produzidos – foram descartados e dispostos em aterros sanitários e/ou em céu aberto, trazendo inúmeros malefícios.

Estudo da Associação Brasileira da Indústria do Plástico - ABIPLAST (2021) em parceria com a empresa MaxiQuim, concluiu que em 2019 foram consumidas 1,3 milhões de toneladas de resíduo plástico na reciclagem, representando um crescimento de 5,2% em comparação a 2018, sendo que 953 mil toneladas são de

plástico pós-consumo; ou seja, material descartado em domicílios residenciais e em locais como shoppings centers, estabelecimentos comerciais, escritórios, entre outros, e 370 mil toneladas de plástico industrial, como sobras dos processos da indústria petroquímica, de transformação de plásticos e da própria reciclagem de plásticos.

Por meio do estudo encomendado pelo PICPlast (Plano de Incentivo à Cadeia do Plástico) e realizado pela empresa MaxiQuim, evidencia-se no cenário pós-pandemia um incremento de 14,3% na produção de plásticos reciclados pós-consumo no ano de 2021, chegando a mais de 1 milhão de toneladas. Levando em conta os dados do ano de 2018 (757 mil toneladas), verifica-se um aumento significativo de 33,9% na produção de resina pós-consumo, evidenciando a evolução no quesito (Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST, 2022). Desse modo, foram consumidos na reciclagem, aproximadamente 1,5 milhões de toneladas de resíduo plástico; destes, 1 milhão de toneladas referem-se a plástico pós-consumo e 405 mil toneladas de plástico industrial (Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST, 2022).

Embora seja notável a melhora no índice de reciclagem mecânica no Brasil no decorrer dos anos, os dados relacionados ao descarte de plástico ainda são considerados alarmantes tendo em vista o potencial de reciclagem. Levando em consideração a alta nos preços do polietileno nos últimos anos e os dados referentes ao descarte do plástico no ambiente (Yao; Hyeon; Yu-Sin, 2022) é de suma importância buscar soluções para a reutilização de tal material.

Neste contexto, a reciclagem e as tecnologias associadas a esse processo têm despertado interesses das indústrias, uma vez que dominar esse mercado oferece vastas oportunidades. No entanto, é importante expor que em países como o Brasil, a reciclagem ainda é um processo incipiente e o custo de recuperação pode ser mais elevado do que o de obtenção de matéria-prima devido à baixa taxa de reciclagem dos polímeros no país. Outro aspecto preocupante dessa prática é a qualidade inferior com relação à resistência mecânica em comparação à resina virgem, dificultando o reuso nos processos produtivos. Portanto, este trabalho teve como propósito avaliar as propriedades estruturais, reológicas, térmicas e mecânicas do polietileno reciclado em comparação às propriedades do polietileno virgem, com um foco especial no setor agrícola com o intuito de reduzir os efeitos ambientais decorrentes do descarte incipiente destes. A escolha desse setor deve-se ao seu

grande impacto na economia do Brasil e à crescente demanda por materiais poliméricos, especialmente na fabricação de malhas de sombreamento agrícola. Além disso, a investigação foi impulsionada pelas aparas obtidas em uma indústria de produção dessas malhas, justificando assim o foco deste estudo no setor agrícola, onde o uso eficiente e sustentável de materiais reciclados pode trazer benefícios significativos.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo principal estudar o efeito do uso do polietileno reciclado advindo das aparas de PEAD das malhas de sombreamento da cor preta – reciclado preto – sob as propriedades estruturais, reológicas, térmicas e mecânicas, em comparação com as propriedades do PEAD virgem. E, considerando a disponibilidade de aparas originadas de malhas de sombreamento de cores claras – reciclado cinza - tornou-se oportuno a caracterização desta para entendimento da classe de polietileno, bem como do efeito do reuso dos mesmos na confecção das malhas.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) Extrudar e confeccionar corpos de prova, seguindo a formulação habitualmente usada em produtos agrícolas, utilizando tanto polietileno virgem quanto reciclado (preto e cinza). Este passo é crucial para garantir que os corpos de prova reflitam fielmente as condições reais de uso no setor agrícola;
- b) caracterizar os materiais quanto às suas propriedades estruturais, reológicas, térmicas e mecânicas. Esta etapa envolve uma análise detalhada para entender as características intrínsecas de cada tipo de polietileno, fornecendo uma base sólida para comparações subsequentes;
- c) comparar os resultados obtidos para o polietileno virgem e o reciclado. O foco aqui é identificar semelhanças e diferenças significativas entre os dois materiais, com o intuito de avaliar a viabilidade e a eficácia do uso

de polietileno reciclado na fabricação de produtos agrícolas, especialmente as malhas de sombreamento;

- d) comparar os resultados obtidos para o polietileno reciclado cinza com as literaturas disponíveis, bem como com os demais resultados, a fim de avaliar a possibilidade de reuso para a fabricação das malhas de sombreamento.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 POLIETILENO

Polímeros são macromoléculas formadas pela ligação sucessiva de unidades repetitivas denominadas meros, por meio de ligações covalentes (Canevarolo Jr., 2006), que por meio da polimerização formará arranjos estruturais diversos, originando polímeros lineares, ramificados ou reticulados (Canevarolo Jr., 2006).

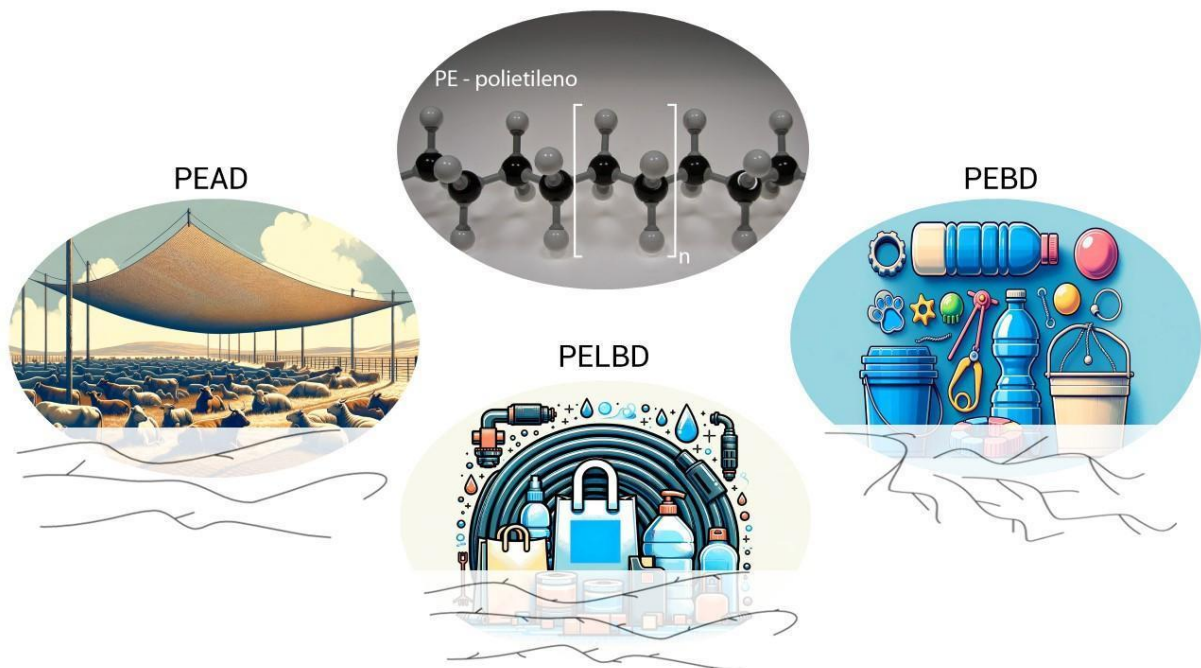
Dentre os polímeros usualmente empregados, destaca-se o polietileno, que é um polímero sintético constituído por átomos de hidrogênio e carbono provindos de diversos monômeros do gás etileno e pertencente à classe das chamadas poliolefinas (Resende, 2018).

De acordo com Canevarolo Jr. (2006), o polietileno apresenta basicamente a fórmula  $C_{2n}H_{4n+2}$ , sendo que “*n*” indica o número de monômeros etileno polimerizados na estrutura do polímero. Sua molécula é formada por uma longa cadeia de hidrocarboneto saturado que poderá ou não conter ramificações - e possui grupos metila em suas extremidades.

O polietileno exhibe várias formas estruturais devido a variações em sua massa molar e no comprimento e presença de ramificações. Essas diferenças estruturais influenciam diretamente a cristalinidade e a densidade do material. O Polietileno de Baixa Densidade (PEBD – em inglês Low Density Polyethylene (LDPE)) possui uma estrutura altamente ramificada, o que confere flexibilidade; já o Polietileno de Alta Densidade (PEAD – em inglês High Density Polyethylene (HDPE)) tem cadeias mais lineares e menos ramificações, resultando em maior densidade e rigidez. O Polietileno Linear de Baixa Densidade (PELBD – em inglês Linear Low-Density Polyethylene (LLDPE)) combina as propriedades do PEBD e PEAD, tendo cadeias lineares com ramificações curtas. O Polietileno de Ultra-Alta Massa Molar (PEUAMM – em inglês Ultra-High Molecular Weight Polyethylene UHMWPE) se destaca por suas longas cadeias moleculares, proporcionando extrema resistência e durabilidade. Estas diferenças estruturais influenciam diretamente as propriedades físicas e químicas dos diferentes tipos de polietileno (Patel, 2017; Silveira, 2012).

A Figura 1 representa as estruturas do PEAD, PEBD e PELBD e correlaciona suas principais aplicações. O Polietileno de Alta Densidade (PEAD) é amplamente aplicado em produtos que exigem resistência e estabilidade, como malhas (telas) de sombreamento utilizadas para o conforto térmico de animais em ambientes externos e/ou interno, tubulações para condução de gás e tambores industriais. Por outro lado, o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) é ideal para itens que requerem maior flexibilidade e maleabilidade, tais como sacolas de supermercado, mangueiras de água e frascos de cosméticos, devido à sua capacidade de absorver impactos e conformar-se facilmente. Já o Polietileno Linear de Baixa Densidade (PELBD) encontra seu uso em produtos que balanceiam resistência e flexibilidade, como tampas de garrafa PET, brinquedos diversos e baldes, combinando a durabilidade com a facilidade de moldagem.

Figura 1 – Representações das estruturas do polietileno e algumas de suas possibilidades de aplicações



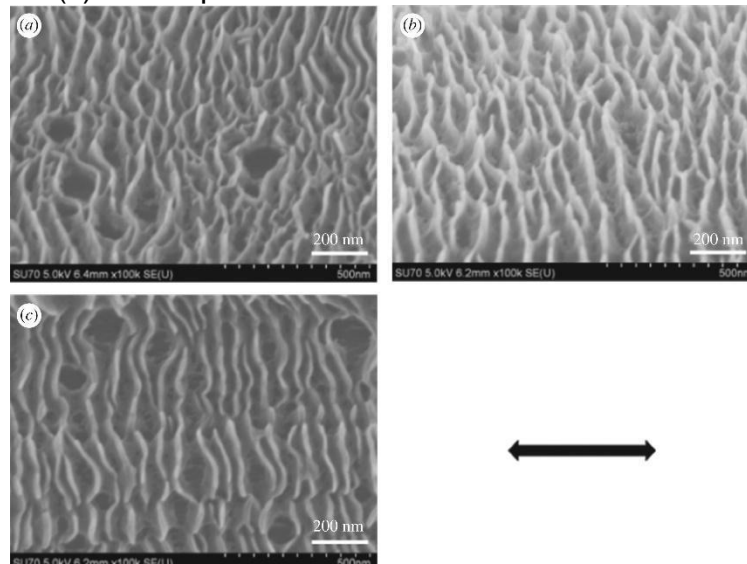
Fonte: Autor (2023).

De um modo geral, a síntese do polietileno é relativamente simples, e implica a utilização do monômero gasoso etileno em um reator sob determinadas condições de temperatura e pressão que irão influenciar na densidade do produto final (Jeremic, 2014). Na produção do PEAD, que foi usado neste trabalho, a polimerização ocorre tipicamente sob baixas pressões e em presença de

catalisadores, como Ziegler-Natta. Estes catalisadores facilitam a formação de cadeias lineares de polietileno com poucas ramificações. O processo resulta em um polímero com maior densidade e cristalinidade em comparação com o PEBD, proporcionando ao PEAD suas características notáveis de resistência à tração e impermeabilidade (Burdett; Eisinger, 2017).

O PEAD, durante a fase de resfriamento, tende a formar regiões cristalinas que são rodeadas por uma região amorfa formada pelo mesmo material, conforme representado na Figura 2 (Miao *et al.*, 2018).

Figura 2 - Micrografias eletrônicas por varredura dos cristais de PEAD (a) 90°C, (b) 100°C e (c) 110°C por 3 horas



Fonte: Miao *et al.* (2018, p. 6).

A fase cristalina apresenta maior densidade e é a principal responsável pela resistência mecânica do material. Já a fase amorfa auxilia na maciez e flexibilidade. Segundo Miao *et al.*, (2018), conforme ilustrado na Figura 2, observa-se que a cristalização do PEAD por 3 horas a diferentes temperaturas de 90, 100 e 110°C resulta em mudanças significativas nas estruturas cristalinas. Especificamente, a cristalização prolongada aumenta as dimensões laterais dos cristais, com o crescimento lateral das cadeias de PEAD se acelerando inicialmente e depois diminuindo com o aumento da temperatura de cristalização. Isso sugere que temperaturas muito altas ou muito baixas não são benéficas para o crescimento lateral dos cristais de PEAD, com a regularidade cristalina diminuindo após 3 horas

de cristalização, refletindo assim na proporção e nas propriedades das fases cristalina e amorfa do material.

### **2.1.1 Tipos de polietileno**

Conforme exposto, a classificação do polietileno se dá de acordo com as condições reacionais, tipo de cadeia e existência de ramificações. O polietileno de baixa densidade (PEBD) é produzido sob alta temperatura e pressão e tem como principal característica a presença de diversas ramificações que impedem o ordenamento das cadeias e fazem com que o grau de cristalinidade seja na faixa de 40 a 60% (Patel, 2017; Silveira, 2012). Possui densidade entre 0,91 e 0,93 g/cm<sup>3</sup> e baixo ponto de fusão (T<sub>m</sub>) entre 110 e 115°C (Coutinho; Mello; Santa Maria, 2003; Patel, 2017; Silveira, 2012; Sarantopoulos; Teixeira, 2017). O PEBD possui cristalitos menores e maior desordem quando comparado ao PEAD, pois suas ramificações não estão inseridas na rede cristalina e possui elevado grau de ramificações curtas e longas ligadas à cadeia principal que se dão devido ao processo de polimerização altamente exotérmico para obtenção dessa classe de material, o que reflete diretamente em suas propriedades (Sarantopoulos; Teixeira, 2017; Zanardi, 2023). Suas cadeias são estendidas com segmentos de 73 átomos de carbono na zona cristalina, ligadas a zona amorfa.

Dentre as propriedades desta classe de polímero tem-se boa tenacidade, excelente resistência ao impacto, flexibilidade, transparência, facilidade no processamento e baixa permeabilidade à água quando comparado aos demais tipos (Coutinho; Mello; Santa Maria, 2003).

O polietileno de alta densidade (PEAD) é polimerizado sob baixa pressão e temperatura moderada, possibilitando empacotamento e alinhamento da estrutura e refletindo diretamente em sua cristalinidade, que tende a ser superior a 90% (Coutinho; Mello; Santa Maria, 2003) e em uma menor quantidade de ramificações em número e comprimento (Jeremic, 2014). Ele apresenta cadeia dobrada com segmentos de aproximadamente 100 átomos de carbono na zona cristalina, ligadas à zona amorfa. Possui densidade entre 0,94 e 0,97 g/cm<sup>3</sup> e ponto de fusão (T<sub>m</sub>) entre 130 e 140°C. Com relação às propriedades, evidencia-se boa rigidez, resistência à tração, média resistência ao impacto e resistência à abrasão.



O polietileno linear de baixa densidade (PELBD) é produzido sob baixa pressão e é um copolímero linear constituído por etileno e uma  $\alpha$ -olefina, sendo este o responsável pelo comprimento da ramificação lateral e, conseqüentemente, pelas características mecânicas do produto final (Sarantopoulos; Teixeira, 2017). O PELBD pode ser produzido por catalisadores do tipo Ziegler- Natta ou metallocênicos e o tipo utilizado irá influenciar diretamente as características do produto final (Patel, 2017; Silveira, 2012).

