INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Jonatan Fraga da Silva

Análise do Comportamento Mecânico do Polipropileno Pós-Processo de Reciclagem Mecânica

Betim
2025

JONATAN FRAGA DA SILVA

Análise do Comportamento Mecânico do Polipropileno Pós-Processo de Reciclagem Mecânica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. André Fonseca Félix

Betim

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

S586a Silva, Jonatan Fraga da

Análise do comportamento mecânico do polipropileno pós-processo de reciclagem mecânica / Jonatan Fraga da Silva. – 2025

53 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Campus Betim, 2025.

Orientador: Prof. Dr. André Fonseca Félix

1. Polipropileno. 2. Reciclagem de plásticos. 3. Polímeros. 4. Processamento de termoplásticos. 5. Engenharia Mecânica. I. Silva, Jonatan Fraga da. II. Título.

CDU: 678

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Denísio Pereira Marcos CRB-6/3142

Jonatan Fraga da Silva

Análise do Comportamento Mecânico do Polipropileno Pós-Processo de Reciclagem Mecânica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovado em: 28 / 02 / 2025 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br
ANDRE FONSECA FELIX
Data: 08/11/2026 11:48:39-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Prof. Dr. André Fonseca Félix (Orientador) – IFMG Campus Betim

Documento assinado digitalmente
gov.br
FLAVIO MAGNO DE CARVALHO FONSECA
Data: 30/01/2026 10:29:08-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ _____

Prof. Dr. Flávio Magno de Carvalho Fonseca – IFMG Campus Betim

Documento assinado digitalmente
gov.br
ROGERIO EUSTAQUIO DE SOUZA
Data: 31/01/2026 11:00:53-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ _____

Prof. Me. Rogério Eustáquio de Souza – IFMG Campus Betim

Dedicatória

Em primeiro lugar, dedico este trabalho a Deus, pois sem ele não haveria forças e capacidade para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

Dedico este trabalho também a minha querida mãe, que de inúmeras maneiras me ajudou e me apoiou para que eu pudesse seguir os meus sonhos e poder estar concluindo mais uma etapa da minha vida.

Dedico este trabalho a minha amada noiva Ana Alice, que esteve comigo em todo período da graduação, me dando forças e apoiando nos momentos difíceis.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por este momento gratificante, que é poder concluir o curso que eu almejei.

Sou grato a todos os profissionais do Instituto Federal Campus Betim, que apesar de tantas adversidades, estiveram sempre dispostos a proporcionar um ensino com qualidade para todos os alunos.

Agradeço aos meus familiares pela disposição em sempre me ajudar quando solicitados.

Também agradeço à empresa, que me proporcionou realizar o meu estágio durante a graduação e agregar conhecimento que levarei para sempre comigo.

Agradeço ao meu orientador prof Dr. André Fonseca Félix pelos momentos de discussão ricos em conhecimento.

Não confunda jamais conhecimento com sabedoria.
Um o ajuda a ganhar a vida; o outro, a construir uma vida.
Sandra Carey

RESUMO

O uso de materiais poliméricos, está em constante crescimento, um dos polímeros mais utilizados para fabricação de peças em geral é o polipropileno (PP), em vista disso, é importante que sejam avaliados métodos de que este material tenha recirculação, o uso de reciclagem mecânica é um método amplamente utilizado para reaproveitamento de materiais. Neste trabalho foi avaliado o comportamento mecânico do polipropileno proveniente de reciclagem mecânica primária e secundária, através de ensaios de tração, impacto, fluidez e densidade. De acordo com os resultados obtidos foi possível concluir que os materiais apresentaram características que permitem a sua utilização em vários produtos, desde que, suas propriedades mecânicas estejam em conformidade com o desempenho do material reciclado. Em suma, a resistência a tração do material reduziu com adição de reciclado, a resistência ao impacto, com até 30% de reciclado aprimorou o material tornando-o mais tenaz, em relação à densidade não houve impacto significativo que possa influenciar na fabricação de produtos, e através de ensaios de fluidez ficou evidente que o material perde viscosidade, e torna-se mais fluido.

Palavras-chave: Polipropileno reciclado. Reciclagem mecânica primária e secundária. Comportamento Mecânico do Polipropileno.

ABSTRACT

The use of polymeric materials is constantly growing. One of the most widely used polymers for manufacturing parts in general is polypropylene (PP). In view of this, it is important to evaluate methods for this material to be recirculated. The use of mechanical recycling is a widely used method for reusing materials. In this work, the mechanical behavior of polypropylene from primary and secondary mechanical recycling was evaluated through tensile, impact, fluidity and density tests. According to the results obtained, it was possible to conclude that the materials presented characteristics that allow their use in various products, as long as their mechanical properties are in accordance with the performance of the recycled material. In short, the tensile strength of the material was reduced with the addition of recycled material. The impact strength, with up to 30% of recycled material, improved the material, making it more tenacious. In relation to density, there was no significant impact that could influence the manufacture of products. Through fluidity tests, it was evident that the material loses viscosity and becomes more fluid.

Keywords: Recycled polypropylene. Primary and secondary mechanical recycling. Mechanical behavior of polypropylene.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Peças Fabricadas em PP nos automóveis.....15
Figura 2 - Esquema de Ligação de PP.....20
Figura 3 – Exemplo de corpo de prova de PP com fibra de coco.....21
Figura 4 – Gráfico ilustrativo do comportamento do material em um ensaio de tração 22
Figura 5 – (1) Canais, (2) peças defeituosas por bolha e (3) falha de injeção 28
Figura 6 – Moinho de trituração de peças plásticas 29
Figura 7 – Símbolos de identificação de polímeros.....30
Figura 8 – Esquema de separação por densidade.....31
Figura 9 – Sistema de reciclagem química.....33
Figura 10 – Sistema de reciclagem energética 34
Figura 11 - Plastômetro.....36
Figura 12 - Balança semi-analítica.....36
Figura 13 - Representação Gráfica Ensaios de Tração 38
Figura 14 - Representação Gráfica Ensaios de Impacto.....41
Figura 15 - Representação Gráfica Ensaios de Densidade 43
Figura 16 - Representação Gráfica Ensaios de Índice de Fluidez.....45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados referente a Tensão de escoamento (σe), Tensão Máxima de Ruptura ($\sigma Máx$) e Módulo de Elasticidade (E) 37
Tabela 2 – Tensão Máxima de Ruptura ($\sigma Máx$), Módulo de elasticidade (E) 38
Tabela 3 – Resistência ao impacto método Izod 39
Tabela 4 – Resistência ao impacto método Izod 40
Tabela 5 – Densidade do material avaliada. 42
Tabela 6 – Densidade do material avaliada. 43
Tabela 7 – Índice de Fluidez 44
Tabela 8 – Índice de Fluidez 44

LISTA DE FÓRMULAS

Equação 1 – Fórmula Para Cálculo de Densidade.....42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PP – Polipropileno

VAA – Valor Agregado Atual

kgf – Quilograma-força

cm^3 – Centímetros Cúbicos

mm – Milímetros

mm^2 – Milímetros quadrados

m^3 – Metros cúbicos

ºC – Graus Celsius

IF – Índice de Fluidez

min - Minutos

BTU - British Thermal Unit (Unidade Térmica Britânica)

kg - Quilograma

g - Grama

σ_e – Tensão de Escoamento

$\sigma_{Máx}$ – Tensão de Ruptura

E – Módulo de Elasticidade

MPa – Megapascal

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

PVC – Policloreto de Vinila

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PEBD – Polietileno de Baixa Densidade

PA – Poliamida

EPDM – Etileno-Propileno-Dieno-Monômero

ASTM – American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana de Testagem e Materiais)

NBR – Norma Brasileira

ISO – Organização Internacional de Normalização

R_P – Reciclagem Primária

R_S – Reciclagem Secundária

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
2 OBJETIVOS 17
2.1 Objetivos Gerais 17
2.2 Objetivos Específicos 17
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 18
3.1 Polímeros 18
3.2 Polipropileno (PP) 19
3.3 Propriedades Mecânicas 20
3.3.1 Resistência à Tração 21
3.3.2 Resistência ao Impacto 22
3.3.3 Densidade 23
3.3.4 Índice de Fluidez 24
3.4 Aplicação do Polipropileno nos Automóveis 25
3.5 Metodologias de Reciclagem 25
3.6 Reciclagem Mecânica 27
3.6.1 Reciclagem Mecânica Primária 27
3.6.2 Reciclagem mecânica secundária 29
3.7 Reciclagem Química 32
3.8 Reciclagem Energética 33
4 METODOLOGIA 35
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 37
5.1 Ensaio de Tração 37
5.2 Ensaio de Impacto 39
5.3 Ensaio de Densidade 41
5.4 Resultados de Índice de Fluidez 43
6 CONCLUSÃO 46
SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS 48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA 49

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Iberdrola (2024) a população mundial mais do que triplicou desde meados do século XX, passando de cerca de 2,5 bilhões em 1950 para 8,2 bilhões em 2024. Conforme dados estatísticos, pode-se notar que a população mundial cresceu de modo exponencial ao longo dos anos, isso nos leva a entender que, a demanda de recursos para abastecer essas pessoas também aumentou de forma considerável.

É importante ressaltar que muitos itens que são fabricados e utilizados, não possuem, em seu fim de vida, uma destinação de maneira sustentável que possa reduzir os seus impactos no meio ambiente no momento do descarte. Apenas no Brasil cerca de 450 mil toneladas de pneus são descartadas anualmente, além disso, plásticos, metais, vidros, óleos e outros materiais se juntam aos pneus, formando um montante enorme de resíduos. Sem o devido cuidado, esses componentes se acumulam em aterros sanitários, ou, pior, em terrenos baldios e cursos d'água, poluindo o solo e a água que consumimos (PORTO, 2024).

De modo geral, as indústrias que estão mais interessadas em reciclar seus resíduos poliméricos são dos segmentos automotivos e de embalagens. A energia gasta para o transporte é consideravelmente reduzida ao substituir embalagens de vidro por polímero. Por exemplo, um caminhão carregado de água mineral engarrafada em vidro está, na verdade, transportando 57% em massa de água e 43% de vidro (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

Segundo o Boletim da ABIPLAST de 2018, o polietileno de baixa densidade (PEBD), o polietileno de alta densidade (PEAD) e o polipropileno (PP) representam juntos 45% da produção mundial de polímeros. Particularmente, o polipropileno é amplamente explorado, mas o aumento do custo das resinas plásticas, pressionado pelas constantes flutuações do preço do petróleo no mercado internacional, tem estimulado as pesquisas na reciclagem deste polímero.

