

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DAS CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

JULIA GEMELLI DOS REIS MENEGOL

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE POLIESTIRENO RECICLADO
NA MOLDAGEM POR INJEÇÃO: COMPARAÇÃO DE PROPRIEDADES COM O
POLIESTIRENO VIRGEM

CAXIAS DO SUL
2026

JULIA GEMELLI DOS REIS MENEGOL

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE POLIESTIRENO RECICLADO
NA MOLDAGEM POR INJEÇÃO: COMPARAÇÃO DE PROPRIEDADES COM O
POLIESTIRENO VIRGEM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL, como requisito final para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Camila Baldasso

CAXIAS DO SUL

2026

JULIA GEMELLI DOS REIS MENEGOL

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE POLIESTIRENO RECICLADO
NA MOLDAGEM POR INJEÇÃO: COMPARAÇÃO DE PROPRIEDADES COM O
POLIESTIRENO VIRGEM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL, como requisito final para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Caxias do Sul, __ de _____ de ____

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus, meu Senhor, Salvador e Protetor. Ele é a razão de todas as coisas e, sem Sua presença, nada seria possível. Por meio da fé, pude desfrutar e viver as mais diversas bênçãos que Ele concedeu em toda a minha vida e em minha jornada acadêmica. Por Ele e para Ele, sou grata.

À minha família. Meus pais, por sempre me incentivarem a estudar, a trabalhar, a ir atrás dos meus sonhos. À minha irmã, por sempre me ajudar em tudo e me ensinar a ser alguém na vida. Sou eternamente grata a eles, minhas maiores inspirações.

Ao meu marido. Ele, que esteve comigo em todas as etapas finais da minha graduação, me ajudou, me acalmou nos momentos de frustração e ansiedade e me inspira diariamente. A minha rotina se tornou mais leve e suportável após sua chegada à minha vida.

À minha orientadora, Professora Doutora Camila Baldasso, a quem expresso minha mais profunda gratidão. Obrigada por aceitar embarcar nessa jornada de Trabalho de Conclusão de Curso comigo e por dedicar seu tempo, conhecimento e paciência.

À Universidade de Caxias do Sul, por proporcionar toda a experiência de graduação, e por fornecer a infraestrutura, os laboratórios e o ambiente acadêmico necessários para a execução deste trabalho de pesquisa.

RESUMO

O crescente acúmulo de resíduos plásticos tem se consolidado como um dos principais desafios ambientais da atualidade, exigindo o reprocessamento de polímeros como uma estratégia crucial para a economia circular e a redução da dependência de matéria-prima virgem. Neste contexto, o poliestireno (PS) destaca-se pela sua ampla aplicação industrial e pela alta geração de resíduos. Entretanto, a reutilização industrial do PS é desafiada pela degradação térmica e mecânica sofrida durante o reprocessamento, que pode impactar significativamente as propriedades físico-químicas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade técnica da utilização do poliestireno reciclado em peças moldadas por injeção, por meio da comparação sistemática de suas propriedades com o poliestireno virgem. A metodologia consistiu na moldagem por injeção de corpos de prova de poliestireno virgem, de poliestireno reciclado e de composições binárias, em diferentes proporções. Nas propriedades químicas, foi utilizada a análise Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). As propriedades térmicas foram avaliadas por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Análise Termogravimétrica (TGA). Adicionalmente, a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada para analisar a morfologia de fratura das amostras e para analisar a resistência mecânica, desenvolveu-se uma metodologia para avaliar a resistência à fixação ao torque através do parafusamento. Os resultados de FTIR demonstraram a preservação da estrutura química característica do poliestireno, sem evidências de alterações significativas associadas à oxidação. Na análise de DSC, as temperaturas de transição vítrea permaneceram próximas às do poliestireno virgem, variando de 99,1 a 101,8 °C. A análise de TGA demonstrou comportamento térmico semelhante entre as composições, apesar de diferenças nas temperaturas de início e máxima taxa de degradação. As análises de MEV evidenciaram alterações morfológicas associadas à incorporação do material reciclado, especialmente com o aumento de sua proporção. Apesar dessas alterações, o ensaio de fixação demonstrou desempenho funcional satisfatório das amostras na aplicação proposta. Conclui-se que a incorporação de poliestireno reciclado em suportes de placa 4x2 é tecnicamente viável, contribuindo para o aproveitamento de resíduos de poliestireno, a redução do consumo de matéria-prima virgem e o fortalecimento de práticas alinhadas à economia circular.

Palavras-chave: Poliestireno; moldagem por injeção; propriedades químicas mecânicas e térmicas; viabilidade técnica; economia circular.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma do processo de injeção	14
Figura 2- Máquina injetora.....	15
Figura 3- Desenho esquemático dos principais componentes de uma máquina injetora.....	15
Figura 4- Tipos de estruturas poliméricas: a) linear; b) ramificada; c) ligações cruzadas; d) em rede.	17
Figura 5- Fluxograma de categorias e subcategorias dos termoplásticos	19
Figura 6- Arranjo geométrico dos polímeros amorfos.	19
Figura 7- Estrutura dos polímeros semicristalinos.....	21
Figura 8- Obtenção do estireno.....	23
Figura 9- Fórmula estrutural do poliestireno.....	23
Figura 10- Processo de obtenção do poliestireno	24
Figura 11- Fluxograma de reciclagem mecânica.....	29
Figura 12- Suporte de placa 4x2 injetado.....	34
Figura 13- Absorções espectrais detectadas no espectro de FTIR da amostra PS virgem.....	40
Figura 14- Absorções espectrais detectadas no espectro de FTIR da amostra P-50.....	41
Figura 15- Absorções espectrais detectadas no espectro de FTIR da amostra P-70.....	41
Figura 16- Absorções espectrais detectadas no espectro de FTIR da amostra PS reciclado.	43
Figura 17- Curvas de TGA e DTG da amostra PS virgem.	45
Figura 18- Curvas de TGA e DTG da amostra P-50.	46
Figura 19- Curvas de TGA e DTG da amostra P-70.	47
Figura 20- Curvas de TGA e DTG da amostra PS reciclado.....	48
Figura 21- Curva de DSC do PS virgem.....	49
Figura 22- Curva de DSC do P-50.....	50
Figura 23- Curva de DSC do P-70.....	51
Figura 24- Curva DSC da amostra PS reciclado.....	52

Figura 25- micrografias superficiais obtidas por MEV das amostras: a) PS virgem; b) P-50; c) P-70; d) PS reciclado..... 53

Figura 26- micrografias transversais obtidas por MEV das amostras: a) PS virgem; b) P-50; c) P-70; d) PS reciclado..... 54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Relação de polímeros e suas temperaturas de secagem.	22
Tabela 2- Propriedades mecânicas do poliestireno.....	26
Tabela 3- Propriedades térmicas do poliestireno.	27
Tabela 4- Poder calorífico dos polímeros.	32
Tabela 5- Formulações de misturas com PS reciclado e PS virgem.....	35
Tabela 6- Principais bandas identificadas no FTIR das amostras analisadas.	44
Tabela 7- Comparativo de resultados de TGA e DTG das amostras.	48
Tabela 8- Comparativo de resultados obtidos de Tg nas amostras.	52
Tabela 9- Resultados de resistência ao impacto da parafusadeira com diferentes torques.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS

DSC- Calorimetria Exploratória Diferencial

FTIR - Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier

MEV- Microscopia Eletrônica de Varredura

PS- Poliestireno

TGA- Análise Termogravimétrica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO	13
2.1. OBJETIVO GERAL	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	14
3.1. INJEÇÃO PLÁSTICA	14
3.1.1. MÁQUINAS INJETORAS E SEUS COMPONENTES	14
3.2. POLÍMEROS.....	16
3.2.1. POLÍMEROS NA INDÚSTRIA DE INJEÇÃO PLÁSTICA	18
3.2.2. TIPOS DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS	18
3.2.3. COMPORTAMENTO DOS TERMOPLÁSTICOS NA INJEÇÃO	
PLÁSTICA 22	
3.3. POLIESTIRENO	22
3.3.1. ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA	23
3.3.2. PROPRIEDADES QUÍMICAS.....	25
3.3.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS	25
3.3.4. PROPRIEDADES TÉRMICAS.....	26
3.3.5. APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DO POLIESTIRENO	27
3.4. POLÍMEROS RECICLADOS.....	28
3.4.1. RECICLAGEM MECÂNICA	29
3.4.2. RECICLAGEM QUÍMICA.....	30
3.4.3. RECICLAGEM ENERGÉTICA.....	31
3.4.4. RECICLAGEM DO POLIESTIRENO	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1. MATERIAIS	34
4.1.1. FORMULAÇÕES DE MISTURAS DE POLIESTIRENO	
RECICLADO E POLIESTIRENO VIRGEM	34
4.1.2. PARÂMETROS DE INJEÇÃO	35

4.2. MÉTODOS	36
4.2.1. ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	36
4.2.2. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)	36
4.2.3. CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)	37
4.2.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA (MEV)	37
4.2.5. ENSAIOS MECÂNICOS	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1. ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	39
5.2. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	44
5.3. CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA	48
5.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA (MEV)	53
5.5. AVALIAÇÃO DE IMPACTO POR FIXAÇÃO	56
5.6. SÍNTESE FINAL DOS RESULTADOS	57
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60

1. INTRODUÇÃO

O crescente acúmulo de resíduos plásticos tem se consolidado como um dos principais desafios ambientais da atualidade, exigindo o desenvolvimento de estratégias eficazes para o gerenciamento e a valorização desses materiais (MAZZER; CAVALCANTI, 2004). Nesse contexto, a reciclagem e o reprocessamento de polímeros surgem como alternativas sustentáveis para minimizar o impacto ambiental e reduzir a dependência de matérias-primas virgens na indústria de transformação.

Dentre os diversos polímeros utilizados na indústria, o poliestireno destaca-se por sua ampla aplicação industrial, bem como sua elevada geração de resíduos de difícil degradação. Assim, o reprocessamento desse material, especialmente para uso em processos de moldagem por injeção, apresenta-se como uma solução promissora para promover a economia circular e otimizar o aproveitamento dos recursos (XU et al., 2024).

No entanto, a reutilização de polímeros em escala industrial impõe desafios relacionados à degradação térmica e mecânica do material, que podem comprometer suas propriedades e o desempenho do produto final. Durante o reprocessamento, alterações estruturais - cisão de cadeias, oxidação e perda de aditivos - podem impactar significativamente a fluidez, a resistência e a estabilidade dimensional do material, tornando seu comportamento distinto daquele que é observado em polímeros virgens.

A degradação resultante do reprocessamento exige uma análise rigorosa das propriedades do material. Técnicas de caracterização como a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e a Análise Termogravimétrica (TGA) são indispensáveis para avaliar o comportamento térmico e a estabilidade do material, enquanto a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Além disso, ensaios mecânicos são necessários para avaliar o desempenho funcional dos produtos obtidos a partir de materiais reciclados (CRESPO, 2025; DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007). A comparação sistemática desses resultados com o material virgem oferece a base técnica para validar o uso sustentável do poliestireno reciclado.

Para delimitar o objeto de estudo, optou-se pelo suporte de placa 4x2, cuja escolha se justifica pelo elevado volume de produção anual em relação a outros componentes plásticos injetados, sendo essencial para instalações elétricas em

ambientes residenciais, industriais e comerciais. O descarte do poliestireno associado a produtos desse tipo representa uma oportunidade de investigação de alternativas de reaproveitamento, tornando relevante a análise de diferentes composições de poliestireno virgem e reciclado, incluindo materiais constituídos integralmente por material reciclado, como contribuição à economia circular.

Além disso, a geometria e a funcionalidade da peça exigem estabilidade dimensional e resistência mecânica adequadas, propriedades que podem ser influenciadas pelo histórico térmico e mecânico do polímero durante o reprocessamento. Dessa forma, o suporte de placa 4x2 constitui um objeto adequado para a comparação entre materiais virgens e reciclados, permitindo avaliar não apenas as alterações nas propriedades químicas, térmicas e morfológicas do poliestireno, mas também seu desempenho funcional na aplicação proposta. Essa abordagem está alinhada ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12 (ODS 12) - Consumo e Produção Responsáveis -, especialmente à meta de reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reutilização (IPEA, s.d.).

2. OBJETIVO

Neste capítulo estão descritos os objetivos gerais e específicos do presente trabalho.

2.1.OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade técnica da utilização de poliestireno reciclado em comparação ao poliestireno virgem em peças moldadas por injeção plástica.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar e comparar as propriedades mecânicas e térmicas dos corpos de prova injetados, quantificando o efeito da adição do reciclado em relação ao material 100% virgem;

Avaliar o impacto da incorporação de poliestireno reciclado nas propriedades mecânicas de peças injetadas, comparando diferentes proporções de misturas com o material 100% virgem;

Caracterizar, por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a microestrutura e a morfologia superficial e transversal das amostras de poliestireno virgem, reciclado e de suas misturas, identificando possíveis alterações associadas ao reprocessamento do material;

Avaliar a viabilidade técnica da incorporação de poliestireno reciclado em peças injetadas, relacionando o desempenho obtido nas diferentes formulações com o potencial de substituição parcial ou total do poliestireno virgem.

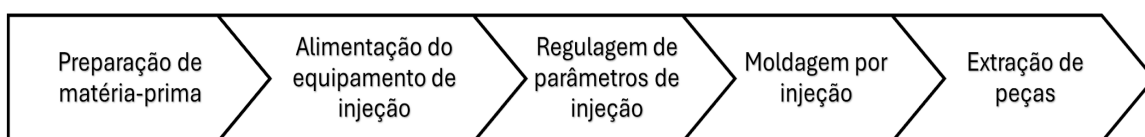
3. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

3.1. INJEÇÃO PLÁSTICA

A injeção de polímeros é um processo industrial amplamente utilizado que consiste na fusão de materiais termoplásticos para a fabricação de componentes em larga escala. Esse processo é realizado por meio de uma máquina injetora e destaca-se por sua elevada eficiência e versatilidade, sendo um dos métodos mais empregados na indústria para a produção de peças com excelente acabamento superficial, alta precisão dimensional e boa durabilidade (SOUSA; GAUDÊNCIO, 2023).

O processo de injeção, desde a preparação da matéria-prima até a obtenção do componente final, pode ser descrito por uma sequência de etapas sucessivas, representadas no fluxograma da Figura 1 (SENADOR, 2013).

Figura 1- Fluxograma do processo de injeção



Fonte: A autora (2025).

3.1.1. MÁQUINAS INJETORAS E SEUS COMPONENTES

As máquinas injetoras são equipamentos industriais especiais para a fundição e moldagem de polímeros, ilustrados na Figura 2. Caracterizam-se pela elevada precisão, repetibilidade e capacidade de operação em larga escala, sendo utilizados em diferentes segmentos industriais de transformação plástica.

O desempenho dos equipamentos depende de variáveis como pressão, temperatura e velocidade, que devem ser ajustadas conforme as propriedades reológicas do material polimérico que será utilizada para a injeção e também de acordo com as especificações do produto final.

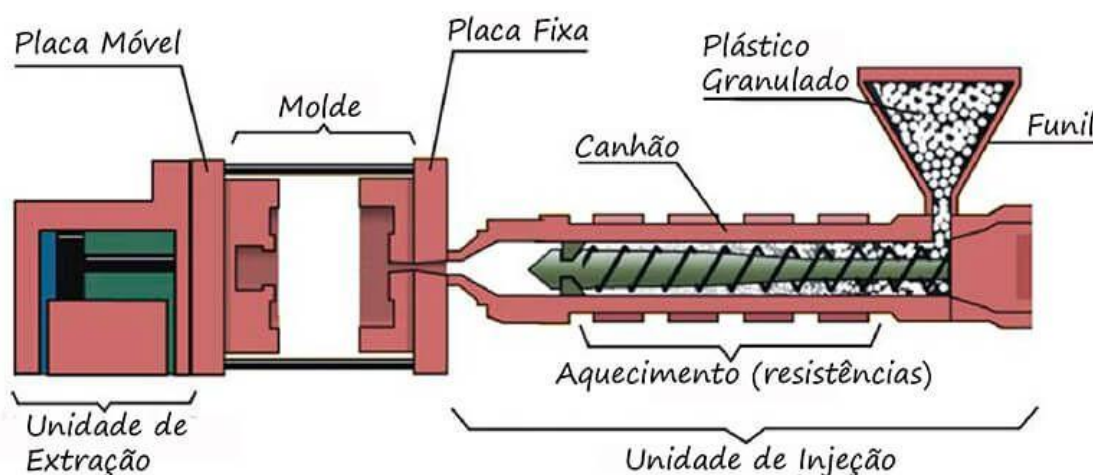
Figura 2- Máquina injetora.



Fonte: Godoy (s.d).

As máquinas injetoras são formadas por um conjunto de sistemas e componentes que atuam de maneira integrada para garantir o correto funcionamento do processo de moldagem. Os componentes principais de uma injetora plástica são o funil de alimentação de material, canhão de injeção, bico injetador, rosca de plastificação, que estão ilustrados na Figura 3 (SENADOR, 2013).

Figura 3- Desenho esquemático dos principais componentes de uma máquina injetora.



Fonte: Madeiplast (2025).

O funil de alimentação é a entrada da matéria-prima na injetora, no início do processo de plastificação, e sua função é direcionar os grânulos para a zona de alimentação da rosca, o canhão. No canhão, o plástico é aquecido em altas temperaturas, ocasionando o processo de fundição e promovendo a plastificação. A

rosca de plastificação está localizada dentro do canhão e a mesma possui três zonas: de alimentação, de compressão e de dosagem. Suas funções são (SENADOR, 2013):

- a) transportar;
- b) comprimir;
- c) fundir;
- d) homogeneizar;
- e) dosar o material plástico.