Possui densidade entre 0,90 e 0,94 g/cm<sup>3</sup> e ponto de fusão entre 120 e 130°C e apresenta menor cristalinidade comparado ao PEAD, melhor resistência ao fissuramento sob tensão e maior resistência ao impacto. Comparado ao PEBD, ele apresenta maior resistência ao cisalhamento e pode ser considerado um material com características intermediárias comparando-o com o PEBD e PEAD, porém é um material de difícil processabilidade, devido a susceptibilidade à fratura, porém apresenta grande participação no mercado devido as propriedades finais passíveis de serem obtidas (Jeremic, 2014; Patel, 2017; Silveira, 2012).

O polietileno de ultra alto massa molar (PEUAMM) é considerado um polietileno de média densidade (aproximadamente 0,93 g/cm<sup>3</sup>), possui poucas ramificações, é semicristalino, sendo o grau de cristalinidade de aproximadamente 45% e elevada massa molar (entre 3.000.000 e 10.000.000 g/mol), podendo apresentar cadeia polimérica até 30 vezes maior que outras classes de polietileno, o que reflete diretamente em sua propriedade reológica. Tal fato impede o processamento desta classe de polietileno pelos métodos convencionais adotados para termoplásticos - injeção, extrusão e sopro – tornando necessário a adoção de técnicas específicas tais como: extrusão RAM ou moldagem por compressão a quente ou a frio, para o processamento (Shen, 2007). Com relação às propriedades, destacam-se alta resistência ao desgaste por abrasão, resistência do fundido, elasticidade, resistência ao intemperismo e baixo coeficiente de atrito.

Já o polietileno de ultrabaixa densidade (PEUBD), possui densidade de aproximadamente 0,825 g/cm<sup>3</sup>, sua cristalinidade é a menor dentre os polietilenos citados e é usualmente utilizado para produção de resinas modificadoras para polímeros com densidades distintas, tais como: PEAD, PEBD e PP. Suas propriedades de destaque são: alta resistência, flexibilidade e boas propriedades ópticas (Hocking, 2005).

Considerando as diversas classes de polietileno e a necessidade de assertividade na seleção do material a ser utilizado para determinada aplicação torna-se oportuno a comparação do desempenho mecânico dos diversos polímeros existentes para facilitar a escolha. Isto posto, estudar as propriedades mecânicas desperta grande interesse científico e tecnológico, pois responde a vários requisitos de aplicação.

## 2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Considerando a aplicação dos polímeros em filmes, tem-se que as propriedades mecânicas dependem da espessura e das características inerentes ao material, a saber: estrutura química e molecular, densidade, massa molar e distribuição, grau de cristalinidade, aditivação, entre outras (Callister Jr.; Rethwisch, 2016). Além disso, a orientação das cadeias poliméricas exerce um forte efeito sobre as propriedades mecânicas do polímero.

Materiais fabricados com PEAD altamente orientado são aproximadamente dez vezes mais resistentes do que os fabricados a partir do polímero não orientado, pois a orientação aumenta o empacotamento das cadeias e conseqüentemente aumenta a rigidez do material. Comparando as propriedades mecânicas do Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) e do Polietileno de Alta Densidade (PEAD), temos que o PEAD apresenta maior resistência a tração, menor permeabilidade e menor transparência (Colombo, 2019). Na Tabela 1, tem-se um comparativo entre as propriedades mecânicas dos polietilenos de baixa, média, alta densidade e ultra alta densidade. Nota-se que há uma relação entre a densidade, a dureza e a resistência à tração, pois quanto maior a densidade maior os valores típicos para os demais ensaios. De modo a analisar as características mecânicas do polietileno, diversos ensaios podem ser aplicados, dentre eles: compressão, flexão, torção e tração, sendo o último o mais comum para o caso de filmes (Coutinho; Mello; Santa Maria, 2003).

Tabela 1 - Comparativo entre propriedades dos PE's

Testes DIN, ASTM	Propriedades	Densidade dos PE's			Peso molecular ultra elevado (PEUAPM)
		Baixa	Média	Alta	
<b>Físicas</b>					
D(53479)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,910-0,925	0,926-0,940	0,941-0,965	0,928-0,941
D(53473)	Absorção de água 24h, 3mm de espessura (%)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
<b>Mecânicas</b>					
D(53455)	Resistência à tração (10 <sup>2</sup> Kgf/cm <sup>2</sup> )	0,4-1,4	0,8-2,4	2,1-3,8	2,8-4,2
D(53455)	Alongamento na ruptura (%)	90/800	50/600	20/1000	200/500
D(53457)	Módulo de flexão (10 <sup>4</sup> Kgf/cm <sup>2</sup> )	0,06-0,5	0,5-1,0	0,7-1,5	0,7-1,2
D256 (ASTM)	Resistência ao impacto (Kg)	Não quebra	—	—	Não quebra
D785 (ASTM)	Dureza Rockwell R	10	15	65	67

Fonte: Coutinho; Mello; Santa Maria (2003, p. 9).

## 2.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

### 2.3.1 Espectroscopia no infravermelho (FTIR)

Espectroscopia é o estudo da interação entre a radiação eletromagnética com a matéria, sendo usualmente utilizada para identificação de compostos orgânicos e inorgânicos (Pacheco, 2022). A Espectroscopia por Infravermelho de Transformada de Fourier (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*, FTIR) identifica diferentes ligações químicas entre átomos por meio das deformações rotacionais e vibracionais, nas quais absorvem energia em determinada frequência de ressonância, conforme características dos átomos objeto do estudo (Souza, 2014).

Essa técnica de caracterização de polímeros é uma poderosa ferramenta utilizada para analisar a estrutura química e funcionalidade dos polímeros. Por meio do FTIR, é possível obter informações sobre as ligações químicas presentes na amostra, identificar grupos funcionais específicos e determinar a composição química do polímero.

A técnica é baseada na absorção de radiação infravermelha pelas moléculas do material, o que resulta em um espectro característico. Ao comparar esse espectro com bancos de dados e espectros de referência, é possível realizar a identificação qualitativa e quantitativa de diferentes componentes poliméricos, bem como monitorar mudanças estruturais decorrentes de processamento, envelhecimento ou degradação. O FTIR é amplamente utilizado na pesquisa e desenvolvimento de

polímeros, controle de qualidade, análise forense e outras aplicações relacionadas à caracterização de materiais poliméricos (Silverstein; Webster; Kiemle, 2017).

### **2.3.2 Reometria capilar - índice de fluidez**

Entende-se por reologia a ciência que estuda as propriedades de deformação e o fluxo da matéria e, considerando que, todos os materiais fluem em tempos distintos com menor ou maior facilidade, é imprescindível o conhecimento do comportamento reológico dos polímeros para a correta seleção (Silva, 2020).

Há diversas técnicas para determinar a reologia de polímeros e, visando comparar o comportamento do polietileno virgem e reciclado (cinza e preto) objeto deste estudo, a técnica escolhida foi a Reometria Capilar a Tensão Constante. Este ensaio é conhecido por índice de fluidez (Melt Flow Index - MFI) e é comumente utilizado pelas petroquímicas e empresas do ramo plástico para controle de qualidade e aplicação adequada da resina. A técnica consiste na medida do fluxo mássico do polímero que escoar através de um capilar padronizado sob condições de temperatura e pressão controladas em determinado intervalo de tempo (Silva, 2020).

O índice de fluidez é expresso em gramas por 10 minutos e fornece informações indiretas sobre a viscosidade e a capacidade de moldagem do polietileno. De maneira geral, amostras com índice de fluidez alto indicam uma maior facilidade de processamento e moldagem, enquanto amostras com índice de fluidez baixo são mais viscosas e podem requerer temperaturas mais elevadas e pressões maiores durante o processamento. Alguns fatores como massa molar, ramificações da cadeia e distribuição dessas propriedades influenciam o índice de fluidez (MFI) do material (Manrich, 2013).

### **2.3.3 Densidade**

Segundo a ASTM D 792 (2013), a densidade de um sólido é uma propriedade usualmente analisada para identificação do material, acompanhamento de alterações físicas em dada amostra, indicar o grau de uniformidade entre lotes, ou ainda, para indicar densidade média de determinado item. Possíveis alterações e/ou

divergências na densidade do material podem estar relacionadas a diferenças na cristalinidade, perda de plastificante, histórico térmico, porosidade e composição da amostra (ASTM D 3418, 2012). Dentre as metodologias existentes para o ensaio de densidade, tem-se o método de deslocamento, também conhecido como método de imersão.

Nesse método, o objeto de teste é imerso em um líquido de referência de densidade conhecida, sendo que este não deve dissolver e/ou interagir com a amostra a ser avaliada, porém deverá molhá-la e possuir gravidade específica inferior à amostra (Sarantopoulos; Teixeira, 2017), então a diferença de volume resultante é medida. O procedimento consiste em medir o volume do objeto imerso no líquido e, em seguida, subtrair o volume do líquido deslocado pelo objeto. A diferença de volume é diretamente relacionada ao volume do objeto, permitindo o cálculo da sua densidade relativa.

Para realizar essa medida de forma precisa, é essencial garantir que o objeto esteja completamente imerso no líquido, evitando bolhas de ar ou espaços vazios.

#### **2.3.4 Calorimetria exploratória diferencial (DSC) e termogravimetria (TGA)**

Entende-se por análise térmica os métodos que estudam a relação entre determinada propriedade da amostra em função da temperatura, sob condições controladas (Brown, 2008). As análises térmicas Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TGA) são técnicas comumente utilizadas para caracterizar amostras de polietileno, pois proporcionam dados importantes sobre as mudanças de fase, entalpia e capacidade calorífica, auxiliando na compreensão das propriedades térmicas e seu comportamento.

O ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial baseia-se na exposição de duas amostras – *referência e objeto de estudo* – a condições programadas de temperatura, de modo a obter como resultado as diferenças térmicas entre os materiais (Gonçalves, 2021).

Segundo Canevarolo Jr (2006), os instrumentos de análise de DSC podem ser divididos em: DSC – Fluxo de calor e DSC – Compensação de potência, sendo o último utilizado no presente estudo. No DSC por Compensação de potência, tem-se um calorímetro que mede a energia envolvida nos eventos térmicos. O princípio de

funcionamento do equipamento pressupõe que amostra e referência sejam mantidas em condições isotérmicas (sistema fechado), assim, se a amostra sofre alterações por algum evento endotérmico ou exotérmico, o equipamento detecta a diferença de temperatura entre ela e a referência, modificando a potência de entrada de um dos fornos de modo a igualar prontamente a temperatura de ambos. Por meio do ensaio de DSC é possível encontrar a transição vítrea, fusão e cristalização do material.

Define-se Termogravimetria, a técnica na qual a mudança de massa é medida em função da temperatura sob programação controlada (Coats; Redfern, 1963). O ensaio Termogravimétrico (TGA) é empregado para avaliar a estabilidade térmica do material, fornecendo informações sobre a degradação e perda de massa em diferentes faixas de temperatura. Por meio da TGA, é possível determinar a temperatura de decomposição, estimar a quantidade de aditivos presentes e identificar a presença de impurezas.

### **2.3.5 Temperatura de deflexão térmica (HDT) e temperatura de amolecimento (VICAT)**

A determinação da temperatura de amolecimento e deformação de um polímero usualmente é realizada pela técnica VICAT. Essa técnica é amplamente utilizada na indústria de plásticos e polímeros para avaliar a resistência térmica de materiais e sua capacidade de suportar condições de temperatura elevada sem perder suas propriedades mecânicas.

O teste VICAT envolve o uso de um penetrador em forma de cone ou agulha, que é aplicado sobre a superfície do polímero aquecido. A temperatura na qual ocorre uma penetração específica no polímero é medida e registrada como a temperatura de amolecimento VICAT. Essa informação é importante para projetar produtos e selecionar materiais adequados para aplicações que envolvam temperaturas elevadas (Gonzalez, 2020).

A técnica de temperatura de deflexão térmica (HDT) aplicada a materiais poliméricos é um método utilizado para avaliar a resistência térmica e a estabilidade dimensional dos polímeros sob carga. Ela mede a temperatura na qual uma barra de teste padrão, submetida a uma carga específica, sofre uma deflexão determinada. O teste HDT fornece informações valiosas sobre a capacidade de um polímero de

resistir a temperaturas elevadas sem sofrer deformação significativa ou alterações dimensionais. É amplamente utilizado em setores como automotivo, aeroespacial e eletrônico, nos quais os materiais podem ser expostos a altas temperaturas durante suas aplicações. O valor de HDT auxilia na seleção de materiais, no projeto de produtos e no controle de qualidade, garantindo que o polímero escolhido possa atender aos critérios de desempenho térmico exigidos (Gonzalez, 2020).

### **2.3.6 Ensaio de tração uniaxial**

O ensaio de tração uniaxial é comumente utilizado para avaliar os parâmetros referentes às propriedades mecânicas dos materiais. A resistência à tração é a capacidade do material de resistir à aplicação de forças de tração antes de se romper. Ela é medida aplicando-se uma carga gradualmente crescente ao material até que ocorra a ruptura. A força máxima suportada pelo material, conhecida como tensão máxima, é registrada durante o ensaio (Callister Jr.; Rethwisch, 2016).

Além da resistência à tração, o ensaio mede a capacidade do material de deformar-se antes de se romper. Ele fornece informações sobre a flexibilidade e a ductilidade do material. O alongamento é expresso como a porcentagem de extensão em relação ao comprimento original do corpo de prova. Durante o ensaio, a extensão é registrada em diferentes pontos de aplicação da carga, permitindo a análise do comportamento do material sob tensão.

O ensaio permite também a determinação do módulo de Young, associado à rigidez ou a resistência do material à deformação elástica (Callister Jr.; Rethwisch, 2016; Canevarolo Jr., 2006).

Com base nesses dados, é possível determinar parâmetros importantes, como a resistência à tração, o módulo de elasticidade e a deformação do material. Essas informações são fundamentais para projetar produtos e selecionar materiais adequados para diversas aplicações, como embalagens, componentes automotivos e dispositivos médicos. O ensaio de tração uniaxial é essencial para garantir a segurança e o desempenho dos materiais poliméricos em diferentes condições de uso (Smith, 2018).

## 2.4 TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE POLÍMEROS

A crescente utilização industrial de polímeros tem levantado uma nova questão: "como lidar com os resíduos gerados por esses materiais?", uma vez que a maioria deles não se decompõe de forma rápida e segura na natureza. É possível destacar que a redução do impacto ambiental do resíduo plástico será uma das principais preocupações das próximas décadas, e diversas prioridades de pesquisa surgem nesse contexto, como o desenvolvimento de plásticos biodegradáveis, a geração de energia por meio da reciclagem de resíduos poliméricos, e o estudo de polímeros de alto desempenho com potencial para reciclagem, principalmente no setor agrícola (Geyer; Jambeck; Lavanda, 2017).

Apesar dos avanços alcançados na reciclagem e na produção de plásticos de alta performance, ainda persistem questões fundamentais que precisam ser abordadas, como a produção de gás metano nos aterros sanitários e a necessidade de destinação adequada do plástico no meio ambiente. Atualmente, há estudos que propõem a produção de plásticos biodegradáveis a partir de resíduos orgânicos, além de tecnologias direcionadas para a resolução desses desafios ambientais. Entre essas tecnologias, destacam-se duas desenvolvidas no Japão e na Bélgica (Syntal) que deram origem ao conceito de "madeira plástica ou biossintética". Esse processo permite reutilizar resíduos poliméricos de diferentes classes, sendo os usuais: polipropileno (PP), polietileno de alta densidade (PEAD), cloreto de polivinila (PVC), acrilonitrila-butadieno estireno (ABS), misturados com resíduos da fibra da biomassa (madeira, bambu e outros), podendo ser amplamente utilizados para móveis de decoração, indústria automobilística, alguns tipos de embalagens e construções e para a indústria aeroespacial devido à excelente estabilidade dimensional, alta durabilidade, fácil processamento, baixo peso e resistência a corrosão (Xiao *et al.*, 2023).

A reciclagem de polímeros levando em conta o quesito ambiental não é trivial pois requer tecnologia avançada. Assim, o desenvolvimento de técnicas para a reciclagem de polímeros, no sentido de agregar valor comercial aos produtos e/ou gerar novos materiais com melhor relação custo/benefício, são fatores importantes para viabilizar a reciclagem (Camargo, 2019). A reciclagem comumente utilizada



pode ser classificada em quatro categorias: primária, secundária, terciária e quaternária (Gonçalves, 2022).

