



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Tecnologia

Péterson Alexandre de Souza Gonçalves

**Gerenciamento e destinação final para componentes automobilísticos em
Polipropileno PP com aplicação em filamentos para impressora 3D**

Resende

2024

Péterson Alexandre de Souza Gonçalves

**Gerenciamento e destinação final para componentes automobilísticos em Polipropileno PP
com aplicação em filamentos para impressora 3D**



Dissertação de mestrado apresentado ao Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente do Centro de Tecnologia e Ciências da Faculdade de Tecnologia, Universidade do Estado Rio de Janeiro, como parte dos requisitos para obtenção do Diploma de Mestre pelo Curso de Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof^ª. Dra. Luciana Ghussn

Coorientador: Prof^ª. Dra. Daniella Regina Mulinari

Resende

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

G635 Gonçalves, Péterson Alexandre de Souza.
Gerenciamento e destinação final para componentes automobilísticos em polipropileno PP com aplicação em filamentos para impressora 3D / Péterson Alexandre de Souza Gonçalves. – 2024.
54 f.

Orientadora: Luciana Ghussn.
Coorientadora: Danielle Regina Mulinari.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Automóveis - Peças - Teses. 3. Polipropileno - Teses. 4. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.) - Teses. 5. Impressoras (Computadores) - Teses. I. Ghussn, Luciana. II. Mulinari, Danielle Regina. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 628.4.037

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

22/10/2024

Data

Péterson Alexandre de Souza Gonçalves

**Gerenciamento e destinação final para componentes automobilísticos em Polipropileno PP
com aplicação em filamentos para impressora 3D**

Dissertação de mestrado apresentado ao Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente do Centro de Tecnologia e Ciências da Faculdade de Tecnologia, Universidade do Estado Rio de Janeiro, como parte dos requisitos para obtenção do Diploma de Mestre pelo Curso de Engenharia Ambiental.

Aprovado em **25/09/2024**

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
LUCIANA GHUSSN
Data: 16/10/2024 17:08:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Luciana Ghussn

Faculdade de Engenharia - UERJ



Documento assinado digitalmente
LUIZ CARLOS CORDEIRO JUNIOR
Data: 18/10/2024 12:14:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Carlos Cordeiro Júnior

Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof.^a Dra. Simone de Fátima Medeiros Sampaio

Universidade de São Paulo - USP

Resende

2024

DEDICATÓRIA

Primeiramente, dedico este trabalho ao meu amado Deus, o maior orientador da minha vida. Sem ele eu nada seria, obrigado por me guiar e me proteger, obrigado pelo dom da minha vida e por nunca me abandonar em momentos de necessidade e angústia. Dedico, também, integralmente este trabalho à minha amada esposa Michele Gonçalves pelo seu suporte, incentivo e esforço em manter em ordem nosso lar e cuidar do nosso amado menino em minha ausência para os experimentos, estágios, reuniões, provas, etc. Este trabalho, também, é dedicado a você meu amor, minha alma gêmea, te amo e te admiro incondicionalmente. Um agradecimento especial ao meu amado filho Heitor, obrigado por acordar o papai todos os dias com esse sorriso que irradia luz e pureza, obrigado por ser peça fundamental no desenvolvimento do papai dando forças para que eu busque o meu melhor sempre meu menino, para vocês, por vocês, obrigado por fazer o papai a pessoa mais feliz desse mundo!

Agradeço à minha mãe que me educou sozinha, em boa parte de minha vida, com todo amor do mundo, que sempre me apoia e admira meu espírito sonhador e batalhador, acredite, reconheço, sou grato e admiro muito tudo que fez e faz por mim, para Michele e para Heitor, suas orações são escudo e blindagem para todos nós continuarmos a caminhada. Agradeço, também, a toda minha família, combustível e porto seguro de nossas vidas. Muito obrigado a todos. Agradeço ao meu amado pai Pedro Gonçalves *in memoriam* que, nunca mediu esforços para me ajudar, incentivar, orientar e educar. Que sempre me ensinou a se reerguer e aprender diante das adversidades da vida, até mesmo da morte. Que sempre me colocou em primeiro lugar e prioridade em sua vida, muito obrigado meu amado pai, não te esqueço e jamais te esquecerei em nenhum instante enquanto me for permitido viver nesta vida e em quantas outras possíveis. Te amo meu blodi, jaja estaremos juntos novamente (como o senhor sempre dizia). Dedico também, ao meu amado sogro Adhemar Mota *in memoriam*, obrigado por compartilhar sua história de vida e ensinamentos comigo, serei eternamente grato por cada sorriso compartilhado.

“Tudo que eu tenho de valor, são as minhas memórias, se elas partissem, eu partiria em dois...”
(Guilherme de Sá).

AGRADECIMENTOS

À professora Luciana Ghussn que se engajou com minha ideia de sustentabilidade buscando melhorias para a indústria, meio ambiente e sociedade, que me auxiliou e orientou para que meu sonho se tornasse realidade no decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

À professora Daniella Mulinari pela excepcional mentoria, coorientação, direcionamento, planejamento, organização, profissionalismo, suporte e engajamento para a conclusão das atividades.

À professora Alena Netto, pelo suporte, ensinamentos e direcionamentos. E, também, a todos os professores que participaram da minha formação e trajetória de desenvolvimento deste projeto.

Aos professores participantes da banca examinadora pela atenção, tempo, colaborações e sugestões.

Aos professores e colaboradores da UERJ por todo carinho e suporte durante essa jornada. Aos colegas de turma, pelas reflexões, críticas e sugestões compartilhadas.

Aos técnicos Ericson Jonathan de Oliveira Teixeira e João Vitor Gomes de Freitas do laboratório da FAT/UERJ Resende que me auxiliaram com as atividades experimentais.

Aos meus gestores da empresa onde trabalho por me empoderar e inspirar a buscar soluções para companhia e realizar meu sonho pessoal e profissional.

O desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que encontra as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades.

Gro Harlem Brundtland

RESUMO

GONÇALVES, Péterson Alexandre de Souza. *Gerenciamento e destinação final para componentes automobilísticos em Polipropileno PP com aplicação em filamentos para impressora 3D*. 2024. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Resende, 2024.

O PP (polipropileno) é um polímero muito utilizado na indústria automobilística em componentes internos e externos dos veículos. Normalmente, em sua estrutura, são incorporadas cargas minerais com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas do material, melhorar a compactação de peças injetadas, reduzir custo de matéria prima, etc. Com isso, essas cargas são incorporadas ao PP gerando os compósitos. O talco é um dos minerais mais utilizados no meio produtivo para componentes veiculares, atualmente, um veículo automotivo tem em seu agregado final de peças, um percentual em torno de 70% de peças plásticas e, em sua grande maioria, em PP/talco. O objetivo do presente estudo é analisar e reduzir o volume de resíduos gerados em uma empresa automobilística da região sul fluminense, em particular, causados pelo descarte de componentes automotivos em PP reforçado com talco. Foi realizada a coleta de resíduos automotivos, feito o reprocessamento para obtenção dos corpos de prova através da moagem e moldagem por injeção. Foram utilizados 3 compósitos diferentes de PP/talco (PP/20% m/m, PP/30% m/m, PP/40% m/m), realizado extrusão e moldagem por injeção para preparação dos corpos de prova que foram aplicados em ensaios mecânicos de tração e flexão, também, foram realizadas espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), determinação do índice de fluidez, calorimetria exploratória diferencial (DSC), determinação da densidade, microscópio eletrônico de varredura (MEV) e Microscópio óptico (MO). A análise de DSC apresentou aumento na cristalinidade da amostra conforme aumenta-se o teor de carga na matriz, melhorando as propriedades mecânicas agindo como agente nucleante do PP aumentando a interação (compatibilidade) entre a interface talco/PP. Seu índice de fluidez apresentou comportamento oscilatório devido ao aumento no teor de talco na matriz, mas, se mantiveram satisfatórios em comparação ao data sheet do fabricante. A análise de FTIR apresentou espectros com variações de picos atribuídos ao percentual de talco inserido na matriz do PP, ou seja, quanto maior o percentual, maior a intensidade dos mesmos no qual, terá influência na cristalinidade do material sem impactos negativos. A Micrografia obtidas por MEV e MO revelaram um aspecto rugoso do material no qual não houve interferência na impressão do filamento. Após análise dos dados obtidos, notou-se variações nos resultados dos 3 compósitos, porem os resultados se mantiveram com valores dentro do especificado pelo fabricante, sendo que, para o PP /20% m/m notou-se maior similaridade e menor variação em comparação com os dados do fabricante. No presente estudo, conclui-se que os filamentos em PP/20% m/m provenientes do reprocessamento de componentes automobilísticos são opções viáveis para redução à utilização do PP virgem, reduzindo assim, volume de componentes segregados, possíveis impactos ambientais e possibilidade de oferta de produtos mais acessíveis à sociedade. Para os demais percentuais (PP/30% m/m, PP/40% m/m), também é possível reciclar e aplicar em outros processos de injeção. Por fim, o PP/talco de peças descartadas na indústria automotiva é uma opção sustentável e pode ser reprocessado/reutilizado para outros fins.

Palavras-chave: Reciclagem; Polipropileno; Impressora 3D; Filamentos; Sustentabilidade.

ABSTRACT

GONÇALVES, Péterson Alexandre de Souza. *Transforming automotive polypropylene components into 3D printing filaments*. 2024. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Resende, 2024.

The PP (polypropylene) is a polymer widely used in the automotive industry for internal and external components of vehicles. Mineral fillers are usually incorporated into its structure in order to improve the mechanical properties of the material, improve the compaction of injected parts, reduce the cost of raw materials, etc. These fillers are then incorporated into the PP, generating composites. Talc is one of the most widely used minerals in the production of vehicle components. Currently, an automotive vehicle has around 70% of its final parts made up of plastic parts, the vast majority of which are made of PP/talc. The objective of this study is to analyze and reduce the volume of waste generated by an automotive company in the southern region of Rio de Janeiro, particularly due to the disposal of automotive components made of PP reinforced with talc. Automotive waste was collected and reprocessed to obtain test specimens through grinding and injection molding. Three different PP/talc composites (PP/20% w/w, PP/30% w/w, PP/40% w/w) were used, and extrusion and injection molding were performed to prepare the specimens that were applied in mechanical tensile and flexural tests. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), determination of the melt flow index, differential scanning calorimetry (DSC), determination of density, scanning electron microscope (SEM) and optical microscope (OM) were also performed. The DSC analysis showed an increase in the crystallinity of the sample as the filler content in the matrix increased, improving the mechanical properties by acting as a nucleating agent for the PP, increasing the interaction (compatibility) between the talc/PP interfaces. Its melt flow index showed oscillatory behavior due to the increase in the talc content in the matrix, but remained satisfactory compared to the manufacturer's data sheet. The FTIR analysis showed spectra with peak variations attributed to the percentage of talc inserted in the PP matrix, that is, the higher the percentage, the greater the intensity of the peaks, which will influence the crystallinity of the material without negative impacts. The micrographs obtained by MEV and MO revealed a rough appearance of the material in which there was no interference in the printing of the filament. After analyzing the data obtained, variations were noted in the results of the three composites, but the results remained within the values specified by the manufacturer, and for PP /20% m/m, greater similarity and less variation were noted in comparison with the manufacturer's data. In the present study, it is concluded that PP /20% m/m filaments from the reprocessing of automotive components are viable options for reducing the use of virgin PP, thus reducing the volume of segregated components, possible environmental impacts and the possibility of offering more accessible products to society. For the other percentages (PP/30% m/m, PP/40% m/m), it is also possible to recycle and apply them in other injection processes. Finally, PP/talc from discarded parts in the automotive industry is a sustainable option and can be reprocessed/reused for other purposes.