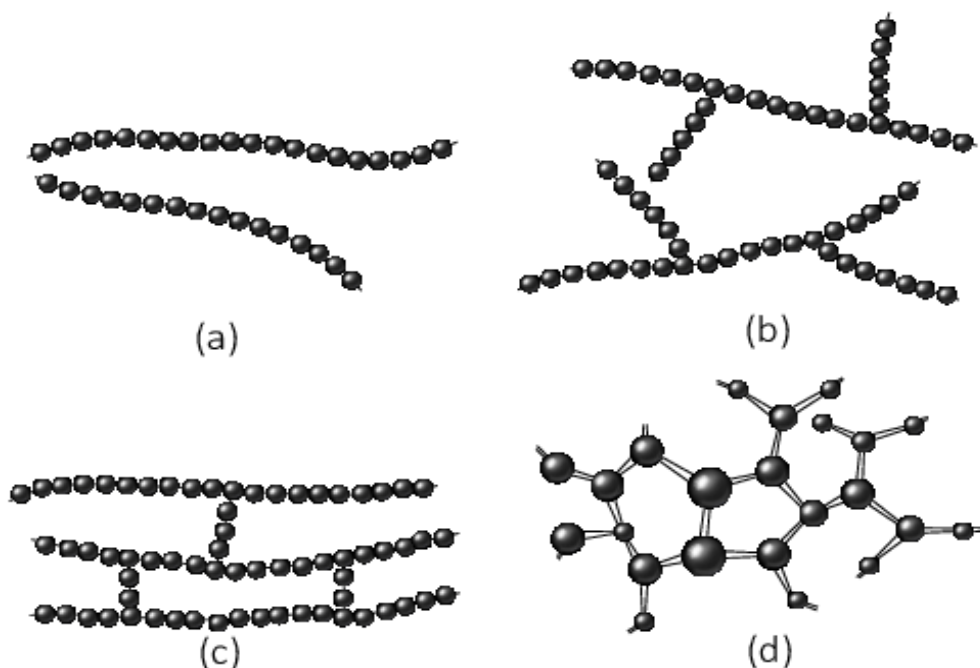
O bico injetor é a conexão entre o molde e o canhão da injetora. É por meio dele que ocorre a passagem do material do interior do cilindro para o interior do molde, sem contato externo nem perdas durante o processo.

3.2. POLÍMEROS

Quando moléculas atingem um tamanho muito grande, devido a um número muito elevado de átomos encadeados entre si, passam a apresentar características próprias gerais e são chamadas de macromoléculas. Essas propriedades decorrem das interações intramoleculares e intermoleculares, que se tornam muito mais relevantes e dominantes do que aquelas associadas apenas à natureza química dos átomos ou aos grupamentos funcionais. Encontram-se macromoléculas tanto de origem natural, como algodão, celulose e amido, quanto de origem sintética, como poliestireno e nylon (MANO, MENDES, 1999). Entre essas macromoléculas, destacam-se os polímeros, que são formados pela repetição de unidades estruturais chamadas monômeros e constituem uma classe especial de materiais com grande diversidade de propriedades.

A palavra polímeros vem do grego e significa "muitas partes" (poli- muitas e meros- partes, muitas partes), ou seja, são formados pela repetição de várias partes iguais e possuem elevado peso molecular que pode chegar a 10^4 e 10^6 (MANO, MENDES, 1999). Este encadeamento de moléculas pode estar organizado em diversas formas, como ligações cruzadas, ramificações, estruturas em rede e estruturas lineares, ilustradas na Figura 4, que distinguem os polímeros entre si.

Figura 4- Tipos de estruturas poliméricas: a) linear; b) ramificada; c) ligações cruzadas; d) em rede.



Fonte: Bastos de Castro (2017).

As ligações intramoleculares e intermoleculares influenciam diretamente na estrutura polimérica, bem como suas propriedades mecânicas e densidade. As longas ramificações aumentam a resistência ao impacto, diminuem a densidade e facilitam o processamento. Já as estruturas lineares permitem melhor cristalinidade e resistência à tração.

As ligações intramoleculares ocorrem dentro das moléculas poliméricas e são ligações primárias e fortes que normalmente são do tipo covalente. Estas ligações, junto com o arranjo das unidades de repetição, determinam a estrutura química e o tipo de cadeia carbônica do polímero, além de influenciar fortemente a flexibilidade da cadeia e estabilidade do polímero. Por sua vez, as intermoleculares são ligações fracas e secundárias que influenciam diretamente as propriedades mecânicas, térmicas e químicas, como temperatura de fusão, solubilidade, deformação etc. A atração entre cadeias depende das forças intermoleculares e, quanto mais fortes as forças, mais difícil é sua separação (SARAIVA, 2020).

3.2.1. POLÍMEROS NA INDÚSTRIA DE INJEÇÃO PLÁSTICA

Os materiais poliméricos chamados de “termoplásticos” são polímeros sintéticos que se caracterizam pela sua facilidade de fundição ao serem aquecidos e por endurecerem ao resfriar, sem perder suas propriedades. Se houver reaplicação de temperatura e pressão, o material novamente irá fluir e amolecer, visto que o processo é completamente reversível (ANDRADE, 2019).

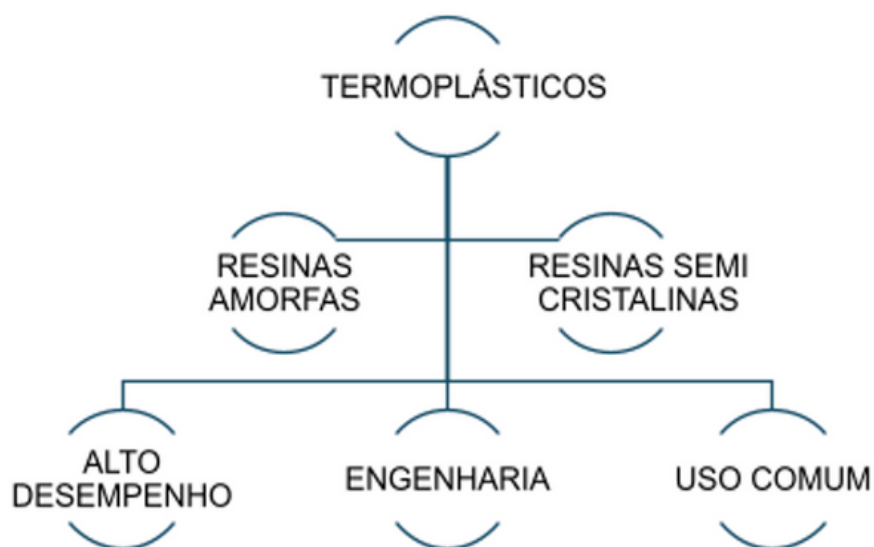
Sua estrutura molecular é caracterizada por macromoléculas lineares ou ramificadas ligadas por ligações intermoleculares de Van der Waals, que dão alta maleabilidade ao material. Com a capacidade de resistir a altas temperaturas sem degradação durante o processo de injeção, os termoplásticos apresentam propriedades como (UGHOC, 2023):

- Boa resistência e durabilidade: apresentam boa resistência ao desgaste, conferindo maior vida útil ao material em diversas aplicações;
- Flexibilidade: apresentam um grande range de flexibilidade (da mais flexível à mais rígida), dependendo da estrutura e do arranjo geométrico do termoplástico a ser trabalhado;
- Maleabilidade e versatilidade: quando o termoplástico é aquecido, as forças intermoleculares de Van der Waals enfraquecem e tornam o material flexível e, se ele é exposto a altas temperaturas, pode se tornar um líquido viscoso. Já quando é resfriado, ele se solidifica novamente, sem perder suas propriedades.

3.2.2. TIPOS DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

Os termoplásticos podem ser divididos em duas grandes categorias: polímeros amorfos e polímeros semicristalinos, e em três subcategorias: alto desempenho, de engenharia e de uso comum (commodities) (UGHOC, 2023), conforme representado no fluxograma da Figura 5.

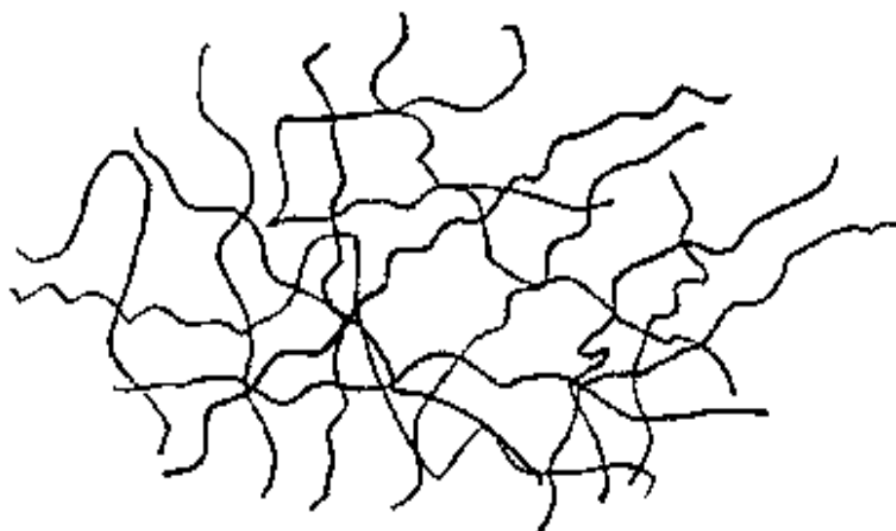
Figura 5- Fluxograma de categorias e subcategorias dos termoplásticos



Fonte: A autora (2025).

Os termoplásticos amorfos são materiais que apresentam estrutura randômica, ou seja, as cadeias moleculares não se organizam de forma ordenada e repetitiva e não possuem um arranjo geométrico definido, como ilustrado na Figura 6.

Figura 6- Arranjo geométrico dos polímeros amorfos.



Fonte: André Duarte B. L. Ferreira (2020)

As propriedades de polímeros amorfos são caracterizadas por (CRAWFORD, 1998):

- Baixa resistência química: devido à estrutura molecular randômica, materiais químicos adentram e rompem com maior facilidade as ligações intermoleculares ali presentes;

- Baixa resistência ao atrito e fadiga: a estrutura aleatória dos polímeros amorfos contribui para que não haja suporte adequado para melhoria em suas propriedades mecânicas;

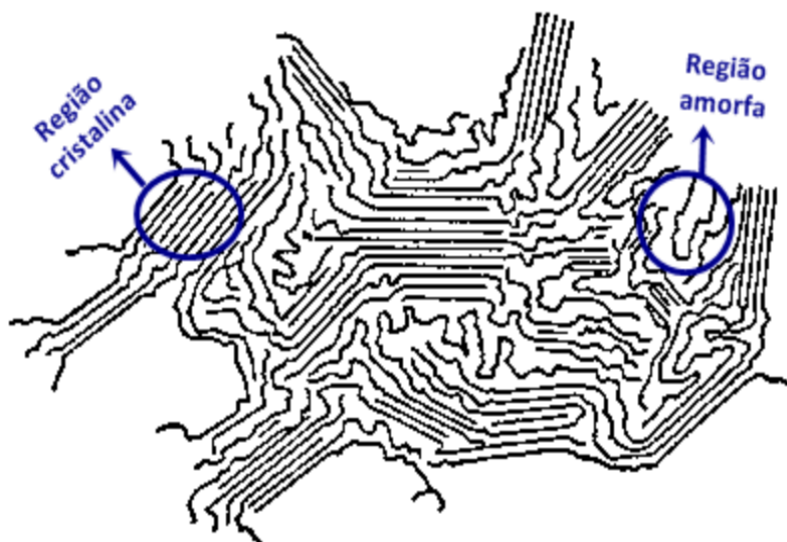
- Ampla faixa de “amolecimento”: devido à agitação térmica, as ligações secundárias são progressivamente rompidas. Este processo não ocorre uniformemente em toda matriz em consequência da ausência de uma estrutura definida, resultando em uma ampla faixa de temperaturas de amolecimento

- Estabilidade dimensional elevada: na solidificação, o característico arranjo molecular resulta em mínima variação volumétrica, o que confere baixa contração dimensional ao material.

Dentre os materiais poliméricos, destacam-se como polímeros amorfos, o Poliestireno (PS), o Policloreto de vinila (PVC), o Policarbonato (PC), a Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e Polimetilmetacrilato (PMMA).

Os polímeros semicristalinos são um grupo de materiais cujo arranjo geométrico é ordenado e bem organizado, porém também possuem grandes regiões amorfas, como ilustrado na Figura 7, resultando em uma combinação única de propriedades que variam de acordo com a proporção de cada região, também chamada de grau de cristalinidade, que influencia diretamente as propriedades do material (ESSENTA COMPONENTS, s.d.).

Figura 7- Estrutura dos polímeros semicristalinos



Fonte: Engenharia de Elite

Como características, os polímeros semicristalinos apresentam (CRAWFORD, 1998):

- Ponto de fusão definido: os polímeros semicristalinos permanecem sólidas até atingirem o ponto de fusão específico do material, no qual se transformam em líquido de baixa viscosidade. Isto ocorre devido às ligações secundárias presentes na estrutura molecular, que se rompem ao mesmo tempo;
- Alta resistência química: o arranjo geométrico bem estruturado dificulta a penetração de substâncias químicas, conferindo a este material excelente resistência a solventes e produtos químicos;
- Boa resistência à fadiga e ao desgaste: o arranjo geométrico confere ao material uma boa resistência a esforços contínuos e à abrasão;
- Alta contração: quando o material passa do estado amorfo para o cristalino, as moléculas se organizam de forma alinhada e compacta, ocasionando uma redução significativa de volume durante o resfriamento do material;
- Opacidade: o grau de cristalinidade afeta a transparência do polímero. Se a proporção de regiões cristalinas é maior, o material acaba se tornando opaco ou translúcido. Já ao contrário, se a proporção de regiões amorfas é maior, maior é a transparência.

Dentre os polímeros semicristalinos, destacam-se o polietileno (PE), o polipropileno (PP), a poliamida (PA) e o tereftalato de polietileno (PET).

3.2.3. COMPORTAMENTO DOS TERMOPLÁSTICOS NA INJEÇÃO PLÁSTICA

O início do processo de injeção de termoplásticos envolve a seleção criteriosa do material que melhor atenda aos requisitos da aplicação desejada. Para isso, são avaliadas as propriedades químicas, físicas e mecânicas do polímero, garantindo que o desempenho seja compatível com a finalidade proposta. Após essa etapa inicial, a execução do processo de injeção deve ser conduzida de forma precisa e controlada, assegurando a qualidade do produto final e o êxito na aplicação.

Além disso, o material termoplástico destinado à alimentação da máquina de injeção deve estar em forma de grânulos e completamente isento de umidade. Para garantir essa condição, realiza-se o processo de desumidificação, responsável por remover a umidade absorvida antes do aquecimento. Caso essa etapa não seja conduzida corretamente, podem ocorrer degradação e perda das propriedades mecânicas do polímero (SENADOR, 2013). Assim, os polímeros que requerem desumidificação prévia estão listados na Tabela 1, juntamente com as respectivas temperaturas de secagem.

Tabela 1- Relação de polímeros e suas temperaturas de secagem.

Tipo de polímero	Temperatura de secagem (°C)
Nylon	80 – 90
PET	160 – 180
Polycarbonato	120 – 130
ABS	80 – 90

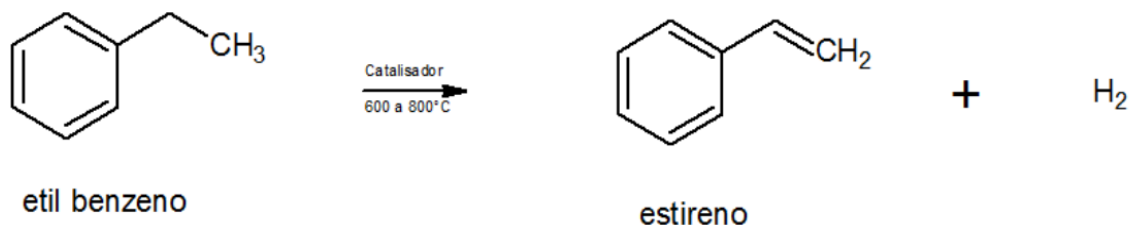
Fonte: A autora (2025).

3.3. POLIESTIRENO

O poliestireno é um polímero sintético aromático, classificado como um polímero termoplástico. Historicamente, ele é considerado o pioneiro entre os termoplásticos, tendo sua primeira produção comercial bem-sucedida registrada na Alemanha em 1930. Este material é obtido diretamente a partir do seu monômero

base, o estireno. O estireno, por sua vez, é um insumo básico da indústria petroquímica, comumente obtido a partir do etilbenzeno, que é derivado do benzeno e do eteno, vide Figura 08 (MONTENEGRO; SERFATY, 2002).

Figura 8- Obtenção do estireno.