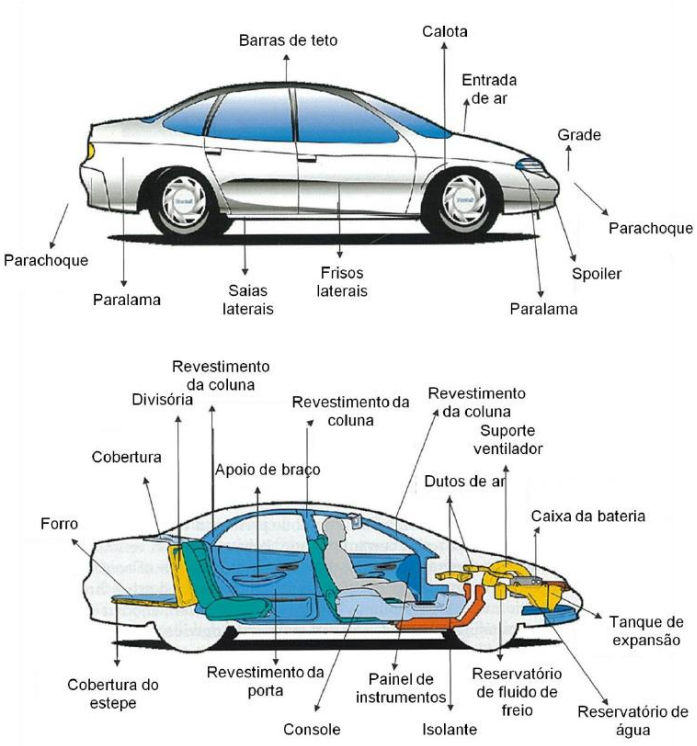
De acordo com Malagueta (2003) os plásticos automotivos que se tornaram descarte passaram a ser uma grande preocupação ambiental, fator que acarreta em um aumento significativo de plásticos acumulados.

Pravia e Machado (2023) destacam que o setor automobilístico, por ser um setor com maior utilização de recursos diversificados, a indústria automobilística tende a ser uma fabricante de grande quantidade de resíduos poluentes. Em contrapartida,

um setor que também busca por soluções que possam reduzir os impactos ambientais causados, buscando métodos através de reciclagem, reuso e remanufatura de peças e componentes de veículos produzidos.

No processo de fabricação de um automóvel, é notório a grande quantidade de peças plásticas que são empregadas, isso se deve a evolução que vem sendo crescente, de forma a reduzir consideravelmente o peso do veículo, sem interferir em suas propriedades funcionais. Conforme dados da Knauf Industries (2019), os polímeros são a segunda matéria-prima mais utilizada na produção de carros e representam 20% do peso total, ou seja, cerca de 300 kg em um carro com 1.500 kg, em peças de diferentes tipos e tamanhos. As peças plásticas representam 50% do volume dos veículos. Na Figura 1 temos ilustrado os tipos de peças automotivas que são comumente fabricadas em PP.

Figura 1 - Peças Fabricadas em PP nos automóveis



Fonte: Petry, 2011

Em sua pesquisa Malagueta (2003) destaca que, a crise do petróleo entre as décadas de 70 e 90 foi um importante acontecimento que contribuiu para que ficasse evidente a demanda pela diminuição do peso dos automóveis, com o objetivo final de reduzir o consumo de combustível. A substituição das peças metálicas por peças

plásticas sem perda de qualidade e segurança foi uma alternativa que trouxe soluções assertivas na busca pela diminuição do peso dos carros.

Pravia e Machado (2023) destacam que, os polímeros em especial o PP, possuem boas qualidades, pois, são de fácil reciclagem, podem ser reforçados com fibras sintéticas ou naturais, além de, possuírem propriedades mecânicas interessantes que permitem a sua utilização em diversas áreas desde as aplicações na indústria automobilística, têxtil, aeronáutica, utilidades domésticas e na construção civil. Um grande exemplo na utilização do PP é a tendência crescente de se aplicar este polímero em produtos de utilidades gerais como baldes, vasilhas, peças de automóveis, entre outros.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Avaliar o comportamento mecânico do polipropileno após o processo de reciclagem mecânica, considerando suas propriedades físicas e estruturais para verificar sua viabilidade de reutilização em aplicações diversas, utilizando como método de estudo a revisão bibliográfica.

2.2 Objetivos Específicos

- Descrever o processo de reciclagem mecânica primária e secundária, apresentando o ciclo de produção e equipamentos utilizados.
- Caracterizar as propriedades mecânicas do polipropileno reciclado, incluindo resistência à tração, impacto, fluidez e densidade.
- Comparar o desempenho do polipropileno reciclado primário e secundário em relação ao material virgem.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Dentre os principais materiais para fabricação de peças plásticas automotivas se destaca o polipropileno como material mais popular nos carros, devido sua versatilidade, propriedades mecânicas e químicas, sendo tradicionalmente utilizado em para-choques, para-lamas, componentes internos, além de muitas outras peças (KNAUF INDUSTRIES, 2022).

A substituição de materiais tradicionais por plásticos na indústria automobilística se deu de forma gradual ao longo de vários anos. Muitas razões, tanto econômicas, quanto tecnológicas, contribuíram para o andamento dessa mudança. Com as crises do petróleo veio a conscientização para o problema da falta de combustível e para a vulnerabilidade do uso indiscriminado de recursos naturais de fontes não-renováveis. Essas crises podem ser consideradas como o momento decisivo da tomada de posição quanto à construção de carros mais eficientes, seguros, confortáveis e que consumissem menos combustível. Pode-se dizer, porém, que somente após a superação de limitações tecnológicas, com o desenvolvimento de polímeros de alto desempenho, é que os plásticos passaram a fazer parte essencial dos automóveis. Considerando o volume dos materiais, são usados mais plásticos do que aço na construção de um veículo, devido ao grande número de aplicações que os polímeros encontraram nesse produto (HEMAIS, 2003).

3.1 Polímeros

A palavra polímero originou-se do grego *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por dezenas de milhares de unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligações covalentes (OLIVEIRA, 2016).

Os polímeros sempre fizeram parte do cotidiano humano. Desde os tempos mais remotos o homem tem usado polímeros naturais como amido, celulose, seda, entre outros. Desde então, o estudo dos polímeros naturais e principalmente dos sintéticos desenvolveu se rapidamente. Atualmente, é difícil imaginar a vida humana sem a utilização de polímeros. Assim, a indústria de polímeros constitui um dos pilares do estilo de vida contemporâneo. É enorme a quantidade de bens que nos cercam, produzidos a partir de materiais poliméricos, uma vez que eles são utilizados em

quase todas as áreas das atividades humanas, principalmente nas indústrias de automóveis (MARQUES, 2010).

Os materiais poliméricos possuem diferenciação entre si de acordo com suas propriedades, escala de produção, nível de consumo e valor agregado atual (VAA). Dependendo da estrutura química, ou seja, dependendo do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, os polímeros podem ser divididos em três classes: Plásticos, Borrachas (ou Elastômeros) e Fibras (CALLISTER, 2002).

De modo geral, os materiais poliméricos podem ser classificados em três grandes grupos: polímeros para usos gerais também conhecidos como *commodities*, polímeros para usos específicos *quasi-commodities* e polímeros de alto desempenho considerados especiais. Polímeros tipo *commodities* são aqueles produzidos em grande escala, têm baixo valor agregado, não apresentam diferenciação, são utilizados para finalidades gerais e são consumidos em grandes quantidades. Os chamados polímeros *quasi-commodities* são, também, produzidos em grande escala, porém em nível mais baixo do que os *commodities*. Entretanto, *quasi-commodities* apresentam desempenhos diferenciados e propriedades que os fazem ser ideais para determinadas aplicações. Polímeros especiais são aqueles que apresentam alto desempenho, são produtos específicos, com propriedades bem definidas e incomuns, tem alto VAA e são produzidos em escalas de pequeno porte (MANO, 1991).

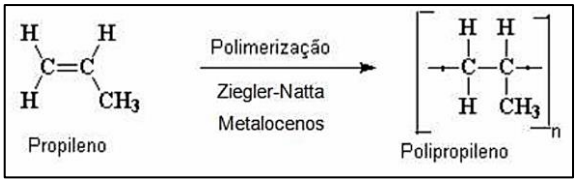
Como exemplos de *commodities*, citam-se os polietilenos, o polipropileno, o poli(cloreto de vinila) e o poliestireno. O típico polímero *quasi-commoditie* é o PET, que tem características específicas de plásticos de engenharia e mercado bem direcionado, porém é produzido em grande escala. Poliamidas, ABS, SAN, poliuretanos e policarbonato também podem ser classificados nessa categoria. Entre os polímeros de alto desempenho, podem ser citados o poli(óxido de metileno) (POM), politetrafluoroetileno (PTFE), poli(tereftalato de butileno) (PBT), poli(sulfeto de fenileno) (PPS) e polímeros líquido-cristalinos (HEMAIS, 2003).

3.2 Polipropileno (PP)

O PP é obtido através de reações de polimerização, aquelas em que produtos simples, chamados monômeros, reagem entre si, combinando suas moléculas e formando moléculas maiores, caracterizadas pela repetição de uma unidade básica. O monômero para a produção de PP é o propeno, também chamado de propileno, um

hidrocarboneto insaturado de fórmula C_3H_6 obtido principalmente através do craqueamento da nafta, um derivado do petróleo. A Figura 2 apresenta o esquema de ligação química do PP (PETRY, 2011).

Figura 2 - Esquema de Ligação de PP



Fonte: Oliveira, 2016

O polipropileno é um dos polímeros que possuem menor densidade entre os termoplásticos mais comuns. Portanto, uma peça moldada em polipropileno será mais leve de forma que um maior número de peças possa ser produzido com uma mesma massa de matéria prima quando comparado a um polímero com densidade maior (OLIVIERA, 2016).

3.3 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas de um material, são suas características quanto ao tipo e grandeza de sua resposta a um estímulo específico que lhe é submetido, relacionando a deformação a uma carga ou força que lhe é aplicada. A resposta dos materiais às influências mecânicas externas são manifestadas pela capacidade destes materiais desenvolverem deformações reversíveis e irreversíveis, e resistirem à fratura (CALLISTER, 2002).

O desempenho de um material está relacionado com suas propriedades, assim como a estrutura do material está relacionado com o seu processamento, e essas relações definem a caracterização dos materiais em termos de projeto, produção e utilização. As propriedades mecânicas mais importantes decorrem de processos onde há grandes relaxações moleculares, como relaxação sob tensão, escoamento sob peso constante e histerese. Essas relaxações dependem muito da temperatura, da capacidade de desenvolver deformações reversíveis pronunciadas, que são maiores em elastômeros vulcanizados, e da íntima correlação entre processos mecânicos e químicos, os quais se influenciam mutuamente de modo substancial (MANO, 1991).

3.3.1 Resistência à Tração

Resistência à tração ou resistência à tração na ruptura, ou tenacidade de um material, é avaliada pela carga aplicada ao material por unidade de área, no momento de sua ruptura (MANO, 1991).