Keywords: Recycling; Polypropylene; 3D printer; Filaments; Sustainability.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
1 OBJETIVO.....	13
1.1 Objetivos específicos.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Política Nacional de Resíduos Sólidos.....	14
2.2 Indústria Automotiva – Geração de Resíduos.	15
2.3 Reciclagem de Polímeros	17
2.4 Polipropileno (PP).....	19
2.5 Reciclagem do Polipropileno.....	21
2.6 Impressão 3D.....	22
3 METODOLOGIA... ..	25
3.1 Materiais.....	25
3.2 Obtenção e preparação das amostras.....	27
3.3 Caracterização das amostras.....	27
3.3.1 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	27
3.3.2 Análise do índice de Fluidez.....	28
3.3.3 Ensaio de Tração e Flexão.	28
3.3.4 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	29
3.3.5 Determinação da Densidade	29
3.4 Obteção dos Filamentos.....	30
3.5 Impressão 3D.....	30
3.6 Rugosidade	32
3.7 Microscopia Eletrônica de Varredura	32
4 RESULTADOS	33
4.1 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	33
4.2 Índice de Fluidez.....	34
4.3 Ensaio de Tração e Flexão.	35
4.3.1 Tração.....	35
4.3.2 Flexão.....	36

4.4	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	37
4.5	Densidade	41
4.6	Obtenção e Impressão 3D dos filamentos.	41
5	CONCLUSÃO.....	45
	REFERENCIAS.....	46
	ANEXOS	51
	Anexo A (Datasheet PP/20% m/m).....	51
	Anexo B (Datasheet PP/30% m/m).....	52
	Anexo C (Datasheet PP/40% m/m).....	53
	Anexo D ((Parâmetros de njeção).....	54

INTRODUÇÃO

O mercado automobilístico, assim como os demais setores industriais, necessita de uma grande capacidade de adaptação em seus processos diante do cenário político-econômico-social vigente. As novas políticas de demandas ambientais, os conflitos armados que acontecem e a instabilidade econômica que passam a grande maioria dos países implicam a necessidade de mudanças que visem otimizar os recursos e os processos a fim de manter a competitividade no setor. Nesse cenário, as empresas do ramo, na busca pela competitividade, têm buscado novos projetos com o intuito de reduzir custos, sejam eles diretos ou indiretos, bem como importação de peças e a terceirização de serviços. (Fonte: Próprio autor)

Atualmente, grande parte das peças dos automóveis tem sido substituídos por materiais poliméricos mais leves, proporcionando no setor automobilístico aspectos que podem ser melhorados do ponto de vista da sustentabilidade. No entanto, diversas empresas desse setor têm encontrado problemas quanto ao gerenciamento e destinação destes resíduos poliméricos. Devido ao acúmulo e, conseqüentemente, descarte/envio para aterros sanitários (BUNJES et. al., 2022), (BELVISO et. al., 2021), (LADHARI et al., 2021) (AJORLOO et. al.,2021), (GU et. al., 2016).

Assim, uma estratégia para solucionar essa questão seria a reciclagem, a qual é essencial para a reutilização dos recursos aplicados durante a vida útil de um automóvel e existe um crescente interesse da indústria automotiva nas atividades relacionadas à proteção ambiental. Belviso et al. (2021) investigaram a eficácia de um método de reciclagem rápida de resíduos de polipropileno (WPP) com adição de cargas inorgânicas provenientes de peças do setor automobilístico. Os dados indicaram que a adição de um baixo percentual (5%) de sepiolita ou zeólita melhora algumas propriedades mecânicas e reológicas dos materiais reciclados por WPP. Contudo, os resultados também mostraram que a simples mistura de resíduos e cargas adicionais (sem preparação de pellets) tem influência no processo de reciclagem (BELVISO et. al., 2021).

KOZDERKA et al. (2017) estudaram a reciclagem do polipropileno de alto impacto reciclado (HIPP), um polímero mais comum em peças de carrocerias de automóveis, como para-choques. Para verificar suas vantagens e desvantagens foram avaliados dois métodos: teste de propriedades mecânicas e reológicas dependendo do número de reprocessamentos e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para verificar a compatibilidade ambiental da reciclagem HIPP. E os resultados comprovaram impactos decrescentes com qualquer adição de conteúdo reciclado, exceto

para a categoria de potencial de irradiação ionizante, que é típica do mix da rede elétrica francesa (KOZDERKA et. al., 2017).

FERNANDES e DOMINGUES (2007) analisaram as propriedades mecânicas de misturas de polipropileno (PP) virgem e reciclado (para-choques), em três porcentagens diferentes, a fim de detectar as alterações das mesmas e concluíram que porcentagens de reciclado acima de 30% causam deterioração das propriedades mecânicas do produto (BEATRIZ et. al., 2007).

Desta forma, o presente projeto tem o propósito avaliar a reciclagem de resíduos de peças de polipropileno (PP) reforçada com carga mineral (talco) e propor a sua aplicação em filamentos para impressão 3D. Assim, será possível utilizar os resíduos do setor automotivo produzindo um material reciclado que atendam os pilares da sustentabilidade, e aos requisitos de propriedades mecânicas e térmicas.

1. OBJETIVO

O objetivo do projeto foi avaliar a viabilidade de reciclar resíduos de PP com carga mineral (talco) gerados da indústria automobilística para aplicação em filamentos de impressoras 3D. Após a reciclagem dos resíduos foram avaliadas as propriedades mecânicas e térmicas, bem como a densidade, e grupos funcionais e comparados ao Datasheet (ANEXO A&B&C).

1.1 Objetivos específicos

Para a obtenção dos materiais reciclados foram necessárias as seguintes etapas de desenvolvimento e caracterização:

- Obter os resíduos das peças do setor automotivo;
- Lavar, secar e triturar os resíduos,
- Injetar os resíduos de PP com carga mineral em diferentes teores (20, 30 e 40 % m/m);
- Caracterizar os materiais: FTIR, Densidade, DSC, Índice de fluidez (IF); Ensaio Mecânicos (tração e flexão);
- Comparar os resultados obtidos dos materiais reciclados ao Data sheet;
- Obter filamentos para impressão 3D e avaliar suas propriedades.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)

Atualmente, o gerenciamento de resíduos é um grande desafio para a sociedade, mesmo com todas as políticas, normas e leis implementadas como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), esses resíduos continuam a ser descartados de forma inadequada. A lei federal sancionada nº 12.305, de 02 de agosto de 2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) apresenta instrumentos importantes para permitir o avanço necessário ao País no enfrentamento dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos. A PNRS apresenta vários objetivos como a prevenção e a redução das quantidades produzidas de resíduos sólidos, proteção à saúde pública, redução dos resíduos perigosos, gestão integrada e sustentável, propicia o aumento da reciclagem, logística reversa e da reutilização dos resíduos sólidos e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos, entre outros (GRILLO, 2012).

Além disso, aborda que todos os geradores de resíduos estão sujeitos ao seu cumprimento, reconhece o resíduo sólido reutilizável como um bem econômico, institui o princípio da reutilização e incentivo ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, e ainda cita a pesquisa científica e tecnológica, como um de seus instrumentos para iniciativas de desenvolvimento de pesquisas voltadas as tecnologias limpas (BRASIL, 2010).

De acordo com Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), das 76,1 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos coletados no ano de 2022, aproximadamente 39% dos resíduos foram destinados a lixões e/ou aterros controlados e 61% encaminhados para destinação adequada, evidenciando o não cumprimento da determinação legal da PNRS. Assim, para uma perspectiva de gestão integrada e gerenciamento, é essencial adotar tecnologias que favoreçam o desenvolvimento sustentável e criem oportunidades para recuperar e valorizar os resíduos através da sua utilização antes de irem para aterro. Uma dessas oportunidades é a logística reversa, a qual tem-se tornado cada vez mais pertinente, pois apresenta uma possível solução para mitigar os impactos do descarte de resíduos sólidos ou líquidos (BALIEIRO, 2023).

Dentre os diversos resíduos que causam impactam negativamente no meio ambiente destaca-se os resíduos industriais gerados das indústrias automobilísticas. O Brasil é o 8º maior produtor de veículos no mundo, com mais de 2,35 milhões de unidades produzidas no ano de 2022, o que torna o país um grande gerador de resíduos sendo responsável por diversos problemas ambientais (O GLOBO, 2024). Dos resíduos gerados, destacam-se os polímeros, que quando comparados aos outros componentes e materiais, possuem um menor índice de reaproveitamento. Desta forma, a implementação da logística reversa dos materiais poliméricos pode contribuir para a redução do impacto ambiental causado pela indústria, além de gerar benefícios econômicos e sociais.

MIETTO (2023) cita que dentre os principais desafios enfrentados na implementação da logística reversa em polímeros na indústria automobilística, destacam-se a complexidade da cadeia de suprimentos, dificuldade na adoção do processo de reciclagem, a falta de incentivos financeiros e a necessidade de investimentos em infraestrutura e tecnologia.

2.2 Indústria Automotiva – Geração de Resíduos

A indústria automobilística brasileira é de suma importância para o desenvolvimento econômico e social do país. No entanto, é uma das maiores geradoras de resíduos em todo mundo, devido ao seu método de produção e ao grande volume de veículos fabricados anualmente, onde a produção atinge cerca de aproximadamente 2,4 milhões por ano no Brasil e cerca de 11 milhões nos EUA (AGENCIA BRASIL, 2023). Assim, essa indústria enfrenta desafios ambientais e a necessidade de adotar práticas sustentáveis. Os desafios ambientais do setor são decorrentes de diversas atividades ao longo do ciclo de vida dos veículos, bem como a geração de resíduos sólidos. Os resíduos podem incluir desde materiais metálicos e poliméricos até líquidos tóxicos e componentes eletrônicos que são extremamente degradantes ao meio ambiente e trazem prejuízos para a indústria. A classificação desses resíduos pode ser dividida em resíduos de produção, resíduos químicos, resíduos de pneus e resíduos eletrônicos (OpenAI, 2022).

Os resíduos de produção do processo de fabricação de veículos geram resíduos provenientes de materiais como metal, plástico, vidro e borracha, os quais podem ser oriundos de diversos processos como cortes, usinagem, moldagem e até mesmo pinturas, entre outros. Além disso, tem-se os resíduos químicos, de pneus e os eletrônicos. Os resíduos químicos são oriundos dos processos em que são utilizados uma grande variedade de substâncias químicas, solventes, tintas,

lubrificantes, óleos, líquidos de refrigeração e produtos de limpeza. Os descartes indevidos desses produtos representam um grande risco para o meio ambiente e a saúde, visto que a sua maioria são tóxicos. Os resíduos de pneus representam um desafio significativo para ciência, pois são inúmeros os projetos de pesquisa que buscam aprofundar e buscar meios para a reutilização e reciclagem de pneus. Os resíduos eletrônicos têm crescido devido ao avanço da tecnologia eletrônica presente nos veículos modernos, os quais são constituídos na sua maioria por sensores, placas de controle, monitores e cabos (PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS, 2023).