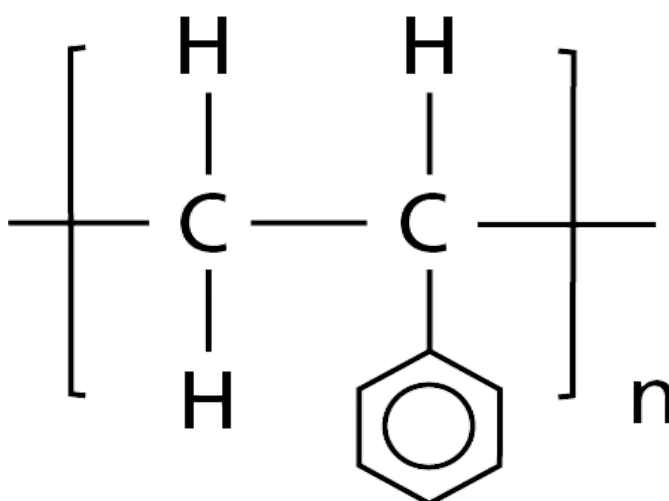


Fonte: Junqueira Zeviani Junqueira Zeviani (2016).

3.3.1. ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O poliestireno é um homopolímero resultante da polimerização do monômero estireno (C_8H_8), um composto derivado do petróleo (SINGH; CHAUHAN; GAUR, 2025). Sua estrutura química básica é de característica linear e é composta por uma cadeia principal de átomos de carbono, com grupos fenílicos (anel benzênico) ligados lateralmente a cada unidade repetitiva, conforme indicado na Figura 9.

Figura 9- Fórmula estrutural do poliestireno



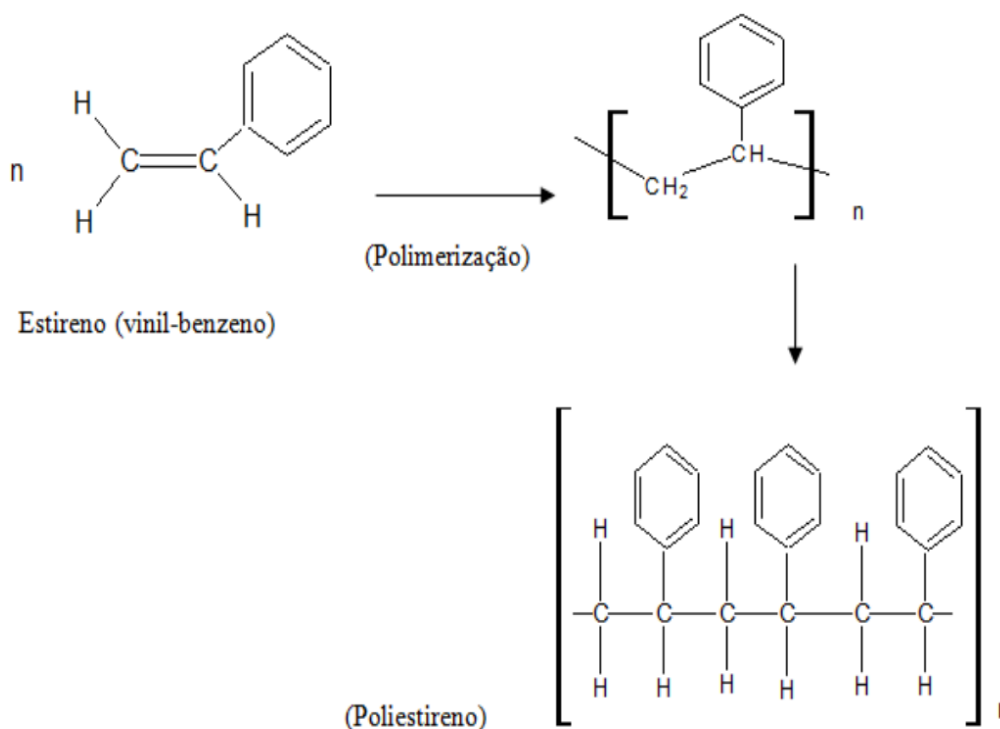
Fonte: Netzsch (s.d.).

A polimerização do estireno pode ocorrer através de diversos mecanismos radicais, catiônicos e aniônicos utilizando métodos de emulsão e suspensão. A

polimerização via radical é comumente utilizada e é induzida via térmica ou com a utilização de peróxidos e é dividida em três etapas: iniciação, propagação e terminação (SINGH; CHAUHAN; GAUR, 2025).

A etapa de iniciação é responsável pela formação de radicais livres que irão crescer e se tornar moléculas de polímeros. Nesta etapa, quanto maior a taxa de iniciação, maior a quantidade de radicais livres no meio reacional, resultando em maior taxa de polimerização. Na propagação, os radicais reagem com as moléculas do monômero de estireno, ocasionando um aumento da cadeia do radical livre. A taxa de propagação é proporcional à taxa de consumo do monômero de estireno e à taxa de produção do polímero. O processo se repete centenas a milhares de vezes, formando longas cadeias de poliestireno. Na terminação, é a etapa em que a reação ocorre quando os radicais se encontram e reagem, formando moléculas de polímero (MACHADO, 2004). O processo de formação do poliestireno é ilustrado na Figura 10.

Figura 10- Processo de obtenção do poliestireno



Fonte: Da Silva Rodrigues *et al.* (2017)

A técnica de polimerização a ser utilizada varia conforme as propriedades desejadas no produto final e nas condições operacionais.

3.3.2. PROPRIEDADES QUÍMICAS

As propriedades químicas do poliestireno e dos termoplásticos em geral estão intimamente ligadas à sua estrutura, que, devido às suas unidades repetitivas de estireno, confere elevada estabilidade molecular e baixa reatividade, tornando-o quimicamente inerte sob condições normais.

À frente de agentes químicos como ácidos e bases, o polímero apresenta resistência significativa devido à sua natureza apolar. Porém, em contrapartida, o polímero se torna altamente suscetível ao ataque de solventes orgânicos apolares como acetona e tolueno. Além disso, o poliestireno pode sofrer degradação oxidativa, resultando em perda de desempenho quando exposto a fortes agentes oxidantes ou radiação ultravioleta (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

3.3.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS

O estudo das propriedades mecânicas do poliestireno é essencial para compreender seu comportamento sob diferentes condições de uso e processamento. De acordo com Ashby (2013), o conhecimento detalhado do desempenho mecânico de um material permite selecionar o polímero mais adequado para cada finalidade, equilibrando resistência, rigidez e ductilidade conforme as exigências do produto final. Os parâmetros referentes às características mecânicas do poliestireno estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Propriedades mecânicas do poliestireno.

Propriedades	Intervalo de parâmetros
Resistência à tração	35,9 – 56,2 Mpa
Módulo de Young	1,2 – 2,6 GPa
Limite de escoamento	28,7 – 56,2 Mpa
Resistência à compressão	31,6 – 61,8 Mpa
Alongamento	1,2 – 3,6 %
Dureza- Vickers	8,6 – 16,9 HV
Tenacidade à fratura	0,7 – 1,1 Mpa.m ^{1/2}

Fonte: Ashby (2013)

Estas propriedades em conjunto descrevem o poliestireno como um material rígido, duro e frágil, com baixa deformação antes da ruptura e resistência mecânica moderada, restringindo a aplicação do material em componentes sujeitos a altas solicitações dinâmicas.

3.3.4. PROPRIEDADES TÉRMICAS

O poliestireno (PS), como polímero amorfo, apresenta propriedades térmicas que são fundamentais para caracterizar seu comportamento sob variação de temperatura. Os parâmetros referentes às características térmicas do polímero estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3- Propriedades térmicas do poliestireno.

Propriedades	Intervalo de parâmetros
Temperatura de transição vítrea	73,9 – 110 °C
Condutividade térmica	0,121 – 0,131 W/m.K
Capacidade calorífica específica	1.690 – 1.760 J/ kg.K
Coeficiente de expansão térmica	90 – 153 μ strain/ °C
Temperatura máxima de operação	76,9 – 103 °C
Temperatura de fusão	240 °C

Fonte: Ashby (2013)

Com base nas propriedades térmicas apresentadas, o poliestireno pode ser utilizado em aplicações com foco em isolamento térmico, o que é confirmado por sua baixa condutividade térmica, que indica que o material resiste bem à transferência de calor. Sua temperatura de transição vítrea sugere que o material irá começar a perder a rigidez a partir de 73,9 °C, e sua temperatura máxima de serviço indica que o limite seguro de uso do material deve estar dentro do valor estabelecido de no máximo 103 °C, ou seja, seu limite de trabalho e de transição vítrea estão dentro da mesma faixa de temperaturas. Já seu coeficiente de expansão térmica é elevado e indica que o termoplástico apresentará uma expansão dimensional significativa conforme o aumento da temperatura, bem como uma contração quando for resfriado.

3.3.5. APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DO POLIESTIRENO

O poliestireno (PS) destaca-se como um dos termoplásticos mais onipresentes e versáteis na indústria global, impulsionado por seu baixo custo, transparência e facilidade de processamento. Sua adaptabilidade permite que seja utilizado em três formas principais, cada uma atendendo a setores industriais distintos: poliestireno cristal (GPPS), poliestireno de alto impacto (HIPS) e o poliestireno expandido (EPS).

O poliestireno cristal (GPPS) apresenta características como transparência, alto brilho e fácil pigmentação. Entre suas aplicações industriais constam: embalagens para a indústria alimentícia e copos descartáveis (MONTENEGRO; SERFATY, 2002).

O poliestireno expandido (EPS) é uma espuma rígida obtida durante a expansão do material durante sua polimerização. Este fenômeno ocorre devido à adição de agentes de expansão, como o gás carbônico, durante a reação. O EPS é utilizado como proteção de embalagens e isolante térmico (MONTENEGRO; SERFATY, 2002).

O poliestireno de alto impacto (HIPS) é o polímero modificado com elastômeros de poli-butadieno. O material é obtido pela polimerização de solução de estireno-butadieno, em que ocorre a formação de um sistema de duas fases devido à imiscibilidade do poliestireno e do poli-butadieno. A diferença entre o poliestireno convencional e o HIPS é a resistência ao impacto e, por esta razão, o mesmo é utilizado na fabricação de eletrodomésticos e computadores (MONTENEGRO; SERFATY, 2002).

3.4. POLÍMEROS RECICLADOS

A produção de polímeros nas indústrias cresce constantemente e, atualmente, não há expectativas de redução destes como matéria-prima, o que ocasiona preocupações na administração dos resíduos gerados. A grande maioria dos polímeros sintéticos é utilizada devido ao alto desempenho e à durabilidade, porém, a vida útil destes é considerada pequena (40% destes materiais têm duração de aproximadamente 1 mês e sua degradação é considerada demorada). Logo, uma das opções viáveis é a reciclagem dos materiais poliméricos.

Em teoria, todo termoplástico é reciclável, podendo ser reutilizado nos processos industriais. A reciclagem dos polímeros pode ser abordada através de três metodologias: reciclagem mecânica, química e energética. Além disso, a reciclagem também pode ser dividida em (FONSECA, s.d.):

- Reciclagem primária: processo em que a matéria-prima virgem a ser reciclada é proveniente de uma fonte confiável, ou seja, sabe-se exatamente a composição do material, pois o mesmo, quando reciclado, deverá gerar produtos com aplicações e propriedades similares;
- Reciclagem secundária: processo que utiliza matéria-prima de pós-consumo, ou seja, resíduos descartados por consumidores ou indústrias. Após o uso, estes resíduos são recuperados e

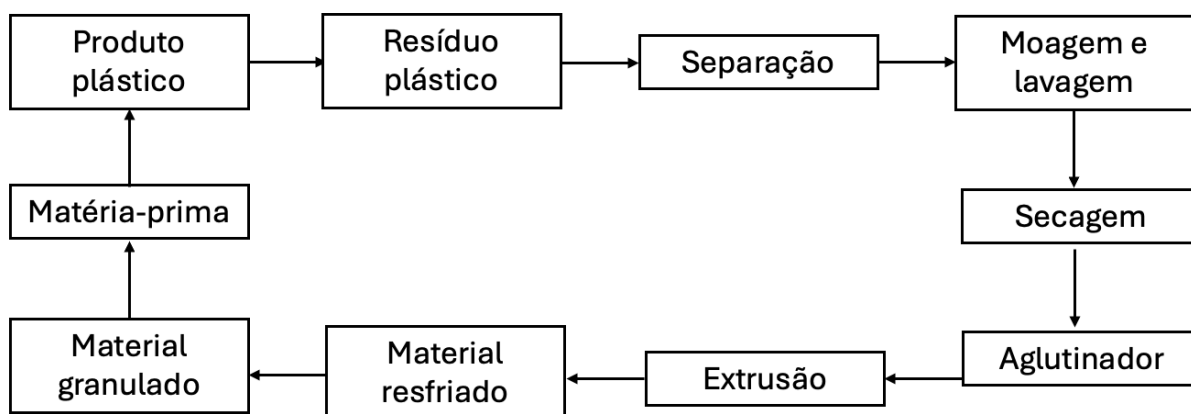
processados para a fabricação de novos produtos que não necessariamente irão ter a mesma finalidade do produto original. Nesta reciclagem, envolvem-se etapas de lavagem e moagem;

- Reciclagem terciária: processo que se baseia na despolimerização, ou seja, ocorre a decomposição molecular controlada, originando novos produtos. Os materiais que não conseguem mais ser recuperados e reprocessados pelas reciclagens primárias e secundárias passam pela reciclagem terciária. Os materiais resultantes são utilizados como matérias-primas e combustíveis.
- Reciclagem quaternária: processo em que o material é processado de modo a se transformar em produtos com alto valor energético, podendo ser utilizado para geração de energia.

3.4.1. RECICLAGEM MECÂNICA

A reciclagem mecânica é o processo mais comum e consolidado para o reaproveitamento de materiais plásticos. A técnica pode ser viabilizada através do reprocessamento por extrusão, injeção, moldagem por compressão e termoformagem (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005). Ela consiste em uma transformação física, sem que ocorram alterações na estrutura química dos resíduos e envolve etapas como 1. separação, 2. moagem, 3. lavagem, 4. secagem, 5. reprocessamento, 6. regranulação em formato de grânulo que pode ser utilizado para a fabricação de novos produtos, conforme Figura 11.

Figura 11- Fluxograma de reciclagem mecânica



Fonte: Portal de Tratamento de água (2012)

A etapa de separação é a mais importante do processo, pois é através dela que se limitam as impurezas a níveis inferiores a 1% m/m, pois a presença de contaminantes, mesmo em concentrações pequenas, pode alterar as propriedades do polímero. De modo geral, a separação ocorre através da diferença de densidade dos resíduos poliméricos, através da utilização de tanques com água ou com soluções alcoólicas e salinas. Após a primeira etapa, ocorre o processo de moagem em moinhos de facas rotativas e peneirado na forma aproximada de grânulos. Neste procedimento, o material moído deve ter dimensões uniformes para que a fusão também ocorra uniformemente. A presença de pó é inconveniente, pois atrapalha o processo de escoamento do material no equipamento de processamento (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

Na etapa da lavagem, o material polimérico moído é lavado em tanques que contêm água ou solução de detergente aquecido. Posteriormente ao processo de lavagem, ocorre a secagem do material, que pode ocorrer através de processo mecânico ou térmico. Esta etapa é essencial, pois dependendo do polímero trabalhado, o mesmo pode sofrer hidrólise durante o reprocessamento. O máximo de umidade residual tolerável é de cerca de 1% m/m, porém pode variar conforme o polímero, atingindo um máximo de 0,02% m/m de tolerância. Após a secagem, os polímeros são formulados com a adição de aditivos como antioxidantes, agentes de acoplamento e plastificantes, dependendo da aplicação final do material (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

3.4.2. RECICLAGEM QUÍMICA

A reciclagem química consiste na despolimerização total ou parcial do polímero, visando convertê-lo em monômeros primários ou em demais produtos químicos. Este processo ocorre através da solvólise (hidrólise, alcoólise e amilose) ou de métodos térmicos (pirólise de baixa e alta temperatura, gaseificação e hidrogenação) (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

A solvólise é utilizada para polímeros como poliésteres, poliamidas e poliuretanos. O processo de hidrólise conduz à recuperação de monômeros através de uma reação com excesso de água, em alta temperatura e com a presença de um catalisador. Na alcoólise, o material é tratado com excesso de metanol e o processo consiste na mistura do metanol na presença de um catalisador ácido ou básico em temperaturas elevadas. A glicólise ocorre quando o polímero é tratado com excesso

de glicol e ocorre a despolimerização através de uma reação de transesterificação (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

A hidrogenação consiste na quebra térmica das cadeias poliméricas do resíduo via utilização de oxigênio. Os produtos resultantes desta técnica são radicais livres altamente reativos que, posteriormente, são saturados com hidrogênio formando hidrocarbonetos como metano, etano e propano. A hidrogenação ocorre em temperaturas entre 440 e 480 °C e pressão de 15 a 25 GPa (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

A gaseificação é a técnica que consiste na introdução controlada de oxigênio para que promova a combustão completa do carbono presente nas cadeias poliméricas, ocorrendo simultaneamente a pirólise e a combustão no interior do leito. O resíduo é submetido à queima em elevadas temperaturas, em torno de 1200 °C, resultando na geração de gases como o monóxido de carbono (CO) e gás hidrogênio (H₂), além de gases inertes (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

A pirólise, por sua vez, é um processo endotérmico que ocorre na ausência de oxigênio, promovendo a degradação molecular dos polímeros. Essa técnica pode ser realizada em duas condições (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005):

- Alta temperatura: o resíduo é decomposto termicamente na ausência de oxigênio, obtendo-se óleos e gases, que posteriormente serão purificados por métodos petroquímicos.
- Baixa temperatura: ocorre a despolimerização dos materiais, via degradação térmica na ausência de oxigênio. Os produtos resultantes são pequenas quantidades de compostos aromáticos e gases leves, como metano, obtendo-se líquidos de altas temperaturas de ebulição.