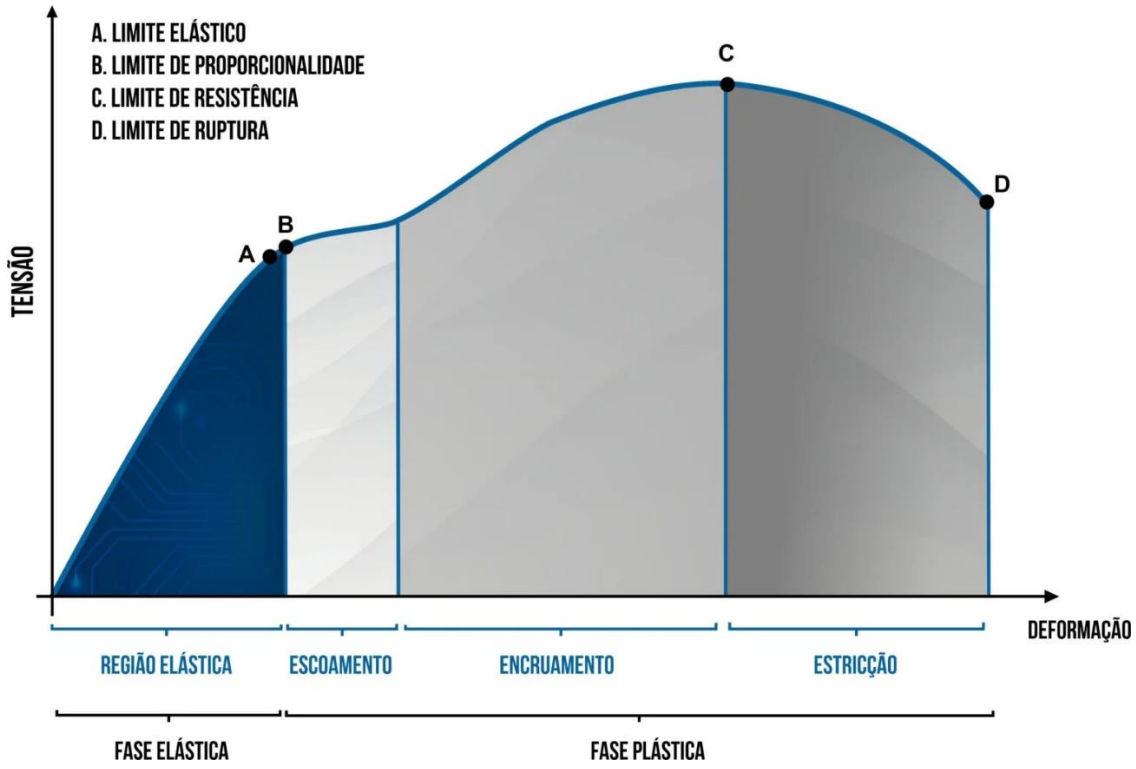
No ensaio de tração um corpo de prova é submetido a um esforço, que tende a alongá-lo ou até mesmo esticá-lo até a sua ruptura, a Figura 3 aborda exemplos de corpos de prova de PP reciclados reforçados com fibra de coco em diferentes porcentagens. As cargas aplicadas ao mesmo, são medidas na própria máquina de ensaio. Este tipo de ensaio, geralmente é realizado utilizando-se corpos de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados, ou, dependendo da finalidade do ensaio, suas informações possam ser usadas tecnicamente. Após o ensaio, obtemos algumas informações dos materiais, sendo possível elaborar um gráfico conforme o exemplo da Figura 4, amplamente conhecido como gráfico tensão x deformação (COSTA, 2000).

Figura 3 – Exemplo de corpo de prova de PP com fibra de coco



Fonte: Jafelice, 2013

Figura 4 – Gráfico ilustrativo do comportamento do material em um ensaio de tração



Fonte: Biopdi, 2023

O módulo de elasticidade é uma propriedade que está relacionada diretamente com a resistência a tração do material, é medido pela razão entre a tensão e a deformação dentro do limite elástico, em que a deformação é totalmente reversível e proporcional a tensão. É conhecido também como módulo de *Young*, e se aplica tanto à tração quanto à compressão, de acordo com a área transversal do material no início do ensaio. Nos polímeros em geral os módulos não excedem 500 kgf / mm^2 (MANO, 1991).

De acordo com o módulo do material é possível quantificar sua rigidez, ou seja, a sua capacidade de resistir à deformação quando submetido a uma carga. Como definição geral, quanto maior o módulo de elasticidade, mais rígido será o material, e menor será sua deformação sob uma carga aplicada (HIBBELER, 2017).

3.3.2 Resistência ao Impacto

Resistência ao impacto se refere a capacidade de um material em absorver energia antes de fraturar quando submetido a uma carga de impacto. Com esta

propriedade conseguimos mensurar e avaliar a tenacidade e a resistência à fratura do material em condições de impacto realistas.

Para determinação desta propriedade utiliza-se o ensaio de impacto, os resultados do ensaio são interpretados considerando a energia absorvida, características da fratura e outros parâmetros relevantes. Esses resultados fornecem informações valiosas sobre a resistência do material a cargas de impacto, auxiliando na seleção adequada de materiais e no projeto de componentes que estão sujeitos a condições de impacto (BIOPDI, 2023).

Vale a pena ressaltar que a classificação “frágil” ou “dúctil” em materiais é um conceito relativo e depende fortemente das condições de ensaio. Assim, particularmente em materiais plásticos, devido ao caráter viscoelástico, a tenacidade é uma função da temperatura, taxa deformacional, geometria e estado de tensões. Em materiais viscoelásticos como polímeros, os processos de relaxação são extremamente sensíveis a variações de temperatura. Assim, a temperatura na qual ocorre uma mudança acentuada no comportamento de fratura – passando de um caráter dúctil para frágil é definida como a temperatura de transição dúctil-frágil, do material (CORREA, YAMAKAWA, HAGE 1999).

3.3.3 Densidade

A densidade é uma propriedade mecânica dos materiais, que está diretamente relacionada à quantidade de massa de uma substância presente em um determinado volume. Essa propriedade possui sua importância em diversos campos da engenharia, como na mecânica dos fluidos, termodinâmica e na escolha de materiais para estruturas e componentes, devido sua influência direta no comportamento do material sob cargas, nas propriedades térmicas e acústicas, e estabilidade de sistemas. A densidade também é utilizada para caracterizar a compactação dos materiais, sendo importante para a análise da resistência e durabilidade de materiais em condições operacionais extremas.

A densidade varia conforme a substância e suas condições ambientais, como temperatura e pressão. Por exemplo, a água possui uma densidade de aproximadamente 1000 kg/m³ a 4°C, mas essa densidade diminui com o aumento da temperatura. Para materiais poliméricos e compostos, a densidade pode ser ajustada

conforme as necessidades do projeto, proporcionando um equilíbrio entre resistência e peso (SOUZA; SILVA, 2020).

3.3.4 Índice de Fluidez

O Índice de Fluidez (IF), também conhecido como Melt Flow Index (MFI), é um parâmetro fundamental para a caracterização de polímeros, especialmente no que diz respeito às suas propriedades reológicas. Esse índice é obtido através de um ensaio realizado em um plastômetro, que mede a taxa de extrusão do material fundido através de um capilar durante 10 minutos, expressando o resultado em gramas por 10 minutos (g/10min). Em termos simples, o índice de fluidez está diretamente relacionado à facilidade de fluxo do polímero, sendo inversamente proporcional à viscosidade do material, ou seja, quanto maior o IF, menor será a viscosidade do polímero, o que indica uma maior facilidade de deformação do material (CARRILHO, 2024).

Este índice tem uma relação direta com a massa molar do polímero, pois materiais com maior índice de fluidez geralmente apresentam massas molares menores. Isso ocorre devido à menor resistência à deformação plástica, uma vez que as cadeias poliméricas mais curtas ou com menos enroscos tendem a fluir mais facilmente. Além disso, a estrutura molecular do polímero desempenha um papel crucial no comportamento reológico. Polímeros com cadeias lineares, por exemplo, tendem a ter menores enroscos em comparação com polímeros de cadeias ramificadas, o que influencia diretamente no valor do IF (BRUCK, 2022).

Por essa razão, o índice de fluidez é amplamente utilizado nas indústrias de processamento de polímeros como parâmetro de controle de qualidade, sendo essencial para processos como injeção, extrusão e sopro. Ele não só ajuda a monitorar a qualidade dos materiais, mas também pode prever o comportamento de fluidez durante as aplicações industriais (BRUCK, 2022). Em suma, o IF é um indicador crucial da facilidade com que um polímero pode ser processado e manipulado, fornecendo informações valiosas sobre suas propriedades e adequação para diferentes processos de fabricação.

3.4 Aplicação do Polipropileno nos Automóveis

O uso do polipropileno na indústria automotiva tem se expandido significativamente, especialmente devido às melhorias técnicas nos compostos dessa resina. O PP é uma escolha estratégica para atender às exigências de custo e desempenho das montadoras, com destaque para a sua aplicação em diversos componentes automotivos. De acordo com a Revista Plástico Industrial (2004), a indústria automotiva atual exige materiais de alta performance, mas com custos acessíveis, e o polipropileno, devido às suas propriedades, tem se mostrado ideal para atender a essas necessidades. Embora as especificações de materiais na indústria automotiva já tenham sido mais rígidas, atualmente, as únicas exceções se aplicam a peças consideradas itens de segurança. Nesse contexto, o polipropileno se destaca como o plástico mais econômico, sendo amplamente utilizado em várias partes dos automóveis.

Os veículos fabricados no Brasil, por exemplo, utilizam cerca de 40kg de polipropileno, sendo 35kg desse total compostos pela resina. Destes 35kg, mais de 70% são compostos de polipropileno (OLIVEIRA, 2006). Este material tem se destacado principalmente em componentes como para-lamas, para-choques, painéis e revestimentos internos, áreas em que os compostos de PP têm mostrado grandes avanços em termos de resistência e durabilidade. A melhoria nas características técnicas do polipropileno, como maior rigidez e resistência ao impacto, tem impulsionado sua utilização no mercado. A evolução da tecnologia de produção dessa resina também resultou em compostos com resistência térmica de até 110°C e um aumento significativo na estabilidade dimensional. Essas melhorias são associadas a um alto índice de fluidez, permitindo a produção de peças mais finas, mas com propriedades mecânicas superiores (REVISTA PLÁSTICO INDUSTRIAL, 2004).

3.5 Metodologias de Reciclagem

A preocupação com a poluição ambiental gerada por resíduos plásticos começou logo após a segunda guerra mundial, quando se registrou um aumento significativo na produção mundial de plásticos (OLIVEIRA, 2016).

Sendo a forma mais apropriada em termos ambientais de gerenciamento dos rejeitos poliméricos a reciclagem é uma alternativa benéfica aos materiais que teriam

como possível destino um aterro sanitário ou incineração. Esta reutilização permite que o material seja transformado e tenha outra finalidade no mercado (NASCIMENTO, *et al*. 2018).

Ainda conforme Oliveira (2016), a reciclagem de polímeros pode ser classificada em quatro categorias: primária, secundária, terciária e quaternária.

a) Reciclagem Primária: consiste na conversão dos resíduos poliméricos industriais por métodos de processamento padrão[1] em produtos com características equivalentes àquelas dos produtos originais produzidos com polímeros virgens (por exemplo, aparas que são novamente introduzidas no processamento);

b) Reciclagem Secundária: conversão dos resíduos poliméricos provenientes dos resíduos sólidos urbanos por um processo ou uma combinação de processos em produtos que tenham menor exigência do que o produto obtido com polímero virgem.

c) Reciclagem Terciária: processo tecnológico de produção de insumos químicos ou combustíveis a partir de resíduos poliméricos;

d) Reciclagem Quaternária: processo tecnológico de recuperação de energia de resíduos poliméricos por incineração controlada.