Com isso, o setor automobilístico tem buscado mitigar seus impactos ambientais através do reuso, remanufatura e reciclagem dos materiais, peças e componentes dos veículos produzidos (VERTOWN, 2024 & ORTH et al., 2014). Além disso, este setor poderá contribuir para as diretrizes da Agenda 2030, em três dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), sendo eles a ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura, onde propõe construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação; ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis, ressaltando tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis e ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis - Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis (IPEA, 2022).

Segundo o Guia do Carro (2024) um levantamento sobre monitoramento dos índices de reciclagem mecânica de plásticos pós-consumo no Brasil feito do Plano de Incentivo à Cadeia do Plástico (PICPlast) em parceria com a MaxiQuim, a indústria automotiva consumiu em 2021 (dados mais recentes) 47 mil toneladas de resinas plásticas pós-consumo (recicladas). Os destaques são as peças de reposição, como para-choques 27 mil toneladas (PP PCR – polipropileno reciclado), peças de segunda linha, reposição e embalagem de peças que usam resina PS PCR – poliestireno reciclado e/ou PVC reciclado, consomem aproximadamente 2 mil toneladas (TERRA, 2023).

A Ford chamou a atenção da imprensa internacional e da indústria automotiva quando, em junho de 2018, anunciou que cada um de seus veículos contém 250 garrafas de plástico reciclado, o que representa a reutilização de 1,2 bilhões de garrafas por ano (KNAUF INDUSTRIES AUTOMOTIVE, 2020). Ainda, afirmou que seus componentes de plástico reciclado são usados para proteger o chassi do carro e para cobrir os arcos das rodas dianteiras e traseiras, os quais melhoram a aerodinâmica e podem ajudar a melhorar o isolamento acústico.

2.3 Reciclagem dos polímeros

A produção global de plástico cresce anualmente, e esse valor está relacionado à inserção de produtos plásticos em diferentes áreas do dia a dia do consumidor, como embalagens, construção, automóveis, eletrônicos, brinquedos, utilidades domésticas, móveis, calçados, entre outros. Assim, a reciclagem de polímeros gera benefícios às indústrias como redução de custos de materiais e processamento, bem como beneficia o meio ambiente ao reduzir o volume de material a ser descartado (PIYA et al., 2022). A reciclagem de plástico descartado consiste, basicamente, em três processos, na coleta e separação, revalorização (é a fase na qual o material já separado passa por um processo que faz com que ele volte a ser matéria-prima) e transformação (fase em que o material transformado em matéria-prima gera um novo produto) (ABDULMOHSEN et al., 2022).

No Brasil, o índice de reciclagem de plástico pós-consumo é de 23%, enquanto na União Europeia o percentual é de 40%. Segundo o Índice de Reciclagem Mecânica de Plásticos Pós-consumo no Brasil, divulgado pelo PICPlast (Plano de Incentivo à Cadeia do Plástico), iniciativa criada pela Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST) e pela Braskem, em parceria com a MaxiQuim, a reciclagem mecânica de plástico pós-consumo atingiu a marca de 25,6% em 2022, registrando o maior crescimento desde 2018 (ABIPLAST, 2018). A pesquisa evidencia que a origem dos resíduos plásticos destinados à reciclagem, com um total de 1.722 mil toneladas, é distribuída em 29% de fontes comerciais de resíduos (sucateiros), 24% provenientes de indústrias (aparatos industriais), 19% de beneficiadores (recicladores menores), 13% de empresas de gestão de resíduos (incluindo logística reversa), 11% de cooperativas, 2% provenientes diretamente das fontes geradoras e 1% de catadores e aterros.

CARVALHO (2024) afirma que apenas 9% do plástico global é reciclado, e no Brasil, a porcentagem é ainda menor, cerca de 1,3%, isso pode ser explicado devido à maneira como o plástico é misturado com outros materiais na produção. Outro desafio imenso ao pensar na reciclagem do plástico é a má identificação do tipo de plástico utilizado nos produtos. Os diferentes tipos de plástico, com diferentes densidades, não podem ser reciclados da mesma forma e é papel das produtoras identificar quais plásticos foram utilizados nos produtos.

O processo de reciclagem de polímeros engloba três tipos distintos, mecânico, químico e energético. O processo de reciclagem mecânica consiste na combinação de um ou mais processos operacionais para o reaproveitamento do material descartado, transformando-o em grânulos para a

fabricação de outros produtos. Esses processos podem ser utilizados para polímeros termoplásticos, mas somente a reutilização é viável para termofixos ou a utilização deste material como carga em novos sistemas de reciclagem. Os polímeros termofixos formam reticulações químicas entre cadeias, o que significa que ambas as ligações intermoleculares e intramoleculares são da mesma natureza, ambas covalentes, o que faz com que o material se degrade antes de poder ser fundido. Os polímeros termoplásticos formam ligações físicas entre as cadeias, o que possibilita a fusão diversas vezes (MARLEAU, T., 2021).

A reciclagem primária ou reciclagem mecânica é a reutilização direta de polímero descartado não contaminado em um novo produto sem perda de propriedades. O fabricante realiza reciclagem mecânica primária de resíduos pós-industriais. Em princípio, os resíduos pós-consumo também podem ser submetidos a reciclagem primária; entretanto, neste caso, diversas complicações adicionais podem surgir, como a necessidade de coleta seletiva e triagem bruta (manual) (MARLEAU, T., 2021). Antes de reintegrar um material usado em um novo produto, normalmente é necessário triturar ou moer. Esses processos tornam o material mais homogêneo e mais fácil de misturar com aditivos e outros polímeros para processamento posterior. Além disso, fica mais fácil de purificar. Uma etapa adicional de limpeza pode ser útil ou mesmo necessária para evitar problemas que poderiam ocorrer com os produtos finais.

A reciclagem secundária ou reciclagem mecânica, o polímero não é alterado, mas seu peso molecular cai devido às cisões da cadeia, que ocorrem na água e em vestígios de ácidos. Isto pode resultar na redução das propriedades mecânicas. Este fenômeno pode ser parcialmente neutralizado por secagem intensiva, desgaseificação a vácuo e vários aditivos estabilizantes (ACHILIAS, D.S., 2012. *Material Recycling - Trends and Perspectives*. Intech, 406). Os resíduos são triturados sem purificação prévia nesta reciclagem, opcionalmente limpos após trituração e integrados no produto, principalmente através da fusão. Os fatores essenciais da reciclagem secundária são a disponibilidade de resíduos para reciclagem; custos de coleta, armazenamento e transporte; forma ou formato; composição; um grau de pureza; diferença de preço entre materiais virgens e reciclados; a presença de aditivos desejados e indesejados; disponibilidade e custos de técnicas e processos; aspectos ecológicos (BREMS et al., 2012).

A reciclagem terciária ou reciclagem química é definida como o processo no qual os polímeros são convertidos quimicamente em monômeros ou parcialmente despolimerizados em oligômeros por meio de uma reação química (ocorre uma mudança na estrutura química do

polímero). Os monômeros resultantes podem ser usados para novas polimerizações para reproduzir o produto polimérico original ou relacionado. Este método pode transformar o material plástico em moléculas menores, adequadas para matéria-prima começando com monômeros, oligômeros ou misturas de outros compostos de hidrocarbonetos (BREMS et al., 2012).

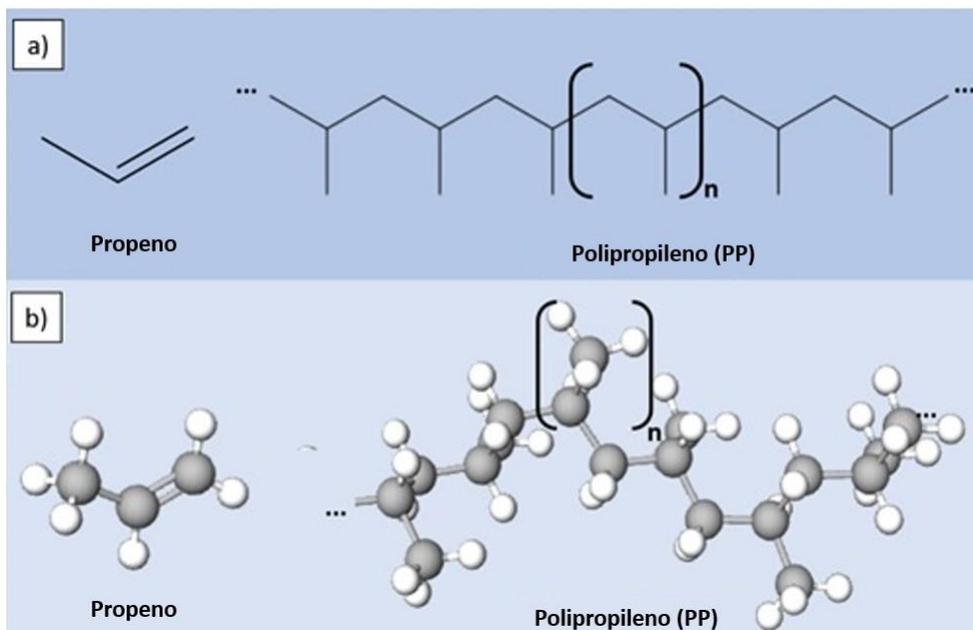
A reciclagem quaternária ou recuperação energética é um método que se refere à recuperação do conteúdo energético do plástico. A forma mais eficaz de reduzir o volume de materiais orgânicos, que envolve a recuperação de energia, é representada pela incineração. Este método é uma boa solução porque gera energia considerável a partir de polímeros. No entanto, não é ecologicamente aceitável devido ao risco para a saúde proveniente de substâncias tóxicas transportadas pelo ar (BREMS et al., 2012).

Neste projeto foi estudado a reciclagem de peças de polipropileno (PP) reforçadas com cargas inorgânicas por meio da reciclagem mecânica.

2.4 Polipropileno (PP)

O Polipropileno (PP) é conhecido como plástico de commodity e de engenharia que são utilizados em utensílios domésticos, embalagens, fios, fibras e em peças automobilísticas. O PP é um homopolímero, semicristalino, de baixa densidade e baixo custo. PP é produzido a partir do monômero de propeno (ou propileno). A fórmula química do polipropileno é $(C_3H_6)_n$, conforme mostrado na Figura 1 (GRAZIANO; JAFFER; SAIN, 2018).

Figura 1. Estruturas moleculares de propeno e PP em arranjo a) 2D e b) 3D.



Fonte: Graziano, 2018.

A molécula de propeno polimerizada pode ser formada em três estruturas básicas de cadeia dependendo da posição dos grupos metil: isotática (iPP) (a) na qual os grupos metil (CH_3) estão dispostos em um lado da cadeia de carbono; e sindiotático (sPP) (b) com arranjo alternado de grupo metil (CH_3) e atático (aPP) (c) com arranjo irregular de grupo metil (CH_3) (TSIOPTSIAS et al., 2020).

O arranjo isotático possui moléculas firmemente compactadas na estrutura cristalina, o que permite que o material isotático seja mais rígido e resistente do que o sindiotático e o atático. Consequentemente, o PP importante comercialmente é o isotático, feito por catálise de Ziegler-Natta com catalisadores que produzem cadeias poliméricas cristalizáveis, um polímero semicristalino com boas propriedades físicas, mecânicas e térmicas no estado sólido (MADDAH, 2016).

As propriedades do polipropileno dependem da taticidade, peso molecular (MW) e distribuição de peso molecular (MWD), grau de cristalinidade e tipo (TZOUNIS et al., 2018).