3.4.3. RECICLAGEM ENERGÉTICA

A reciclagem energética consiste em um processo de tratamento de resíduos plásticos que visa à conversão do material em energia térmica e/ou elétrica por meio da incineração. Embora essa técnica permita a recuperação de volumes significativos de energia a partir de polímeros, ela apresenta limitações ambientais, uma vez que a combustão gera e libera substâncias nocivas, como óxidos de carbono e compostos sulfurados. Por esse motivo, o processo deve ser conduzido em altas temperaturas e

obrigatoriamente associado a sistemas de tratamento de gases, de modo a minimizar os impactos ambientais decorrentes da emissão desses poluentes (ANDRADE, 2019).

A quantidade de energia gerada irá depender do poder calorífico dos hidrocarbonetos a serem queimados. Em média, os plásticos apresentam valores de 35 MJ/kg de poder calorífico, o que faz com que os mesmos apresentem alto potencial energético relativo, quando incinerados. A Tabela 4 apresenta o potencial energético de diversos polímeros (ANDRADE, 2019).

Tabela 4- Poder calorífico dos polímeros.

Polímero	Poder calorífico (MJ/kg)
Polietileno	41,8
Polipropileno	30,9
Policloreto de vinila	13,7
Poliamida	36,8
Poliestireno	39,0

Fonte: Andrade Domingos de Souza (2019).

De modo geral, estas técnicas de reciclagem (mecânica, química e energética) representam alternativas sustentáveis, contribuindo para a redução do impacto ambiental e para a economia circular no setor de polímeros.

3.4.4. RECICLAGEM DO POLIESTIRENO

O poliestireno é o polímero com a menor taxa de reciclabilidade, devido a países que não executam corretamente a reciclagem do material. Dados de países como os Estados Unidos indicam que a taxa de reciclabilidade do poliestireno é $< 1\%$. A reciclagem do poliestireno é, em princípio, simples e eficaz. Porém, devido à densidade de resíduos do polímero ser baixa, os custos de transporte e armazenamento se tornam altos. Existem duas possíveis rotas para a reciclagem do poliestireno: mecânica e química (XU et al., 2024).

A reciclagem mecânica é a forma mais comum de reaproveitamento do poliestireno. No processo, o material é coletado, moído e reprocessado por extrusão

ou injeção, resultando em grânulos que podem ser utilizados para a fabricação de novos produtos. Todavia, as propriedades do material resultante se tornam inferiores ao comparar com o polímero virgem, limitando seu uso para aplicações que necessitam de alto desempenho do material (XU et al., 2024).

Outra rota possível seria a reciclagem química, que permite a recuperação dos monômeros do poliestireno, principalmente o estireno, por meio de métodos térmicos como a pirólise e gaseificação. Esta metodologia tem uma maior flexibilidade sobre a composição e é mais tolerante a impurezas, não requerendo uma triagem minuciosa. Porém, é mais cara e requer maior densidade de resíduos gerados para se tornar economicamente viável (RODRIGUES et al., 2017).

Em síntese, a reciclagem de polímeros representa uma estratégia essencial para reduzir impactos ambientais e promover a sustentabilidade na indústria de materiais plásticos. No caso específico do poliestireno, sua reciclagem apresenta desafios devido às características do material, como baixa densidade e dificuldade de coleta, mas também oportunidades relevantes, já que pode ser reaproveitado em diferentes aplicações após processos mecânicos ou químicos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MATERIAIS

Os principais materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho encontram-se relacionados abaixo:

- a. Poliestireno virgem em cristal (GPPS) - Braskem;
- b. Poliestireno reciclado (grânulos)- Fornecedor Raposo Plásticos;
- c. Suportes 4x2 injetados para interruptores e tomadas, apresentado na Figura 12 — empresa fabricante de produtos elétricos.

Figura 12- Suporte de placa 4x2 injetado.



Fonte: A autora (2025).

4.1.1. FORMULAÇÕES DE MISTURAS DE POLIESTIRENO RECICLADO E POLIESTIRENO VIRGEM

Com as matérias-primas de poliestireno virgem e reciclado, foram formuladas quatro diferentes misturas, a fim de realizar a comparação do desempenho do suporte injetado ao ser submetido aos procedimentos mecânicos e térmicos.

A formulação foi estabelecida com base na variação do percentual de material reciclado em massa (m/m), conforme Tabela 5.

Tabela 5- Formulações de misturas com PS reciclado e PS virgem.

Amostra	Percentual de poliestireno reciclado na amostra
PS virgem	0%
P-50	50%
P-70	70%
PS reciclado	100%

Fonte: A autora (2025).

Os percentuais de poliestireno reciclado utilizados nas formulações P-50 e P-70 foram definidos com base nas diretrizes estabelecidas pelo setor de Engenharia da empresa fabricante de produtos elétricos, que realizou previamente um estudo sobre a incorporação de material reciclado ao processo de moldagem por injeção. Dessa forma, o presente trabalho manteve as formulações previamente definidas pelo setor, possibilitando a avaliação experimental do desempenho dos materiais nas condições já estabelecidas. Deste modo é possível:

1. Avaliar a transição gradual das propriedades físico-mecânicas e térmicas conforme aumenta o teor de reciclado;
2. Identificar limites críticos de desempenho, ou seja, o ponto em que a adição de reciclado compromete significativamente a estabilidade dimensional e a resistência mecânica;
3. Validar a viabilidade técnica do uso de 100% reciclado, comparando-o diretamente com o material virgem.

4.1.2. PARÂMETROS DE INJEÇÃO

O processamento dos corpos de prova foi realizado por moldagem por injeção, conforme os procedimentos operacionais estabelecidos pelo setor de Engenharia de Processos da empresa.

Os parâmetros de injeção foram definidos de acordo com as condições previamente estabelecidas para o processo e mantidos constantes entre as

formulações analisadas, conforme procedimento interno. Em razão da confidencialidade das informações técnicas relacionadas ao processo produtivo, os valores específicos dos parâmetros de injeção não são apresentados neste trabalho.

4.2. MÉTODOS

4.2.1. ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica empregada para identificar grupos funcionais presentes em moléculas orgânicas. A metodologia é amplamente empregada em materiais poliméricos para a análise de interações dos átomos das moléculas com aditivos e plastificantes e também para o monitoramento de alterações na estrutura molecular decorrentes de degradação e envelhecimento do polímero (STUART, 2004).

A técnica de espectroscopia FTIR baseia-se pela vibração molecular dos átomos. O espectro infravermelho é obtido através da passagem da radiação infravermelha pela amostra em análise e é determinado pela fração incidente de radiação absorvida em determinado comprimento de onda. A banda de energia obtida corresponde a uma frequência vibracional característica que permite identificar os componentes químicos presentes (STUART, 2004).

Para a realização desta análise, utilizou-se o espectrofotômetro Nicolet IS10, da marca Thermo Scientific. Os parâmetros de processo foram definidos de acordo com o polímero de estudo, neste caso, para o poliestireno, foi utilizada uma faixa espectral de 4000 a 400 cm^{-1} que é a região de infravermelho médio, com uma resolução padrão de 4 cm^{-1} e o número de varreduras foi definido de 16 a 64 varreduras (NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 2025).

4.2.2. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

A Análise Termogravimétrica (TGA) é uma técnica termoanalítica empregada para a análise da variação de perda e ganho de massa em função da temperatura, através da utilização de uma balança de alta precisão para registrar mudanças de taxa

de massa. Através desta análise é possível analisar as propriedades térmicas de componentes orgânicos e materiais poliméricos (CRESPO, 2025).

Para materiais poliméricos, a técnica de TGA é fundamental para a determinação da estabilidade e decomposição térmica, teor de umidade e oxidação térmica degradativa. A metodologia também permite a estimativa do conteúdo de plastificantes e aditivos, que podem influenciar diretamente o comportamento térmico do material, sendo, portanto, uma ferramenta essencial para a caracterização de polímeros (CRESPO, 2025).

Os parâmetros empregados na análise foram estabelecidos considerando as propriedades intrínsecas do poliestireno. Para a avaliação por TGA, utilizou-se o equipamento da marca NETZSCH TG 209 F3 com faixa de temperatura de 25 °C a 610 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min e atmosfera controlada de gás nitrogênio a 250 ml/min (CHIGWADA; KANDARE; WANG; MAJONI; MLAMBO, 2008).

4.2.3. CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)

A metodologia DSC é fundamental para a análise de materiais poliméricos, pois, por meio dela, é possível detectar processos físicos e obter parâmetros térmicos, como temperatura de transição vítrea, temperatura de transição de capacidade calorífica, temperatura de cristalização, temperatura de fusão e transição cristalina (CRESPO, 2025).

As condições experimentais de análise foram estabelecidas em conformidade com a norma ASTM D3418, que define os procedimentos padronizados para a determinação de transições térmicas. Para a caracterização do poliestireno, empregou-se uma faixa de temperatura inicial de 20 °C e final de 180 °C, abrangendo o intervalo necessário para a identificação da transição vítrea do polímero. O aquecimento foi conduzido em atmosfera inerte de nitrogênio, a uma taxa constante de 10 °C por minuto, a fim de garantir e minimizar efeitos ocasionados por degradação térmica e influência de oxigênio da atmosfera (RODRÍGUEZ-PACHECO et al., [s.d.]).

4.2.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica que fornece informações referentes à morfologia de amostras sólidas. Além disso, a técnica

permite a identificação de componentes químicos presentes na estrutura do material, podendo auxiliar na identificação de contaminantes.

A metodologia de análise baseia-se na utilização de um feixe de elétrons que interage com a superfície da amostra sólida e a analisa de ponta a ponta, em linhas sucessivas, gerando sinais que são convertidos em imagens detalhadas. Estas imagens podem ser ampliadas até 100.000 vezes, permitindo a análise de características estruturais que não são possíveis de serem visualizadas na microscopia óptica convencional (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Para a análise do poliestireno por microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram adotados parâmetros específicos visando minimizar efeitos de carregamento e possíveis danos ao material. As análises conduzidas sob baixo vácuo, utilizando uma tensão de aceleração de 10 kV, aumento de 5000x e distância de trabalho de 15 milímetros.

4.2.5. ENSAIOS MECÂNICOS

4.2.5.1. AVALIAÇÃO DE IMPACTO POR FIXAÇÃO

O ensaio de fixação não possui procedimento padronizado e nem é exigido por norma técnica específica aplicável ao produto avaliado. Desta forma, foi desenvolvido um método experimental com o objetivo de simular as condições típicas de instalação de suportes de placa 4x2 utilizadas por profissionais durante a fixação com parafusadeira em superfícies de construções civis. Nesse procedimento, as amostras foram submetidas a operações de parafusamento, simulando esforços mecânicos gerados pela aplicação do torque durante a instalação.

A avaliação consistiu em verificar a capacidade do material em suportar o torque e a pressão de contato no momento da fixação, sem apresentar fraturas ou deformações que comprometam sua funcionalidade.

Para o ensaio mecânico de fixação, as amostras foram submetidas a diferentes níveis de torque de parafusamento, em incrementos progressivos de 0,6 A 1,2 N.m. O critério de falha foi definido pela ocorrência de deformação do conjunto parafuso-suporte ou perda de capacidade de fixação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

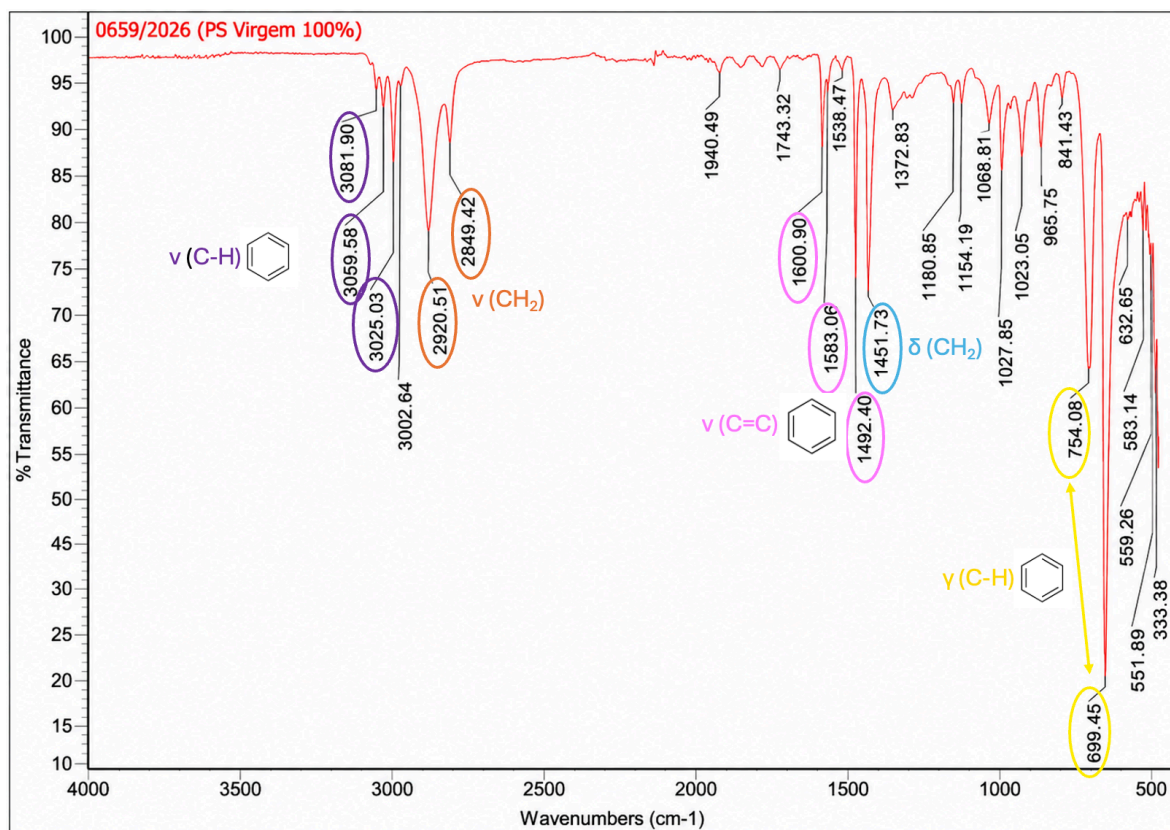
A Figura 13 apresenta o espectro geral de FTIR obtido para a amostra PS virgem e nesta estão destacadas as absorções espectrais características do poliestireno, evidenciando principalmente os picos em 3081,09, 3059,58 e 3025,03 cm^{-1} , atribuídos ao estiramento de ligações -C-H aromáticas, confirmando a presença de estruturas benzênicas na cadeia polimérica (LOPES; FASCIO, 2004).

Além disso, observam-se absorções em 2920,51 e 2849,2 cm^{-1} , associadas ao estiramento assimétrico e simétrico de ligações C-H alifáticas, características de grupos metileno (-CH₂-) presentes na cadeia principal (LOPES; FASCIO, 2004).

As absorções observadas em 1600,90, 1583,06 e 1492,70 cm^{-1} indicam vibrações de estiramento de ligações C=C do anel aromático da estrutura, enquanto a banda em 1451,73 cm^{-1} é atribuída à deformação angular CH₂ da cadeia principal. Por fim, as absorções em 754,08 e 695,45 cm^{-1} são atribuídas às deformações fora do plano das ligações C-H de anéis aromáticos monossubstituídos, constituindo uma das principais evidências espectrais para a identificação de poliestireno, corroborando a caracterização do material (LOPES; FASCIO, 2004).

Adicionalmente, observa-se a ausência de absorções significativas na região de 1700 - 1750 cm^{-1} , faixa característica de grupos carbonila (C=O), indicando menor influência de processos relevantes de oxidação e/ou degradação química. Estes resultados indicam a integridade do poliestireno virgem analisado.

Figura 13- Absorções espectrais detectadas no espectro de FTIR da amostra PS virgem.



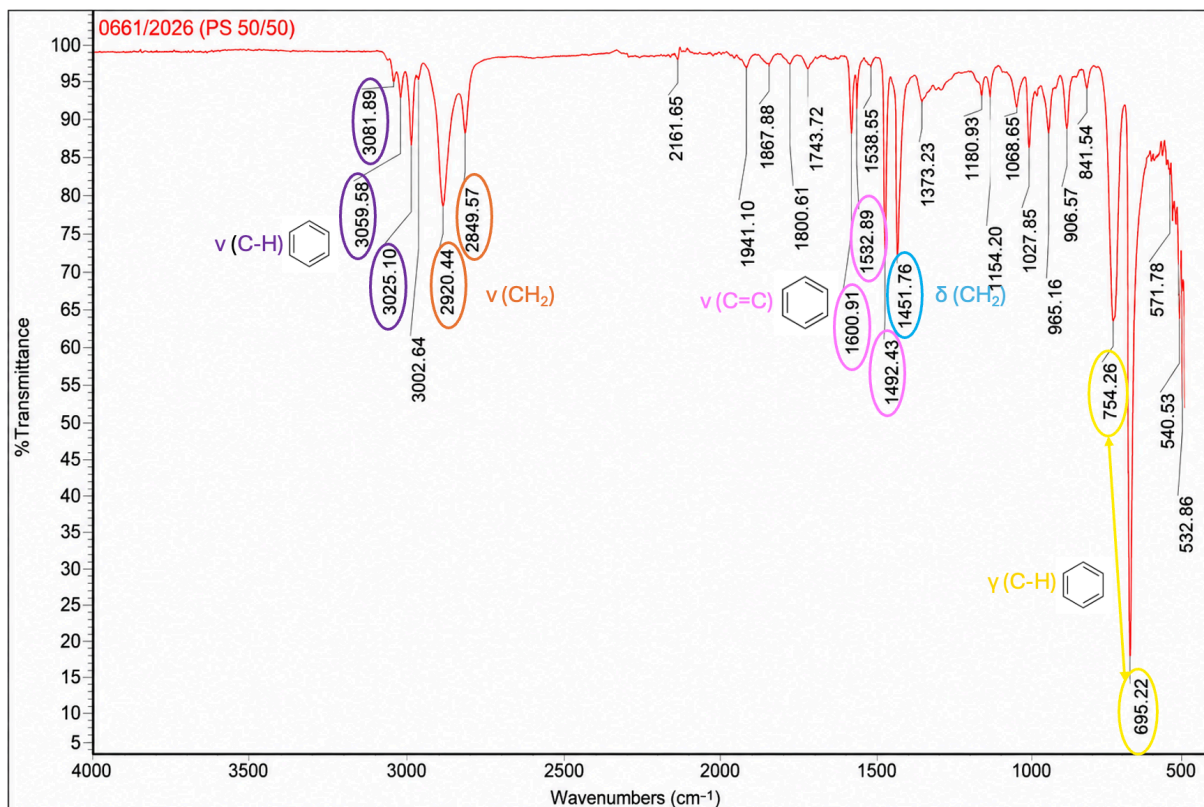
Fonte: A autora (2026).