A reciclagem primária tem como base os resíduos poliméricos industriais, onde por meio de metodologias padrão são obtidos produtos com características equivalentes àquelas dos produtos originais produzidos com polímeros virgens; por exemplo, aparas que são novamente introduzidas no processamento.

A reciclagem secundária é realizada com resíduos sólidos urbanos por meio de um processo - ou uma combinação - de processos que transformam os materiais em produtos com exigência inferior em propriedades térmicas e mecânicas. A reciclagem terciária é um processo que requer certa tecnologia, pois gera insumos químicos ou combustíveis a partir de resíduos poliméricos. Para isso, faz-se necessário o tratamento dos distintos tipos de plásticos, reduzindo custos de pré-tratamento, custos de coleta e seleção. Por fim, na reciclagem quaternária, o processo de recuperação de energia de resíduos poliméricos é feito por incineração controlada (Gonçalves, 2022).

Diz-se também reciclagem primária e secundária, a reciclagem mecânica ou física, sendo que a primária faz uso do polímero pós-industrial e a secundária do pós consumo. Além disso, entende-se por reciclagem terciária, a reciclagem química e a quaternária, reciclagem energética (Silva, 2021).

A reciclagem mecânica é a realizada em maior escala no Brasil, pois possibilita a imediata redução do volume e da massa do descarte, além de não alterar a estrutura química do material a ser reprocessado, porém possui algumas limitações e não permite o tratamento de todos os tipos de materiais, sendo um ponto passível de estudo para desenvolver alternativas futuras (Avelino, 2020).

No processo em questão, o polímero passará pela etapa de seleção, moagem, lavagem, secagem, aglutinação e reprocessamento (Assis, 2020; Ntarelli *et al.*, 2022), sendo os pellets o produto da reciclagem mecânica. Estes podem ser incorporados novamente ao processo para obtenção de novos produtos e, alguns tipos de termoplásticos, ajustam-se bem a este processo, preservando as propriedades físicas, químicas e mecânicas da resina virgem, desde que não haja mistura de polímeros (Camargo, 2019).

O polímero reciclado é heterogêneo devido à degradação por cisalhamento, termoxidativa e por hidrólise sofrida durante o processamento, causando alterações

nas propriedades do produto acabado, principalmente devido a alteração no tamanho das cadeias (Fragoso, 2019).

Neste contexto, de modo a obter melhora em determinada característica do produto e/ou processo podem ser incorporados aditivos, sendo comumente utilizados: antioxidante, antiestático, retardante de chama, absorvedor de luz ultravioleta, cargas e reforços (Prudêncio, 2021). Além disso, estudos indicam a incorporação de resinas virgens do mesmo tipo de polímero ou adição de outros aditivos compatibilizantes para melhoria de alguns aspectos (Assis, 2020).

Levando em conta as outras opções de reciclagem empregadas, tem-se que indústrias de ponta apostam na reciclagem química. Ela ocorre através de processos de despolimerização por solvólise (hidrólise, alcoólise, amilose), por métodos térmicos (pirólise, gaseificação, hidrogenação) ou ainda métodos térmicos/catalíticos (pirólise e a utilização de catalisadores seletivos). Estes convertem os resíduos poliméricos em moléculas individuais de tamanho reduzido (monômeros), possibilitando o reuso na fabricação de novos produtos petroquímicos e polímeros (Avelino, 2020).

Dentre os métodos existentes, tem-se que o processo usual é a hidrogenação, pois promove a quebra dos elementos dos polímeros, possibilitando a formação de produtos saturados com a ausência de partículas líquidas, sem que haja necessidade de tratamentos adicionais, sendo o custo elevado a principal desvantagem da referida alternativa (Avelino, 2020).

Ainda em termos de reciclagem quaternária, tem-se a energética, que consiste na incineração do resíduo plástico de modo a obter geração de energia através da combustão e é empregado geralmente para resíduos complexos, tais como termorrígidos, elastômeros e compósitos (Santos, 2017).

Neste contexto, considerando a necessidade de reciclagem de resíduos em grande quantidade e adoção de opção de relevância sustentável, tem-se que a reciclagem mecânica é considerado método estratégico, pois apresenta impacto ambiental reduzido devido a menor emissão de gases que refletem no aquecimento global; apresenta uma redução no consumo de energia comparada a outros materiais e oferece expansão do ciclo de vida dos materiais (Branco, 2020).

## 2.5 CULTIVO PROTEGIDO

O uso de plásticos aumenta de forma expressiva e contínua em diversos segmentos e no ramo agrícola no Brasil não é diferente. O agronegócio é uma das principais atividades econômicas do Brasil e no ano de 2022 representou aproximadamente 24,8% do PIB do país, sendo fonte geradora de emprego e renda (CEPEA, 2023). Deste modo, os plásticos vêm sendo trabalhados a fim de atender as necessidades agrícolas, assim como acontece no setor industrial, pois são inúmeros os benefícios que o plástico proporciona, já que o uso deste material é visto como uma solução inovadora que favorece a produtividade, reduz custos de produção e apresenta grande apelo sustentável, principalmente se alinhar-se a sua produção e reciclagem (Dranski *et al.*, 2013).

No ramo agrícola, a evolução da tecnologia - bem como o conhecimento das estruturas básicas dos materiais - possibilitou o uso abrangente do plástico, tendo em vista as diversas vantagens do material frente às metodologias usuais empregadas, sendo os diferenciais de maior destaque: o baixo custo (inclusive de fabricação), peso reduzido do produto, flexibilidade, transparência, resistência química e isolamento elétrico (Ortega, 2021).

Neste contexto, surge o termo “Plasticultura” empregado mundialmente para designar o uso do plástico na agricultura, de modo a obter ambientes favoráveis para a produção de diversos itens, trazendo à tona o cultivo protegido (Botton, 2019).

Entende-se por cultivo protegido a técnica que possibilita o controle de variáveis climáticas como temperatura, umidade do ar, radiação solar e vento. Com o uso de coberturas apropriadas, observa-se um ganho de eficiência produtiva, além de reduzir o efeito da sazonalidade, favorecendo a oferta mais equilibrada ao longo dos meses. Com a adoção dessa prática, observa-se uma redução nas necessidades hídricas, pois reduz-se o fenômeno de evapotranspiração, proteção física contra condições climáticas adversas, controle do vento e da radiação solar, melhora nas condições de trabalho para os funcionários, redução do uso de fertilizantes e redução do êxodo rural gerando empregos e maior rentabilidade de empresas do ramo agrícola (Botton, 2019).

Dentre os polímeros com maior empregabilidade no ramo agrícola, destacam-se o polietileno (PE), polipropileno (PP), copolímero de etileno e acetato de vinila (EVA) e policloreto de vinila (PVC). As aplicações de maior relevância para o setor abrangem os sistemas de irrigação e a aplicação de filmes plásticos e/ou malhas de sombreamento para cobertura e proteção dos cultivos (Barrera-Martinez, 2022).

Segundo Aguiar *et al.* (2004), os filmes e malhas plásticas voltados para a proteção de cultivo e de produção são bastante técnicos e suas formulações são específicas, sendo normalmente incorporados de aditivos químicos de modo a alcançar um conjunto de propriedades necessárias para o uso que se destinam. Em geral, em suas formulações são incorporados antioxidantes, refletores e difusores de luz, antitérmicos e inseticidas.

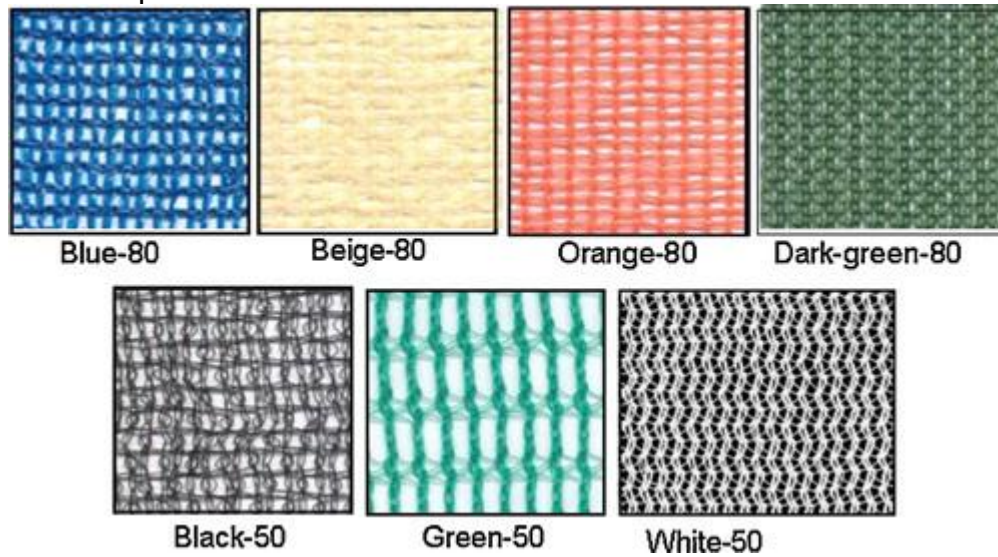
Devido a sua utilização de modo contínuo, foi necessária a elaboração de um conjunto de normas para Filmes plásticos agrícolas para cultivo protegido (ABNT NBR 15560-1, 15560-2 e 15560-3); que tratam de características físicas e mecânicas assim como dos métodos de ensaio para filmes usados como cobertura de estufas no cultivo protegido, porém evidencia-se que a maioria das indústrias não aderiram a tal normativa.

É válido expor que o objetivo inicial do uso dos filmes plásticos no ramo agrícola era concebido para proteger a agricultura e atender a necessidade de controle de fatores como incidência de sol, pragas e controle de umidade. Hoje tem finalidades que vão além da proteção e garantem o sucesso do negócio desde que manejados de maneira adequada (Botton, 2019; Aguiar *et al.*, 2004).

## 2.6 MALHAS DE SOMBREAMENTO

Entende-se por malhas de sombreamento agrícola e/ou tela de sombreamento, o tecido obtido por meio do entrelaçamento de fios e/ou fitas de polietileno – obtidas por meio de filmes – pelo sistema de malharia de urdume ou tecelagem plana, conforme ilustrado na Figura 3, tendo como intuito principal a proteção física do cultivo e manejo ambiental e da radiação.

Figura 3 – Exemplos de malhas de sombreamento



Fonte: Al-Helal; Abdel-Ghany (2010, p.126).

As malhas podem ser encontradas em diferentes colorações e percentuais de sombreamento, sendo as usuais na coloração preta, vermelha, azul e/ou branca e preta. A diversidade de colorações representa uma evolução no setor agrícola, tendo em vista as alterações espectrais passíveis devido a coloração da tela, que interferem diretamente nas características e qualidade do cultivo protegido.

As malhas de sombreamento podem ser empregadas para fins agrícolas, para proteção física e/ou melhoria na qualidade do cultivo ou para fins urbanos, para proteção de carros e outros bens, sendo necessária a substituição destas após determinado período de uso, para garantia do cumprimento dos requisitos. Isto posto, torna-se oportuno analisar a viabilidade do uso do polietileno reciclado para fabricação desses materiais de modo a minimizar o impacto com o descarte dos resíduos no meio ambiente. Para tanto, faz-se necessário estudar o impacto do uso do material reciclado nas propriedades estruturais, reológicas e mecânicas, pois é imprescindível que as malhas de sombreamento apresentem os padrões de qualidade exigidos pelo mercado (Al-Helal; Abdel-Ghany, 2010).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

O polietileno de alta densidade virgem e os reciclados, cujo detalhamento da definição encontra-se no Quadro 1, foram fornecidos por uma empresa do ramo agrícola, que produz malhas de sombreamento.

O polietileno reciclado foi produzido a partir da reciclagem primária das aparas geradas no processo de extrusão e fabricação de malhas de sombreamento, bem como dos materiais fora do padrão de qualidade determinados pela empresa.

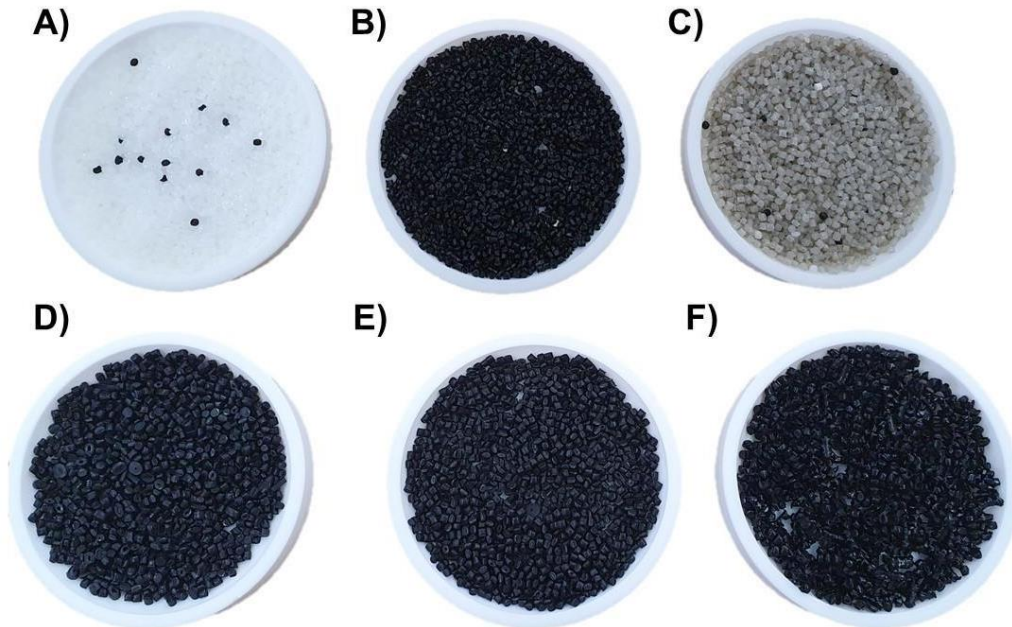
Quadro 1 - Definição do tipo de material utilizado no estudo

<b>Material</b>	<b>Definição do material</b>
<i>Polietileno de alta densidade virgem</i>	Aquele recebido e extrudado diretamente da petroquímica, sem qualquer processamento adicional (Figura 4 A)
<i>Polietileno reciclado preto</i>	Aquele obtido pelo processo de reciclagem primária das malhas de sombreamento da cor preta - com formulações premium (com maior concentração de aditivos) e formulações base (concentração reduzida de aditivos) (Figura 4 B)
<i>Polietileno reciclado cinza</i>	Aquele obtido pelo processo de reciclagem primária de malhas de sombreamento distintas (Figura 4 C)

Fonte: Autor (2023).

É válido expor que, para a realização do estudo os componentes da formulação foram completamente misturados com o polímero através do processo de extrusão, onde obteve-se pellets das amostras de coloração preta para todas as composições (Figura 4 A, B,C, D, E e F).

Figura 4 - Imagens dos pellets de polietileno A) virgem com aditivos; B) preto com aditivos; C) cinza com aditivos, antes do processo de extrusão, e D) virgem com aditivos; E) preto com aditivos; F) cinza com aditivos, depois do processo de extrusão

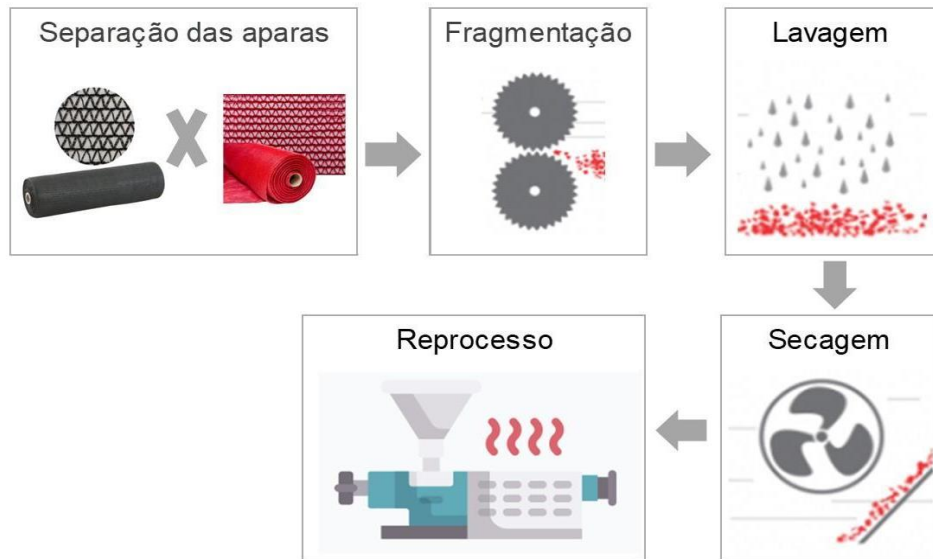


Fonte: Autor (2022).