O PP oferece boa resistência química em uma ampla gama de produtos químicos (ácidos, álcalis e solventes orgânicos), boa resistência à fadiga, boa resistência à fissuração por tensão ambiental, boa resistência a detergentes e facilidade de usinagem, juntamente com a capacidade

única de ser fabricado por quaisquer métodos de processamento padrão, como moldagem por injeção, extrusão, moldagem por sopro e termoformação (MADDAH, 2016).

2.5. Reciclagem do polipropileno

O consumo de plásticos para produtos e embalagens continua a crescer, apesar das preocupações ambientais e de sustentabilidade. É provável que sejam necessárias técnicas de reprocessamento mais eficientes e aplicações de valor acrescentado para mudar estas tendências de reciclagem (ZANDER et al., 2019). Desta forma, a reciclagem é fundamental para reduzir o envio de materiais para aterros e o uso de matéria-prima.

O PP está entre os três plásticos mais utilizados a nível mundial, depois do polietileno (PE) e do policloreto de vinila (PVC), com muitas aplicações industriais e de consumo, e representa uma das principais fontes de resíduos plásticos. Portanto, o primeiro passo no processo de reciclagem do PP é garantir que ele seja separado de quaisquer outros polímeros plásticos, que podem ser facilmente reconhecidos pelo sistema de codificação de identificação de resina estabelecido pela Sociedade da Indústria do Plástico (SPI) e impresso na parte inferior de um produto (Figura 2).

Figura 2. Código de identificação da resina para PP.



Fonte: Society of the Plastics Industry, 2024.

Apesar do baixo preço do polipropileno, as empresas preferem utilizar materiais virgens em vez de reciclados. Portanto, muitos estudos propuseram o uso de PP pós-consumo para impressão 3D (ITSARI et al., 2024). Assim, pode agregar mais valor ao material reciclado e oferecer ao mercado um material que possa contribuir com o meio ambiente. Atualmente, o mercado global de reciclagem atinge 72,6 bilhões de dólares, enquanto 4,0% pertencem ao PP com valor estimado de 2,9 bilhões de dólares (VIDAKIS et al., 2021).

Contudo, algumas dificuldades mais significativas na reciclagem do PP surgem da fácil degradabilidade deste polímero durante as operações de processamento e reciclagem. O polipropileno é eventualmente afetado pela degradação térmica. Além disso, o estresse mecânico e a radiação ultravioleta também alteram fortemente a estrutura e a morfologia do PP. O alongamento à ruptura e a resistência ao impacto são as propriedades mais influenciadas pela degradação. Como o PP possui carbono terciário na cadeia, o impacto da degradação térmica e mecânica no PP é ainda mais dramático do que em outros materiais poliméricos (IUNOLAINEN, 2017). Assim, a aplicação de PP na impressão 3D é um desafio para imprimir devido ao empenamento severo e à má adesão da camada, atualmente, muitas poucas impressoras podem imprimir com PP (IUNOLAINEN, 2017). No entanto, usar PP para impressão 3D é excelente para aplicações que precisam ser leves, à prova d'água ou duráveis.

2.6 Impressão 3D

A Manufatura Aditiva (MA) é uma ferramenta da indústria 4.0, popularmente conhecida como Impressão 3D. Adiciona material em vez de removê-lo e pode produzir objetos tridimensionais próximos ou iguais às dimensões originais. Os processos MA não requerem moldes ou ferramentas especiais para criar formas complexas (KRISTIAWAN et al., 2021). O processo de impressão 3D acontece através da fusão e posterior solidificação de materiais por deposições camada por camada, formando gradativamente a geometria do produto desejado sem a necessidade de acabamento significativo ou desperdício de material (ZHANG et al., 2019).

O uso de MA tem sido uma das rotas mais procuradas no mundo contemporâneo, devido à liberdade geométrica de softwares de design auxiliado por computador e scanners, proporcionando aos engenheiros a materialização de conceitos virtuais. Espera-se que o mercado global de MA atinja uma taxa composta de crescimento anual de 14,4% até 2027, estimulado pelas indústrias de uso final e de customização. Os polímeros termoplásticos podem ser os mais utilizados no período previsto entre 2020 e 2027 devido aos seus benefícios de custo para fins industriais e domésticos.

O crescimento contínuo e a busca pela MA se devem a preocupações sustentáveis em relação à redução do consumo de energia e insumos, produção limpa e métodos ecologicamente corretos (MAJEED et al., 2021). Outro fator que pode aumentar ainda mais o carácter verde da MA pode ser a reutilização de materiais. Assim, do ponto de vista industrial, além de ressignificar os resíduos

para uma nova finalidade, o MA pode ser essencial para uma transição de uma economia linear para uma economia circular (CRUZ SANCHEZ et al., 2020).

A tecnologia FDM tem sido a mais impulsionado pelas indústrias automotiva e de produtos de saúde. Os principais fabricantes globais no mercado de impressoras FDM são Stratasys Ltd., Exone, XYZprinting, Inc., Mcor Technologies Ltd., Materialize NV, Ultimaker, Optomec, Ricoh Company, Ltd., Proto labs, INC., Organovo Holdings, Inc., Voxeljet AG, EnvisionTEC, Prodways, EOS GmbH, Sistemas 3D (MarketWatch, 2021). A tecnologia FDM não se restringe à pesquisa na ciência dos materiais ou na indústria para desenvolvimento de novos produtos e prototipagem rápida. Hoje em dia, existem abundantes impressoras FDM de código aberto devido à expiração das patentes. Esse fato causou uma revolução no mercado, reduzindo o custo de uma impressora básica para menos de mil dólares e para cinco mil dólares. O benefício econômico permite maior acessibilidade para uso pessoal de impressoras tipo desktop, possibilitando um cenário futuro que poderá ser uma tecnologia cada vez mais presente no cotidiano humano.

O processo de impressão 3D por FDM precisa passar por etapas anteriores à impressão em si. A forma desejada é obtida em software CAD, por exemplo, AutoCAD ou SolidWorks. Após isso, o desenho digital deve ser transformado em uma linguagem de triângulo padrão (STL). Anteriormente, a forma é transformada em fatias (software Slic3r) que, ao serem sobrepostas, adquirem a forma virtual 3D desejada. Somente após essas etapas preliminares a impressora FDM entra em ação. Assim, utilizando termoplástico aquecido a máquina de impressão 3D FDM funde o material e o passa pelo processo de extrusão, uma matriz em forma de bico que se movimenta em plano cartesiano desenhando cada camada como um plano bidimensional, ao terminar se levanta levemente e repete o processo camada após camada, até que o resultado seja a geometria programada (SINGH; CHAWLA; SINGH, 2020). O tempo de impressão corresponde ao tamanho da geometria da peça que está sendo confeccionada. Geometrias pequenas e geometrias altas e finas são impressas rapidamente, enquanto geometrias maiores e mais complexas demoram mais para serem impressos.

A demanda por um material alternativo novo e sustentável para filamentos de impressoras 3D aumentou. Uma fonte alternativa de filamento é a reutilização e reciclagem de produtos plásticos pós-consumo, o que também é uma abordagem atraente para conservar energia e sustentar o meio ambiente. Além disso, a impressão 3D é considerada uma tecnologia de processamento limpa, uma vez que a utilização de polímeros reciclados pós-consumo para produzir novos

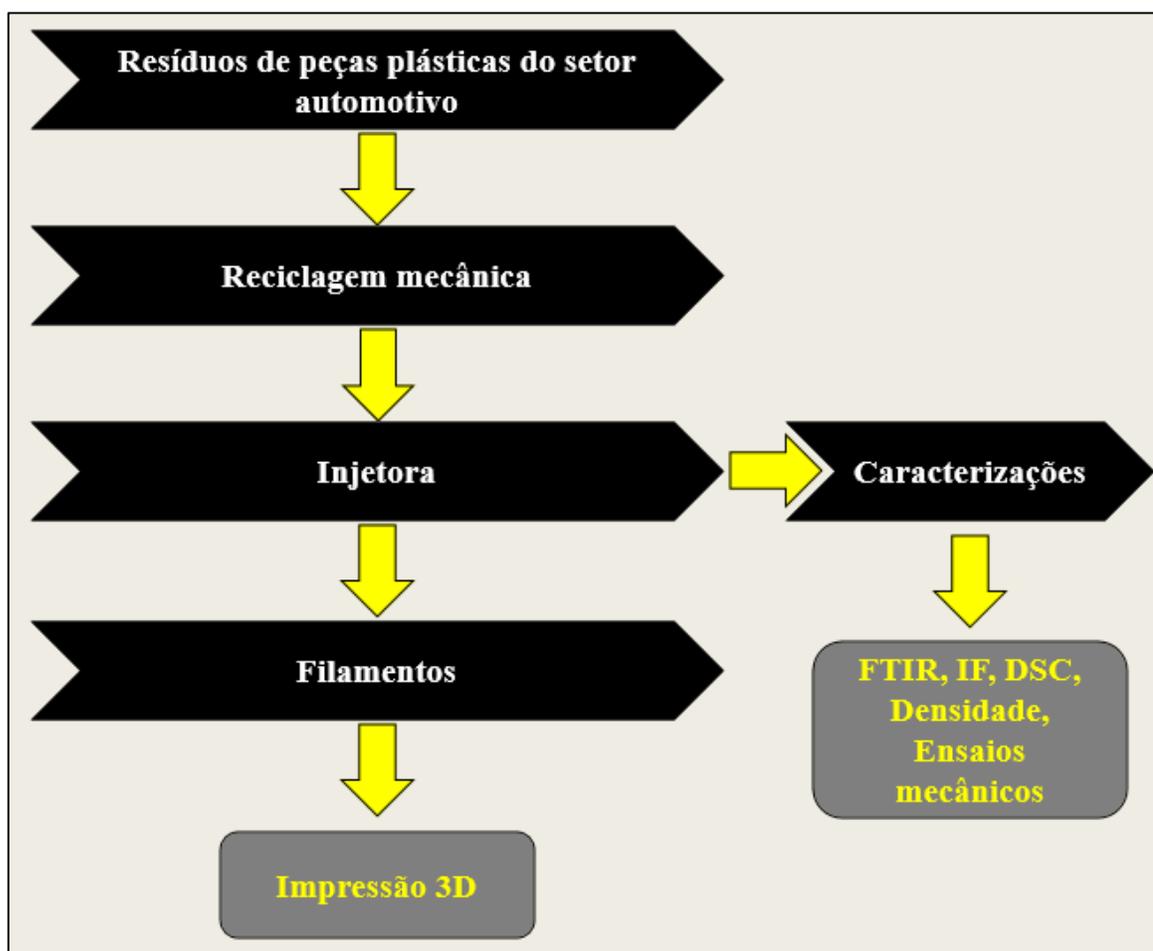
componentes/peças pode utilizar a economia circular para contribuir para o problema global de contaminação plástica (TABLIT et al., 2024)

A literatura aborda vários trabalhos utilizando PP virgem e reciclado com diferentes aditivos (MORALES, 2021; KRISTIAWAN, 2022; VIDAKIS et al., 2022).

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada para a realização desse trabalho pode ser evidenciada no fluxograma abaixo.

Figura 3 – Fluxo metodológico para a realização do trabalho.