Já para os resultados espectrais das amostras P-50 e P-70, apresentados respectivamente nas Figuras 14 e 15, seria esperado detectar absorções na região de 1.700–1750 cm⁻¹, características de grupos carbonila (C=O), as quais poderiam indicar a ocorrência de processos degradativos decorrentes de alterações químicas na cadeia polimérica associadas ao reprocessamento da fração reciclada presente nas misturas (LOPES; FASCIO, 2004).

Entretanto, observou-se que as mesmas são muito fracas e pouco definidas, sem a intensidade característica esperada para grupos carbonílicos, indicando a que não correu uma degradação oxidativa significativa no material.

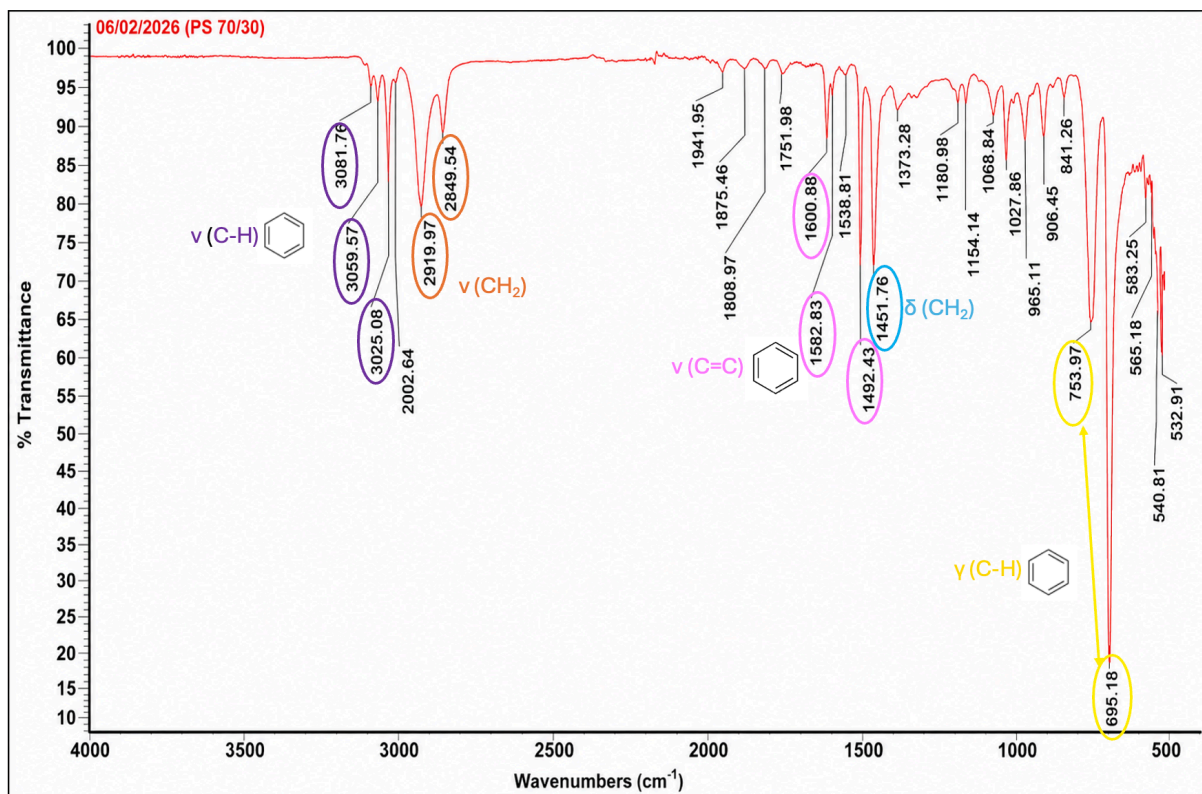
As demais absorções identificadas nos espectros são compatíveis com as bandas características do poliestireno, porém apresentam menor intensidade em comparação ao poliestireno virgem, o que pode estar associado a alterações físicas e estruturais decorrentes do reprocessamento da fração reciclada. Esse comportamento era esperado, uma vez que as amostras são constituídas por misturas de poliestireno virgem e reciclado.

Figura 14- Absorções espectrais detectadas no espectro de FTIR da amostra P-50.



Fonte: A autora (2026).

Figura 15- Absorções espectrais detectadas no espectro de FTIR da amostra P-70.



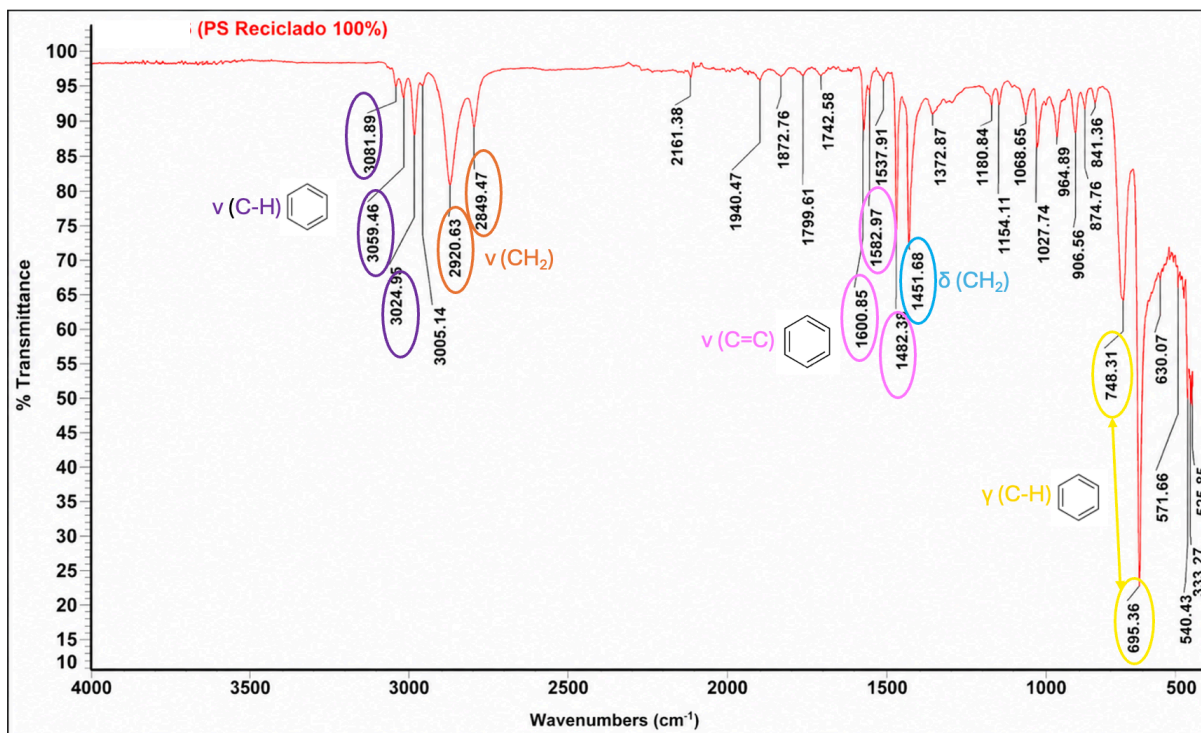
Fonte: A autora (2026).

Por fim, a Figura 16 apresenta o espectro de FTIR da amostra PS reciclado. Observa-se que, mesmo após o processo de reprocessamento, o material mantém as absorções espectrais características do poliestireno, evidenciando a preservação da estrutura química principal, embora com menor intensidade quando comparado ao poliestireno virgem.

Conforme mencionado anteriormente nas análises dos espectros das amostras P-50 e P-70, essa redução de intensidade das bandas pode estar relacionada às alterações estruturais e físicas decorrentes do reprocessamento. Considerando que se trata de uma amostra constituída integralmente por material reciclado, esse comportamento é esperado, uma vez que os ciclos de reprocessamento podem promover modificações estruturais sem que alterem a identidade química predominante do polímero.

Destaca-se também a presença de bandas de menor intensidade na região de $1700 - 1750 \text{ cm}^{-1}$, características de grupos carbonila (C=O), cuja formação é frequentemente relacionada aos processos de degradação oxidativa induzidos por sucessivos ciclos de reprocessamento. Esse resultado sugere que o material reciclado analisado foi provavelmente submetido a um número reduzido de ciclos, não apresentando degradação oxidativa significativa. Dessa forma, os resultados obtidos indicam que, apesar das modificações estruturais, a estrutura química do poliestireno permaneceu predominantemente preservada.

Figura 16- Absorções espectrais detectadas no espectro de FTIR da amostra PS reciclado.



Fonte: A autora (2026).

De modo geral, a análise por FTIR confirmou a identificação do poliestireno em todas as amostras estudadas, uma vez que foram observadas as absorções características associadas aos grupos aromáticos e à cadeia principal do polímero. Destaca-se que as amostras contendo mistura de material virgem e reciclado, bem como a amostra constituída integralmente por material reciclado, não apresentaram absorções significativamente intensas na região de 1700 – 1750 cm⁻¹, características do grupo carbonila. Esse comportamento indica que não foram observadas evidências significativas de degradação oxidativa nas amostras analisadas, sugerindo a preservação da estrutura química característica do polímero.

Através da Tabela 6, é possível obter um resumo das absorções espectrais identificadas nos espectros de FTIR das amostras analisadas, evidenciando a manutenção das características estruturais do poliestireno independentemente da proporção do material reciclado empregado.

Tabela 6- Principais absorções espectrais identificadas no FTIR das amostras analisadas.

Número de onda (cm ⁻¹)	Atribuição	PS Virgem	P-70	P-50	PS Reciclado
~3081	Estiramento C–H aromático	✓	✓	✓	✓
~3059	Estiramento C–H aromático	✓	✓	✓	✓
~3025	Estiramento C–H aromático	✓	✓	✓	✓
~1600	Estiramento C=C aromático	✓	✓	✓	✓
~1582	Estiramento C=C aromático	✓	✓	✓	✓
~1482	Estiramento C=C aromático	✓	✓	✓	✓
~1452	Deformação CH ₂	✓	✓	✓	✓
~754	Deformação C–H aromático fora do plano	✓	✓	✓	✓
~695	Deformação C–H aromático fora do plano	✓	✓	✓	✓
1700–1752	Estiramento C=O (carbonila)	Fraca	Fraca	Fraca	Fraca

Fonte: A autora (2026).

5.2. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

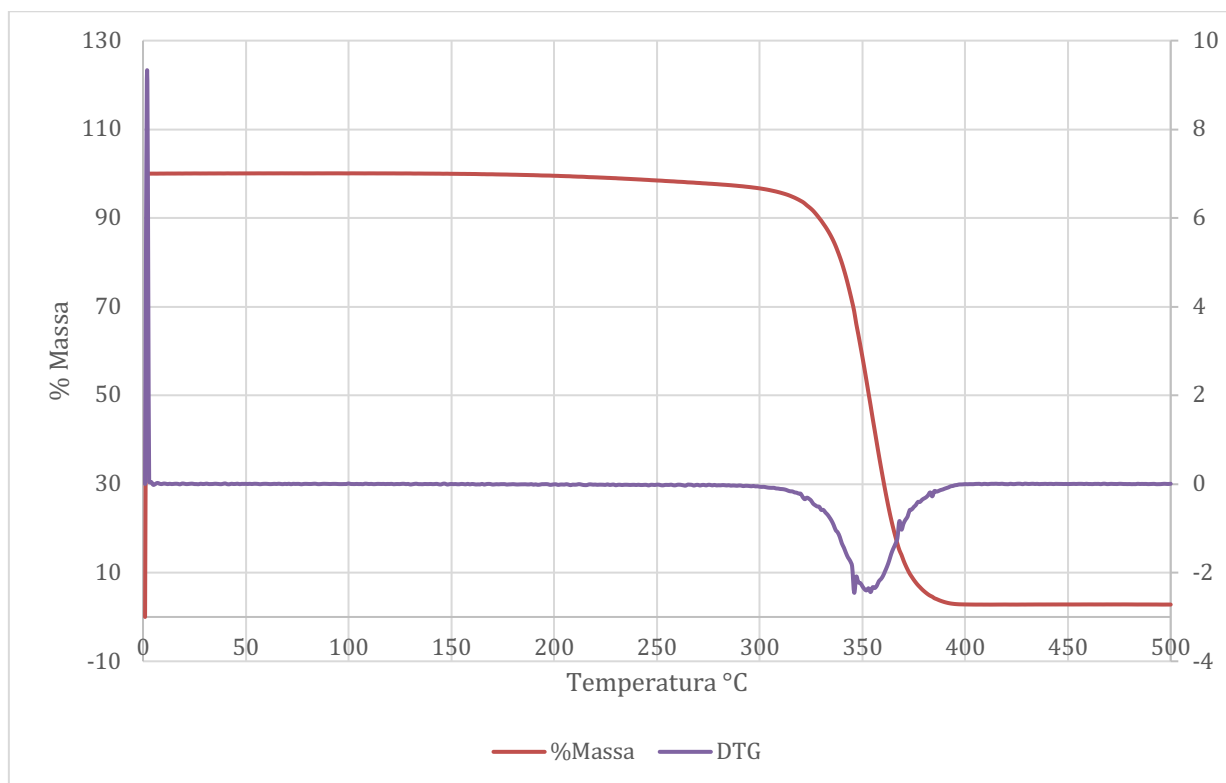
A Figura 17 apresenta as curvas termogravimétricas (TGA) e sua derivada (DTG) da amostra PS virgem. Observa-se que o material apresentou elevada estabilidade térmica em até 345 °C, mantendo sua massa praticamente constante durante esse intervalo de temperatura. A partir de 350 °C, inicia-se o processo de degradação térmica, evidenciado por uma acentuada perda de massa da amostra, conforme evidenciado pela curva TGA e pelo pico observado na curva DTG, correspondente à máxima taxa de decomposição do material.

A análise da curva DTG permitiu identificar a temperatura correspondente à máxima taxa de degradação térmica, observada entre aproximadamente 350 °C, representada pelo pico mínimo da curva derivada. Além disso, a curva apresentou um único pico curto e largo de degradação, indicando que a decomposição do material

ocorreu predominantemente em uma única etapa térmica, porém de forma lenta, característica típica do poliestireno virgem (TORONTECH, 2025).

Como resultado final, observou-se que houve uma perda de aproximadamente 97% da massa inicial, apresentando aproximadamente 3% de resíduo, indicando a presença de possíveis materiais inorgânicos ou impurezas na amostra.

Figura 17- Curvas de TGA e DTG da amostra PS virgem.

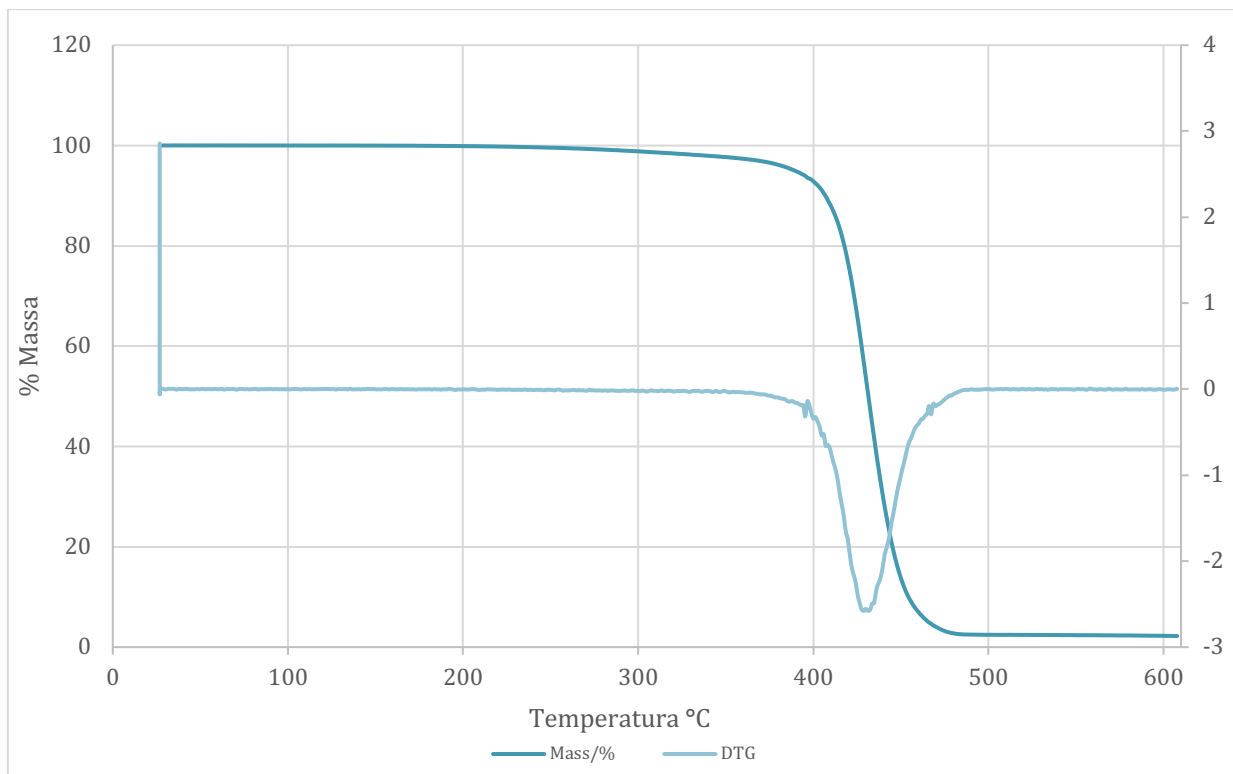


Fonte: A autora (2026).