A produção dos polímeros no geral tem crescido constantemente e não há expectativa de redução nesse crescimento, o que faz aumentar a preocupação em como administrar os resíduos gerados por essa demanda crescente. Uma das opções é a reciclagem do material polimérico. Neste método temos a reintrodução do polímero existente e redução do consumo de matéria prima nova (ANDRADE, 2019).

A reciclagem faz parte dos resultados de uma série de ações focadas em processar materiais aparentemente sem valor em matéria-prima para produção de novos bens. Além de possuir boa aceitação pela população, a reciclagem apresenta como vantagens: a redução do volume descartado no meio ambiente, preservação dos recursos naturais, economia de energia e geração de emprego (MANO; PACHECO; BONELLI, 2010).

A reciclagem dos materiais poliméricos pode ser realizada em três métodos distintos: mecânica, química e energética (MANO, 2000).

[1] Processamento padrão consiste nas técnicas de produção mais utilizadas para materiais termoplásticos e termofixos. Ex. Injeção Plástica.

3.6 Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica pode ser dividida em duas classes: a primária e a secundária. A diferença entre elas é que a primeira ocorre logo após o primeiro processamento, reciclando, portanto, os resíduos gerados pela manufatura inicial, enquanto a reciclagem secundária ocorre após o uso e descarte do material. Na primária as propriedades do material reciclado são aproximadas do material virgem diferente da secundária que apresenta propriedades inferiores ao da primária (FARIA, 2002).

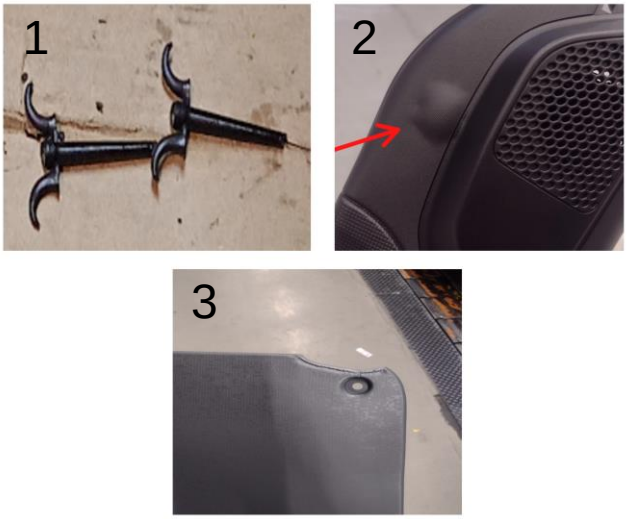
Este tipo de reciclagem, é a forma mais difundida de reprocessamento, sendo amplamente aplicada nas indústrias recicladoras de polímeros. Para as propriedades do produto final serem semelhantes ou não ao material de origem, dependerá da qualidade de cada etapa do processo e da heterogeneidade do resíduo (PESSÔA, 2018)

3.6.1 Reciclagem Mecânica Primária

Na reciclagem primária os descartes geralmente mantêm muito próxima as características do produto original (material virgem) e têm origem na própria indústria. Os descartes desse tipo podem ser, por exemplo, as sobras de plástico do processo industrial (peças defeituosas, aparas, rebarbas da linha de produção, e são chamados de resíduos pós-industriais (ECYCLE; 2024).

A Figura 5 aborda exemplos de materiais que são reaproveitados na reciclagem primária.

Figura 5 – (1) Canais, (2) peças defeituosas por bolha e (3) falha de injeção



Fonte: Elaborado pelo autor

No geral as etapas de reciclagem são: separação; trituração; ensacamento após essas etapas o material está disponível para reuso, algumas empresas também costumam adotar o processo de análise laboratorial do material para certificar que aquele lote de material atende as especificações recomendadas.

a) Separação: Neste processo serão separados os produtos que foram descartados de acordo com o tipo específico de seu material. Exemplo: Peças produzida com PP separadas de peças produzidas com PA.
b) Trituração: Nesta etapa os produtos são triturados em um equipamento próprio para esta operação, amplamente denominado de moinho, a Figura 6 aborda um moinho utilizado para trituração de polímeros.

Figura 6 – Moinho de trituração de peças plásticas



Fonte: Plástico Moderno, 2012

c) Ensacamento: Na etapa de ensacamento os produtos triturados que são oriundos de um único material, são ensacados com a descrição do seu material e disponibilizados para reuso.

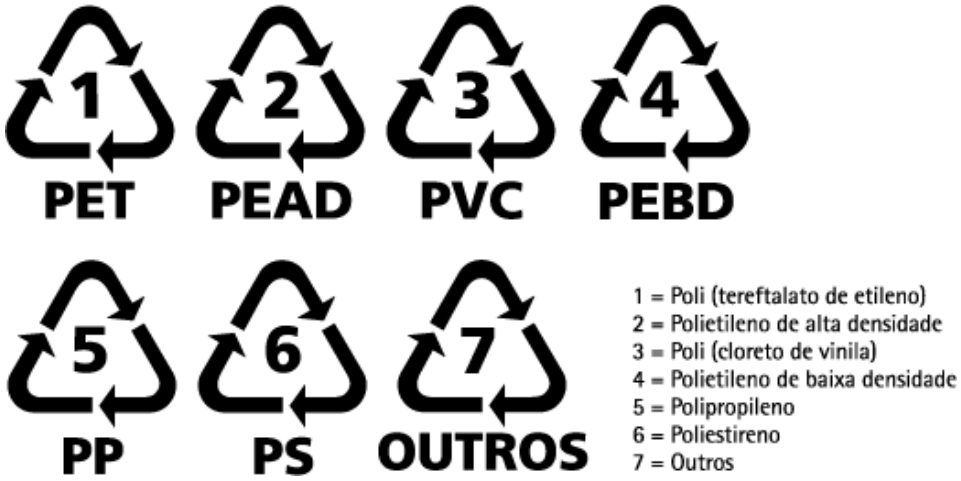
3.6.2 Reciclagem mecânica secundária

Os polímeros termoplásticos são amplamente reciclados pelo método de reciclagem mecânica secundária.

As etapas envolvidas são: a) Recolhimento e separação; b) Moagem; c) Lavagem e secagem; d) Aglomeração; e) Peletização. Durante a fase de fundição, o material reprocessado pode ser misturado com uma resina virgem, a fim de se obter propriedades superiores. Esta reciclagem é tradicional e a mais utilizada no Brasil. O custo de operação é relativamente baixo, mas exige um investimento inicial considerável (ANDRADE, 2019).

a) Recolhimento e Separação: Nesta etapa é onde inicia todo o ciclo do processo, onde pessoas da organização ou terceiros irão realizar a coleta seletiva dos materiais a serem reciclados e irão realizar a separação por tipo de material. Esta separação pode ser realizada de modo manual ou automatizada. Sendo manual executada verificando a marcação do tipo de material gravado no produto acabado quando possível, os símbolos de materiais conforme Figura 7 são regidos através da norma NBR 13.230 da ABNT (SPINACÉ; PAOLI, 2004).

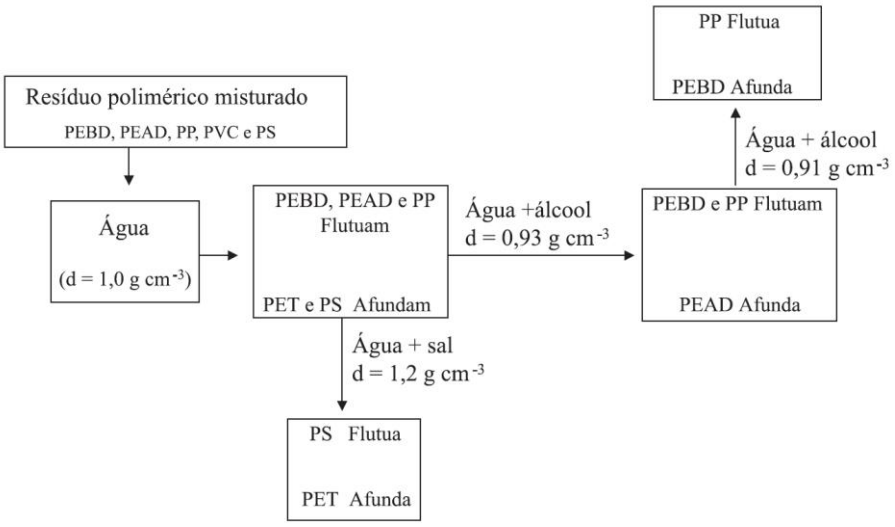
Figura 7 – Símbolos de identificação de polímeros



Fonte: Soares, 2020

De forma automatizada é muito utilizado a separação através da densidade conforme esquemático da Figura 8, em tanques de flotação ou hidro ciclones.

Figura 8 – Esquema de separação por densidade.



Fonte: Spinacé; Paoli, 2004

b) Moagem: Na etapa de moagem, os polímeros são triturados em pedaços menores para facilitar o processamento subsequente, usando-se máquinas de trituração como moinhos, que podem variar de acordo com o tipo de plástico e o volume de material a ser processado. Os mais comuns são moinhos de facas, de martelo e de rolos (MUNDO DO PLÁSTICO, 2024).
c) Lavagem e Secagem: Na operação de lavagem e secagem é onde o material moído passará por limpeza, em um tanque com solução de água ou detergente aquecido. A água utilizada na operação normalmente opera em circuito fechado, onde após ser utilizada passará por tratamento e retornará ao ciclo. Logo em seguida o material lavado é submetido à secagem em grandes secadores com circulação de ar (PLÁSTICO TRANSFORMA, 2024).
d) Aglomeração: Consiste na etapa onde os materiais são alimentados em uma máquina extrusora, onde são fundidos por aquecimento e levados por uma rosca sem fim a uma matriz, formando os filamentos contínuos, comumente chamados de “espaguetes” (FACIN, 2024).
e) Peletização: Na etapa de peletização, os “espaguetes” são resfriados em uma banheira com água a temperatura ambiente e cortados em uma granuladora, formando os grânulos ou também chamados de *pellets* de material plástico reciclado, que são embalados (FACIN, 2024).

3.7 Reciclagem Química

A reciclagem química consiste em um processo que provoca a despolimerização[2] total ou parcial dos polímeros, destruindo a estrutura polimérica, incluindo a cadeia principal. Esse processo avançado transforma polímeros em moléculas menores, predominantemente líquidos ou gases, os quais podem ser utilizados para gerar novamente o polímero original ou como combustível (PESSÔA, 2018; ZANIN, 2015).

Entre os processos utilizados na reciclagem química, destacam-se:

a) Hidrogenação: Nesse método, as cadeias poliméricas são quebradas pelo tratamento com hidrogênio e calor, gerando produtos que podem ser processados em refinarias.

b) Gaseificação: Os plásticos são aquecidos com ar ou oxigênio, resultando em gás de síntese, composto de monóxido de carbono e hidrogênio.

c) Quimólise: Processo que promove a quebra parcial ou total dos plásticos em monômeros por meio da utilização de glicol, metanol e água.

d) Pirólise: Consiste na quebra das moléculas pela ação do calor na ausência de oxigênio, gerando frações de hidrocarbonetos que podem ser processadas em refinarias (ANDRADE, 2019).