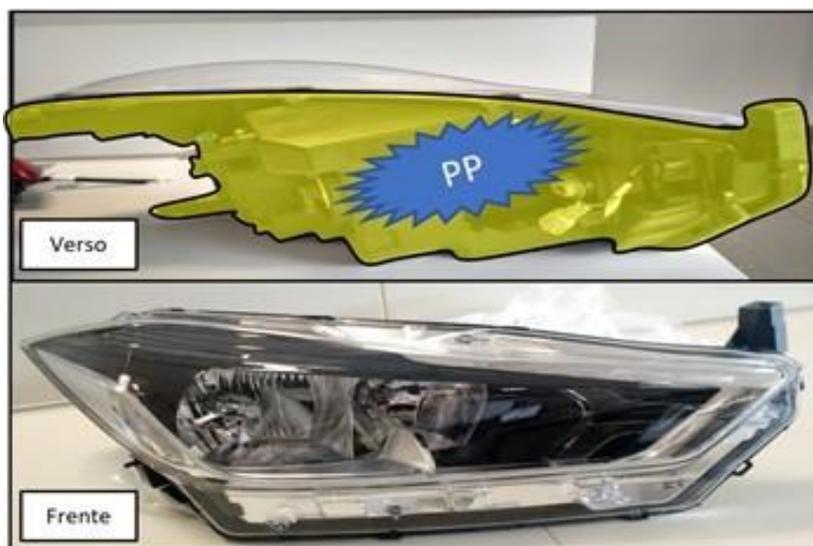
Fonte: Próprio autor.

3.1 Materiais

Os resíduos plásticos utilizados neste trabalho são peças descartadas provenientes de uma empresa automobilística instalada na região Sul Fluminense do estado do Rio de Janeiro. Esses resíduos são componentes aplicados em interiores e exteriores do veículo de polipropileno (PP)

com cargas adicionais de talco. Estas peças são descartadas por apresentarem não conformidade física e/ou visual não atendendo aos requisitos de qualidade da empresa e, são direcionadas para seu completo descarte. Inicialmente, a peça original pode ser visualizada “em amarelo” referente à área completa de disposição do material a ser estudado (Figura 4). Posteriormente, pode ser evidenciada a peça descartada, a qual foi utilizada para o estudo (Figura 5).

Figura 4. Peça/Local para extração das amostras.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5. Peças descartadas da empresa para serem utilizadas no estudo.



Fonte: Próprio autor.

3.2 Obtenção e preparação das amostras

Para a captação das peças em condição de descarte foi realizado a extração das amostras, as quais foram designadas como Amostra 1 (contendo PP reforçado com 20 % m/m de talco), Amostra 2 (contendo PP reforçado com 30 % m/m de talco) e Amostra 3 (contendo PP reforçado com 40 % m/m de talco). Na sequência, foi realizado o processo de higienização, lavagem e secagem das amostras. Para a lavagem e secagem das peças foi utilizado uma bacia plástica onde as amostras foram inseridas e cobertas com água de mangueira de jardim. Em seguida, foi adicionado detergente neutro, agitado com as mãos e, deixado por 30 min em repouso. Na sequência, foi removida uma a uma de dentro da bacia, lavado com água e seco individualmente com pano seco. As peças limpas foram estocadas à 30 °C por 3 dias.

Posteriormente, as amostras foram trituradas em moinho granulador (Plastimax, 3,7 kW, Rio Grande do Sul, Brasil) e injetadas em na mini injetora (AXPLÁSTICOS, aplicado parâmetros de fechamento do molde em 90%, duração de fechamento 8.1s, amortecimento em 30%, duração de amortecimento 1.0s, abertura de molde 30%, tempo abertura de molde 2.0s. Parâmetros de AQUECIMENTO: Zona 1 em 170~172°C, Zona 2 em 193°C, Zona 3 em 184~185°C, Zona 4 em 20~33°C, banda de alarme e resfriamento em 30°C. Parâmetros de INJEÇÃO: Duração de resfriamento 30s, duração de preenchimento 6,5s, velocidade de preenchimento 90%, curso relativo 58950 mm, disponível no Laboratório de Materiais de Processos da Faculdade de Tecnologia da UERJ. Parâmetros de DOSAGEM: retardo 0,38s, velocidade de recuo da rosca 30%, velocidade de giro da rosca 65%), (Anexo D (Parâmetros de Injeção).

3.3 Caracterização das amostras

As amostras após a reciclagem foram caracterizadas para realizar a comparação com o DataSheet (Anexo A - PP/20% m/m), (Anexo B - PP/30% m/m), (Anexo C - PP/40% m/m).

3.3.1 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Amostras foram analisadas em um equipamento DSC Q20 da TA Instruments (panelinha de alumínio), disponível no Laboratório de Polímeros da EEL/USP, sob fluxo constante de nitrogênio

(40 mL.min⁻¹) com taxa de aquecimento e de resfriamento de 10 °C.min⁻¹, na faixa de temperatura de 0 °C a 250 °C. A porcentagem de cristalinidade (X_c) foi calculado de acordo com a Equação (1), onde $\Delta H_{f100\%}$ é a entalpia do PP totalmente cristalino (209 J.g⁻¹).

$$X_c = \frac{\Delta H_f}{[f \times \Delta H_{f100\%}]} \times 100 \quad (1)$$

Sendo:

X_c : índice de cristalinidade;

ΔH_f : entalpia de fusão

$\Delta H_{f100\%}$: entalpia de fusão padrão

f : fração em massa do PP

3.3.2 Análise do Índice de Fluidez

A medição dos valores do índice de fluidez das amostras foi realizada para verificar a viscosidade dos materiais e determinar como seria a forma de processamento das amostras. O índice de fluidez das amostras foi determinado utilizando um plastômetro de extrusão INSTRON, modelo CEAST MF10 de acordo com a norma D1238-13 (ASTM D1238, 2014) com uma carga de 5 kg a 200 °C, com valores do índice de fluidez calculados em g/10s, disponível no Campus da UFABC.

3.3.3 Ensaio de Tração e Flexão

Os corpos de provas das amostras obtidas foram investigados mecanicamente em uma máquina de ensaios EMIC (modelo DL10000, Instron Brasil Equipamentos Científicos Ltda, Paraná, Brasil), com célula de carga de 5 kN, disponível no Laboratório de Materiais e Processos da Faculdade de Tecnologia (FAT/UERJ). Testes de tração e flexão foram realizados em quintuplicata para cada amostra, com auxílio de um extensômetro (Figura 6). Os ensaios de tração foram realizados conforme norma ASTM D 638, com velocidade de 5 mm.min⁻¹. Os ensaios de flexão (três pontos) foram realizados de acordo com a norma ASTM D 790, na velocidade de 1,3 mm.min⁻¹.

Figura 6. Ilustração da realização do ensaio de tração das amostras.



Fonte: Próprio autor.

3.3.4 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros das amostras foram determinados em um espectrofotômetro Perkin Elmer (modelo Spectrun 100) no modo ATR, disponível no Laboratório de Plasma da FEG/UNESP, utilizando o método de transmitância. A análise foi realizada no intervalo de comprimento de onda de 650 a 4000 cm^{-1} , com 12 varreduras.

3.3.5 Determinação da Densidade

A determinação da densidade aparente das amostras foi determinada dividindo-se o peso dos corpos de prova pelo volume calculado por meio de um paquímetro digital (MTX 316119).

3.4 Obtenção dos filamentos

Para a obtenção dos filamentos compósitos, foram utilizados os materiais moídos após a reciclagem, empregando um sistema de extrusão de bancada (Filmaq 3D, Curitiba, Paraná, Brasil) composto por uma extrusora monorosca, uma unidade de resfriamento/tração e um mecanismo de enrolamento, disponível no Laboratório de Materiais de Processos da Faculdade de Tecnologia da UERJ, como mostrado na Figura 7. No entanto, foi possível obter somente o filamento PP reforçado com 20 % m/m de talco, pois a quantidade de reforço gerou defeitos na obtenção do filamento. Foram considerados dois parâmetros para garantir a adequação da extrusão do filamento: a velocidade de extrusão necessária para conseguir filamentos lineares e a temperatura de extrusão de acordo com cada filamento. A velocidade de obtenção do filamento foi medida seguindo os princípios do movimento retilíneo uniforme, que registrou o tempo que o filamento levou para percorrer uma distância de 12,8 cm.

Figura 7. Sistema de extrusão de bancada Filmaq3D utilizado para a obtenção do filamento.



Fonte: Filmaq3d, 2024.

3.5 Impressão 3D

A impressão 3D dos filamentos foi realizada em uma Impressora 3D (3D S3X, Sethi 3D), disponível no Laboratório de Materiais de Processos da Faculdade de Tecnologia da UERJ, como mostrada na Figura 8. Peças circulares com dimensões de 3 x 5 mm (altura x raio), com estrutura de projeção ortogonal foram projetados no software CAD 3D Inventor, com parâmetros da impressora adotados para o filamento, conforme condições citadas na Tabela 1. Foram utilizadas diferentes temperaturas de processamento para adaptar o equipamento às diversas condições do compósito.

Figura 8. Impressora 3D S3X da Sethi3D.



Fonte: STLFLIX, 2024.

Tabela 1. Parâmetros de modelagem de deposição fundida para impressão dos compósitos.

Parâmetros de impressão	PP/20% m/m
Temperatura do bico (°C)	230
Temperatura da mesa (°C)	60
Resfriamento (%)	80
Velocidade da 1ª camada impressa (mm s ⁻¹)	15
Velocidade de impressão (mm s ⁻¹)	40
Altura da 1ª camada impressa (mm)	0.3
Altura das camadas subsequentes (mm)	0,1

3.6 Rugosidade

A determinação da rugosidade nos filamentos é importante para avaliar uma possível textura superficial única composta por saliências, podendo ser regulares ou irregulares. Essas saliências podem ser perceptíveis ou não dependendo de suas dimensões. O perfil de rugosidade é medido através do resultado da varredura do perfil real com uma sonda que filtra mecanicamente este perfil através do raio na ponta da sonda. A partir dessa varredura, diferentes parâmetros de rugosidade podem ser medidos ou calculados. Neste trabalho, foi avaliado o parâmetro rugosidade média aritmética (R_a), o qual consiste na média aritmética dos valores absolutos dos desvios do perfil em relação à linha média do perfil de rugosidade. Os testes de rugosidade foram realizados em triplicata ao longo do comprimento de cada filamento usando um dispositivo portátil modelo SJ-201 da Mitutoyo Corporation Ltda, disponível no Laboratório de Metrologia da Faculdade de Tecnologia da UERJ.