Para a amostra P-50, a Figura 18 apresenta a curva termogravimétrica (TGA) e a derivada DTG. A partir do gráfico, observou-se que o material manteve sua estabilidade térmica até aproximadamente 300 °C. A partir de 400 °C, observa-se uma acentuada perda de massa na curva TGA, acompanhada por um pico na curva de DTG, indicando o início da degradação térmica. A temperatura correspondente à máxima taxa de degradação foi observada em 440 °C, representada pelo pico na curva DTG.

Como resultado final, observa-se uma perda de até 97% de massa, com um residual de 3% da massa inicial.

Figura 18- Curvas de TGA e DTG da amostra P-50.



Fonte: A autora (2026).

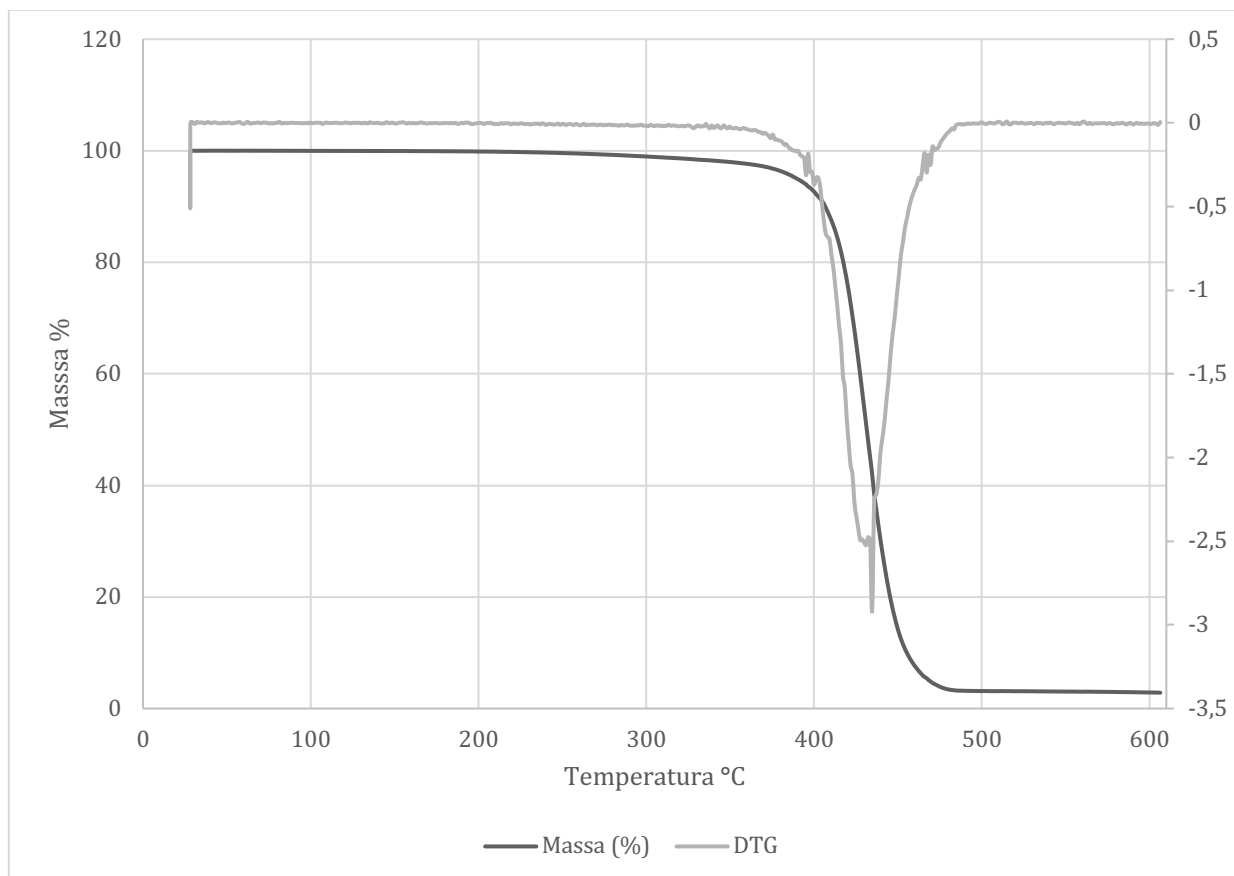
A análise das curvas demonstra que a incorporação de 50% de poliestireno reciclado não promove alterações significativas na estabilidade térmica do material, mantendo um perfil de degradação semelhante ao do poliestireno virgem, caracterizado por uma única etapa de decomposição térmica e com percentual residual de aproximadamente 3%. Além disso, observa-se um pico de DTG mais agudo e alto, indicando que a máxima taxa de degradação ocorre em um intervalo de temperatura mais restrito e de forma mais rápida, sem alterar o perfil de degradação do polímero (TORONTECH, 2025).

O comportamento observado na amostra P-50 se aplica de forma semelhante à amostra P-70. Na Figura 19, observa-se que a degradação ocorre em torno de 300°C e o pico de DTG surge na faixa de temperatura de 440 °C, o mesmo analisado na P-50. No entanto, há algumas diferenças que podem ser observadas, dentre elas:

- a) A perda de massa inicia ligeiramente mais cedo;
- b) O pico de degradação é menos definido, sugerindo uma heterogeneidade maior devido à introdução de um percentual maior de PS reciclado na mistura.

Desta forma, conforme o aumento do percentual de reciclado na mistura, há a ocorrência de uma redução de uniformidade, porém sem comprometer a viabilidade do material.

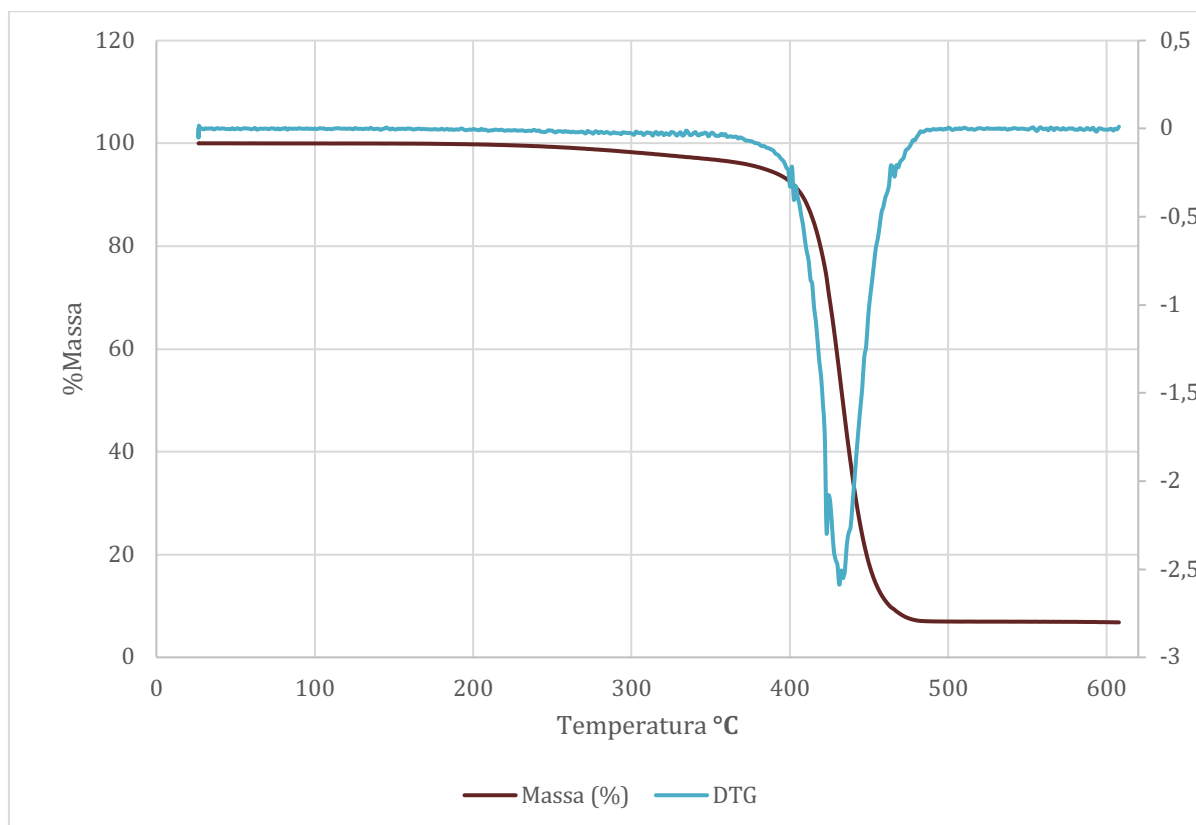
Figura 19- Curvas de TGA e DTG da amostra P-70.



Fonte: A autora (2026).

Por fim, a Figura 20 apresenta o gráfico de comportamento térmico do PS reciclado. Observa-se um comportamento bastante semelhante ao das misturas analisadas, com estabilidade térmica mantida até aproximadamente 250 °C. A curva de DTG apresenta um pico único, alto e agudo, indicando que a degradação térmica ocorreu predominantemente em uma única etapa e a máxima taxa de perda de massa esteve concentrada em um intervalo estreito de temperatura de 440 °C. Esse comportamento sugere uma resposta uniforme do material reciclado, evidenciando que o processo de reprocessamento não alterou significativamente o perfil de degradação do poliestireno.

Figura 20- Curvas de TGA e DTG da amostra PS reciclado.



Fonte: A autora (2026).

A Tabela 7 apresenta um comparativo dos resultados obtidos de TGA e DTG das amostras analisadas, incluindo o número de estágios (picos) de degradação e o percentual de resíduo final obtido.

Tabela 7- Comparativo de resultados de TGA e DTG das amostras.

Amostra	TGA (°C)	DTG (°C)	Estágio de degradação	Percentual de resíduo final
PS virgem	345	350	1 estágio	~ 3%
P-50	300	440	1 estágio	~ 3%
P-70	300	440	1 estágio	~ 3%
PS Reciclado	250	440	1 estágio	~ 3%

Fonte: A autora (2026).

5.3. CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA

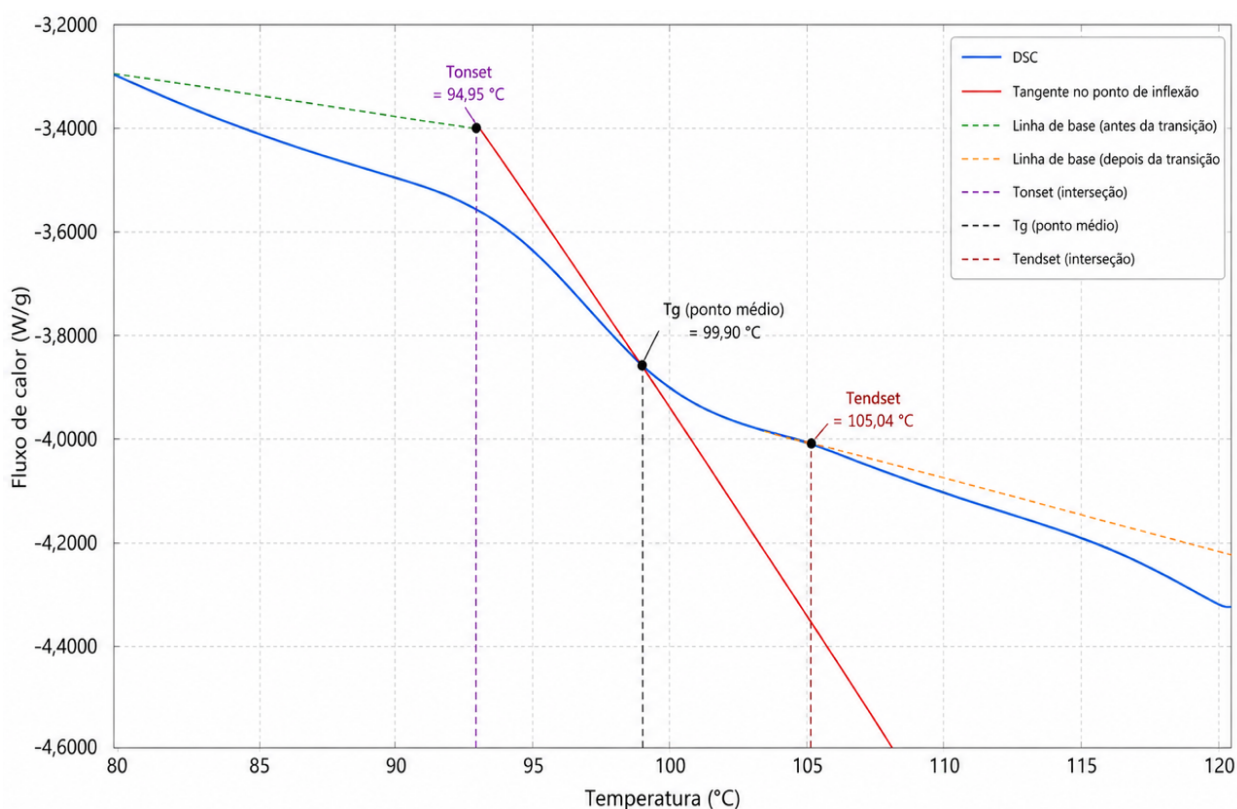
Para a determinação da temperatura de transição vítrea (T_g), os dados obtidos no segundo ciclo de aquecimento do ensaio de calorimetria diferencial de varredura

(DSC) foram exportados para o Microsoft Excel. Com objetivo de aumentar a precisão da análise, a região compreendida entre 80 °C e 120 °C foi ampliada, permitindo melhor visualização da transição vítrea.

Inicialmente, foram identificados o ponto de início da transição, caracterizado pela perda de linearidade da curva, e o ponto final da transição, correspondente ao reestabelecimento dessa linearidade. Em seguida, a temperatura de transição vítrea (T_g) do material foi determinada pelo método da tangente, a partir da interseção entre a linha de base e a reta traçada na região de maior inclinação da curva.

A Figura 21 apresenta a curva DSC da amostra PS virgem utilizada para a determinação da transição vítrea (T_g).

Figura 21- Curva de DSC do PS virgem.



Fonte: A autora (2026).

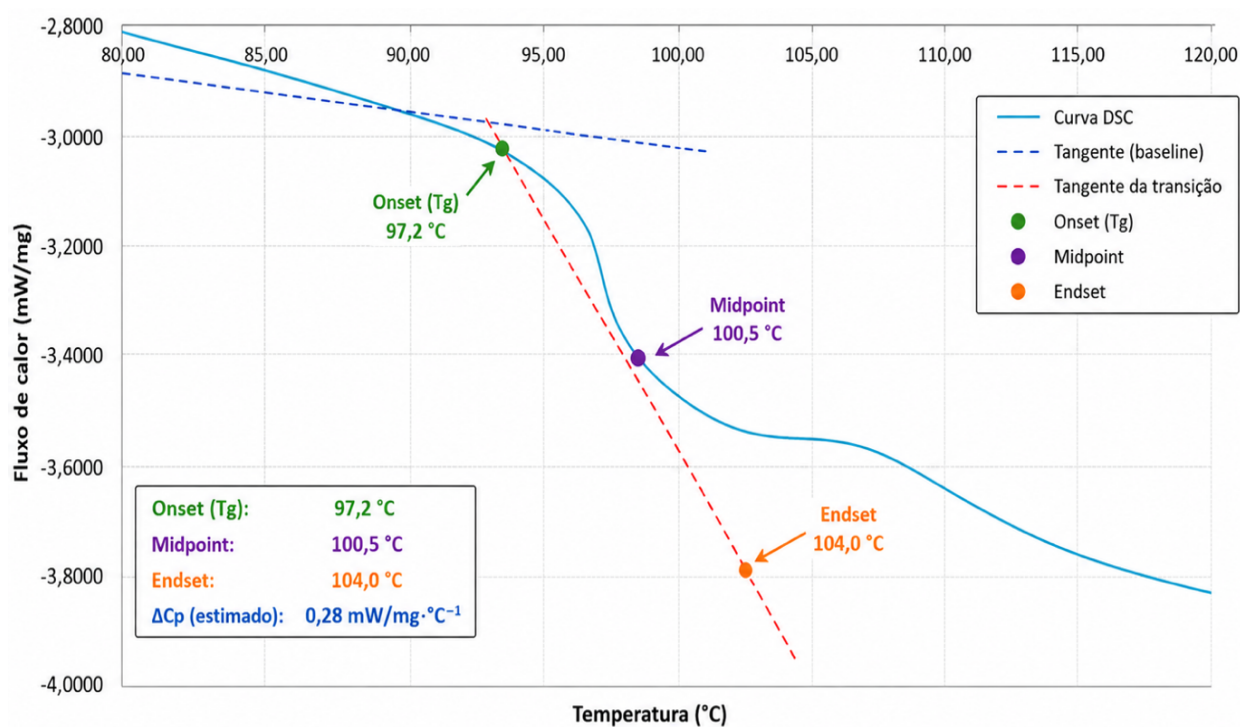
A temperatura de transição vítrea (T_g) da amostra PS virgem foi determinada em 99,90 °C. Este valor está em concordância com os reportados na literatura para o poliestireno, cuja T_g é normalmente observada em torno de 100 °C (AHSBY, 2013). Essa proximidade indica que o material analisado apresenta comportamento térmico compatível com o esperado para o polímero em sua forma virgem, evidenciando a

integridade de sua estrutura molecular e ausência de alterações significativas decorrentes de processamento.