### 3.2 OBTENÇÃO DOS *PELLETS* DE POLIETILENO RECICLADO

Para obtenção dos pellets de polietileno reciclado foram utilizadas as aparas do processo de produção das malhas de sombreamento agrícola, preta e branca. Para isso, utilizou-se o processo denominado de reciclagem mecânica, contemplando as seguintes etapas: separação do resíduo polimérico (aparas), fragmentação, lavagem, secagem, reprocessamento e, finalmente, a transformação do polímero em produto acabado, representadas na Figura 5.

Figura 5 - Representação das etapas da produção de pellets do polietileno reciclado



Fonte: Adaptado de Movimento Plástico Transforma (2020).

A reciclagem ocorreu na cidade de Leme, nas instalações de um parceiro da empresa do ramo agrícola.

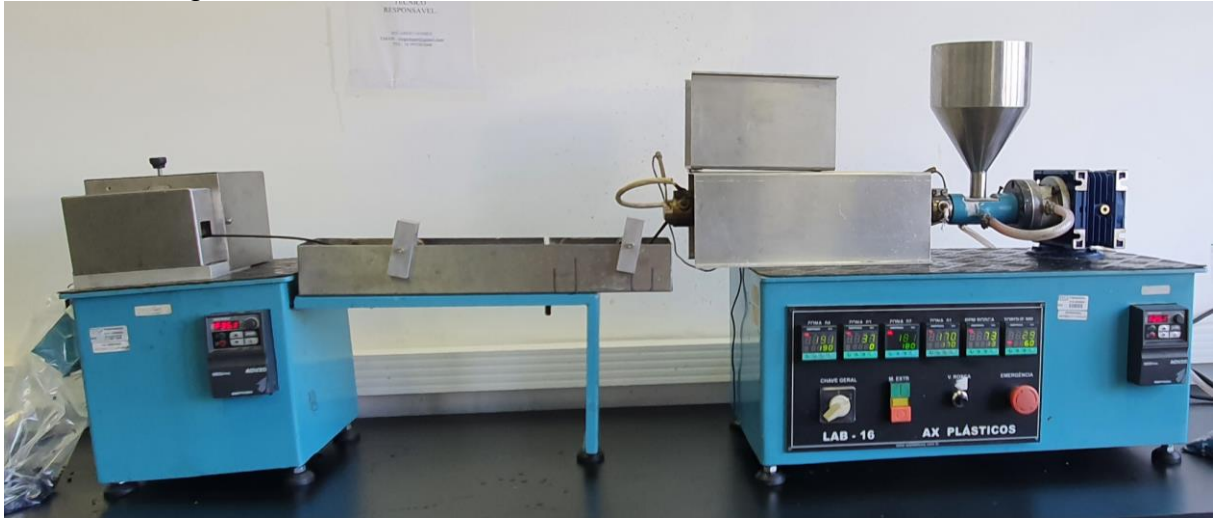
### 3.3 OBTENÇÃO DOS *PELLETS* COM FORMULAÇÃO USUAL PARA FINS AGRÍCOLA

De modo a obter uma base sólida para comparativo, utilizou-se para obtenção dos *pellets*, a formulação usual para produtos agrícolas, alterando somente o tipo de polietileno (virgem ou reciclado) e mantendo a dosagem de aditivos e matéria-prima.

Para isso, pesou-se as quantidades necessárias de polietileno e de aditivos que conferem cor, auxiliam no processo de extrusão, protegem contra radiação ultravioleta e a oxidação, em balança semianalítica BK 400, marca Gehaka. Em seguida, fez-se os ajustes nos perfis de temperatura da extrusora, marca AX Plásticos (Figura 6), como descrito na Tabela 2. Para isso, foram considerados os parâmetros usuais para polietileno de alta densidade.



Figura 6 - Imagem da extrusora utilizada nos ensaios, localizada no departamento de Engenharia de materiais da USP São Carlos



Fonte: Autor (2022).

Tabela 2 - Perfis de temperatura e parâmetros de processo na extrusora

Item	Parâmetro de processo		
	PE virgem	PE reciclado preto	PE reciclado cinza
Temperatura da zona 1	170°C	169°C	170°C
Temperatura da zona 2	180°C	181°C	181°C
Temperatura da zona 3	193°C	191°C	186°C
Rotação por minuto (RPM)	73	73	73

Fonte: Autor (2022).

Os *pellets* dos materiais previamente pesados foram misturados manualmente e foi realizada a alimentação do funil único da extrusora com a mistura de polietileno virgem e aditivos e iniciou-se o processo de extrusão. Em seguida, o material foi fundido e conformado no formato de filamento contínuo ("macarrão"), passou pela calha de resfriamento e foi fracionado no peletizador, de modo a obter os pellets para posterior injeção e confecção dos corpos de prova do tipo gravatinha tipo I (Figura 7).

Os *pellets* obtidos foram acondicionados em caixas de alumínio e levados para a estufa de secagem durante 24 horas, em ambiente devidamente controlado ( $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ), com circulação e renovação de ar, modelo AL 102/900, marca American Lab.

Figura 7 - Fluxograma do processo de extrusão dos corpos de prova



Fonte: Autor (2023).

### 3.4 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para obtenção dos corpos de prova gravatinha tipo I foi utilizada a injetora marca Battenfeld Plus 35, do Laboratório de Engenharia de Materiais da USP, campus de São Carlos (Figura 8).

Figura 8 - Imagem da Injetora Battenfeld Plus 35 utilizada localizada no departamento de Engenharia de materiais da USP São Carlos



Fonte: Autor (2022).

Após a devida secagem dos *pellets*, iniciou-se a preparação da injetora acoplado o molde tipo gravatinha na saída da injetora, bem como realizando os

ajustes de parâmetros de processo. Para isso, utilizou-se os parâmetros usuais para polietileno de alta densidade, expostos na Tabela 3.

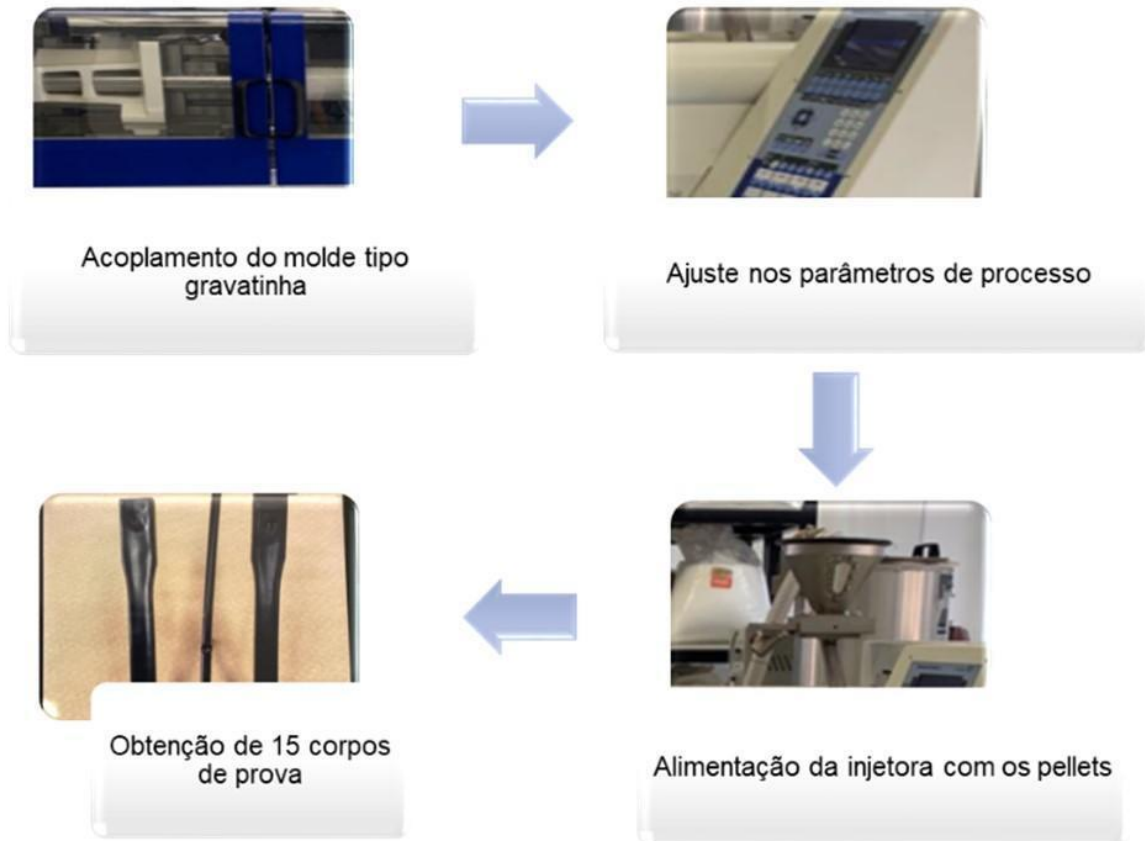
Tabela 3 - Perfis de temperatura e parâmetros de processo injetora

Item	Parâmetro de processo
Temperatura da zona 0	160°C
Temperatura da zona 1	160°C
Temperatura da zona 2	160°C
Temperatura do molde	40°C
Pressão de injeção	120 bar
Pressão de empacotamento P1, P2 e P3	25 bar
Tempo de empacotamento T1	0,5 segundo
Tempo de empacotamento T2	1,0 segundo
Tempo de empacotamento T3	1,5 segundos
Velocidade de injeção V1	50%
Velocidade de injeção V2	50%
Velocidade de injeção V3	25%
Velocidade de injeção V4	15%
Tempo de injeção	2 segundos
Tempo de resfriamento	9,5 segundos

Fonte: Autor (2022).

Após a preparação da injetora, iniciou-se o abastecimento com os *pellets* produzidos a partir de polietileno virgem e aditivos, de modo a obter 15 (quinze) corpos de prova do tipo gravatinha (Figura 9). O processo foi repetido para a obtenção dos corpos de prova utilizando os *pellets* produzidos a partir do polietileno reciclado preto e aditivos e, polietileno reciclado cinza e aditivos.

Figura 9 - Fluxograma do processo de injeção dos corpos de prova



Fonte: Autor (2023).

### 3.5 CARACTERIZAÇÕES

#### 3.5.1 Espectroscopia no infravermelho (FTIR)

Para a caracterização e identificação dos grupamentos químicos das amostras de polietileno, foi utilizado o ensaio preconizado na norma ASTM E 1252 *Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis*. Para isso, utilizou-se o espectrofotômetro de infravermelho (FTIR) por Reflectância Total Atenuada (ATR), modelo Spectrum 100 e o acessório Universal ATR Sampling Accessory, da marca Perkin Elmer, no Laboratório de Engenharia de Materiais da USP, campus de São Carlos.

O acessório em questão possui um cristal de diamante com um ângulo nominal incidente de 45°, na qual o feixe de luz infravermelho é incidido através do cristal na forma que reflete, produzindo reflexos internos na superfície da amostra, que são devidamente registrados para posterior leitura. O banco de dados disponível

no equipamento e no campus da USP (Figura 10) possibilitou a análise e interpretação dos dados gerados.

Figura 10 - Imagem do equipamento Spectrum 100 para o ensaio de FTIR, localizado no departamento de Engenharia de materiais da USP São Carlos



Fonte: Autor (2022).

O ensaio foi iniciado com a adição de uma pequena amostra do *pellet* de polietileno sob o cristal do equipamento, com o uso de uma pinça metálica, e, em seguida, posicionou-se o acessório para a realização da varredura na amostra. O ensaio foi feito por meio de 32 varreduras, possibilitando análise nas faixas de comprimento de onda de  $4000$  a  $550\text{ cm}^{-1}$  (Figura 11), com o intuito de comparar a composição química das amostras.

Figura 11 - Fluxograma do ensaio FTIR



Fonte: Autor (2023).

### 3.5.2 Reologia capilar - índice de fluidez

O índice de fluidez (g/10min) das amostras foi determinado com o auxílio do peso de 2,16 kg e na temperatura de  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ , seguindo os procedimentos

estabelecidos pela norma ASTM D 1238 (ASTM D 1238, 2010). Os ensaios foram realizados utilizando o equipamento MI-2, marca DP Union (Figura 12), no Laboratório de Engenharia de Materiais da USP, campus de São Carlos. Foi utilizada uma matriz metálica cilíndrica, que representa o capilar por onde o polímero fundido escoava, com diâmetro do capilar igual a  $2 \pm 0,01$  mm.

Figura 12 - Imagem do Plastômetro MI-2, localizada no departamento de Engenharia de materiais da USP São Carlos



Fonte: Autor (2023).

Iniciou-se o ensaio preenchendo o capilar com *pellet* de polietileno virgem e aditivos. Em seguida, o material foi aquecido, fundido e extrudado e um espécime foi cortado e pesado (Figura 13). Repetiu-se o procedimento acima para os demais objetos de estudo (reciclado preto e reciclado cinza). Em seguida, de modo a encontrar o Índice de Fluidez de Massa (MFI), utilizou-se a equação 1:

$$\text{MFI} = M \text{ (g)} \times k \div T_c \text{ (s)} * 10 \text{ (s)} \quad (1)$$

Em que:

M: massa do pellet

$T_c$ : tempo de corte

k: constante equivalente a 600, referente a conversão do tempo de ensaio



Figura 13 - Fluxograma do ensaio de Índice de fluidez



Fonte: Autor (2023).

### 3.5.3 Densidade

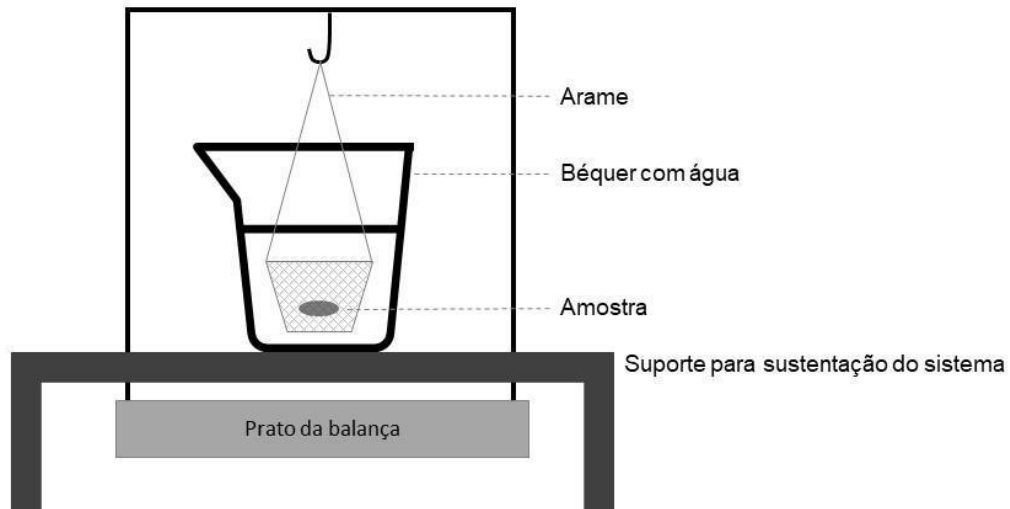
Visando comparar diferenças significativas devido às composições das amostras - principalmente no que tange o material reciclado - fez-se o ensaio de densidade, conforme preconizado na norma ASTM D 792 *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics*, método B - Método do Deslocamento para plásticos em outros líquidos.

O líquido de imersão utilizado para o ensaio foi o álcool isopropílico, com densidade conhecida de  $0,786 \text{ g/cm}^3$ . A avaliação foi realizada sob condições controladas de temperatura e umidade relativa, sendo, respectivamente,  $23^\circ\text{C}$  (vinte e três graus Celsius) e 52% (cinquenta e dois por cento).

Utilizou-se a balança de precisão modelo AY220, marca Shimadzu, disponível no laboratório parceiro, situado em Jacutinga-MG. O corpo de prova foi preso em um arame fino fixado ao gancho acima do prato da balança, de modo a permitir que o

mesmo fique 2,5 cm suspenso, como ilustra a Figura 14. Os corpos de prova foram cortados com aproximadamente 2,5 cm foram pesados dentro do béquer seco. Em seguida, adicionou-se o álcool isopropílico no béquer e realizou-se nova pesagem. O ensaio foi realizado em triplicata.