3.7 Microscopia Eletrônica de Varredura

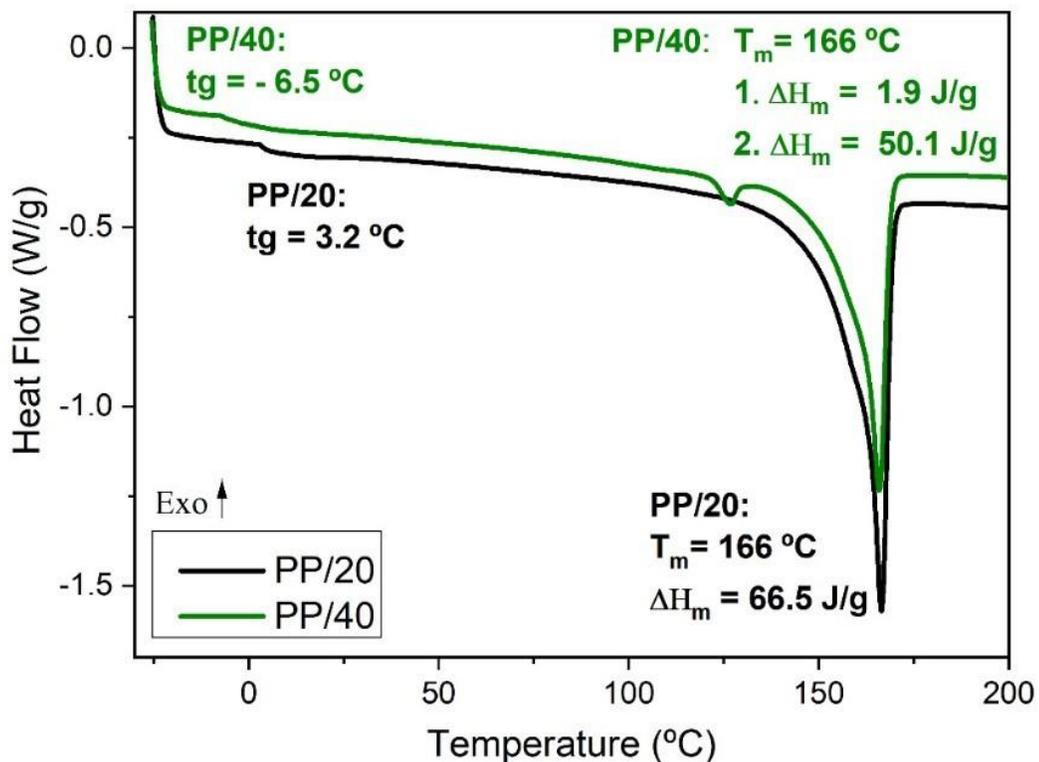
A análise morfológica dos filamentos foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO LS-15 com sistema EDS/EBDS Oxford INCA Energy 250, disponível no Laboratório de Análise de Imagens de Materiais (LAIMat) da UNESP, campus de Guaratinguetá. O equipamento foi operado em baixo vácuo com 1 kV de tensão utilizando detector de elétrons secundários. Para esta análise, as amostras foram fixadas em fita de carbono em um suporte de amostra e submetidas ao recobrimento metálico com ouro.

4 RESULTADOS

4.1 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A avaliação do comportamento térmico dos compósitos foi realizada por análises de DSC, com o objetivo de verificar o efeito da adição de diferentes concentrações do talco na matriz de PP na temperatura de fusão cristalina (T_f), e na cristalinidade (X_c) dos compósitos. A Figura 9 evidencia as curvas DSC dos compósitos de PP com diferentes teores de talco. A partir das curvas DSC foi possível identificar a temperatura de fusão cristalina (T_f) dos materiais. Não foi possível identificar a T_g do material via DSC, devido à baixa sensibilidade do equipamento. Analisando as curvas observou-se que ocorreu uma diferença não significativa na temperatura de fusão dos compósitos. O aumento da temperatura de fusão não foi proporcional a quantidade de talco inserida à matriz de PP. O compósito PP/30% m/m apresentou menor T_f comparado aos demais compósitos. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos por meio das curvas DSC dos compósitos e do PP.

Figura 9. Curvas DSC dos filamentos de PP/20% e PP/40% m/m.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 2. Tabela com os dados das curvas DSC dos compósitos.

Amostras	T_f (°C)	ΔH_f (J.g⁻¹)	X_c (%)
PP/20% m/m	150,1	73,8	44,1
PP/30% m/m	148,2	72,3	49,4
,PP/40% m/m	149,4	72,6	57,9

Analisando os dados da porcentagem de cristalização observou-se um aumento na cristalinidade dos compósitos ao inserir maior teor de carga. Houve um aumento de 31,3% na cristalinidade do PP com 20% de teor de talco em relação ao PP com 40% de teor de talco, ocasionando uma melhora nas propriedades mecânicas dos materiais observados no item 5.4 (ensaios de tração e flexão). Segundo Batista (2015) o grau de cristalinidade de termoplásticos semicristalinos desempenha um papel importante na determinação das propriedades finais de materiais compósitos estruturais, pois o mesmo afeta a extensão das ligações secundárias intermoleculares, existentes em grande quantidade, nas regiões cristalinas (BATISTA, 2015). Acredita-se que o talco agiu como agente nucleante do PP favorecendo a nucleação dos cristalitos ao aumentar a compatibilidade entre a interface talco/PP. E esse aumento na interação (compatibilidade) entre os componentes do compósito, poderá ocasionar uma diminuição do índice de fluidez devido à uma menor mobilidade das cadeias (Sun et. al., 2022).

4.2 Índice de fluidez (IF)

O índice de fluidez é uma medida que permite compreender os efeitos de alterações na estrutura polimérica ou da ação de cargas ou aditivos sobre as propriedades reológicas do polímero. Assim, espera-se que com o aumento do teor de carga mineral na matriz polimérica, ocorra uma redução do índice de fluidez e conseqüentemente uma maior dificuldade para o processamento. A Tabela 3 apresenta o comportamento do índice de fluidez dos compósitos em função do teor de talco.

Tabela 3. Tabela com os dados do IF dos compósitos.

Amostras	IF (g/10min)	Data Sheet
PP/20% m/m	18,9	16,0 – 20,0
PP/30% m/m	28,5	27,0 – 32,0
PP/40% m/m	7,4	4,0 – 9,0

Analisando os resultados observa-se um comportamento oscilatório com o aumento do teor de talco nos compósitos. Irineu (2022) cita que este comportamento evidencia uma possível concorrência entre efeitos provocados pelo talco no material como a plastificação e a restrição de volume livre característica de cargas particuladas.

Além disso, foi possível observar que o índice de fluidez dos compósitos após a reciclagem dos mesmos apresentou valores dentro do Data Sheet, sendo assim satisfatório para o processamento.

4.3 Ensaio de tração e flexão

4.3.1 Tração

A Tabela abaixo apresenta o comportamento do ensaio de tração dos compósitos, levando em consideração, seu respectivo teor de talco.

Tabela 4. Dados do ensaio de tração vs especificação do fabricante.

Amostra	Tensão Máx (MPa)	Datasheet	Deformação Máx (%)	Datasheet
PP/20% m/m	30,8 ± 1,1	28.8 - 35.2	16,4 ± 0,3	18.0 - 22.0
PP/30% m/m	31,7 ± 1,5	24.3 - 29.7	9,6 ± 0,1	10.8 - 13.2
PP/40% m/m	32,8 ± 0,7	27.0 - 33.0	10,4 ± 0,2	3.6 - 4.4

Abaixo, pode-se evidenciar o comportamento dos corpos de prova desde a quebra da inercia até sua respectiva ruptura:

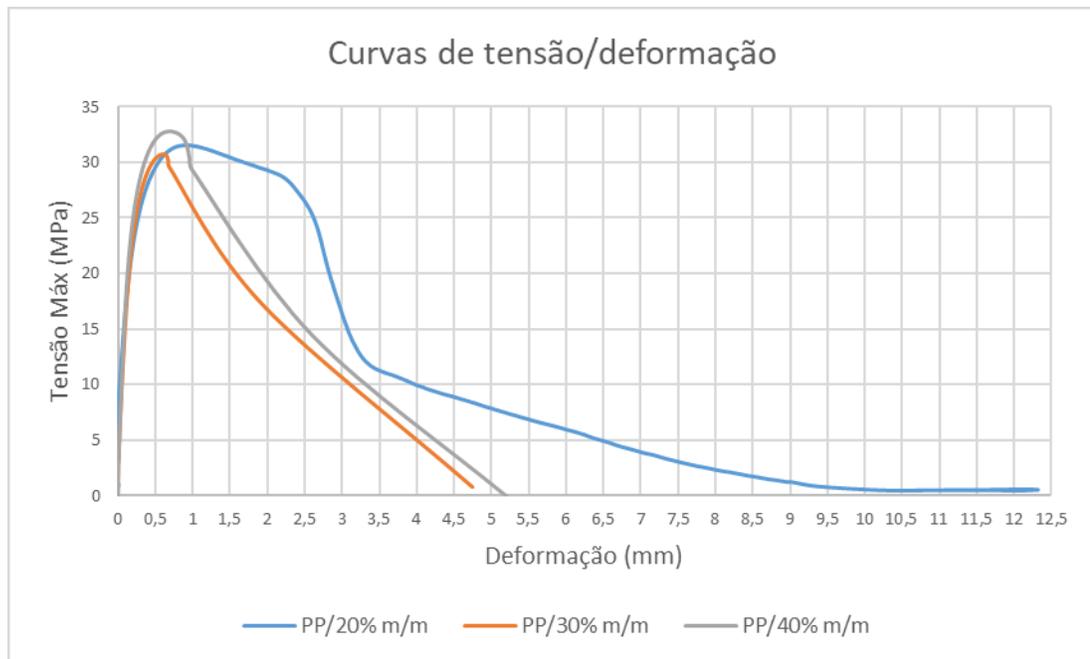


Gráfico 1. Performance dos corpos de prova.

Analisando os dados nota-se uma baixa resistência de deformação em comparação com as especificações do fabricante, quanto maior o percentual de talco, menor sua resistência a deformação. Irineu (2022) menciona que adição de talco na matriz do PP influencia diretamente em sua deformação, quanto maior o teor de talco menor sua resistência a deformação. Neste experimento, nota-se uma boa performance nos resultados de tensão, observa-se que, quanto maior o percentual de talco, maior a tensão suportada pelo corpo de prova.

4.3.2 Flexão

A Tabela abaixo apresenta o comportamento do ensaio de flexão dos compósitos, levando em consideração, seu respectivo teor de talco.