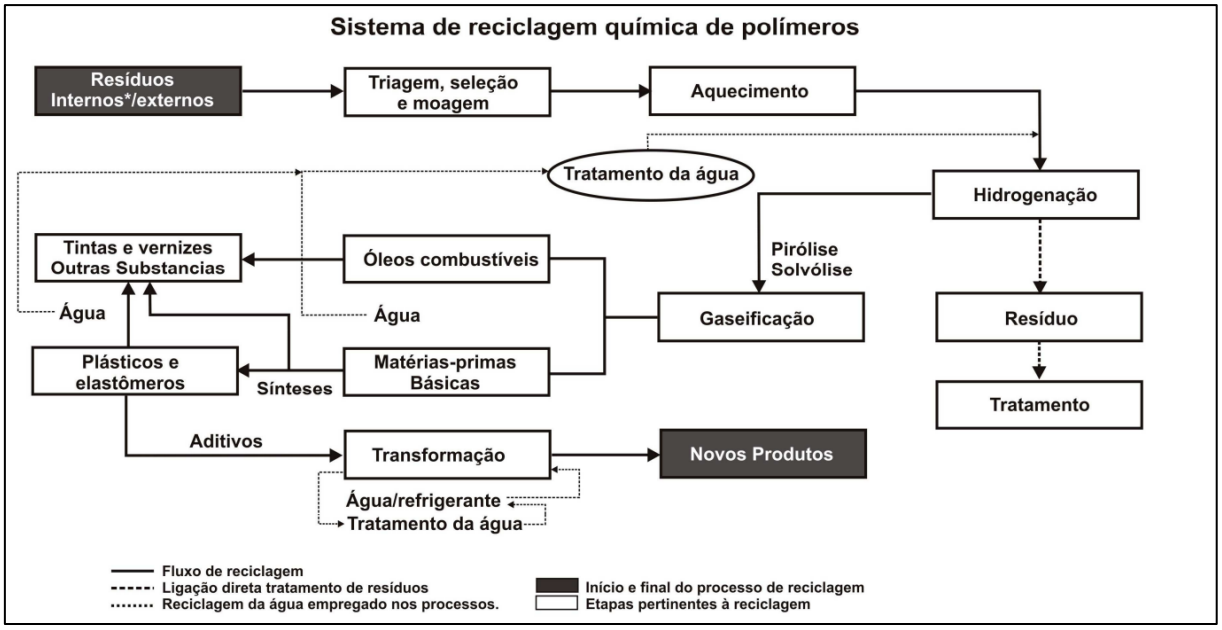
Esse conjunto de técnicas permite a reciclagem de misturas de plásticos diferentes, aceitando determinado grau de contaminação por tintas, papéis e outros materiais, ampliando a viabilidade do reaproveitamento de plásticos em cenários variados.

A reciclagem química está associada à reciclagem terciária e inclui outras metodologias, como fratura catalítica, fotodegradação e degradação em reatores de micro-ondas. Essas abordagens complementam o leque de possibilidades para transformar os polímeros em recursos úteis, promovendo a sustentabilidade e a redução do impacto ambiental (PESSÔA, 2018; ZANIN, 2015).

A Figura 9 retrata o fluxograma de um processo de reciclagem química.

[2] Despolimerização consiste na degradação de uma macromolécula em moléculas mais simples (p.ex., monômeros) que mantêm a mesma fórmula empírica.

Figura 9 – Sistema de reciclagem química



Fonte: Cerqueira, 2009

3.8 Reciclagem Energética

A reciclagem energética, também chamada de reciclagem quaternária, consiste na incineração controlada de polímeros com o objetivo de gerar energia a partir da combustão. Este método é reconhecido como uma das formas mais eficazes de reduzir o volume de materiais, especialmente aqueles que possuem alto poder calorífico[3], como os plásticos (ANDRADE, 2019). Em geral, as misturas de plásticos encontradas nos lixos urbanos possuem um poder combustível de cerca 9.000 BTUs/Kg, enquanto que nas suas frações específicas (separados de outros materiais e/ou por naturezas de plásticos) podem apresentar um saldo energético positivo de até 42.000 BTUs/Kg de resíduo. A título comparativo, as madeiras secas apresentam um valor energético de 12.000 a 16.000 BTUs/Kg e o carvão cerca de 24.000 BTUs/Kg. O óleo bruto do refino do petróleo possui um valor energético aproximado de 12.000 BTUs/Kg (FORLIN; FARIA, 2002).

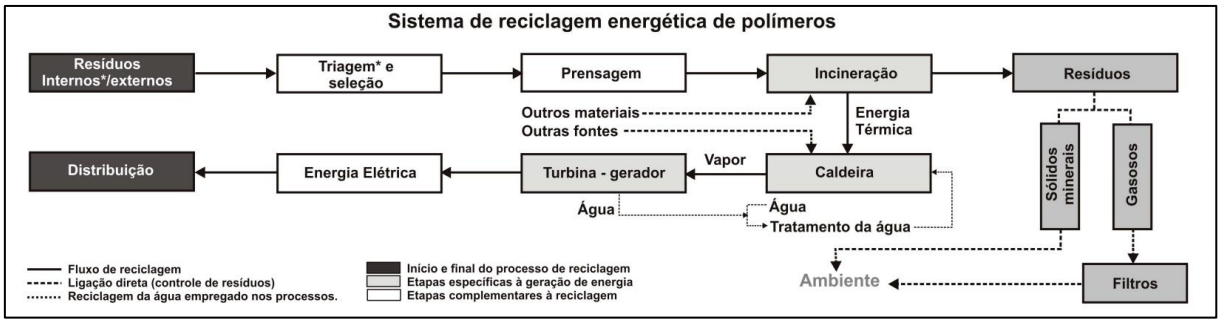
Durante o processo de reciclagem energética, ocorre a despolimerização dos resíduos plásticos. Embora não haja garantia quanto aos produtos obtidos, a energia liberada é aproveitada como fonte renovável. Isso torna esse método especialmente

[3] Poder calorífico: O poder calorífico é a quantidade de energia por unidade de massa liberada na oxidação de um determinado combustível.

indicado para resíduos complexos ou que exijam cuidados específicos, como termorrígidos, borrachas, compósitos e descartáveis médico-hospitalares (ZANIN, 2015; CERQUEIRA, 2007).

Entre os métodos para a recuperação de energia incluem-se a pirólise, a incineração e a recuperação de gases provenientes de aterros sanitários. Entretanto, é fundamental que o processo de incineração seja realizado em altas temperaturas e acompanhado de sistemas adequados para tratamento de gases. Sem a contenção adequada, a liberação de substâncias nocivas, como dióxido de carbono, dióxido de enxofre e toxinas de materiais como o PVC, pode causar sérios danos ambientais. Por outro lado, os resíduos sólidos gerados podem ser utilizados como complemento ao solo sem riscos ambientais significativos (ANDRADE, 2019). A Figura 10 retrata o fluxograma de um processo de reciclagem energética.

Figura 10 – Sistema de reciclagem energética



Fonte: Cerqueira, 2009

4 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa utilizada foi no formato de revisão bibliográfica com práticas experimentais, sendo realizado a busca por materiais relacionados ao tema do trabalho através das plataformas de pesquisa Google Acadêmico, Periódicos Capes e Biblioteca Virtual do IFMG Campus Betim, também foi utilizado como método de pesquisa a biblioteca física do Campus.

Os seguintes passos foram utilizados para encontrar material relevante:

1) Realizou-se a busca com as palavras chaves relacionadas ao tema de estudo nas plataformas mencionadas, e foi feito o armazenamento dos documentos encontrados. Palavras chaves mais utilizadas: "Polipropileno", "Polipropileno Reciclado", "Polipropileno reciclado AND Reciclagem Mecânica", "Polímeros", "Processo de Reciclagem de Polímeros"

2) Realizou-se a leitura do resumo dos trabalhos, para assim realizar um pré-filtro inicial, descartando conteúdos que não teria relevância.

3) Foi feita a leitura dos arquivos de maneira assertiva e refletindo a respeito, selecionando trechos ricos em informações, que pudessem agregar na construção do trabalho.

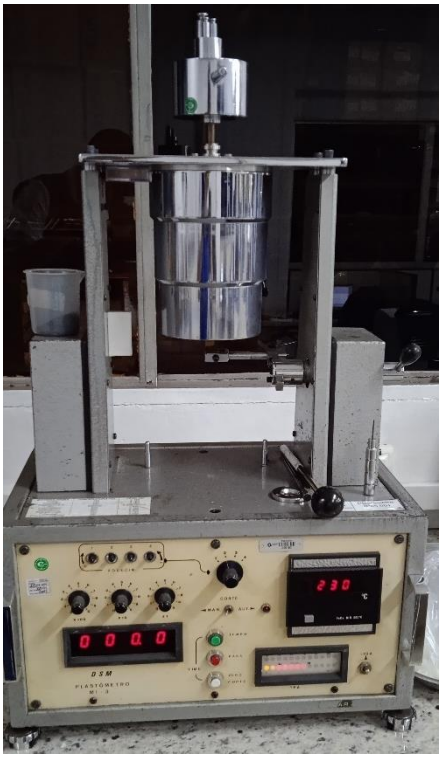
4) Foi separado alguns trechos dos materiais em forma de fichas, para utilização posterior, estes foram utilizados para fixação de ideias e/ou citações.

5) As referências bibliográficas dos documentos utilizados foram listadas para correta menção dos autores.

6) Pesquisas de campo também foram realizadas a fim de agregar com informações ao trabalho. Ensaios de fluidez e densidade foram realizados seguindo as normas ISO 1133 E ISO 1183 respectivamente.

Para o ensaio de fluidez foi utilizado um Plastômetro modelo MI-3, fabricante DSM, conforme Figura 11.

Figura 11 - Plastômetro



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o ensaio de densidade foi utilizado uma balança de precisão semi-analítica, modelo AD200, fabricante Marte, resolução 0,001g e faixa de indicação de 0,000 a 210,000g, conforme Figura 12.

Figura 12 - Balança semi-analítica



Fonte: Elaborado pelo autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ensaio de Tração

De acordo com o estudo de Carrilho (2024) é possível afirmar que foi utilizado como método para reprocesso do material polimérico, a reciclagem mecânica do tipo primária (R_P), pois, foram injetados os materiais virgens, e para obtenção do material reciclado, este mesmo material foi triturado através de um moinho para que pudesse ser novamente injetado e obtido o corpo de prova com material reciclado, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Dados referente a Tensão de escoamento (σ_e), Tensão Máxima de Ruptura ($\sigma_{Máx}$) e Módulo de Elasticidade (E)

Corpo de Prova	σ_e (MPa)	Δ (%)	$\sigma_{Máx}$ (MPa)	Δ (%)	E (MPa)	Δ (%)
Virgem	22,44	-	25,72	-	952,07	-
V+5%R_P	21,30	-5,08	25,39	-1,28	895,99	-5,89
V+10%R_P	20,47	-8,77	25,65	-0,27	899,09	-5,56
V+20%R_P	20,51	-8,60	25,38	-1,32	907,44	-4,69
V+30%R_P	20,67	-7,88	25,41	-1,21	902,86	-5,17

Fonte: Carrilho, 2024

Através do ensaio de tração, Carrilho (2024) analisou o comportamento dos materiais ensaiados conforme norma ASTM D638, os resultados obtidos nas amostras distintas foram comparados com o material virgem. Conforme dados da Tabela 1 observa-se que com a adição de material reciclado obteve-se um desempenho negativo nas propriedades mecânicas perdendo cerca de 8,7% de resistência ao escoamento, 1,3% em sua ruptura e 5,8% em seu módulo de elasticidade quando adicionado até 30% de material reciclado na mistura.