Figura 14 - Ilustração da base para testes de densidade utilizando uma balança de precisão



Fonte: Adaptado de Sarantopoulos; Teixeira (2023).

### 3.5.4 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

Neste trabalho, a fim de entender as diferenças térmicas entre as amostras de polietileno virgem e reciclado, iniciou-se com o ensaio de DSC.

Para a caracterização térmica foram utilizados os equipamentos DSC 8000 Differential Scanning Calorimeter e Intracooler 2 Colling Accessory, ambos da marca Perkin Elmer, do Laboratório de Engenharia de Materiais da USP, campus de São Carlos (Figura 15). O equipamento foi parametrizado para aquecimento e, posteriormente, resfriamento de  $-70^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$ .



Figura 15 - Imagem do equipamento DSC 8000 e Intracooler 2, do departamento de Engenharia de materiais da USP São Carlos

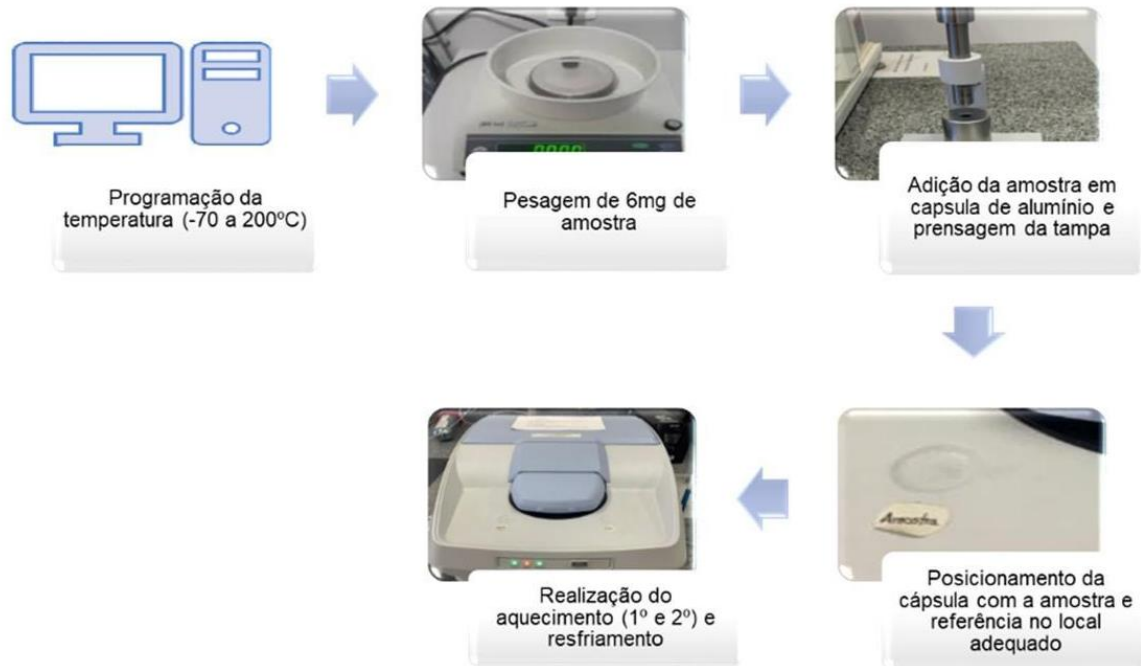


Fonte: Autor (2022).

Para a realização dos ensaios, pesou-se 6 (seis) miligramas das amostras e acondicionou-as nas cápsulas de alumínio. Em seguida, a cápsula foi fechada com tampa e prensada, de modo a aumentar o contato térmico entre a amostra.

O ensaio foi iniciado com o 1º aquecimento, de modo a apagar o histórico térmico da amostra a taxa de temperatura de  $-70^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$ . Em seguida, fez-se o resfriamento e, por fim, o 2º aquecimento na mesma taxa empregada ( $-70^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$ ). A taxa utilizada para estudo foi  $10^{\circ}\text{C}/\text{minutos}$ , usualmente adotada para polímeros (Figura 16).

Figura 16 - Fluxograma do ensaio de DSC



Fonte: Autor (2023).

### 3.5.5 Análise termogravimétrica (TGA)

Para avaliar a variação de massa em função da temperatura, fez-se o ensaio de Termogravimetria (TGA), no equipamento Pyris 1 TGA, utilizando panela de alumínio modelo 0290041 para a amostra de polietileno, ambos da marca Perkin Elmer disponíveis no Laboratório de Engenharia de Materiais da USP, campus São Carlos (Figura 17). Para a realização do ensaio, amostras de polietileno virgem, reciclado preto e reciclado cinza pesando 4,4 mg, 4,5 mg e 4,8 mg, respectivamente foram colocadas na pastilha de platina e prensadas com 5 (cinco) toneladas na prensa da marca Specac.

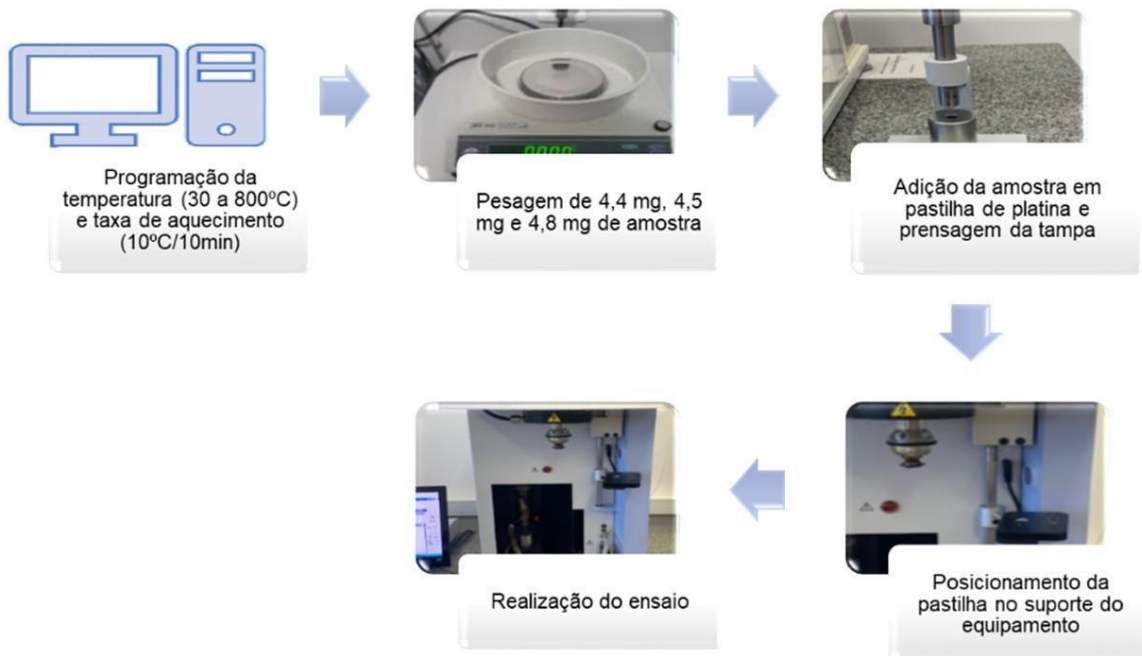
A programação da temperatura foi de 30 a 800°C em uma taxa de aquecimento de 10°C/minutos, sendo nitrogênio a atmosfera adotada para o ensaio. As demais condições para a realização dos ensaios de TGA encontram-se na Figura 18.

Figura 17 - Imagem do equipamento Pyris 1 TGA, do departamento de Engenharia de materiais da USP São Carlos



Fonte: Autor (2022).

Figura 18 - Fluxograma do ensaio de TGA



Fonte: Autor (2023).

### 3.5.6 Temperatura de deflexão térmica (HDT) e temperatura de amolecimento (VICAT)

Os ensaios VICAT e HDT foram realizados no equipamento HDT 3 VICAT, marca CEAST, disponível no Laboratório de Engenharia de Materiais da USP, campus de São Carlos. Para isso, foi utilizado o ensaio preconizado na norma ISO 75-1 *Plastics - Determination of temperature of deflection under load* (Figura 19).

Figura 19 - Imagem do equipamento HDT 3 VICAT para o ensaio de HDT e VICAT, localizado no departamento de Engenharia de materiais da USP São Carlos



Fonte: Autor (2023).

Para o ensaio HDT, foram ensaiados 3 corpos de prova de cada objeto de estudo sobre os quais foi aplicado um esforço de 1820 kPa, sob aquecimento em banho de óleo de silicone a uma taxa de 120°C (+10°C/hora), sendo a temperatura máxima para o ensaio 250°C. As amostras foram expostas ao teste pelo lado plano (*flatwise*) e pelo lado estreito (*edgewise*), possibilitando o entendimento da deformação dos materiais sob tensão pré-estabelecida.

Já no ensaio VICAT os corpos de prova foram expostos à carga constante de 10N, de modo a alcançar a tensão de flexão de 0,45mm (+ 0,03), penetrando 1mm de profundidade cada amostra por meio de um indentador.

### 3.5.7 Ensaio de tração uniaxial

Para a análise da resistência mecânica das amostras foi utilizado o Equipamento de Ensaio Universal 5969, com célula de carga de 5KN, marca Instron, no Laboratório de Engenharia de Materiais da USP, campus de São Carlos (Figura 20).

Figura 20 - Imagem do equipamento de ensaio universal Instron 5969, localizado no departamento de Engenharia de materiais da USP São Carlos



Fonte: Autor (2022).

O equipamento foi devidamente parametrizado com a distância da garra de 115 mm, bem como velocidade de ensaio em 50 mm/min, conforme preconizado na ASTM D 638. O corpo de prova do tipo I foi fixado entre as garras e foi acionado a pré-carga automática, para posterior início do ensaio. O ensaio foi realizado em cinco corpos de prova e teve início com as amostras confeccionadas a partir da formulação padrão (polietileno virgem).

## 4 RESULTADOS

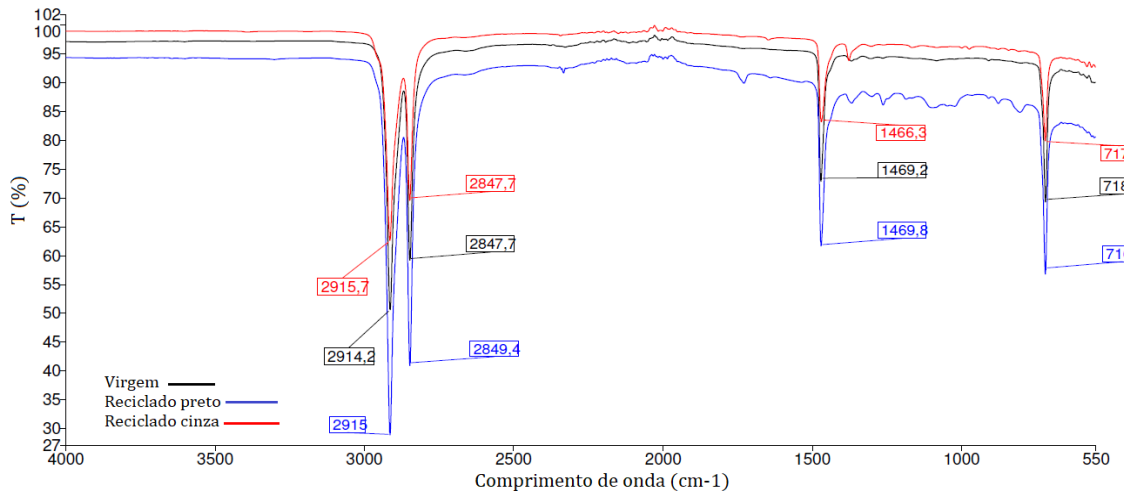
### 4.1 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE

O polietileno é composto principalmente por ligações carbono-carbono (C-C) e carbono-hidrogênio (C-H), por isso, mesmo com a presença de aditivos nas amostras é de se esperar bandas de absorção intensa em torno de 3000-2850  $\text{cm}^{-1}$ , que está associada às vibrações das ligações C-H esticadas (vibrações assimétricas e simétricas). Essa região é conhecida como a região de estiramento das ligações C-H (Silverstein; Webster; Kiemle, 2017). Além disso, no espectro da Figura 21 é possível observar uma banda de absorção intensa em torno de 1460-1470  $\text{cm}^{-1}$ , conhecida como a banda de deformação das ligações C-H. Essa banda está relacionada às vibrações de deformação das ligações C-H assimétricas em grupos metileno (-CH<sub>2</sub>-). Também pode ser observada uma pequena absorção em torno de 720-730  $\text{cm}^{-1}$ , que é atribuída às vibrações de deformação das ligações C-H simétricas em grupos metileno.

Outras características do espectro de FTIR do polietileno incluem uma região de absorção devido à presença de carbonila (C=O) em torno de 1710  $\text{cm}^{-1}$ , indicando que ocorreu oxidação ou modificação do polietileno. Como nas amostras em questão foram adicionados aditivos para o processamento do material, a presença da banda de carbonila é um indício da modificação do polímero pelas moléculas de aditivos.

Dentre a aditivação realizada, tem-se que o esqueleto carbônico do negro de fumo provindo do masterbatch para conferir cor, é esperado em número de ondas em torno 1500-1600  $\text{cm}^{-1}$  (Costa, 2023), podendo ser observado na Figura 21, espectros na referida região.

Figura 21 - FTIR das amostras de polietileno virgem, reciclado preto e reciclado cinza



Fonte: Autor (2022).

Observando os resultados da Figura 21 é possível observar que as estruturas são similares quimicamente pois possuem estiramento na banda em  $2900\text{ cm}^{-1}$  e deformação angular da cadeia na banda próxima a  $720\text{ cm}^{-1}$ , característicos de polietileno. As outras bandas podem estar relacionadas a grupos funcionais específicos introduzidos pelos aditivos ou resultantes do processo de reciclagem.

Os picos entre  $1460$  e  $1470\text{ cm}^{-1}$ , além de serem atribuídos à deformação de grupos metileno, também podem ser influenciados pela presença de grupos metila terminais, que podem surgir devido à degradação ou ramificação durante o processamento do polímero. A presença de pequenos picos em torno de  $1370\text{ cm}^{-1}$  indica deformações de grupos metila, que são características comuns em polímeros que sofreram processamento térmico ou mecânico.

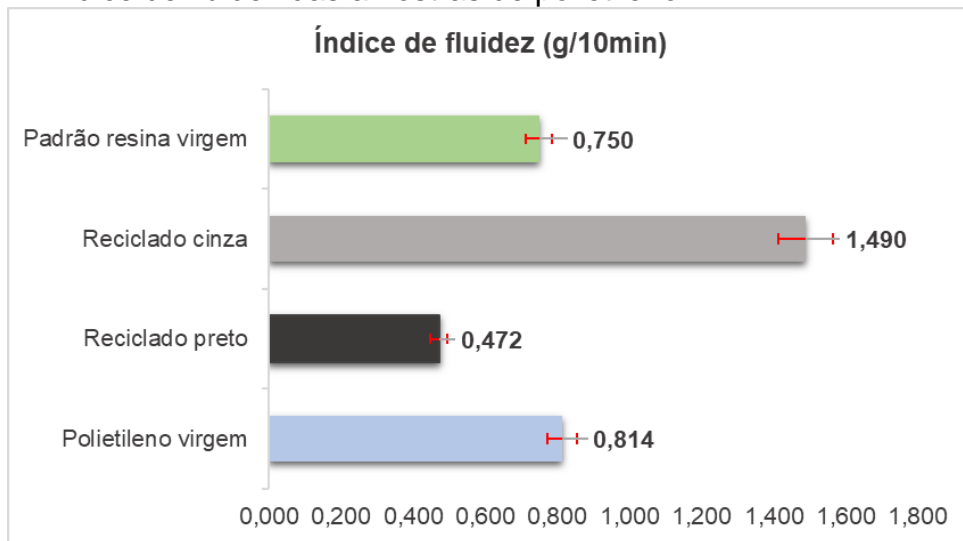
Picos na região de  $1250$  a  $1000\text{ cm}^{-1}$  podem estar associados a grupos ésteres ou éteres, que são possíveis subprodutos de reações de oxidação ou de aditivos específicos, como antioxidantes. Estas observações são coerentes com as estruturas químicas dos aditivos e subprodutos esperados e fornecem um perfil mais detalhado do ambiente químico das amostras de polietileno (Silverstein; Webster; Kiemle, 2017).