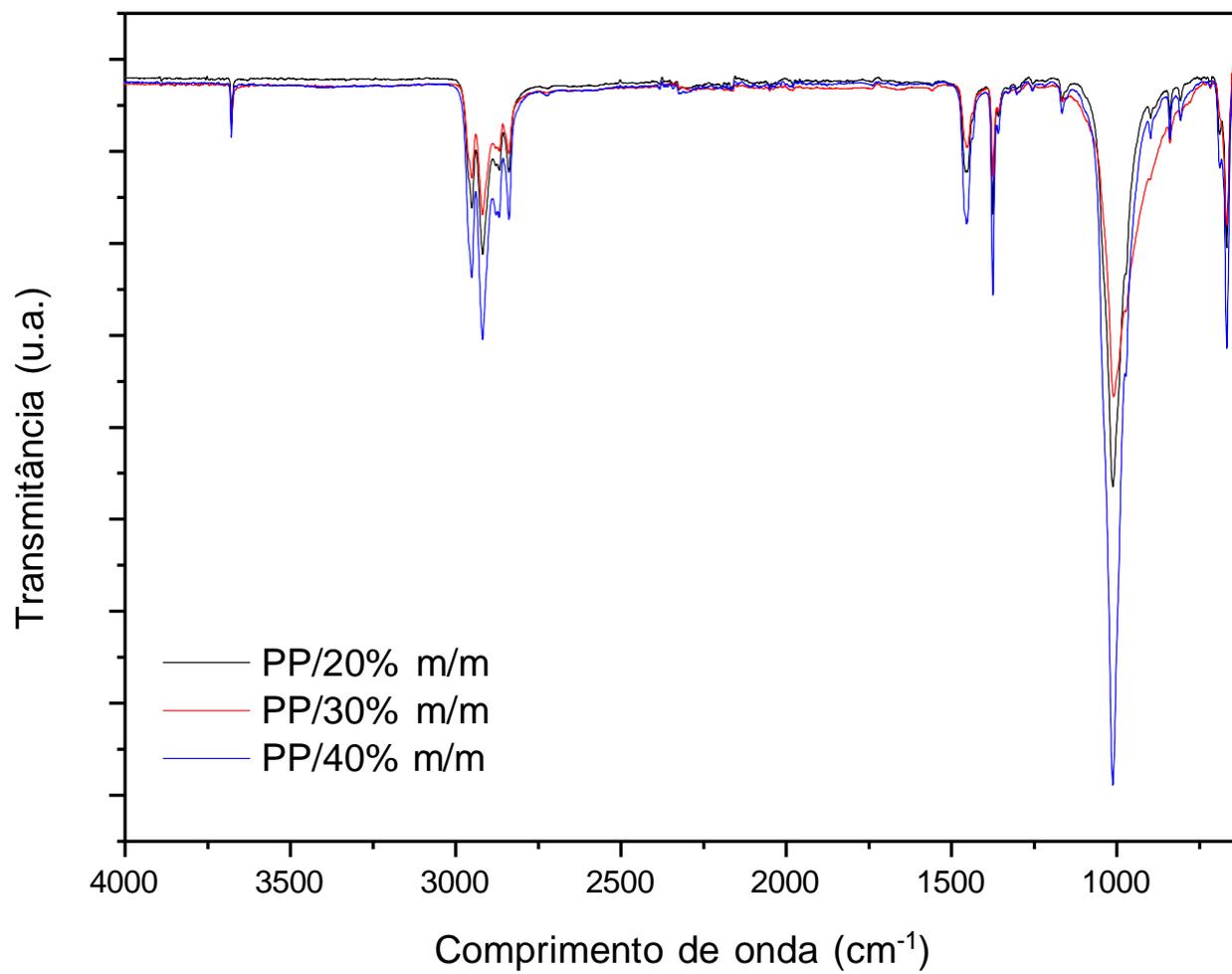
Tabela 5. Dados do ensaio de flexão vs especificação do fabricante.

Amostra	Tensão Máx (MPa)	Datasheet	Módulo de Young (GPa)	Datasheet
PP/20% m/m	$54,8 \pm 2,6$	40,5 – 49,5	$2,73 \pm 0,14$	2,47 – 3,02
PP/30% m/m	$55,3 \pm 1,7$	24,3 – 29,7	$3,98 \pm 0,15$	2,97 – 3,63
PP/40% m/m	$56,1 \pm 3,7$	27,0 – 33,0	$4,66 \pm 0,25$	4,00 – 4,89

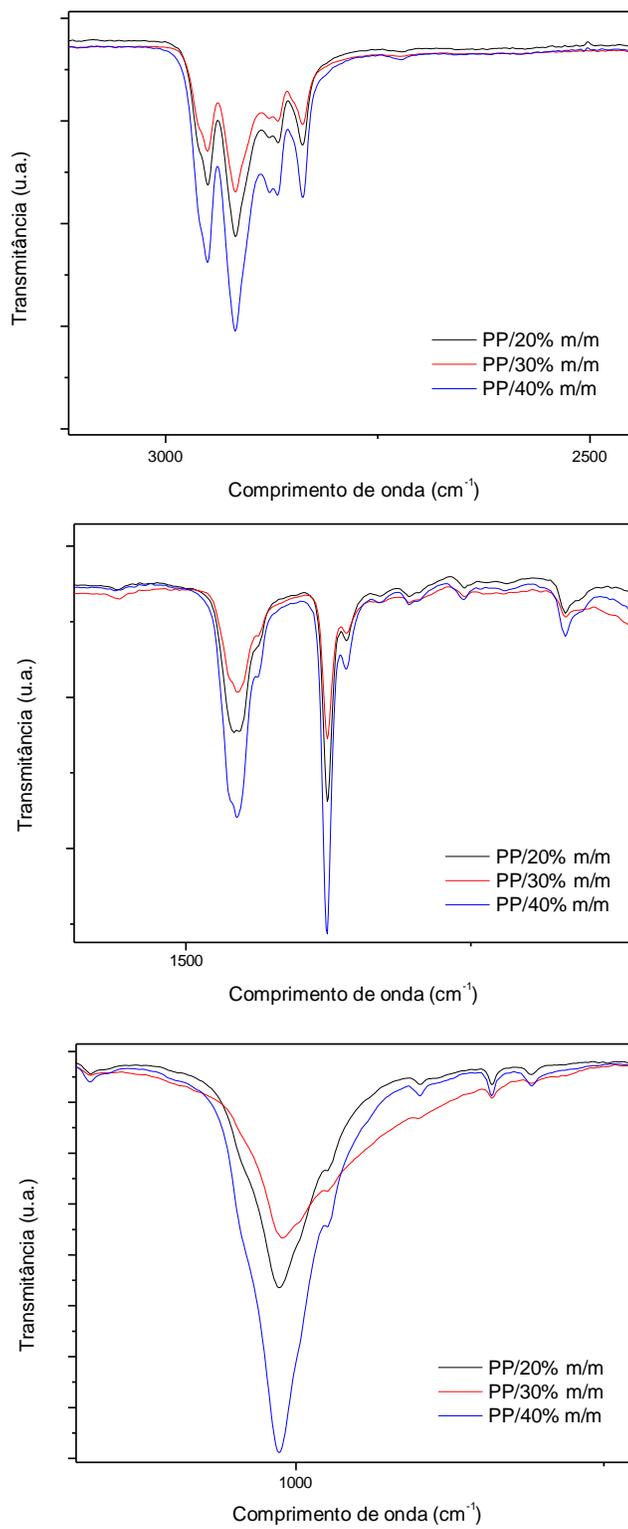
Verificando-se os dados, evidencia-se valores de tensão elevada em comparação com as especificações do fabricante, quanto maior a concentração de talco, maior sua tensão na flexão do corpo de prova. Rodrigues (2020) sinaliza que a adição de talco na matriz PP aumenta diretamente sua resistência e, conseqüentemente, sua tensão nos experimentos de flexão. Por outro lado, nota-se resultados dentro da conformidade para o módulo de Young em conformidade com as especificações do fabricante.

4.4 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de FTIR podem ser visualizados na Figura 10. Analisando os espectros observou-se picos em 2956, o qual está relacionado à vibração de alongamento assimétrico $-\text{CH}_3$. Também se notou picos em 2918, 2840 e 1455 cm^{-1} , os quais são referentes ao alongamento assimétrico $-\text{CH}_2-$, ao alongamento simétrico $-\text{CH}_2-$ e atribuídos à flexão simétrica $-\text{CH}_2-$, respectivamente. A Figura 11 evidencia melhor esses picos. Evidenciou-se picos de absorção exibidos em 972, 997 e 1165 cm^{-1} , os quais são atribuídos à vibração oscilante $-\text{CH}_3$. O aumento no teor de talco aumentou as vibrações relacionadas ao CH_3 e diminuiu as vibrações relacionadas ao CH_2 . A análise da área do pico referente a cada vibração não apresenta diferenças significativas entre as amostras com 20 e 30% de teor de talco, mas mostra que há um aumento das vibrações associadas a CH_3 simétrico e assimétrico e uma diminuição das vibrações associadas a CH_2 . A quantidade de talco inserida na matriz de PP influencia na intensidade dos picos, quanto maior a inserção de talco maior foi a intensidade dos mesmos, o que influenciará na cristalinidade dos materiais.

Figura 10. Espectros de FTIR.

Fonte: Próprio autor.

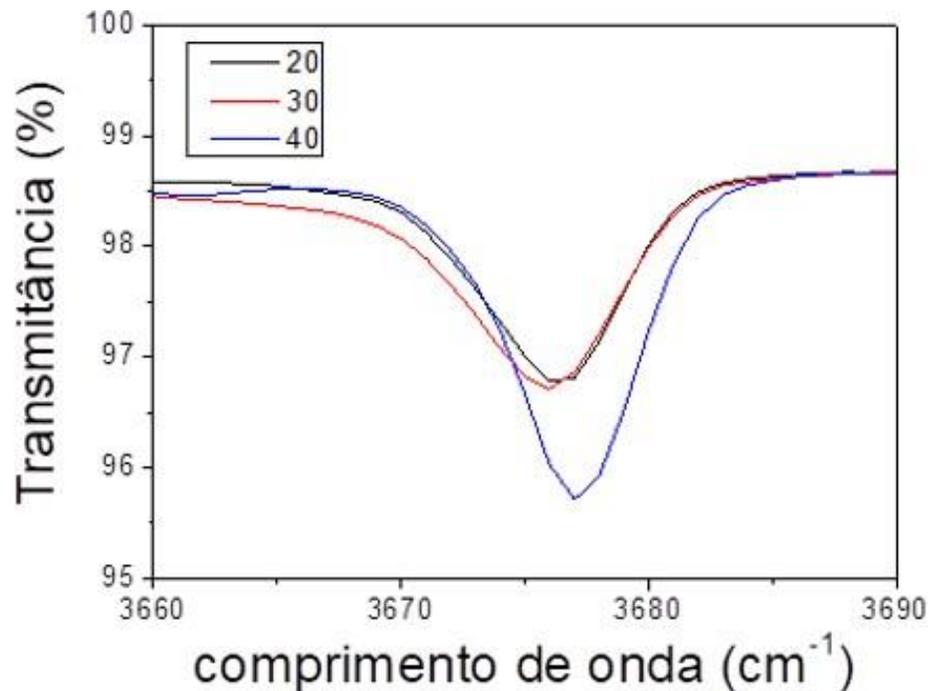
Figura 11. Espectros de FTIR.

Fonte: Próprio autor.

A Figura 12 nos mostra a banda com pico em 3676 cm^{-1} que está associada a vibração do grupo Mg (Mg-OH), sendo possível observar que não há diferença significativa entre as amostras para 20% e 30% de teor de talco, mas essa banda se intensifica para a amostra com 40% de teor de talco.

Silva (2016) sinaliza que em PP puro pode-se identificar a presença de estiramentos de carbono característicos do material polimérico como as bandas de absorção típicas de ligações CH presentes no polipropileno, ou seja, estiramento de grupos CH/CH₂/CH₃ entre 2850 e 2980 cm^{-1} (na tabela 4 evidencia-se a associação entre os grupos funcionais e bandas observadas no espectro de FTIR sinalizados na figura 11, no qual, notou-se estiramentos simétricos em banda CH₂, a partir de 2840), deformação angular de grupos CH₃ em 1354 e 1460 cm^{-1} , estiramento de ligações C-C em 1167 cm^{-1} . Com adição de talco na matriz observa-se todos os estiramentos característicos do PP com exceção dos estiramentos entre 400 e 600 cm^{-1} e estiramento próximo a 1014 cm^{-1} que representam respectivamente as ligações de Si-O-Si e Si-O presente na molécula de talco que possui estrutura molecular $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ e o estiramento próximo a 699 cm^{-1} pertence ao OH livre na estrutura da carga.

Figura 12. Banda com pico em 3676 cm^{-1} .



Fonte: Próprio autor.

Tabela 6. Associação entre os grupos funcionais e bandas observadas no espectro de FTIR.