Pereira *et al.* (2018) abordou o método de reciclagem mecânica do tipo secundária (R_S), utilizando a reciclagem de resíduos de big bags para formular a composição com percentuais de material virgem variados. Os ensaios realizados e sua formulação de corpos de prova seguiram a norma ASTM D638.

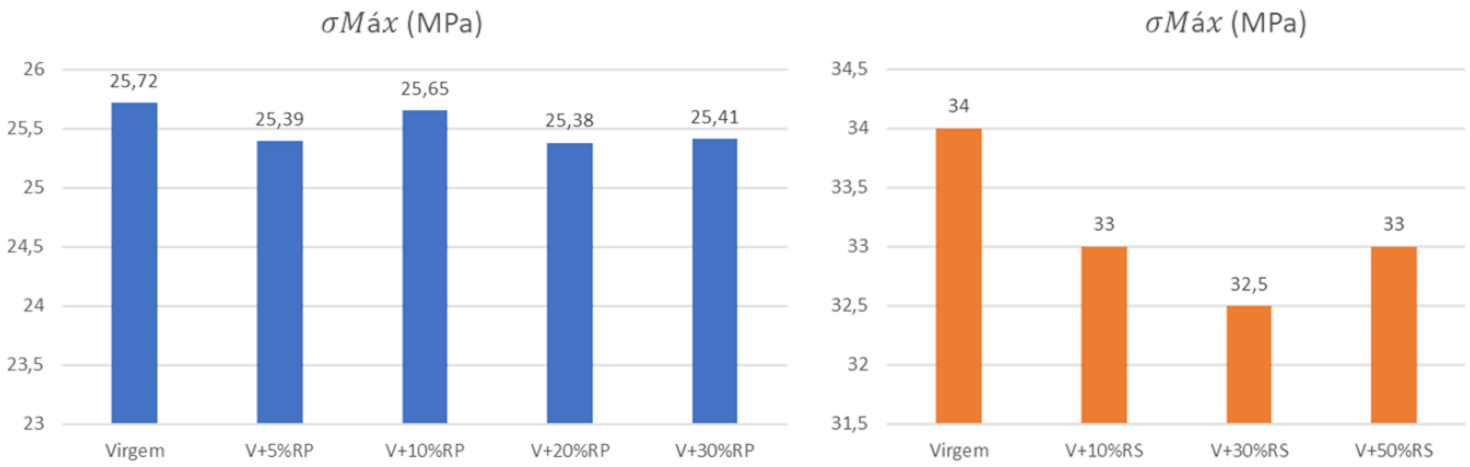
De acordo com Pereira *et al. (2018)* e através dos dados obtidos conforme Tabela 2 a resistência à tração da ruptura não sofreu alteração significativa com a adição do resíduo, até mesmo com a incorporação de 50% do material reciclado proveniente dos resíduos de tecido de big bag, o que retrata um bom resultado. Em relação ao módulo de elasticidade, nota-se que quando incorporado material reciclado há um aumento, em geral, nesta propriedade para os compostos em comparação ao polímero puro, sendo mais acentuado o valor para o composto com 10% de resíduo de tecido de big bag, cerca de 19% maior que o polímero puro. A partir desse resultado, pode-se compreender que este aumento no módulo de elasticidade, possivelmente, está associado à presença de cargas que atuaram reforçando a rigidez do material.

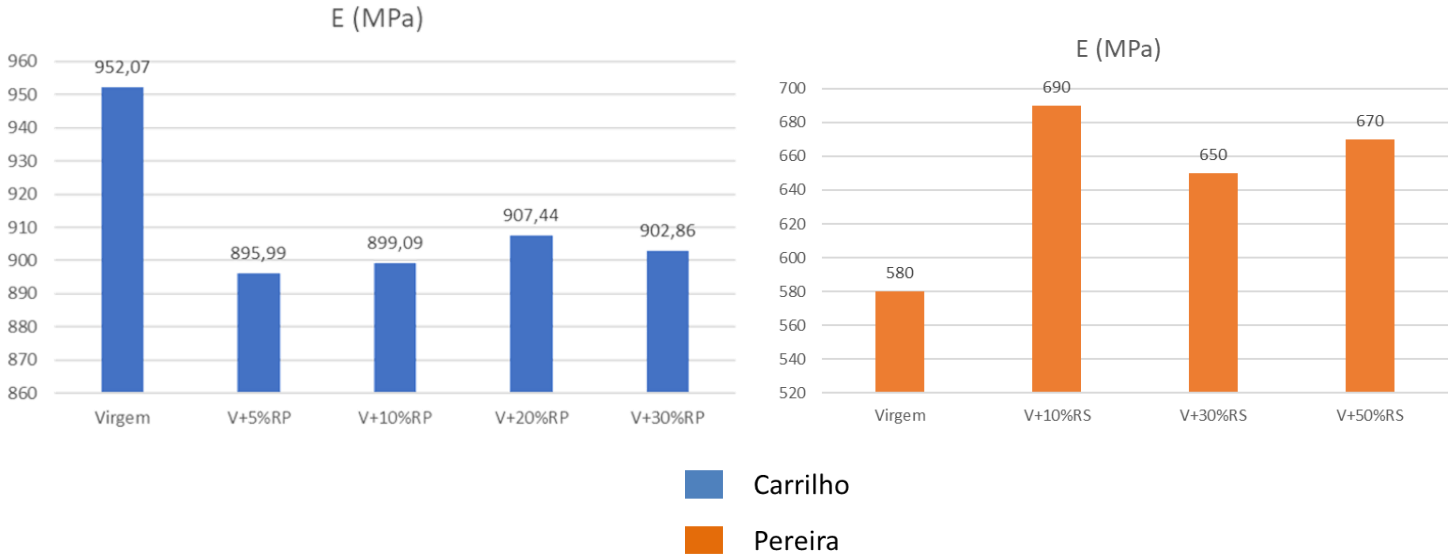
Tabela 2 – Tensão Máxima de Ruptura ($\sigma_{Máx}$), Módulo de elasticidade (E)

Corpo de Prova	$\sigma_{Máx}$ (MPa)	Δ (%)	E (MPa)	Δ (%)
Virgem	34,0	-	580	-
V+10%RS	33,0	-2,94	690	+18,97
V+30%RS	32,5	-4,41	650	+12,07
V+50%RS	33,0	-2,94	670	+15,52

Fonte: Pereira *et al.*, 2018

Figura 13 - Representação Gráfica Ensaios de Tração





Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 Ensaio de Impacto

Gafforelli e Santana (2020), seguindo a metodologia de reciclagem mecânica secundária, realizou os ensaios com a utilização de resíduos de componentes automotivos e incorporou-os ao material virgem utilizado na fabricação de para-choques automotivos, formulando composições variadas. Seus ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D256 e inseridos na Tabela 3.

Tabela 3 – Resistência ao impacto método Izod

Corpo de Prova	Resistência ao Impacto (kJ/m^2)	Δ (%)
Virgem	32,09	-
V+10%RS	34,02	+6,01
V+20%RS	33,63	+4,80
V+30%RS	32,81	+2,24

Fonte: Gafforelli e Santana, 2020

Conforme estudo abordado por Gafforelli e Santana (2020), os resultados do ensaio de resistência ao impacto Izod apresentados na Tabela 3 foram satisfatórios considerando que as composições com diferentes teores de material reciclado superaram o desempenho do material virgem. Em amostras com 10% de PP reciclado

apresentaram o maior valor de resistência, sendo ele 6% maior que o resultado do material virgem.

Silva *et al.* (2013), realizou testes utilizando como metodologia a reciclagem mecânica secundária, utilizando PP virgem, resíduos de PP provenientes de grades de embalagens plásticas e porcentagens iguais para todas amostras de EPDM virgem. Seus ensaios foram realizados conforme norma ASTM D256 para obtenção dos valores de resistência ao impacto IZOD.

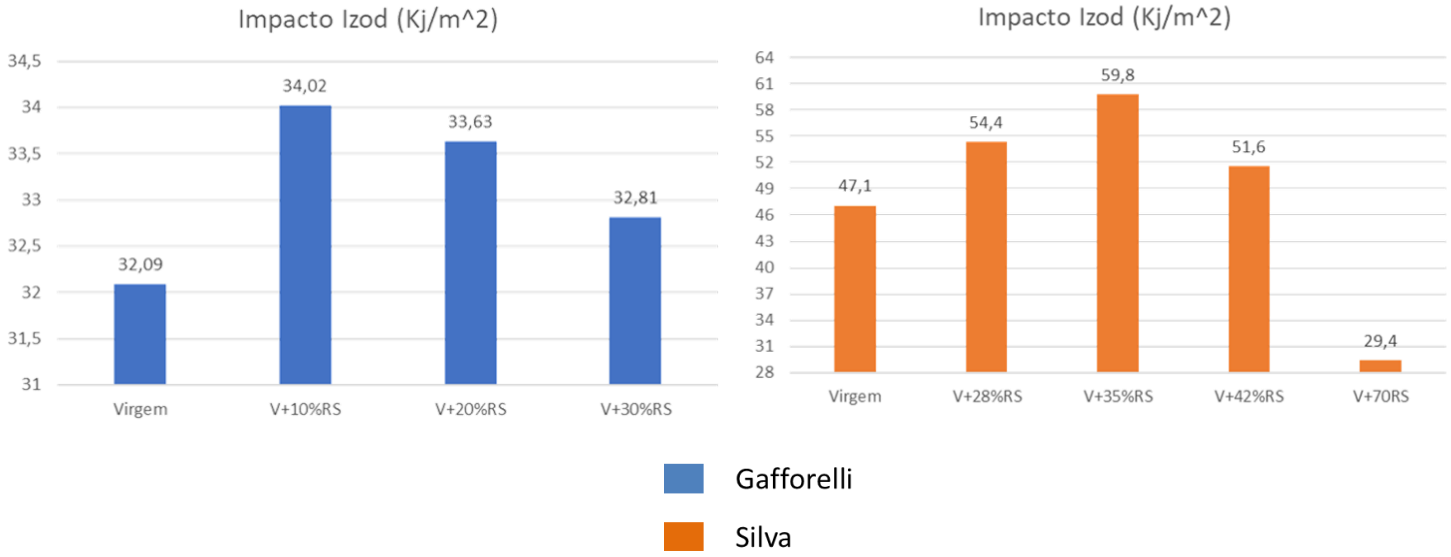
De acordo com os valores obtidos por Silva *et al.,* (2013) utilizando material virgem e misturas diferentes com material reciclado conforme apresentado na Tabela 4, nota-se que o mesmo apresentou valores que estão em concordância com os apresentados por Gafforelli e Santana (2020), pois, o aumento de teor de PP reciclado até 35% trouxe melhora no desempenho do material em resistência ao impacto, chegando a um aumento de quase 27%, enquanto que a implementação de porcentagens acima de 35% causaram aumento na rigidez e queda da tenacidade.