#### 4.2 ÍNDICE DE FLUIDEZ

Os resultados obtidos para o índice de fluidez das amostras de polietileno virgem e reciclado encontram-se na Figura 22.



Figura 22 - Índice de fluidez das amostras de polietileno



Fonte: Autor (2023).

Verificou-se que o *pellet* com polietileno virgem apresentou resultado próximo ao padrão da resina virgem, sofrendo aumento possivelmente devido a influência dos aditivos adicionados. Constatou-se que o reciclado cinza apresenta o maior índice de fluidez em comparação com as outras amostras, indicando maior facilidade de escoamento do material. Segundo a ASTM D1238-10 (*Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer*) (2010), esse resultado sugere que o reciclado cinza possui menor massa molar e mais ramificações nas cadeias poliméricas, resultando em uma redução do efeito elástico do material, tornando-o mais fluido e de maior vazão durante o processo. É importante expor que a presença de impurezas e aditivos na matéria-prima reciclada também pode afetar a estrutura molecular do polímero.

A análise do índice de fluidez nos materiais reciclados é crucial para entender como os aditivos influenciam as propriedades do polietileno e a influência de sucessivos processamentos que podem degradar a matriz polimérica.

Os aditivos desempenham um papel vital na melhoria das características do material reciclado, afetando diretamente seu comportamento durante o processamento e o desempenho do produto final. No caso do reciclado cinza, cujo índice de fluidez é superior ao do polietileno virgem utilizado para comparativo, é possível que a presença de certos aditivos esteja contribuindo para uma menor viscosidade e, conseqüentemente, um maior índice de fluidez.

Aditivos como estabilizadores térmicos, antioxidantes, ou modificadores de impacto podem ser introduzidos durante o processo de reciclagem para melhorar a



estabilidade do material e prolongar sua vida útil. No entanto, esses aditivos também podem alterar as propriedades de fluxo do PE. Por exemplo, um estabilizador térmico pode reduzir a degradação do material durante o processamento, resultando em um índice de fluidez mais alto devido à preservação das cadeias poliméricas (Asriza; Arcana; Fabiani, 2019; Ito *et al.*, 2023; Malík *et al.*, 1995).

Além dos resultados já discutidos, é essencial considerar o impacto dos processos de reciclagem no índice de fluidez do PE. Durante a reciclagem, fatores como exposição térmica e mecânica podem causar a degradação das cadeias poliméricas, influenciando diretamente no índice de fluidez. Esse fenômeno é particularmente evidente na amostra de reciclado cinza onde o aumento do índice de fluidez pode refletir uma redução na massa molar devido à quebra de cadeias durante o processamento. Tal aspecto ressalta a importância de monitorar as condições de reciclagem para manter as propriedades desejadas do material.

#### 4.3 DENSIDADE

Os resultados dos ensaios de densidade são apresentados na Tabela 4 e foram realizados em triplicata.

Tabela 4 - Valores obtidos com os ensaios para determinação da densidade das amostras de polietileno virgem, reciclado preto e reciclado cinza

Amostra	V (cm <sup>3</sup> )	M <sub>seca</sub> (g)	M <sub>imersa</sub> (g)	D (g/cm <sup>3</sup> )	D <sub>média</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Padrão ficha técnica da resina <b>0,959 g/cm<sup>3</sup></b>
Polietileno virgem	0,1077	0,1316	0,0239	0,960	0,963 ± 0,003	
	0,1140	0,1400	0,0260	0,965		
	0,1081	0,1323	0,0242	0,962		
Reciclado preto	0,2360	0,2877	0,0517	0,958	0,959 ± 0,001	
	0,2602	0,3176	0,0574	0,959		
	0,2356	0,2879	0,0523	0,960		
Reciclado cinza	0,0634	0,0751	0,0117	0,931	0,932 ± 0,001	
	0,0835	0,0991	0,0156	0,933		
	0,0539	0,0640	0,0101	0,933		

Fonte: Autor (2022).

Verificou-se que o polietileno virgem e o polietileno reciclado preto apresentam valores de densidade típicos de polietileno de alta densidade (Coutinho; Mello; Santa Maria, 2003), com valores entre 0,94 e 0,97 g/cm<sup>3</sup>. Infere-se que isso

ocorreu pois foram reciclados somente aparas similares, produzidas com o polímero virgem de alta densidade. Por outro lado, o polietileno reciclado cinza apresentou valores de densidade típicos de polietileno linear de baixa densidade, com valores entre 0,90 e 0,94 g/cm<sup>3</sup>. Tal diferença na densidade do polietileno reciclado cinza pode ter ocorrido devido à variedade de aparas utilizadas no processo de reciclagem, que incluíram uma concentração maior de polietileno de *grade* distinto do usual encontrado nas outras amostras.

Sabe-se que a densidade de materiais poliméricos, como o polietileno, está intrinsecamente relacionada às suas propriedades mecânicas, sendo um indicativo da cristalinidade e do grau de ramificação das cadeias poliméricas. No contexto do polietileno, uma densidade mais elevada geralmente corresponde a uma estrutura mais cristalina e a cadeias poliméricas com menor ramificação, o que implica em uma matriz mais rígida e com maior resistência mecânica. Especificamente, a resistência à tração e o módulo de elasticidade tendem a ser maiores em polímeros de alta densidade devido à maior interação intermolecular e ao empacotamento mais eficiente das cadeias. Por outro lado, amostras de menor densidade, que indicam uma maior presença de regiões amorfas, tendem a exibir maior ductilidade e capacidade de absorção de energia sob impacto, atributos desejáveis em aplicações onde a flexibilidade é crucial.

A análise dos dados de densidade obtidos para o polietileno virgem e reciclado sugere que o polietileno virgem, com densidade próxima ao limite superior do intervalo para PEAD, deve exibir uma resistência mecânica superior em comparação com as amostras recicladas, particularmente a amostra de polietileno reciclado cinza. Essas diferenças são fundamentais para a seleção de materiais em aplicações específicas, onde o equilíbrio entre resistência e flexibilidade deve ser cuidadosamente considerado para garantir o desempenho e a durabilidade do produto final (Jeremic, 2014; Patel, 2017; Silveira, 2012).

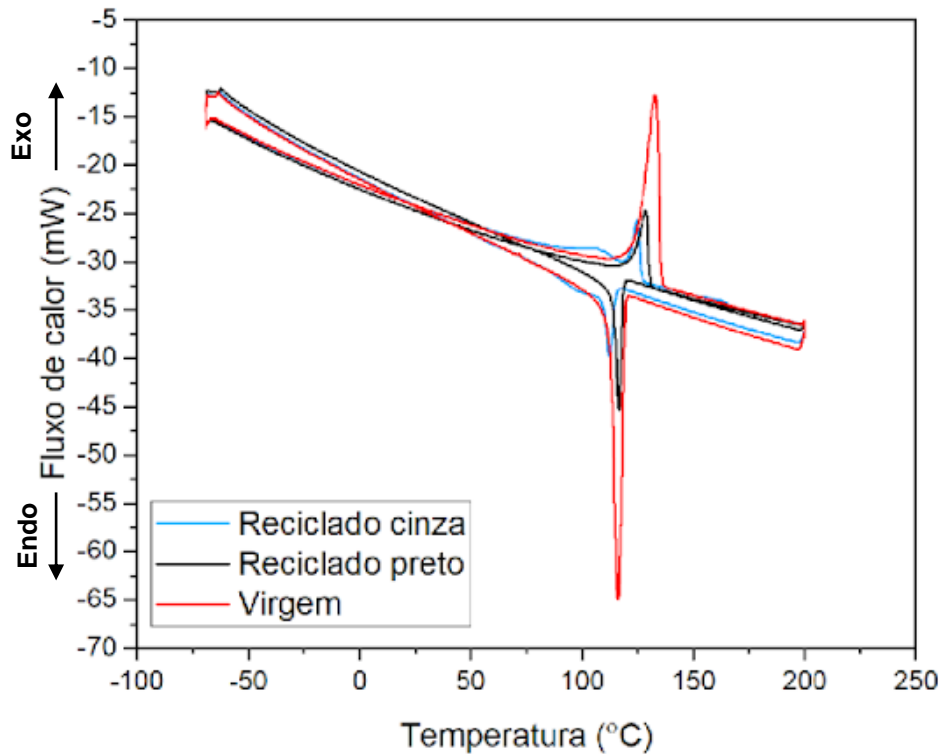
#### 4.4 ANÁLISES TÉRMICAS

A Figura 23 mostra as curvas de DSC das amostras analisadas. Pode-se observar claramente os picos de fusão e cristalização das amostras.

Comparando os resultados obtidos por meio da análise DSC das amostras, pode-se observar que a amostra de polietileno virgem apresentou fusão à

temperatura mais elevada ( $\sim 137$  °C) indicando uma menor mobilidade das cadeias poliméricas. Em sequência, a amostra de reciclado preto apresentou fusão em temperatura ligeiramente menor, em torno de 128 °C, valor próximo ao encontrado para o reciclado cinza ( $\sim 125$  °C) (Tabela 5).

Figura 23 - Curva DSC das amostras de polímero virgem, reciclado preto e reciclado cinza



Fonte: Autor (2022).

Tabela 5 - Comparativo entre resultados DSC

Amostra	Aquecimento		Resfriamento	
	$T_m$ °C	$\Delta H$ J/g	$T_c$ °C	$\Delta H$ J/g
<b>Virgem</b>	137	171	116	-155
<b>Reciclado preto</b>	128	129	116	-124
<b>Reciclado cinza</b>	125	72	114	-82

Fonte: Autor (2023).

Ao discutir as análises de DSC das amostras de polietileno, é crucial considerar como os componentes da composição da massa afetam os resultados obtidos. As temperaturas de fusão ( $T_m$ ) reduzidas observadas para as amostras recicladas em comparação com o polietileno virgem podem ser parcialmente atribuídas à presença de aditivos e contaminantes que são incorporados durante o

ciclo de vida do polietileno ou durante o processo de reciclagem. Tais substâncias podem agir como plastificantes, reduzindo as interações intermoleculares e, portanto, diminuindo a  $T_m$ . Isso é corroborado pelo fato de que o polietileno reciclado cinza, que potencialmente contém uma maior variedade de aditivos, apresenta a menor  $T_m$  e a menor entalpia de fusão ( $\Delta H$ ).

As alterações na composição do polímero, como a redução da massa molar ou o aumento da ramificação devido à degradação térmica ou mecânica durante a reciclagem, podem resultar em uma cristalinidade diminuída, o que também contribui para uma  $T_m$  mais baixa. A menor  $\Delta H$  do polietileno reciclado cinza sugere uma menor cristalinidade quando comparado ao polietileno virgem e reciclado preto, o que é consistente com uma maior mobilidade das cadeias poliméricas e, conseqüentemente, uma menor energia requerida para atingir a fusão.

A presença de aditivos e contaminantes também pode ser responsável pela variação nas temperaturas de cristalização. A temperatura de cristalização mais baixa do reciclado cinza sugere que aditivos ou impurezas presentes não estão atuando como nucleantes, promovendo a cristalização em temperaturas mais altas, ou, alternativamente, interferindo no rearranjo das cadeias poliméricas, aumentando a energia necessária para a cristalização.

Os dados encontrados na literatura para as temperaturas de fusão dos diferentes tipos de polietileno (Coutinho; Mello; Santa Maria, 2003) mostram que o polietileno de baixa densidade (PEBD) apresenta  $T_m$  em torno de 110 °C e para o polietileno de alta densidade (PEAD) os valores de  $T_m$  encontram-se acima de 130 °C. Já o polietileno linear de baixa densidade (PELBD) apresenta  $T_m$  entre 120 e 130 °C. Comparando os dados obtidos neste trabalho com os dados reportados na literatura é possível concluir que dentre as amostras analisadas, a amostra de polímero virgem, assim como informado pelo fabricante, corresponde ao PEAD. Já para o reciclado cinza evidencia-se que a  $T_m$  está próxima ao polietileno linear de baixa densidade (PELBD), dados que corroboram também com os resultados obtidos de densidade do referido material e indicam uma possível mistura de aparas recicladas.

No que diz respeito aos resultados de cristalização ( $T_c$ ), nota-se que a amostra de reciclado cinza apresentou uma temperatura de cristalização ligeiramente menor em comparação com as demais amostras, indicando que esse

material requer menos energia para o rearranjo das cadeias e a subsequente formação de cristais.

Os valores de  $\Delta H$  (variação da entalpia) forneceram informações significativas sobre as transições térmicas ocorridas durante os ciclos de aquecimento (absorção de calor) e resfriamento (liberação de calor). Para o polietileno virgem, observou-se um valor de  $\Delta H$  de 171 J/g durante o aquecimento e -155,5 J/g no resfriamento.

Realizando uma comparação indireta, para o polietileno reciclado preto, foram obtidos valores de  $\Delta H$  de 129 J/g no aquecimento e -124 J/g no resfriamento. Esses valores mostram uma menor absorção e liberação de energia em comparação com o polietileno virgem, sugerindo diferenças nas propriedades térmicas e na estrutura do polímero. Já para o polietileno reciclado cinza, os valores de  $\Delta H$  foram de 72 J/g no aquecimento e -82 J/g no resfriamento, valores ainda menores, o que indica uma menor quantidade de energia absorvida e liberada durante as transições térmicas em comparação com as outras amostras, sugerindo diferenças nas propriedades de fusão e cristalização desse material. Esses valores de  $\Delta H$  são influenciados por diversos fatores, como a massa molar, a presença de aditivos e a composição molecular do polímero. Eles fornecem informações importantes sobre as características térmicas e o comportamento de transição de fase do polietileno em diferentes condições de aquecimento e resfriamento.

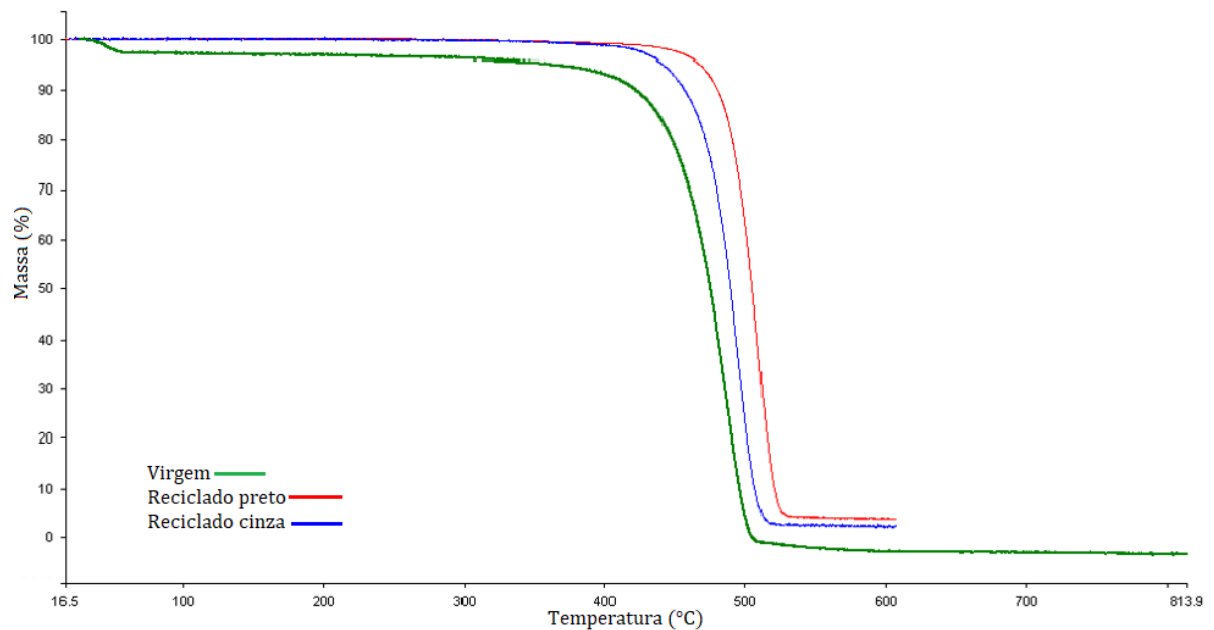
Os resultados das análises de TGA são apresentados na Figura 24. Foram obtidas curvas de decomposição da amostra em um único estágio, o que significa que a análise térmica revelou um único evento de decomposição ou perda de massa da amostra durante o processo de aquecimento.