Já para as amostras P-50 e P-70, apresentadas, respectivamente, nas Figuras 22 e 23, observou-se que os valores obtidos para a temperatura de transição vítrea (T_g) permaneceram muito próximos em relação ao obtido para a amostra PS virgem. Para a formulação P-50, a T_g determinada foi de 100,5 °C, enquanto a amostra P-70 apresentou T_g de 101,8 °C.

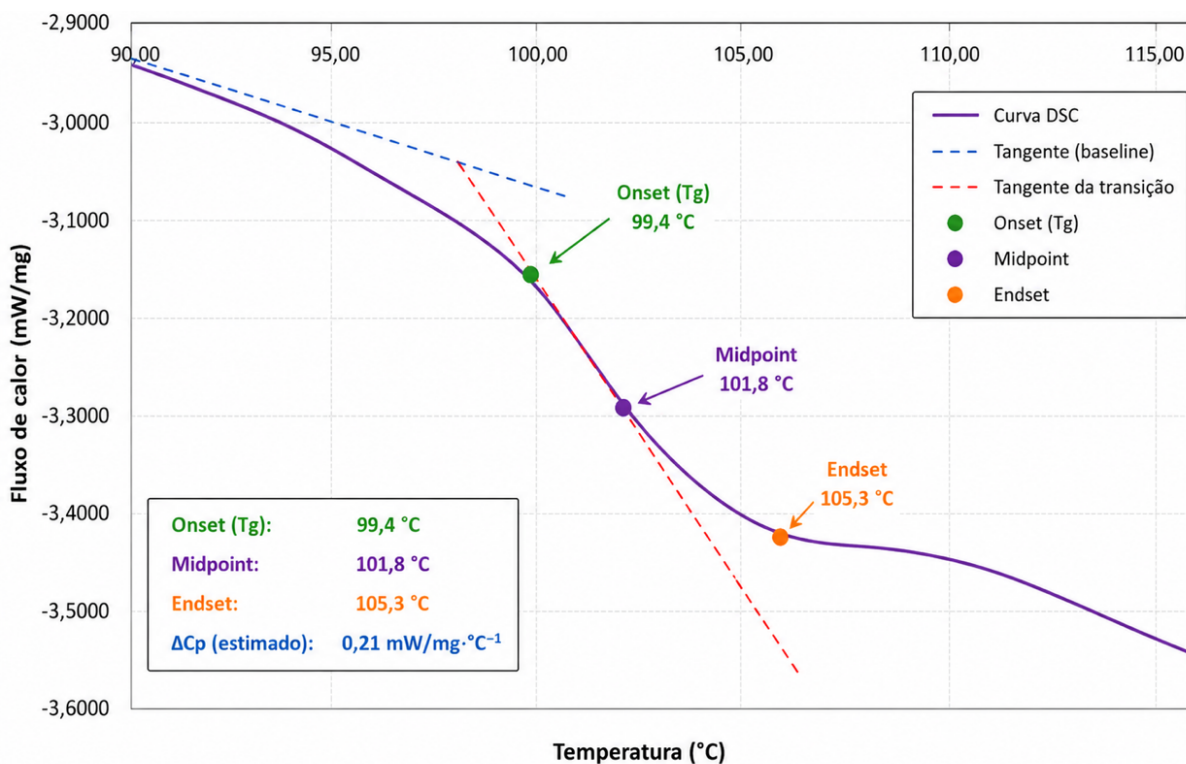
As pequenas variações observadas são pouco significativas e indicam que a incorporação de poliestireno reciclado não promoveu alterações expressivas nas propriedades térmicas do material.

Figura 22- Curva de DSC do P-50.



Fonte: A autora (2026).

Figura 23- Curva de DSC do P-70.

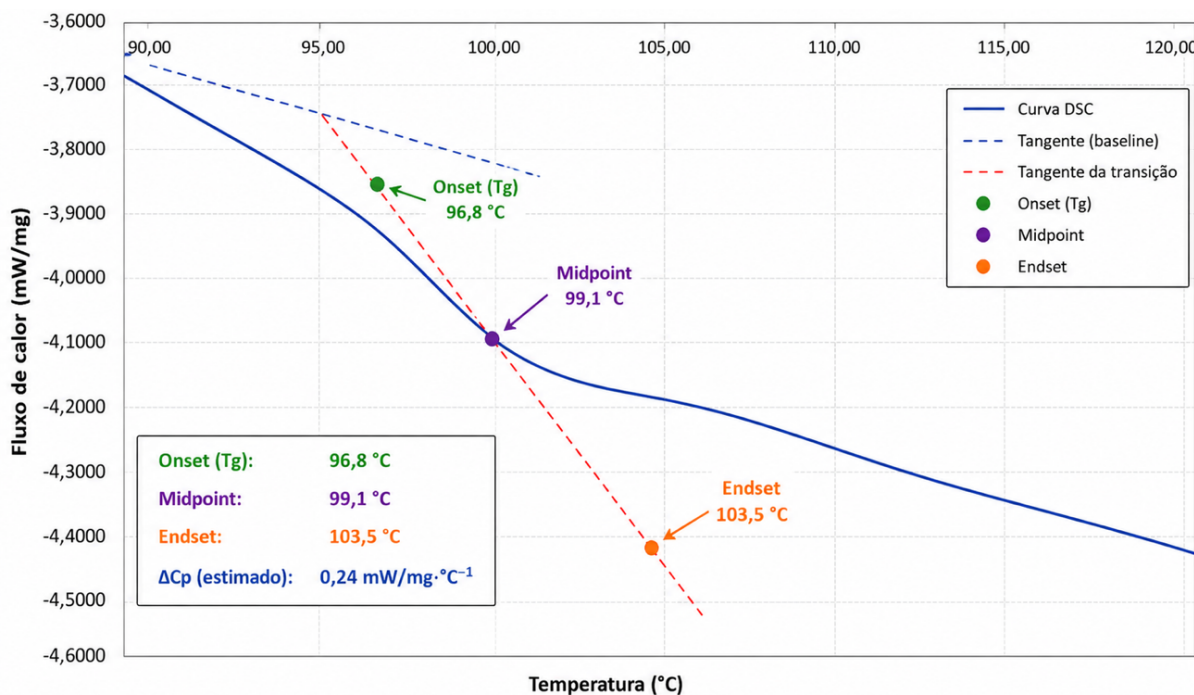


Fonte: A autora (2026).

A Figura 24 apresenta a curva de DSC da amostra PS reciclado, a partir da qual foi determinada uma temperatura de transição vítrea (T_g) de 99,1 °C.

Com o valor obtido, é possível concluir que, mesmo após o processo de reciclagem do PS, o valor permaneceu dentro da faixa típica de comportamento do poliestireno virgem, indicando que o material manteve características térmicas compatíveis com sua estrutura original. No entanto, diferente das amostras analisadas anteriormente, observa-se um alargamento no perfil da curva de transição vítrea, sugerindo rearranjos estruturais possivelmente associados à degradação decorrente do reprocessamento. Este comportamento sugere que o processo de reprocessamento não provocou degradação suficiente para modificar de forma relevante a temperatura de transição vítrea do material, corroborando os resultados obtidos nas análises de FTIR e DSC, que também evidenciaram a preservação das características térmicas e estruturais do poliestireno.

Figura 24- Curva DSC da amostra PS reciclado.



Fonte: A autora (2026).

Com a Tabela 8, é possível analisar comparativamente os resultados obtidos de transição vítrea (T_g) de todas as amostras com a faixa de temperatura encontrada na literatura.

Tabela 8- Comparativo de resultados obtidos de T_g nas amostras.

Amostra	Transição vítrea (°C)	Faixa na literatura (°C) (AHSBY, 2013)
PS virgem	99,9	95–105
P-50	100,5	95–105
P-70	101,8	95–105
PS Reciclado	99,1	95–105

Fonte: A autora (2026).

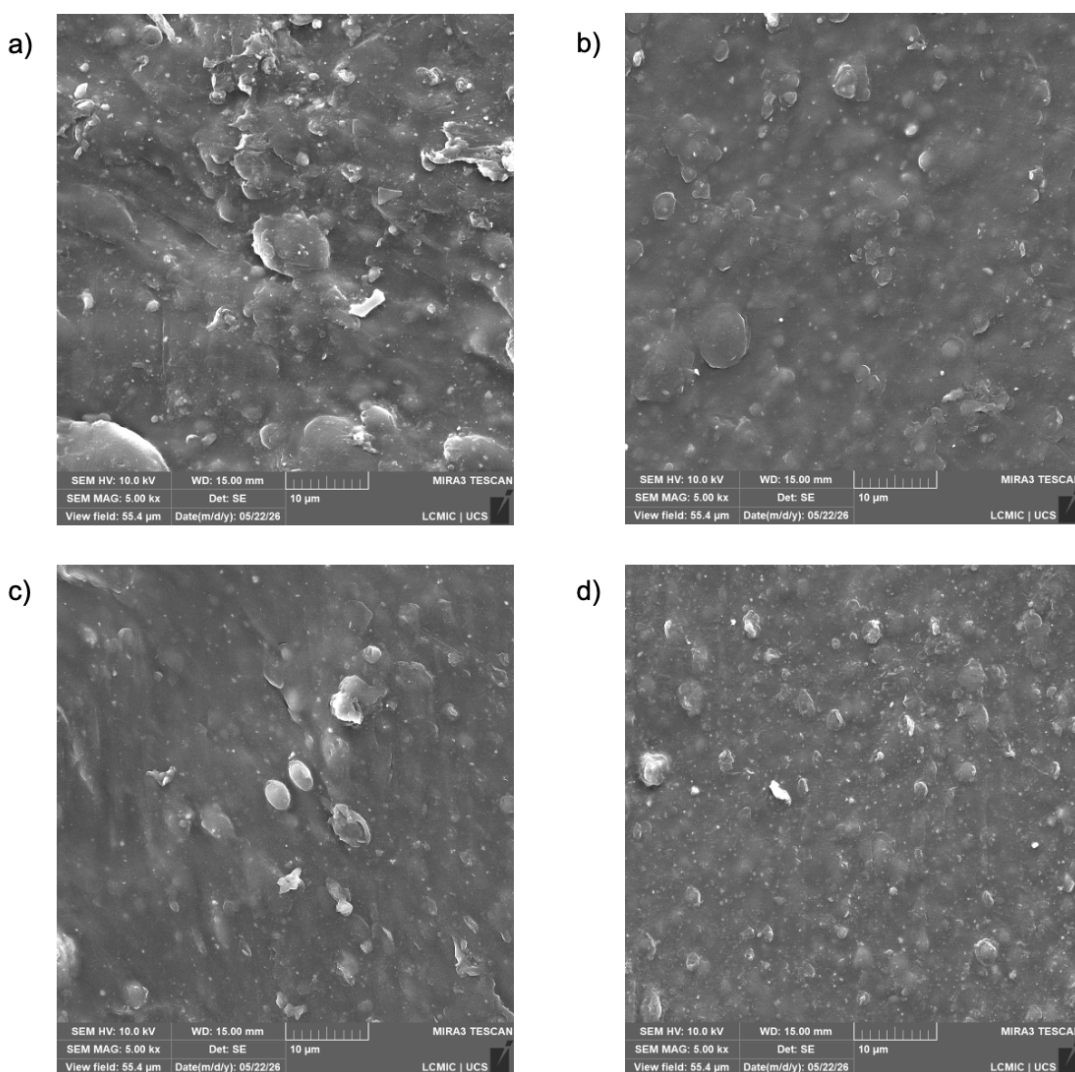
Os resultados obtidos por DSC demonstraram que as amostras P-50, P-70 e PS reciclado apresentaram valores de T_g dentro do intervalo descrito pela literatura para o poliestireno virgem, evidenciando a preservação das propriedades térmicas.

No entanto, conforme a incorporação de material reciclado, observaram-se alterações no perfil das curvas, indicando que a adição do material promoveu rearranjos estruturais.

5.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA (MEV)

A Figura 25 apresenta um comparativo entre as micrografias superficiais obtidas por MEV das amostras PS virgem, P-50, P-70 e PS reciclado. Por meio dessas imagens, foi possível avaliar as diferenças morfológicas superficiais observadas entre as formulações analisadas.

Figura 25- micrografias superficiais obtidas por MEV das amostras: a) PS virgem; b) P-50; c) P-70; d) PS reciclado.



Fonte: A autora (2026).

A amostra PS virgem apresentou superfície relativamente contínua, sendo observadas apenas pequenas irregularidades localizadas, sem evidências de deformações significativas ou descontinuidades acentuadas.

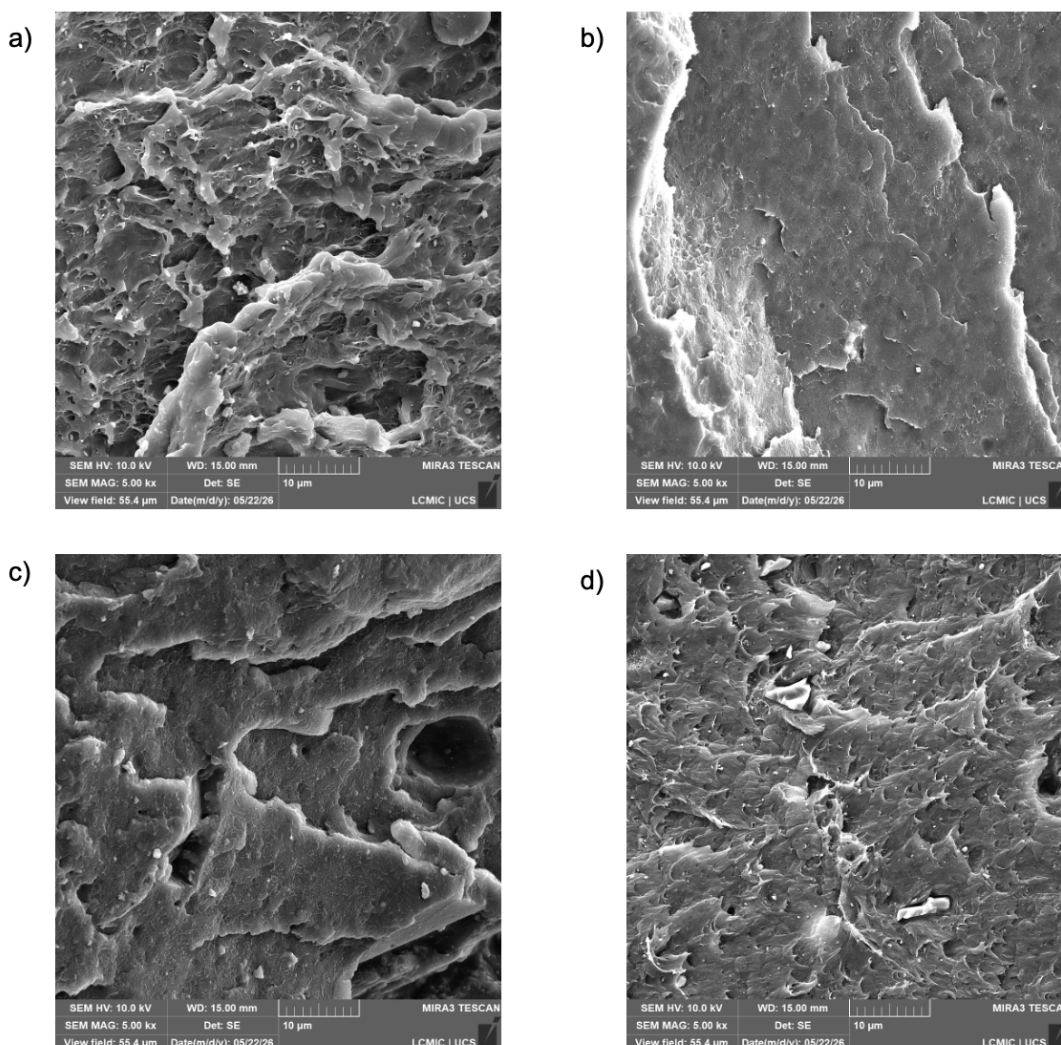
Na amostra P-50, observou-se uma estrutura mais homogênea e com maior distribuição mais uniforme das partículas e menor concentração de irregularidades em

comparação ao PS virgem. Já na amostra P-70, verificou-se um leve aumento de heterogeneidade superficial, evidenciado pela maior quantidade de partículas dispersas e irregularidades mais pronunciadas. Por fim, a amostra PS reciclado apresentou uma maior quantidade de partículas distribuídas ao longo da superfície e textura mais granulada, quando comparada às demais amostras analisadas.