Tabela 4 – Resistência ao impacto método Izod

Corpo de Prova	Resistência ao Impacto (kJ/m^2)	Δ (%)
Virgem	47,1	-
V+28%R_S	54,4	+15,50
V+35%R_S	59,8	+26,96
V+42%R_S	51,6	+9,55
V+70R_S	29,4	-37,58

Fonte: Silva *et al*., 2013

Figura 14 - Representação Gráfica Ensaios de Impacto



Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 Ensaio de Densidade

O ensaio de densidade realizado foi utilizando a metodologia de reciclagem primária em uma indústria de fabricação de peças plásticas automotivas na região metropolitana da cidade de Belo Horizonte. Nesta fábrica são reaproveitados os materiais provenientes de produtos defeituosos e canais de injeção, conforme ilustrado na Figura 5 do tópico 3.6.1 deste trabalho, estes produtos são separados e triturados para posterior reutilização em novos produtos utilizando misturas com materiais virgens.

Para avaliação da densidade do material abaixo foi utilizada a norma ISO 1183, onde, conforme norma é necessário pegar as massas das amostras em dois formatos distintos, massa submersa em líquido específico e massa real. O líquido utilizado na etapa de submersão neste ensaio foi o álcool isopropílico de densidade 0,788 g/ml. Após a coleta das massas a densidade é calculada a partir da fórmula descrita na Equação 1.

Equação 1 – Fórmula Para Cálculo de Densidade

$$\rho = (\frac{m_{S,A}\ x\ \rho_{IL}}{m_{S,A} - \ m_{S,IL}})$$

$$m_{S,A} = Massa\ aparente\ da\ amostra\ (g)$$

$$\rho_{IL} = Densidade\ do\ líquido\ de\ imersão\ (g/cm^3)$$

$$m_{S,IL} = Massa\ aparente\ da\ amostra\ no\ líquido\ de\ imersão\ (g)$$

Fonte: ISO 1183

Tabela 5 – Densidade do material avaliada.

Corpo de Prova	Densidade (g/cm^3)	Δ (%)
Virgem	1,035	-
V+10%R_P	1,038	+0,29
V+30%R_P	1,033	-0,19
V+50%R_P	1,030	-0,48
V+70%R_P	1,029	-0,58
100R_P	1,019	-1,55

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme os dados coletados inseridos na Tabela 5 a mistura de material virgem com até 70% de material reciclado induz uma perda de 0,58% em sua densidade, o material contendo 100% de reciclado houve uma redução de 1,55% em sua densidade. A redução na densidade indica que um produto utilizando material reciclado, pode ter um pouco de sua massa reduzida.

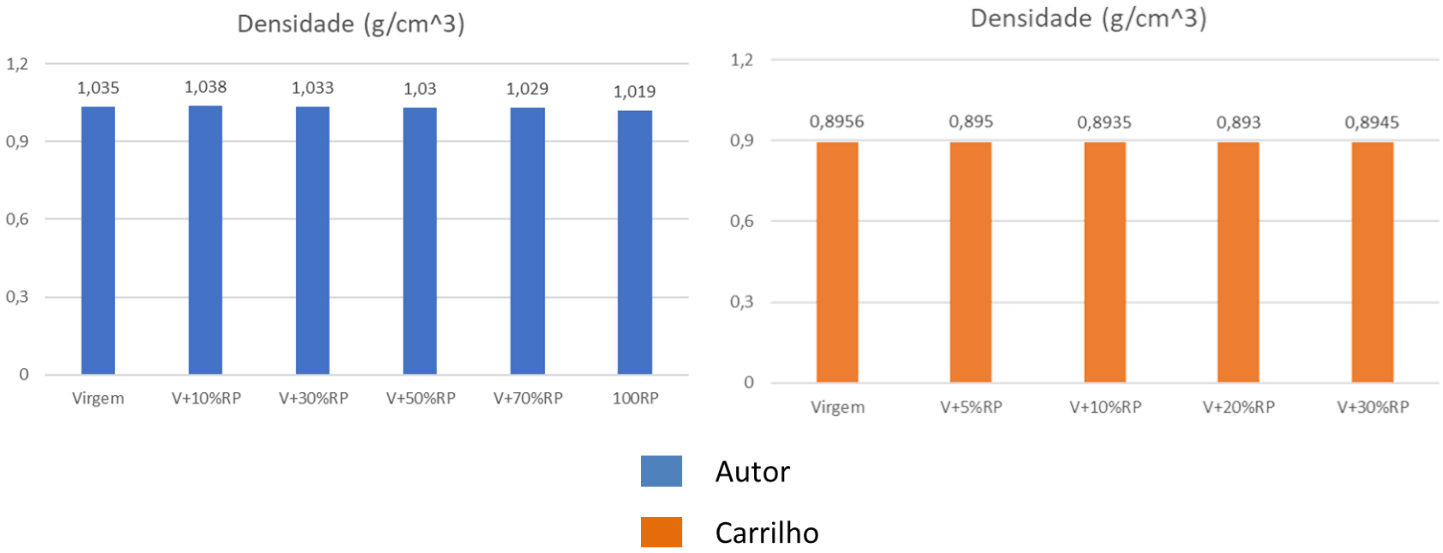
Carrilho (2024) realizou ensaios de densidade de amostras obtidas pelo método de reciclagem primária, conforme resultados encontrados na Tabela 6, é possível admitir que o material reciclado não influenciou de maneira significativa na densidade. Ele afirma que as diferenças percentuais encontradas são quase nulas, valores que não irão influenciar na massa do produto e tampouco na quantidade de material necessária para fabricação. Os resultados encontrados por Carrilho (2024) confirmam o comportamento obtido na Tabela 5 através dos ensaios realizados.

Tabela 6 – Densidade do material avaliada.

Corpo de Prova	Densidade (g/cm^3)	Δ (%)
Virgem	0,8956	-
V+5%R_P	0,8950	-0,07
V+10%R_P	0,8935	-0,23
V+20%R_P	0,8930	-0,29
V+30%R_P	0,8945	-0,12

Fonte: Carrilho, 2024

Figura 15 - Representação Gráfica Ensaios de Densidade



Fonte: Elaborado pelo autor

5.4 Resultados de Índice de Fluidez

O ensaio de fluidez realizado foi seguido conforme norma ISO 1133, este ensaio foi realizado com o apoio da instituição conforme mencionado no tópico 5.3 deste trabalho. As amostras foram provenientes do método de reciclagem primária, com as composições variando de material virgem a material totalmente reprocessado.

Conforme dados obtidos e inseridos na Tabela 7, houve uma tendência a aumentar a fluidez do material com níveis maiores de material reprocessado. Segundo

a empresa que forneceu o material os níveis de aceitação para aprovação desta propriedade no material conforme datasheet, está entre 20 e 25g/10min, para este critério todos as composições estão dentro da faixa de aprovação.

Tabela 7 – Índice de Fluidez

Corpo de Prova	Fluidez (g/10min)	Δ (%)
Virgem	20,00	-
V+10%R_P	20,44	+2,20
V+30%R_P	21,02	+5,10
V+50%R_P	21,35	+6,75
V+70%R_P	22,05	+10,25
100%R_P	22,69	+13,45

Fonte: Elaborado pelo autor

Carrilho (2024) através dos ensaios com amostras obtidas do processo de reciclagem primária avaliou a fluidez dos materiais com até 30% de reciclado conforme norma ASTM D1238. Seus resultados foram inseridos na Tabela 8 deste trabalho.

Tabela 8 – Índice de Fluidez

Corpo de Prova	Fluidez (g/10min)	Δ (%)
Virgem	24,176	-
V+5%R_P	24,353	+0,73
V+10%R_P	24,787	+2,53
V+20%R_P	25,137	+3,98
V+30%R_P	25,351	+4,86

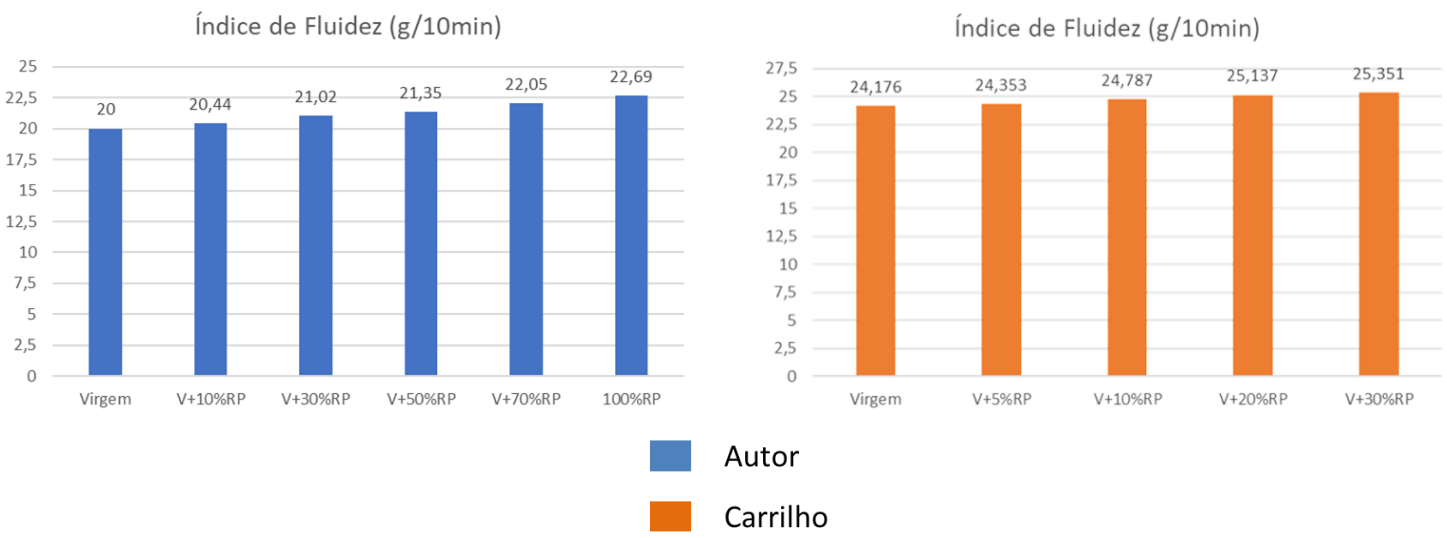
Fonte: Carrilho, 2024

Os resultados apontados na tabela 8 seguiram uma tendência similar aos encontrados conforme Tabela 7 comprovando que existe uma relação de aumento de fluidez com o aumento de material reciclado.

Carrilho (2024) afirma que quanto maior for a porcentagem de material reciclado adicionada maior será a fluidez do material, efeito que é promovido pela

existência de uma maior quantidade de ligações entre as cadeias que são quebradas. Características também observadas nos resultados obtidos na Tabela 7.