As curvas obtidas na TGA mostram a variação da massa da amostra em função da temperatura, o que permite identificar os estágios de decomposição ou perda de massa que ocorrem. No caso de um único estágio de decomposição, a curva de TGA exibirá uma diminuição contínua e consistente na massa da amostra conforme a temperatura é elevada. Esse comportamento indica que a decomposição ocorre de forma homogênea e contínua ao longo do intervalo de temperatura analisado. É importante ressaltar que a obtenção de curvas de decomposição em um único estágio pode indicar uma reação de decomposição simplificada, na qual apenas um componente ou grupo funcional está presente na amostra, resultando em uma única perda de massa. Por outro lado, se a amostra contiver múltiplos

componentes ou grupos funcionais, é possível obter curvas de decomposição em vários estágios, com cada estágio representando a decomposição de um componente específico.

O comportamento das curvas está de acordo com o reportado na literatura (Passador *et al.*, 2013). Para o polietileno virgem a decomposição iniciou por volta de 380 °C e a perda de massa prosseguiu até a temperatura de 510 °C, como apresentado na Tabela 6. Para o reciclado preto e cinza, as temperaturas nas quais começaram a ocorrer perda de massa foram de 450 e 430 °C, respectivamente, e a perda de massa prosseguiu até temperaturas próximas de 540 e 518 °C, respectivamente.

Figura 24 - Curva de decomposição termogravimétrica das amostras de polietileno virgem, reciclado preto e reciclado cinza



Fonte: Autor (2022).

Tabela 6 - Interpretação curva TGA das amostras de polietileno virgem, reciclado preto e reciclado cinza

Amostra	Perda de massa (°C)
Polietileno virgem	380 - 510
Reciclado preto	450 - 540
Reciclado cinza	430 - 518

Fonte: Autor (2022).

#### 4.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO UNIAXIAL

Os ensaios foram realizados utilizando 5 corpos de provas de cada composição e os valores de resistência à tração, alongamento e módulo Young estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Comparativo entre resultados de resistência mecânica

Amostra	Resistência à tração (MPa)			Alongamento na ruptura (%)			Módulo Young (MPa)		
	<i>Virgem</i>	<i>Reciclado preto</i>	<i>Reciclado cinza</i>	<i>Virgem</i>	<i>Reciclado preto</i>	<i>Reciclado cinza</i>	<i>Virgem</i>	<i>Reciclado preto</i>	<i>Reciclado cinza</i>
1	23,7	19,7	15,4	45,3	126,2	335,7	1109,4	734,7	254,7
2	23,6	20,6	16,0	32,4	128,9	347,1	1107,6	881,9	262,5
3	22,9	21,1	16,6	31,1	102,2	426,8	1132,9	928,9	390,7
4	23,3	19,9	16,8	47,5	112,1	425,8	1138,7	804,9	417,8
5	24,2	19,4	15,7	35,6	139,4	374,1	1029,8	878,2	444,5
<b>Média</b>	<b>23,6</b>	<b>19,9</b>	<b>16,0</b>	<b>35,6</b>	<b>126,2</b>	<b>374,1</b>	<b>1109,5</b>	<b>878,2</b>	<b>390,7</b>
<b>Mínimo</b>	<b>22,9</b>	<b>19,4</b>	<b>15,4</b>	<b>31,1</b>	<b>102,3</b>	<b>335,7</b>	<b>1029,8</b>	<b>734,7</b>	<b>254,7</b>
<b>Máximo</b>	<b>24,2</b>	<b>21,1</b>	<b>16,8</b>	<b>47,5</b>	<b>139,4</b>	<b>426,7</b>	<b>1138,7</b>	<b>928,9</b>	<b>444,5</b>
<b>Desvio</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>7,5</b>	<b>14,6</b>	<b>42,8</b>	<b>43,5</b>	<b>76,3</b>	<b>89,2</b>

Fonte: Autor (2022).

Observou-se que a amostra contendo polietileno virgem apresentou maior resistência à tração e módulo de Young, indicando uma maior rigidez do material. No entanto, verificaram-se resultados inferiores em relação ao alongamento quando comparados aos materiais reciclados. Com base nestes resultados, pode-se concluir que o uso de polietileno virgem proporciona uma maior resistência à tração e rigidez, indicando uma adequada capacidade de suportar cargas e manter a integridade estrutural. No entanto, os materiais reciclados apresentaram resultados superiores em termos de alongamento, o que sugere uma maior capacidade de deformação plástica antes do rompimento.

A maior resistência à tração e rigidez do polietileno virgem pode ser explicada por sua estrutura mais ordenada e sua maior cristalinidade. O polietileno virgem geralmente contém menos defeitos, ramificações ou impurezas em sua estrutura, o que favorece a homogeneidade e a continuidade das cadeias poliméricas, conferindo ao material propriedades mecânicas superiores.

No processo de reciclagem, o polietileno pode sofrer degradação térmica, oxidação ou contaminação com outros materiais, o que pode levar ao encurtamento das cadeias poliméricas e ao aumento das ramificações. Essas alterações estruturais resultam em uma diminuição das regiões cristalinas e aumentam a proporção de regiões amorfas, reduzindo a resistência à tração e a rigidez do material reciclado em comparação com o polietileno virgem.

Portanto, o polietileno virgem, com sua estrutura mais ordenada e menor incidência de defeitos, é capaz de suportar cargas mais elevadas e manter sua integridade estrutural sob estresse mecânico, o que o torna mais adequado para aplicações que exigem alta resistência e rigidez.

#### 4.6 TEMPERATURA DE DEFLEXÃO TÉRMICA (HDT) E TEMPERATURA DE AMOLECIMENTO (VICAT)

Os resultados para a temperatura de deflexão térmica (HDT) e temperatura de amolecimento (VICAT), como apresentados na Tabela 8, revelam dados significativos sobre a estabilidade térmica das amostras de polietileno estudadas. É perceptível que o polietileno virgem possui o maior valor de HDT, alcançando 42,8°C, o que está em consonância com a literatura, que apresenta um HDT médio em torno de 50°C para o PEAD. Essa maior resistência à deflexão sob carga do material virgem pode ser atribuída à sua maior cristalinidade e ao menor grau de ramificações, características que conferem uma matriz mais estável sob condições de aquecimento.

Em relação ao polietileno reciclado preto, os valores de HDT estão próximos aos do virgem, indicando que o processo de reciclagem mantém em grande parte a estrutura térmica do polímero. Isso sugere que as aparas de polietileno reciclado preto são primariamente oriundas de PEAD, mantendo características semelhantes após o reprocessamento. Já o polietileno reciclado cinza demonstra uma queda notável no HDT, aproximando-se dos valores típicos do PEBD, o que pode ser reflexo da diversidade dos materiais de partida ou da presença de aditivos que alteram a estabilidade térmica do polímero.



Tabela 8 - Comparativo entre resultados de HDT e VICAT

Amostra	HDT (°C)		VICAT (°C)
	<i>Flatwise (0,42mm)</i>	<i>Edwise (0,25mm)</i>	
Polietileno virgem	42,8	41,2	123,8
Reciclado preto	38,4	41,6	118,5
Reciclado cinza	32,1	33,7	103,4

Fonte: Autor (2023).

O VICAT segue um padrão similar, onde o polietileno virgem mostra uma temperatura de amolecimento próxima ao valor padrão da resina virgem, reforçando a qualidade e a homogeneidade do material não reciclado. Os reciclados, por sua vez, exibem uma redução na temperatura de VICAT, indicativo de um potencial degradação do material ou incorporação de aditivos com menor resistência térmica durante o ciclo de vida do produto.

A análise desses parâmetros térmicos é essencial para compreender o comportamento dos materiais sob condições de uso real e deve ser minuciosamente considerada no design de produtos que utilizarão estas resinas. A seleção do polietileno para uma aplicação deve levar em conta não apenas o desempenho mecânico, mas também a estabilidade térmica, assegurando que o produto atenda ou exceda os requisitos operacionais esperados (Fried, 2014).

Na Tabela 9, encontra-se um resumo dos resultados.

Tabela 9 – Resumo e breve discussão dos resultados

(continua)

<b>Ensaio</b>	<b>Poliétileno virgem</b>	<b>Reciclado preto</b>	<b>Reciclado cinza</b>
<b>Índice de fluidez (g/10min)</b>	0,814	0,472	1,49
<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,963	0,959	0,932
<b>DSC (Aquec.) T<sub>m</sub> (°C)</b>	137	128	125
<b>DSC (Aquec.) ΔH (J/g)</b>	171	129	72
<b>DSC (Resfriam.) T<sub>c</sub> (°C)</b>	116	116	114
<b>DSC (Resfriam.) ΔH (J/g)</b>	-155	-124	-82
<b>TGA (°C)</b>	380 – 510	450 – 540	430 - 518
<b>HDT (Flat) (°C)</b>	42,8	38,4	32,1
<b>HDT (Edge) (°C)</b>	41,2	41,6	33,7
<b>VICAT (°C)</b>	123,8	118,5	103,4
<b>Tração (Mpa)   Média</b>	23,6	19,9	16
<b>Alongamento na ruptura (%)   Média</b>	35,6	126,2	374,1

Tabela 9 – Resumo e breve discussão dos resultados

(continua)

Ensaio	Poliétileno virgem	Reciclado preto	Reciclado cinza
<b>Módulo Young (MPa)   Média</b>	1109,5	878,2	390,7
<b>Breve discussão</b>	<p>No ensaio de FTIR é possível identificar as bandas características do polietileno. Observa-se índice de fluidez próximo ao padrão da resina virgem. Com relação a densidade, o resultado obtido está conforme literatura para o PEAD, indicando maior cristalinidade. As análises térmicas indicam menor mobilidade das cadeias poliméricas decorrentes da temperatura de fusão elevada e os resultados obtidos estão conforme literatura para o PEAD. Com relação a temperatura de HDT, tem-se resultado superior aos reciclados e em consonância com a literatura. O resultado obtido para VICAT foi próximo da resina virgem.</p>	<p>No ensaio de FTIR é possível identificar as bandas características do polietileno. Evidencia-se picos característicos de antioxidantes. Além disso, evidencia-se picos em torno de <math>1370\text{ cm}^{-1}</math>, característicos de polímeros que sofreram processamento térmico. Observa-se redução no índice de fluidez. Com relação a densidade, o resultado obtido está conforme literatura para o PEAD. As análises térmicas indicam temperatura de fusão ligeiramente menor que o polietileno virgem, possivelmente devido a aditivação superior. O <math>\Delta H</math> indica menor absorção e liberação de energia comparado ao virgem.</p>	<p>No ensaio de FTIR é possível identificar as bandas características do polietileno. Evidencia-se picos característicos de antioxidantes. Além disso, evidencia-se picos em torno de <math>1370\text{ cm}^{-1}</math>, característicos de polímeros que sofreram processamento térmico. Observa-se índice de fluidez superior quando comparado ao virgem e reciclado preto, indicando facilidade de escoamento, menor massa molar. Com relação a densidade, o resultado obtido infere que a classificação do polímero é linear de baixa densidade, justificando os resultados inferiores para resistência à tração e alongamento. As análises térmicas indicam menor temperatura de fusão, sendo similar a literatura para PELBD.</p>

Tabela 9 – Resumo e breve discussão dos resultados

(conclusão)

Ensaio	Polietileno virgem	Reciclado preto	Reciclado cinza
<b>Breve discussão</b>	Com relação a resistência mecânica, evidencia-se resultado superior com relação a resistência a tração e módulo Young comparado aos reciclados, que se dá devido a cristalinidade e ordenamento da estrutura do material.	Com relação a temperatura de HDT, tem-se resultado similar ao virgem sugerindo que as aparas recicladas foram provenientes de polietileno de alta densidade. O resultado obtido para VICAT, foi inferior ao padrão, indicando potencial degradação e/ou incorporação de aditivos com resistência térmica inferior. Com relação a resistência mecânica, evidencia-se resultado superior de alongamento, porém inferior de resistência a tração e módulo Young comparado ao virgem, possivelmente devido a degradação térmica, que reduz as regiões cristalinas e aumentam as regiões amorfas culminando na redução dos respectivos parâmetros	O $\Delta H$ inferior sugere menor cristalinidade e quantidade de energia absorvida e liberada durante as transições térmicas. Com relação a temperatura de HDT, tem-se uma queda notável da temperatura, aproximando-se de valores típicos para PEBD. O resultado obtido para VICAT, foi inferior ao padrão, tais resultados indicam potencial degradação e/ou incorporação de aditivos com resistência térmica inferior. Com relação a resistência mecânica, evidencia-se resultado superior de alongamento, porém inferior de resistência a tração e módulo Young comparado ao virgem, possivelmente devido a degradação térmica que reduz as regiões cristalinas e aumentam as regiões amorfas culminando na redução dos respectivos parâmetros.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As propriedades do polietileno reciclado preto, derivado das aparas produzidas durante a fabricação de malhas de sombreamento agrícolas, exibem uma notável similaridade em termos de composição química, análise térmica e reologia quando comparadas ao polietileno virgem, demonstrando homogeneidade nas aparas recicladas.

Com base nas propriedades do reciclado cinza, conclui-se que houve uma mistura de aparas de origem distinta no processo de reciclagem, pois são provenientes de polietileno linear de baixa densidade, diferindo do reciclado preto e do polietileno virgem.

No que se refere à composição química do reciclado preto e cinza, não foram identificados elementos que impeçam a utilização dos materiais estudados na fabricação das malhas de sombreamento. Entretanto, observou-se variações significativas nos eventos térmicos e nas propriedades mecânicas em relação ao polietileno virgem. Em termos de propriedades mecânicas, o polietileno virgem sobressai com valores superiores de resistência à tração e rigidez, embora apresente limitações em sua capacidade de deformação plástica antes da ruptura. Este último aspecto é atenuado no polietileno reciclado, onde o surgimento de ramificações durante o reprocessamento aprimora a plasticidade.

Com base nas caracterizações efetuadas, identifica-se um potencial considerável para o emprego do reciclado preto na produção de novas malhas de sombreamento, embora se reconheça a necessidade de aperfeiçoamento de suas propriedades mecânicas para atender os rigorosos padrões de qualidade exigidos para tal aplicação.

Quanto ao reciclado cinza, foi possível concluir que a classificação do mesmo difere do usual para fabricação das malhas de sombreamento (PEAD), devido a miscigenação de produtos. Sendo assim, não foi identificado potencial para o emprego deste reciclado nas malhas de sombreamento, sendo necessário para tal fato, a devida separação das aparas antes do processo de reciclagem.

Vale ressaltar que este estudo não contemplou uma avaliação da resistência química – especialmente contra agentes como cloro, enxofre e fósforo – das amostras de polietileno virgem em contraste com as recicladas, um fator de elevada importância para a plasticultura. Uma investigação aprofundada nesse aspecto é

fundamental para garantir a viabilidade e segurança no uso desses materiais em contextos agrícolas.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, R.L.; DAREZZO, R.J.; FOZANE, D.E.; AGUILERA, G.A.H.; SILVA, D.J.H. **Cultivo em Ambiente Protegido: Histórico, Tecnologia e Perspectivas**. Viçosa: UFV, 2004.
- AL-HELAL, I.M.; ABDEL-GHANY, A.M. Responses of plastic shading nets to global and diffuse PAR transfer: optical properties and evaluation. **Njas: Wageningen Journal of Life Sciences**, [S.l.], v. 57, n. 2, p. 125-132, 1 jun. 2010. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1016/j.njas.2010.02.002>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1016/j.njas.2010.02.002?scroll=top&needAccess=true>. Acesso em: 03 fev. 2023.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1238**: Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. United States, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3418**: Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry. United States, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 638**: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. United States, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 792**: Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. United States, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 1252**: Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis. United States, 2021.
- ASRIZA, R.O; ARCANA, I. M; FABIANI, V.A. Thermal degradation of High-Density Polyethylene Containing Cobalt Stearat as Oxidant Additive. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S.l.], v. 353, n. 1, p. 012036, 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/353/1/012036>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/353/1/012036>. Acesso em: 03 fev. 2023.
- ASSIS, Marcos Wilson Vicente de; SANTOS, Taidés Tavares dos. Propriedades químicas, problemas ambientais e reciclagem de plástico: uma revisão de literatura. Chemical properties, environmental problems and plastic recycling: a review. **Jornal Interdisciplinar de Biociências**, [S.l.], v.5, n.1, p. 31-37, 2020. Disponível em: <https://revistas.ufpi.br/index.php/jibi/article/view/7>. Acesso em: 20 fev. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (org.). **Índice de plástico reciclado pós-consumo cresceu em 2019, segundo estudo encomendado pelo PICPLAST**. São Paulo: ABIPLAST, 2021. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/noticias/indice-de-plastico-reciclado-pos-consumo-cresceu-em-2019-segundo-estudo-encomendado-pelo-picplast/>. Acesso em: 06 ago. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (org.). **Produção de plásticos reciclados pós-consumo cresce 14,3% no Brasil**. São Paulo: ABIPLAST, 2022. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/noticias/producao-de-plasticos-recicladospo-consumo-cresce-143-no-brasil/#:~:text=PRODU%C3%87%C3%83O%20DE%20PL%C3%81STICOS%20RECICLADOS%20P%C3%93S,Brasileira%20da%20Ind%C3%BAstria%20do%20PI%C3%A1stico&text=Em%202021%2C%2023%2C4%25,consumo%20foram%20recicladospo%20no%20pa%C3%ADs>. Acesso em: 05 jan. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15560 -1**: Filmes plásticos agrícolas para cultivo protegido – Parte 1: Cobertura de estufas. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15560 -2**: Filmes plásticos agrícolas para cultivo protegido – Requisitos e métodos de ensaio – Parte 2: Mulching (Cobertura de solo). Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15560 -3**: Filmes plásticos agrícolas para cultivo protegido – Parte 3: Telas para sombreamento e proteção. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

AVELINO, Guilherme Monteiro. **A reciclagem como alternativa ao tratamento de resíduos plásticos no Brasil**. 2020. Monografia de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/13660/TCC-Guilherme%20Avelino.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 02 jun. 2023.