Analisando comparativamente, as imagens obtidas permitiram observar diferenças na morfologia superficial e transversal das amostras analisadas. Entretanto, as imagens de MEV, isoladamente, não permitem determinar de forma conclusiva a origem dessas características, sendo necessária a associação com outras técnicas de caracterização para estabelecer sua causa.

Já a Figura 26 apresenta um comparativo entre as micrografias obtidas transversalmente por MEV das amostras PS virgem, P-50, P-70 e PS reciclado.

Figura 26- micrografias transversais obtidas por MEV das amostras: a) PS virgem; b) P-50; c) P-70; d) PS reciclado.



Inicialmente, observa-se que, comparativamente, a amostra PS virgem apresentou uma superfície transversal irregular e com relevo acentuado do que as outras amostras analisadas. Porém diferentemente das demais, não há presença acentuada de cavidades. A amostra P-50 apresentou morfologia transversal relativamente homogênea, com distribuição mais uniforme ao longo da região analisada. Em contrapartida, a amostra P-70 apresentou maior descontinuidade e presença de cavidades, evidenciando um aumento de heterogeneidade estrutural em relação à P-50. Por fim, a amostra PS reciclado apresentou uma estrutura mais compacta e homogênea em comparação à amostra PS virgem.

Essas observações permitem identificar diferenças morfológicas entre as formulações, mas não são suficientes, isoladamente, para estabelecer uma relação causal definitiva entre a morfologia observada e os mecanismos de degradação, processamento ou alteração estrutural do material.

De forma geral, as análises morfológicas superficiais e transversais evidenciaram diferenças na organização estrutural das amostras associadas às diferentes proporções de poliestireno reciclado incorporadas. Enquanto as micrografias superficiais permitiram observar variações na homogeneidade, na distribuição das características morfológicas e na textura das amostras, as análises transversais evidenciaram diferenças na irregularidade, na presença de descontinuidades e na morfologia das superfícies de fratura.

Embora as micrografias não permitam, isoladamente, estabelecer uma relação causal definitiva entre as características observadas e os efeitos do reprocessamento, os resultados demonstram a existência de diferenças morfológicas entre as formulações analisadas.

5.5. AVALIAÇÃO DE IMPACTO POR FIXAÇÃO

A avaliação funcional de impacto foi determinada através do parafusamento dos corpos de prova em diferentes torques, até o desgaste da rosca do parafuso e ruptura das amostras. A Tabela 9 apresenta os dados de análise e os resultados obtidos como “Conforme” ou “Não Conforme”.

Tabela 9- Resultados de resistência ao impacto da parafusadeira com diferentes torques.

Torque (N.m)		PS virgem	P-50	P-70	PS Reciclado
0,6	Resistência	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme
0,7		Conforme	Conforme	Conforme	Conforme
0,8		Conforme	Conforme	Conforme	Conforme
0,9		Conforme	Conforme	Conforme	Conforme
1,0		Conforme	Conforme	Conforme	Conforme
1,1		Conforme	Conforme	Conforme	Conforme
1,2		Não Conforme	Não Conforme	Não Conforme	Não Conforme

Fonte: A autora (2026).

Através da Tabela 8, é possível observar que todas as amostras analisadas apresentaram comportamento semelhante nos ensaios de resistência ao impacto por aparafusamento. As estruturas das amostras permaneceram íntegras entre 0,6 a 1,1 N.m, porém ao aplicar o torque de 1,2 N.m, observou-se um início de ruptura na região de encaixe do parafuso, ocasionando desgaste do parafuso e comprometimento da estrutura dos suportes, indicando que foi detectado o limite de resistência do poliestireno.

Os resultados demonstram que a utilização do poliestireno reciclado, tanto integral quanto em misturas, não ocasionou perda significativa de propriedades mecânica, quando submetido a este teste característico de análise deste modelo de corpo de prova (suporte de placa injetado). Este comportamento sugere que a incorporação do material reciclado preservou a capacidade do material suportar os esforços mecânicos aplicados durante operações de instalação.

5.6. SÍNTESE FINAL DOS RESULTADOS

De modo geral, os resultados obtidos pelas diferentes técnicas de caracterização permitiram avaliar os efeitos associados à incorporação do poliestireno reciclado nas propriedades do material, possibilitando a comparação entre as formulações analisadas.

Na análise de FTIR, identificou-se que todas as amostragens apresentaram as absorções espectrais características do poliestireno, indicando que mesmo com a incorporação progressiva de reciclado, houve a preservação da estrutura química do polímero. Além disso, a fraca intensidade das absorções detectadas na região de $1700 - 1750 \text{ cm}^{-1}$ que são características do grupo carbonila, sugere que o material reciclado analisado não apresentou alterações químicas expressivas detectáveis por essa técnica, embora não seja possível determinar, exclusivamente a partir dos espectros obtidos, o número de ciclos de reprocessamento aos quais o material foi submetido.

As análises de TGA/DTG apresentaram perfis de degradação e estabilidade térmica semelhantes para todas as amostras, evidenciando estabilidade térmica de até aproximadamente 345°C , dependendo da composição. Além disso, todas as formulações analisadas apresentaram um único estágio de degradação, característico do poliestireno, com temperaturas de máxima taxa de decomposição muito próximas entre si. Esses resultados indicam que, nas condições avaliadas, a incorporação progressiva de material reciclado não resultou em alterações expressivas nos parâmetros de estabilidade e degradação térmica determinados pela análise de TGA/DTG.

Os resultados obtidos por DSC indicam que a incorporação de poliestireno reciclado promoveu poucas alterações nas propriedades térmicas do material. As temperaturas vítreas encontradas permaneceram próximas ao intervalo de $95 - 105^\circ\text{C}$, em concordância com os valores reportados na literatura para o poliestireno, evidenciando a manutenção do comportamento térmico característico do polímero.

As análises morfológicas realizadas por MEV evidenciaram diferenças nas características superficiais e transversais das amostras analisadas. Foram observadas variações na homogeneidade, na rugosidade, na distribuição das características morfológicas e na organização estrutural entre as formulações. Entretanto, as micrografias de MEV, isoladamente, não permitem estabelecer uma

relação causal definitiva entre as características observadas e os mecanismos de degradação, processamento ou alteração estrutural do material. Dessa forma, os resultados de MEV devem ser interpretados em conjunto com as demais técnicas de caracterização, que permitiram avaliar a manutenção das principais características químicas e térmicas do poliestireno nas condições analisadas.

Por fim, o teste mecânico de fixação com aplicação de torque evidenciou um comportamento funcional satisfatório dos corpos de prova injetados. As amostras suportaram níveis de torque aplicados de 0,6 a 1,1 N.m durante o parafusamento, sem que comprometessem a funcionalidade, demonstrando a viabilidade de poliestireno reciclado para a aplicação proposta.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A incorporação de poliestireno reciclado nas amostras de suportes de placa 4x2 mostrou-se satisfatória, uma vez que não promoveu alterações significativas nas propriedades químicas e térmicas do poliestireno, mantendo desempenho mecânico satisfatório na aplicação proposta, indicando que a utilização de material reciclado pode representar uma alternativa para a redução de consumo de matéria-prima virgem na fabricação do produto.

Os resultados obtidos por FTIR confirmaram a preservação da estrutura química do poliestireno nas diferentes composições, evidenciada pela presença das bandas características do polímero. As análises de TGA e DSC demonstraram comportamento térmico semelhante entre as amostras, indicando que o reprocessamento não promoveu alterações significativas nessa propriedade. Embora as análises de MEV tenham indicado alterações morfológicas associadas ao reprocessamento e à incorporação do material reciclado, os resultados obtidos nas caracterizações químicas, térmicas e mecânicas indicaram que essas alterações não comprometeram o desempenho das amostras na aplicação proposta. Além disso, o ensaio mecânico de fixação demonstrou desempenho funcional satisfatório do produto injetado.

Dessa forma, conclui-se que a utilização de poliestireno reciclado na fabricação de suportes de placa 4x2 representa uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente relevante, contribuindo para o aproveitamento de resíduos plásticos, proporcionando uma destinação de maior valor agregado aos resíduos de poliestireno e reduzindo o consumo de matéria-prima virgem. Além disso, o estudo reforça a importância do desenvolvimento de soluções voltadas à economia circular, contribuindo para os princípios do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 12- Consumo e Produção Responsáveis, ao incentivar práticas de uso eficiente de recursos e gestão de resíduos.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar a continuidade aos estudos de viabilidade técnica do uso de poliestireno reciclado na moldagem por injeção, sugere-se a avaliação de outros itens injetados de alto volume de produção que utilizam a matéria-prima e investigar a incorporação de diferentes teores de material reciclado em suas estruturas, através das análises de caracterização química, térmica e mecânica, visando ampliar o conhecimento sobre seu desempenho em diferentes aplicações.

Além disso, recomenda-se o desenvolvimento de estudos voltados à viabilidade técnica da utilização de outros polímeros de difícil reciclagem em processos de moldagem de injeção, visando ampliar as alternativas de reaproveitamento destes materiais e contribuir para a redução de consumo de matéria-prima virgem e, conseqüentemente, a redução de geração de resíduos plásticos.

REFERÊNCIAS

ANDRADE DOMINGOS DE SOUZA, Reginaldo. **Processo de reciclagem de polímeros termoplásticos**. Natal, 2019 Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

ANDRÉ DUARTE B. L. FERREIRA, André . Introdução. *In*: ANDRÉ DUARTE B. L. FERREIRA, André. **Polímeros**. 2020. 1 p. Disponível em: https://estudomec.info/files/MCM2_Polimeros.pdf. Acesso em: 16 mar. 2026.

ARAUJO FONSECA, Lúcia Helena. Reciclagem: o primeiro passo para a preservação ambiental. **SEMANA ACADEMICA**. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/reciclagem.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2026.

ASHBY, Michael. **Material and the Environment**. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, v. 2, 2013.

ASTM INTERNATIONAL. *Standard test method for transition temperatures and enthalpies of fusion and crystallization of polymers by differential scanning calorimetry*. ASTM D3418-21. West Conshohocken, PA, 2021. Disponível em: ASTM D3418-21 PDF. Acesso em: 27 maio 2026.

BASTOS DE CASTRO, Paulo . **Modelo de dano dúctil-hidrolítico acoplado para materiais elasto-viscoplásticos baseado em atualizações constitutivas variacionais**. Paraíba, 2017 Tese (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Bahia, Paraíba, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324783816_Modelo_de_dano_ductil-hidrolitico_acoplado_para_materiais_elasto-viscoplasticos_baseado_em_atualizacoes_constitutivas_variacionais. Acesso em: 16 mar. 2026.

BRASIL ESCOLA. **Poliestireno**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/poliestireno.htm>. Acesso em: 16 mar. 2026.

BURIELO DE SOUSA, Wander; GAUDÊNCIO, Gustavo Spina. Processamento de Polímeros por Extrusão e Injeção: Conceitos, Equipamentos e Aplicações. . **ÉRICA**, SÃO PAULO, 2013.

CALLISTER, d. w.; RETHWISCH, d. g.. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, v. 9. 2018.

CALLISTER, w. d.; RETHWISCH, d. g.. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**.. Rio de Janeiro: LTC, v. 10, 2022.

CHIGWADA, Grace; KANDARE, Everson; WANG, Dongyan; MAJONI, Stephen; MLAMBO, Darlington. *Thermal stability and degradation kinetics of polystyrene/organically-modified montmorillonite nanocomposites*. Marquette

University; Cornell University, [2008]. Disponível em: <https://epublications.marquette.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1362&context=chem_fac>. Acesso em: 27 maio 2026.

CRAWFORD, r. j.. **Plastics Engineering**. 3 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.

CRESPON, Janaína. **Métodos termoanalíticos aplicados a materiais**. 2025. 73 slides. Disponível em: . Acesso em: 16 mar. 2026.

DA SILVA RODRIGUES, Ana C. *et al.* 145 Iberoam. **Polímeros y Materiales Polímeros**, 18(3), 145–160 (2017) VIAS DE RECICLAGEM DOS POLÍMEROS POLIPROPILENO (PP) E POLIESTIRENO (PS): UM ESTUDO BIBLIOGRÁFICO. **Revista Iberoamericana Polímeros y Materiales Polímeros**, v. 18, 18 mar 2017. Disponível em: <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2019/06/2017-18-3-da-silva-rodrigues-y-col.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2026.

DA SILVA SPINACÉ, Márcia Aparecida; DE PAOLI, Marco Aurélio. A TECNOLOGIA DA RECICLAGEM DE POLÍMEROS. **QUÍMICA NOVA**, SÃO PAULO, v. 28, 2005.

DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. Microscopia Eletrônica de Varredura: aplicações e preparação de amostras. **EDIPUCRS**, PORTO ALEGRE, v. 2, 2007.

Engenharia de Elite. **Polímeros**. Engenharia de Elite. Criciúma. Disponível em: <https://engenhariadeelite.wordpress.com/polimeros/>. Acesso em: 16 mar. 2026.

FORTE DE MAGALHÃES PINHEIRO BONASSI MACHADO, Paula. **Polimerização via radical livre para polímeros lineares e ramificados usando iniciadores mono e difuncional**. CAMPINAS, 2004 Dissertação (Engenharia química) - Universidade Estadual de Campinas, CAMPINAS, 2004.

GODOY, Juarez. **Injetora**. M&S Industrial. Disponível em: <https://mesindustrial.com.br/injetora/>. Acesso em: 16 mar. 2026.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **ODS 12 – Consumo e Produção Sustentáveis**. Brasília, DF: IPEA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods12.html>. Acesso em: 24 jun. 2026.\]

JUNQUEIRA ZEVIANI, Lígia Elias. **CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA NA FABRICAÇÃO DE PUXADORES NA INDÚSTRIA MOVELEIRA** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12177/1/LD_COEMA_2016_2_12.pdf . Acesso em: 16 mar. 2026.

MADEIPLAST. **Injetora de plástico: tipos e como funciona**. Madeiplast. Disponível em: <https://madeiplast.com.br/blog/injecao-plastica/injetora-de-plastico/>. Acesso em: 16 mar. 2026.

MANO, E.b; MENDES, L.c. **INTRODUÇÃO A POLÍMEROS**. 2 ed. SÃO PAULO: EDGARD BLUCHER, 2004.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **Standard Reference Material® 1921b**: Infrared Transmission Wavelength/Wavenumber Standard. Gaithersburg, MD: NIST, 17 set. 2025. 9 p. Certificado de material de referência. Disponível em: <https://tsapps.nist.gov/srmext/certificates/1921B.pdf>. Acesso em: 27 maio 2026.

Netzsch. **PS: Poliestireno**. Netzsch Proven Excellence. Disponível em: <https://analyzing-testing.netzsch.com/es/polimeros-netzsch-com/commodity-thermoplastics/ps-polystyrene>. Acesso em: 16 mar. 2026.

PORTAL DE TRATAMENTO DE ÁGUA. **Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química**. Portal de Tratamento de água. 2012. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/reciclagem-do-lixo-de-informatica-uma-oportunidade-para-a-quimica/>. Acesso em: 16 mar. 2026.

RODRÍGUEZ-PACHECO, Luis Carlos; PARAGUAY-DELGADO, Francisco; CASTAÑEDA-BALDERAS, Rubén; CAMACHO-RÍOS, María Luisa; HERRERA-PÉREZ, Guillermo Manuel; ESTRADA-MORENO, Iván Alziri; LARDIZÁBAL-GUTIÉRREZ, Daniel. *Low-cost and novel Arduino -Load cell-based prototype to determine transition temperatures*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. – CIMAV; CONACyT, Chihuahua, México, [s.d.]. Disponível em: https://epublications.marquette.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1362&context=chem_fac. Acesso em: 27 maio 2026.

SÁ PEIXOTO MONTENEGRO, Ricardo; SERFATY, Elias Moysés. **ASPECTOS GERAIS DO POLIESTIRENO**. BNDES. RIO DE JANEIRO, 2002. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2350/1/BS%2016%20Aspectos%20Gerais%20do%20Poliestireno_P.pdf. Acesso em: 16 mar. 2026.

SENADOR, Diogo Souza. **INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS**. VARGINHA, 2013 Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Centro Universitário do Sul de Minas, VARGINHA, 2013.

SINGH, Ajay; CHAUHAN, Anjali; GAUR, Rahul. A comprehensive review on the synthesis, properties, environmental impacts, and chemiluminescence applications of polystyrene (PS). . **DISCOVER CHEMISTRY**, v. 2, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44371-025-00125-y>. Acesso em: 16 mar. 2026.

STUART, Barbara h. **Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications**. NEW YORK: JOHN WILEY & SONS, 2004.

THE DIFFERENCE between amorphous and semi-crystalline plastics. . ESSENTRA COMPONENTS. Disponível em: <https://www.essentra.components.com/en-gb/news/manufacturing/injection-moulding/the-difference-between-amorphous-and-semi-crystalline-plastics/>. Acesso em: 25 set. 2025.

TORONTECH. **Como interpretar uma curva TGA: um guia especializado**. 17 out. 2025. Disponível em: <https://torontech.com/pt/tga-curve-interpretation/>. Acesso em: 28 jun. 2026.

UGHOC, Adam. **Thermoplastics: Their Properties and Common Uses**. . POLYMER MOLDING. 2023. Disponível em: <https://www.polymermolding.com/thermoplastics-their-properties-and-common-uses/>. Acesso em: 8 set. 2025.

XU, Zhen *et al.* Progress and Challenges in Polystyrene Recycling and Upcycling.. **CHEMSUSCHEM**, v. 17, n. 12, 2024.