Figura 16 - Representação Gráfica Ensaios Índice de Fluidez



Fonte: Elaborado pelo autor

6 CONCLUSÃO

Este estudo analisou o comportamento do polipropileno reciclado após o processo de reciclagem mecânica, mostrando como ele se comporta em diferentes propriedades mecânicas quando combinado com material virgem. Os resultados do ensaio de tração revelaram que, com a adição de PP reciclado, houve uma leve redução nas propriedades do material, como resistência ao escoamento (%), resistência à ruptura e o módulo de elasticidade. Em alguns casos, as perdas chegaram a 8,7%, 1,3% e 5,8%, respectivamente, quando o reciclado alcançou 30% na mistura, isso indica que, o material reciclado pode não ter o mesmo desempenho do material virgem, isso pode ser um fator considerável quando se busca uma alta resistência mecânica.

Por outro lado, os resultados do ensaio de impacto tiveram uma tendência de melhora no desempenho. Com até 30% de material reciclado, a resistência ao impacto aumentou até 6%, o que significa que o PP reciclado conseguiu se mostrar mais tenaz do que o material virgem. Esse comportamento pode ser útil em aplicações que exigem maior capacidade de absorção de energia, como peças que enfrentam choques e impactos durante seu uso.

Quanto à densidade, as diferenças entre as amostras de material virgem e reciclado foram pequenas. A variação na densidade apresentou valores muito baixos, valores estes que não afetariam a fabricação de peças, mesmo aquelas que necessitam de uma massa específica, com valores bem definidos e range de tolerância baixo. Assim, a adição de material reciclado não causaria grandes variações nos produtos finais, o que é uma boa notícia para a indústria, visto que usualmente uma variação grande na densidade pode impactar diretamente no peso, na quantidade de material para fabricação, e até possíveis oscilações no custo do produto.

O índice de fluidez também se comportou de maneira interessante. Quando aumentou a quantidade de PP reciclado, a fluidez do material também aumentou, o que pode facilitar o processo de moldagem por injeção, ganhando espaço em aplicações de maiores complexidades geométricas, como peças com detalhes finos, devido aumento de sua capacidade em fluir em canais estreitos e cavidades complexas nos moldes de injeção.

Uma possível aplicação real para o PP reciclado pode ser no setor automotivo, principalmente na fabricação de componentes internos de veículos como suportes de console, alguns componentes dos painéis de instrumentos e forros de portas. São tipos de componentes que exigem uma combinação de resistência mecânica e capacidade de absorção de impacto, propriedades que o PP reciclado com até 30% apresenta. O aumento da resistência ao impacto, observado no respectivo ensaio, torna o PP reciclado uma opção alternativa para peças que precisam resistir a choques e vibrações durante a vida útil do veículo, o que é comum em componentes internos de automóveis. Além disso, devido aumento do índice de fluidez, peças complexas e detalhes finos não serão um empecilho.

Embora o material reciclado apresente uma leve redução nas propriedades de resistência à tração e módulo de elasticidade, esses parâmetros podem ser adequados para aplicações internas, onde a exigência resistência mecânica é menor do que em partes externas ou de maior carga. A densidade praticamente nula também contribui para a consistência do peso das peças, o que é importante para manter as especificações e a eficiência de fabricação. Dessa forma, o uso do PP reciclado nessa aplicação permite uma redução de custos e uma maior sustentabilidade, sem comprometer significativamente o desempenho do produto final, sendo uma solução viável para indústrias que buscam incorporar práticas de economia circular em seus processos produtivos.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Analisar o comportamento de fluidez do polipropileno reciclado proveniente de reciclagem secundária.

Avaliar a influência do PP reciclado em outras propriedades como contração, dureza e resistência a flexão.

Estudo acerca de como é tratada a pigmentação do material após o processo de reciclagem e sua influência na qualidade final da matéria prima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST. **Índice de reciclagem mecânica de plástico no brasil atinge 25,6% em 2022, revela estudo do picplast.** 2018. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/noticias/indice-dereciclagem-mecanica-de-plastico-no-brasil-atinge-256-em-2022-revela-estudo-do-picplast/>. Acesso em: 20 de Nov. de 2024.

ALCAPLAS, Transformar Para Preservar. **A Revolução Sustentável na Indústria Automotiva: Plásticos Recicláveis e o Futuro Verde.** Disponível em <https://www.alcaplas.com.br/2024/04/04/a-revolucao-sustentavel-na-industria-automotiva-plasticos-reciclaveis-e-o-futuro-verde/>. Acesso em 07 de Jan. de 2025.

ANDRADE, R. D. S. **Processos de Reciclagem de Polímeros Termoplásticos.** Natal RN, 2019.

AZAPAGIC, A. **Polymers, the environment and sustainable development**. Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd., 2003.

BIOPDI. **Ensaio de Impacto: Uma Análise Detalhada**. 2023. Disponível em: < https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-impacto/>. Acesso em 06 de Jan. de 2025.

BIOPDI. **Diagrama Tensão Deformação dos materiais: principais conceitos**. 2023. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/diagrama-tensao-deformacao/>. Acesso em: 11 de Dez. de 2024.

BRANDRUP, J. **Recycling and recovery of Plastics**. Alemanha: Hanser Publishers, 1999.

BRUCK, Alexandre. **Índice de Fluidez: conheça este Ensaio de Materiais.** Disponível em <https://c2lab.com.br/blog-indice-de-fluidez-conheca-este-ensaio-de-materiais/>. Acesso em 08 de Jan. de 2025.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução.** LTC, 5ª ed. 2002.

CARRILHO, Rui Filipe Amaro. **Influência do Reciclado nas Propriedades Mecânicas de Peças Injetadas.** 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2024. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/f4686b2a359cc5c8b9edc297487398ec/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>. Acesso em: 09 de Jan. de 2025.

CERQUEIRA, V. **Panorama Sobre o Cenário Tecnológico de Reciclagem de Polímeros.** III Encontro de Sustentabilidade em Projeto. Itajaí, 2009

CORREA, C. A.; YAMAKAWA, R. S.; HAGE. E. **Determinação de Temperatura de Transição Dúctil-frágil de Plásticos Através de Testes de Impacto Instrumentado.** Polímeros: Ciência e Tecnologia. São Carlos SP, 1999.

ECYCLE. **O que é reciclagem mecânica.** São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/o-que-e-reciclagem-mecanica/>. Acesso em: 08 de Jan. de 2025.

FACIN. Junior. **Reciclagem de Polipropileno**. São Paulo, 2024.

FARIA, A. C. A. **Análise macromecânica de compósitos poliméricos reciclados.** 2002. 158f. Dissertação de Mestrado. UFMG, Belo Horizonte, 2002.

FORLIN, F. J.; FARIA, J. A. F. **Considerações Sobre a Reciclagem de Embalagens Plásticas.** Campinas SP, 2002

GAFFORELLI, C. P; SANTANA, R. M. C. **Reintegração de Resíduo Termoplástico do Setor Automotivo no Desempenho de Compostos para Para-Choque.** Porto Alegre RS, 2020.

HEMAIS, C. A. **Polímeros e a Indústria Automobilística.** Rio de Janeiro RJ, 2003.

HENNING, M., GRUNWALD, J., LUSEBRINK, H. **Fabricação de autopeças usando PP expandido com conteúdo reciclado**. Plástico Industrial, São Paulo. Disponível em <https://www.arandanet.com.br/revista/pi/artigo_tecnico/223-Fabricacao-de-autopecas-usando-PP-expandido-com-conteudo-reciclado.html>. Acesso em 19 de Jan. de 2025.

HIBBELER, R. C. **Estática: Mecânica para Engenharia.** Pearson Universidades, 14ªed, 2017.

IBERDROLA. **A evolução da população mundial e seu futuro impacto no planeta**. 2024. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/evolucao-da-populacao>. Acesso em 06 de Jan. de 2025.

JAFELICE. **Caracterização de Compósitos de Polipropileno Reciclado e Fibra de Coco.** São Paulo, 2013.

KNAUF INDUSTRIES. **Quanto pesaria um carro se todas as suas peças plásticas fossem feitas de um material diferente?** 2019. Disponível em: <https://knaufautomotive.com/pt-br/quanto-pesaria-um-carro-se-todas-as-suas-

pecas-plasticas-fossem-feitas-de-um-material-diferente/>. Acesso em 08 de Jan. de 2025.

MALAGUETA, D. C. **O desafio da reciclagem de plásticos automotivos**. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 11., Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2003.

MANO, E. B. **Polímeros Como Materiais de Engenharia.** Blucher, 1991.

MANO, E. B.; PACHECO, É.B. A. V.; BONELLI, C. M. C. **Meio ambiente, poluição e reciclagem**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2010. Cap 6,11,12,13, p. 41-48, 113-148.

MARQUES, L. **O que são polímeros e porque são interessantes?.** Universidade de Évora, 2010.

MUNDO DO PLÁSTICO. **Conheça as Etapas da Reciclagem Mecânica do Plástico.** 2024. Disponível em: <https://mundodoplastico.plasticobrasil.com.br/artigos/conheca-etapas-da-reciclagem-mecanica-do-plastico/>. Acesso em 05 de Jan. de 2025.

NETO, C. M. *et.al.* **A utilização dos Polímeros na Indústria Automobilística.** IX Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial, 2015.

OLIVEIRA, A. A. **Comportamento Mecânico e Térmico de Misturas de Polipropileno Virgem e Reprocessado por Múltiplas Extrusões.** Ponta Grossa, 2016.

OLIVEIRA, A. J. D. **Caracterização Mecânica e Reológica de Polipropileno Reciclado para a Indústria Automotiva.** 2006. Pontífica Universidade Católica do Paraná, Curitiba PR, 2006.

PEREIRA, C. H. *et al.* **Influência da Incorporação de Resíduos de Tecido de Big Bag nas Propriedades Mecânicas do Polipropileno.** Campina Grande PB, 2018.

PESSÔA, V. A. F. **Reciclagem e reutilização de materiais poliméricos plásticos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

PETRY, A. **Mercado Brasileiro de Polipropileno com Ênfase no setor Automobilístico.** Porto Alegre, 2011.

PORTO. **Como a reciclagem de carros ajuda o meio ambiente?.** Disponível em: <https://blog.portoseguro.com.br/como-a-reciclagem-de-carros-ajuda-o-meio-ambiente>. Acesso em 18 Dez. de 2024.

PRAVIA, Z. M. C.; MACHADO, S. C. **Reuso de Materiais plásticos para aplicações em elementos estruturais**. Revista Caderno Pedagógico. Curitiba, 2023.

SILVA, A. L. N. **Composições de Polipropileno Heterofásico e Borracha EPDM com a Incorporação de Resíduo de Polipropileno e Artefatos.** Rio de Janeiro, 2013.

SOUZA, M. R.; SILVA, L. L. **Propriedades mecânicas e sua influência no desempenho de materiais**. Revista Brasileira de Materiais, v. 36, n. 2, p. 47-58, 2020.

SPINACÉ, M. A. S; PAOLI, M. A. **A tecnologia da reciclagem de Polímeros.** Campinas SP, 2004.

ZANIN, M.; MANCINI, S. D**. Resíduos plásticos reciclagem: aspectos gerais e tecnologia**. 2ª ed. São Carlos: EdUFSCar - Editora da Universidade Federal de São Carlos, 2015.