BARANWAL, Jaya; BARSE, Brajesh; FAIS, Antonella; DELOGU, Giovanna Lucia; KUMAR, Amit. Biopolymer: a sustainable material for food and medical applications. **Polymers**, [S.l.], v. 14, n. 5, p. 983, 28 fev. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym14050983>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/5/983>. Acesso em: 20 jul. 2022.

BARRERA-MARTINEZ, C. L.; MELÉNDEZ-RENTERIA, N.P; DE LEÓN-ZAPATA, M.A; SALINAS-JASSO, T.A; AGUILAR-GONZÁLEZ, C.N; LAREDO-ALCALÁ, E.I. Polímeros de origen microbiano con aplicaciones agroindustriales. **Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica**, [S.l.], v.9, n.54, p.19-40, Enero - Febrero 2022. Disponível em: [https://riit.com.mx/apps/site/idem.php?module=Catalog&action=ViewItem&id=6216&item\\_id=85442](https://riit.com.mx/apps/site/idem.php?module=Catalog&action=ViewItem&id=6216&item_id=85442). Acesso em: 20 fev. 2023.

BOTTON, Gustavo Scolari. **Análise da viabilidade econômico-financeira na produção de tomate: sistemas de cultivo em ambiente protegido e a campo**. 2019. Relatório de estágio (Bacharelado em Administração) – Universidade Federal de Santa Maria, Palmeira das Missões, RS, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/20032/TCCG-ADM-2019-BOTTON.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2022.

BRANCO, Livia Terezinha Pimentel. **Estudo de alternativas para a reciclagem mecânica de resíduos poliméricos industriais combinados com outros materiais**. 2020. Tese (Doutorado Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, Lorena,



SP, 2020. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97134/tde-25082021-132803/publico/EMT20002\\_C.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97134/tde-25082021-132803/publico/EMT20002_C.pdf). Acesso em: 18 fev. 2023

BROWN, M.E; GALLAGHER, P.K. **Handbook of thermal analysis and calorimetry. Recent advances, techniques and applications**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier's B.V, 2008.

BURDETT, Ian D.; EISINGER, Ronald S.. Ethylene Polymerization Processes and Manufacture of Polyethylene. In: SPALDING, Mark A.; CHATTERJEE, Ananda M. (ed.). **Handbook of Industrial Polyethylene and Technology: Definitive Guide to Manufacturing, Properties, Processing, Applications and Markets**. [S.l.] Wiley-Scrivener, 2017. p. 61-103. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119159797>. Acesso em: 13 fev. 2022.

CALLISTER, W. J; RETHWISH, D.G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 9. ed. [S.l.]: Editora LTC, 2016.

CAMARGO, Rayane Veloso de. **Reciclagem mecânica-química de resíduos de filmes de polietileno de baixa densidade em combinação com o polipropileno**. 2019. Dissertação (Mestrado Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, Lorena, SP, 2019. Disponível em: [https://teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97134/tde-28052019-151150/publico/EMD18012\\_C.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97134/tde-28052019-151150/publico/EMD18012_C.pdf). Acesso em: 18 fev. 2023

CANEVAROLO, S.V. J. **Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2.ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **PIB-Agro/CEPEA: Após recordes em 2020 e 2021, PIB do agro cai 4,22% em 2022**. [2023] Disponível em: <https://www.cepea.org.br/br/releases/pib-agro-cepea-apos-recordes-em-2020-e-2021-pib-do-agro-cai-4-22-em-2022.aspx?pagina=>. Acesso em: 02 jun. 2023

COATS, A.W; REDFERN, J.P. Thermogravimetric analysis. A review. **Analyst**, London, v.88, n.1053, p. 906-925, 1963. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/an9638800906>. Acesso em: 02 jun. 2023

COSTA, Bruno Oliveira. **Estudo das propriedades estruturais e morfológicas de amostras de negro de fumo**. 2023. Monografia de Conclusão de Curso (Graduação em Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Ituiutaba, MG, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/38489/1/EstudoPropriedadesEstruturais.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2023.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. de. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia** [ s. l. ], v. 13, n. 1, p. 1–13, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000100005>. Acesso em: 10 fev. 2023.

DRANSKI, João A. L.; PINTO JUNIOR, Artur S.; CAMPAGNOLO, Marcelo A.; MALAVASI, Ubirajara C.; MALAVASI, Marlene M. Sobrevivência e crescimento do pinhão-mansão em função do método de aplicação e formulações de hidrogel. **Revista Brasileira de**

**Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.l.], v. 17, n. 5, p. 537-542, maio 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662013000500011>. Acesso em: 20 fev. 2022.

FRAGOSO, Julyana Ferro. **Avaliação da cinética de cristalização de polietileno: efeito das ramificações longas e da degradação termo oxidativa**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2019. Disponível em: <https://www.bdtd.uerj.br:8443/handle/1/7984>. Acesso em: 10 fev. 2023

FRIED, J.R. **Polymer Science and Technology**. 3. ed. [s.l.]: Person Education, 2014

GEYER, Roland; JAMBECK Jenna R.; LAVANDA, Lei Kara. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**. [S.l.], v. 3, 7 ed., jul. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>. Acesso em: 15 fev. 2023

GONÇALVES, Ana Paula. **Desafios para redução das embalagens plásticas de alimentos pós-consumo nos rejeitos da coleta seletiva: um estudo de caso em uma cooperativa no município de Assis**. 2022. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.2022.tde-20062022-104036>. Acesso em: 20 fev. 2023

GONÇALVES, Rui Lopes. **Aspectos cinéticos da determinação do equilíbrio sólido-líquido por meio de calorimetria exploratória diferencial**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2021.tde-04112021-121600>. Acesso em: 06 jun. 2023

GONZALEZ, C. M. A. **Vicat Softening Temperature Determination of Polymeric Materials: Methodology and Applications**. *Polymer Testing*. v.75, 2020.

HABITZREUTER, Filipe; GABRIEL, Amanda Grizzo; SEMENSATO, Leonardo Henrique; SANTOS, Danilo Martins dos; FILHO, Sérgio Paulo Campana. Biopolímeros, Processamento e Aplicações. *In Nanotecnologia Aplicada a Polímeros*. São Paulo: Editora Blucher, 2022. Cap. 3, p. 91-132. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/9786555502527-03>. Acesso em: 05 jul. 2023.

HOCKING, M.B. Commercial Addition (Vinyl-Type) Polymers. In **Handbook of Chemical Technology and Pollution Control**. Columbia: Elsevier Inc., 2005. p.737–758. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-012088796-5/50026-0>. Acesso em: 05 jul.2023

ITO, Asae; ROPANDI, Akid; KONO, Koichi; HIEJIMA, Yusuke; NITTA Koh-hei. Additive Effects of Solid Paraffins on Mechanical Properties of High-Density Polyethylene. **Polymers**. Japan, 15/5. p.1-12., march 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15051320>. Acesso em: 05 dez. 2023

JEREMIC, Dusan. Polyethylene. In **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. [S.l.]: Wiley Online Library. p. 1-42. 01, Ago. 2014. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/14356007.a21\\_487.pub3](https://doi.org/10.1002/14356007.a21_487.pub3). Acesso em: 05 dez. 2023

KHERICI, Samira; BENOUALI, Djullali; NOUREDINE, Chekhar. The Effects of Calcium Carbonate Filler on HDPE Pipe. **Advances in Science and Technology Research**

**Journal.** v.16, 3 ed., p.213-218, 2022. Disponível em:  
<https://doi.org/10.12913/22998624/149606>. Acesso em: 05 dez.2023

MALÍK, Ján; STOLL, Klaus H.; CABATON, D.; THURMER, A. Processing stabilization of HDPE: a complex study of an additive package. **Polymer Degradation and Stability.** v.50. 3 ed. p. 329-336, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(95\)00165-4](https://doi.org/10.1016/0141-3910(95)00165-4). Acesso em: 02 jan. 2023.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos.** 2. ed. [S.l.]: Editora Artiliber, 2013.

MIAO, Weijun; ZHU, Hao; DUAN, Tianchen; CHEN, Hongbing; WU, Feng; JIANG, Libin; WANG, Zong Bao. High-density polyethylene crystals with double melting peaks induced by ultra-high-molecular-weight polyethylene fibre. **The Royal Society Open Science.** v.5. 5 ed. Jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsos.180394>. Acesso em: 05 dez. 2023.

MOVIMENTO PLÁSTICO TRANSFORMA. **Todas as etapas do processo de reciclagem.** [S.l.]: PICPlast; ABIPLAST; Braskem, 2020. Disponível em:  
<https://www.plasticotransforma.com.br/materia-detalle/etapas-do-processo-de-reciclagem-do-plastico>. Acesso em: 06 ago. 2022.

NATARELI, Caio Vinicius Lima; OLIVEIRA, Juliano Elvis; MATTOSO, Luis Henrique Capparelli; SANTOS, Mayara de Oliveira. Introdução aos Materiais Poliméricos. *In* **Nanotecnologia Aplicada a Polímeros.** São Paulo: Editora Blucher, 2022. p. 49-90. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/9786555502527-02>. Acesso em: 05 jul. 2023.

ORTEGA, Canova; CARMEM, Marial del. **Comparación de la huella de carbono de plásticos reciclables y bioplásticos con aplicaciones en plasticultura.** (Máster em Ingeniería Ambiental Y Procesos Sostenibles) - Universidad Politecnica de Cartagena, Cartagena, 2021. Disponível em:  
<https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/9286/tfm-can-com.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 dez. 2023

PACHECO, Katiellen Amorim. **Espectroscopia atômica:** uma breve revisão. 2022. Monografia (Bacharelado em Química Industrial) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vila Velha, 2022. Disponível em:  
[https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/2441/TCC\\_%20Espectroscopia%20at%c3%b4mica%20uma%20breve%20revis%c3%a3o.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/2441/TCC_%20Espectroscopia%20at%c3%b4mica%20uma%20breve%20revis%c3%a3o.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 02 ago. 2023

PASSADOR, Fabio R.; TRAVAIN, Daniel R.; BACKES, Eduardo. H; RUVOLO, Adhemar Filho; PESSAN, Luiz A. Nanocompósitos de Blendas HDPE/LLDPE e OMMT Parte II: Avaliação das Propriedades Térmica, Óticas e de Transporte a Gases. **Polímeros Ciência e Tecnologia.** v. 23, n.6, p.748-757, 2013. Disponível em:  
<https://doi.org/10.4322/polimeros.2013.065>. Acesso em: 05 dez. 2023

PATEK, Rajen M. Types and Basics of Polyethylene. In: SPALDING, Mark A.; CHATTERJEE, Ananda M. (ed.). **Handbook of Industrial Polyethylene and Technology: Definitive Guide to Manufacturing, Properties, Processing, Applications and Markets.** [s.l.] Wiley-Scrivener, 2017. p. 105-138. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1002/9781119159797.ch4>. Acesso em: 13 fev. 2022.

PRUDÊNCIO, Danilo Fugui de Matos. **Avaliação no desempenho de longa duração do Polietileno de Alta densidade**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2021.tde-04112021-121600>. Acesso em: 06 jun. 2023

RESENDE, L. de M. **Análise das características do polietileno verde como alternativa a substituição do polietileno petroquímico**. 2018. Centro Universitário de Formiga, Formiga, 2018.

SARANTOPOULOS, C. I.G.L.; TEIXEIRA, F.G. **Embalagens plásticas flexíveis: Principais polímeros e avaliação de propriedades**. 2.ed. Campinas: ITAL, CETEA, 2017.

SHEN, FW. 6 - Ultrahigh-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) in joint replacement. In JENLINS, Mike. **Biomedical Polymers**. Woodhead Publishing, 2007. p. 141–173. Disponível em: <https://doi.org/10.1533/9781845693640.141>. Acesso em: 02 ago. 2022.

SILVA, Agmar José de Jesus Silva. Análise comparativa da curva de viscosidade e do índice de fluidez de dois grades de polipropileno utilizando reometria capilar. **Revista Sítio Novo**, Palmas, v.4, n.3, p. 98-108, jul./set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.47236/2594-7036.2020.v4.i3.97-108p>. Acesso em: 02 ago. 2023.

SILVA, Maria Flávia Borges da. **Estudo de técnicas de reciclagem do poliestireno expandido: uma revisão sistemática e uma proposta de reaproveitamento**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2021. Disponível em: <https://bdtd.ufbm.edu.br/bitstream/123456789/1213/1/DISSERT%20MARIA%20F%20B%20SILVA.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2023.

SILVEIRA, Mauro Ricardo da Silva. **Funcionalização do polietileno linear de baixa densidade para promover adesão**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/76154/000877836.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2023

SILVERSTEIN, R.M.; WEBSTER, F.X.; KIEMLE, D.J. **Spectrometric Identification of organic compounds**. 17. ed. New York: John Wiley & Sons, INC, 2017.

SMITH, J., J. A. Mechanical Characterization of Polymeric Materials: Tensile Testing and Beyond. **Journal of Polymer Science**. v. 2(35), p. 127–142, 2018.

SOUZA, Ana Kely Rufino; DE LIMA, Dinorah Machado Vaz; OLIVEIRA, Simone Laila Andrade. TÉCNICA FTIR E SUAS APLICAÇÕES EM AMOSTRAS ORGÂNICAS. **Anais do ENIC**, [s. l.], n. 6, 2015. Disponível em: <https://anaisonline.uems.br/index.php/enic/article/view/2526>. Acesso em: 3 mar. 2024.

VISENTINI, M. S.; SANTOS, M. dos. Transparência na Gestão Pública Municipal Evidenciada nos Portais Eletrônicos dos Municípios do Conselho Regional de Desenvolvimento (Corede) das Missões/RS. **Desenvolvimento em Questão**, [s. l.], v. 17, n. 49, p. 158–175, 2019. DOI: 10.21527/2237-6453.2019.49.158-175. Disponível em: <https://www.revistas.unijui.edu.br/index.php/desenvolvimentoemquestao/article/view/8082>. Acesso em: 06 jun. 2023.

WANG, Qiang; ZHANG Chen; LI Rongrong. Environmental toxicity and decomposition of polyethylene. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. **Environmental Science and Pollution Research**, [s.l.], v.30, p. 40405-40426, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24901-w>. Acesso em: 10 out. 2023.

XIAO, Rong; QINGHAN, Yu; HAORAN Ye; YANG Shi; YEQUAN Sheng; MINGLONG Zhang; PEJMAN Nourani; SHENGBI Ge. Visual design of high-density polyethylene into wood plastic composite with multiple desirable features: A promising strategy for plastic waste valorization. **Journal of Building Engineering**, [s.l.], v.63, Part A, 105445, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105445>. Acesso em: 23 jul. 2023.

YAO, Zhuang; HYEON, Jeong Seong; YU-SIN, Jang. Environmental toxicity and decomposition of polyethylene. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s.l.], v.242, 113933, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113933>. Acesso em: 12 fev. 2023.

ZANARDI, Eric. **Obtenção e caracterização de blendas poliméricas de polietileno de baixa densidade (PEBD) e polipropileno reciclado (PPr)**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/handle/11600/66588>. Acesso em: 12 dez. 2023.