Posição do pico (cm ⁻¹)	Intensidade relativa do pico Teor de talco (%)			Vibração
	20	30	40	
2956	0,20	0,21	0,22	CH ₃ picos de estiramento assimétricos
2948	0,08	0,07	0,06	
2918	0,33	0,32	0,25	CH ₂ picos de estiramento assimétricos
2889	0,14	0,14	0,16	CH ₃ picos de estiramento simétricos
2869	0,10	0,11	0,14	
2840	0,15	0,15	0,16	CH ₂ picos de estiramento simétricos

4.5 Densidade

A Tabela 7 apresenta a densidade das amostras dos materiais estudados. Com os dados obtidos, verificou-se que a quantidade de carga mineral na matriz de PP influenciou em sua densidade.

Tabela 7. Densidade dos materiais estudados

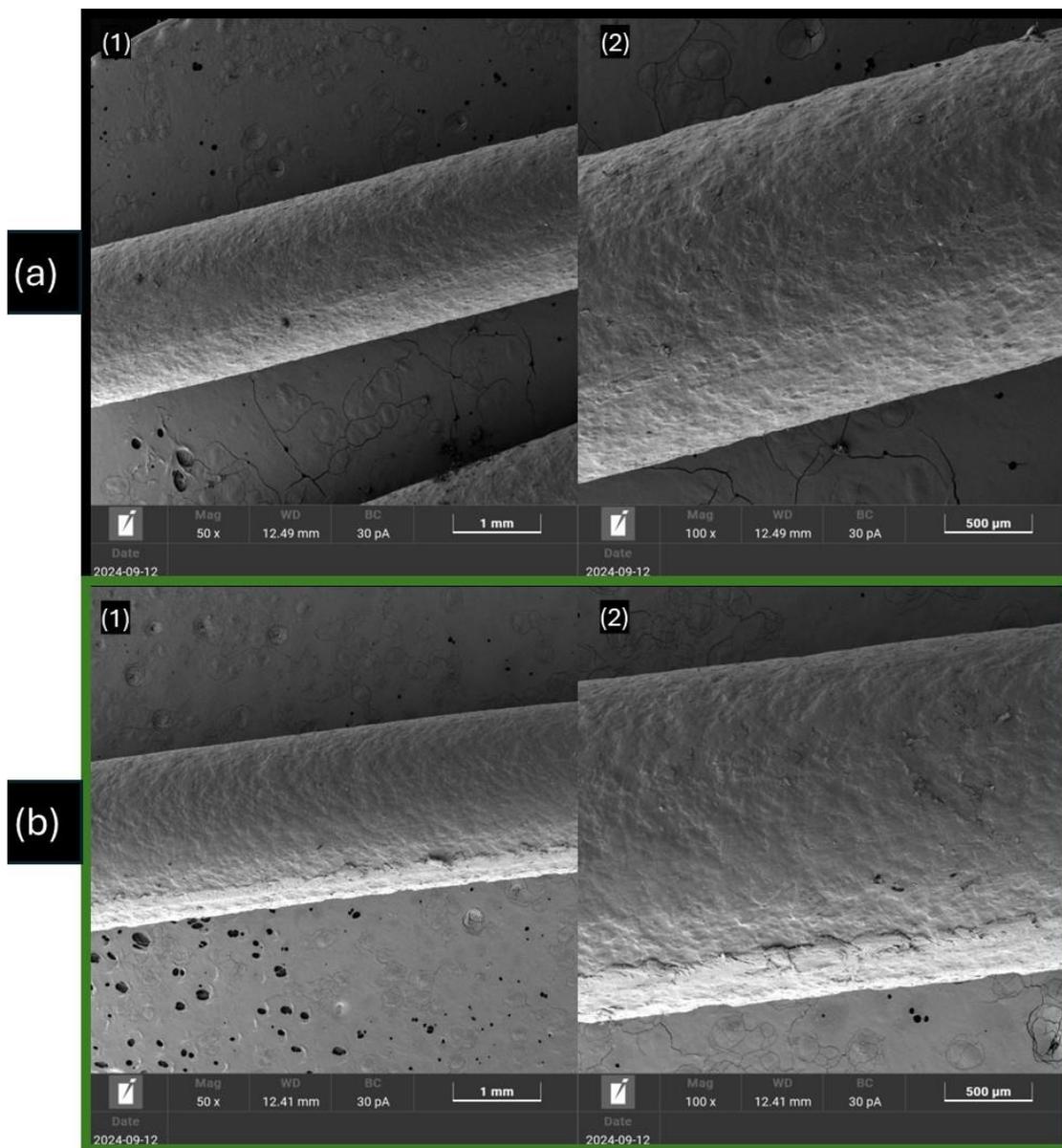
Amostras	Densidade (g/cm ³)	Datasheet
PP/20% m/m	1,045 ± 0,009	1,050 ± 0,105
PP/30% m/m	1,180 ± 0,004	1,160 ± 0,116
PP/40% m/m	1,229 ± 0,003	1,230 ± 0,123

Observou-se também que ao comparar as densidades dos materiais reciclados com o datasheet do produto, as variações da densidade se mantem dentro dos parâmetros especificados pelo fabricante do produto.

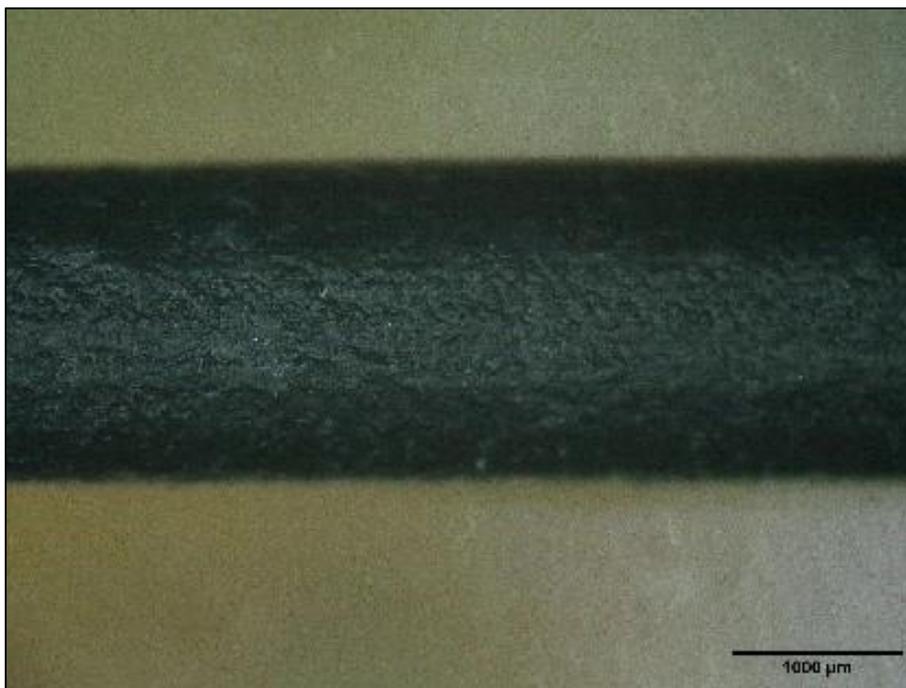
4.6 Obtenção e impressão 3D dos filamentos

A Figura 13 evidencia micrografias obtidas por MEV e, a Figura 14 por MO, mostrando a seção transversal de filamentos compósitos. Analisando as imagens observa-se um aspecto rugoso do material, o qual não interferiu na impressão do filamento.

Figura 13. Morfologia dos filamentos: (a) Imagens MEV do PP/20% (50X (1) e 100X (2)); (b) Imagens MEV do PP/40% (50X (1) e 100X (2)).



Fonte: Próprio autor.

Figura 14. Morfologia dos filamentos: Imagem MO

Fonte: Próprio autor.

Nota-se, pelas imagens, um filamento com excelente qualidade e homogeneidade morfológica entre as cargas de reforço, não identificado presença de impurezas, fraturas, fragilidades, bolhas, falhas e irregularidades em sua superfície.

Os filamentos compósitos foram obtidos com sucesso para garantir que os parâmetros de impressão, como pressão de extrusão e viscosidade, não afetassem a qualidade do material obtido (Figura 15). O diâmetro, a densidade, a temperatura de extrusão e a rugosidade são parâmetros cruciais para a compreensão do processamento do material do filamento, conforme mostrado na Tabela 8.

Tabela 8. Valores médios e desvio padrão de diâmetro, densidade, temperatura de extrusão.

Amostra	Diâmetro (mm)	Densidade (g.cm ⁻³)	Temperatura de extrusão (°C)	Rugosidade Ra (μm)
PP/20% m/m	1.6 ± 0.1	1.1 ± 0.1	230	1,36 ± 0,2

Os compósitos (PP/20% m/m) apresentaram diâmetros e densidades semelhantes, com baixo desvio padrão demonstrando precisão durante o processo (Hanemann et al., 2023). Este arranjo ocasionou nos resultados mais favoráveis e melhorou a precisão durante o processo de impressão 3D.

Figura 15. Filamentos obtidos e compósitos impressos em 3D.



Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÃO

Este projeto analisou a viabilidade para reutilização de Polipropileno (PP) com adição de carga mineral (talco) nas proporções de 20%, 30% e 40% com o objetivo de produzir filamentos recicláveis para impressão 3D, obtendo os resultados de acordo com as análises aplicadas;

A caracterização dos filamentos retornou resultados satisfatórios e dentro do esperado para atendimento ao objetivo do projeto, resultados apresentaram pouca alteração, comparado com o PP virgem; O compósito com PP /20% m/m apresentou melhor performance, precisão e retornou resultados mais favoráveis para o processo de impressão 3D.

A análise de DSC apresentou aumento na cristalinidade da amostra conforme aumenta-se o teor de carga na matriz, melhorando as propriedades mecânicas agindo como agente nucleante do PP aumentando a interação (compatibilidade) entre a interface talco/PP.

Seu índice de fluidez apresentou comportamento oscilatório devido ao aumento no teor de talco na matriz, mas, se mantiveram satisfatórios em comparação ao data sheet do fabricante.

A análise de FTIR apresentou espectros com variações de picos atribuídos ao percentual de talco inserido na matriz do PP, ou seja, quanto maior o percentual, maior a intensidade dos mesmos no qual, terá influência na cristalinidade do material sem impactos negativos.

Para os resultados obtidos no teste mecânico, os compósitos apresentaram leve queda na resistência à deformação e, maior resistência a tração, em conformidade com o aumento do teor de talco na matriz. No entanto, ambos se mantiveram dentro do especificado pelo data sheet do fabricante.

Para o teste de densidade, a presença de carga mineral na matriz dos compósitos apresentou uma ligeira influência em comparação com o data sheet do fabricante, no entanto, se mantiveram dentro dos parâmetros especificados.

A Micrografia obtidas por MEV e MO revelaram um aspecto rugoso do material no qual não houve interferência na impressão do filamento.

Concluindo que os filamentos em PP /20% m/m provenientes da reutilização e reciclagem de componentes automobilísticos são opções viáveis para redução à utilização do PP virgem, redução aos impactos ambientais e oferta de produto mais acessível à sociedade. Para os demais percentuais, também, podemos reciclar e aplicar em outros processos de injeção.

REFERÊNCIAS

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-de-reciclagem-mecanica-de-plastico-no-brasil-atinge-256-em-2022-revela-estudo-do-picplast/>>. Último acesso em: 27/06/2024.

AJORLOO, M.; GHODRAT, M.; KANG, WH. Incorporation of Recycled Polypropylene and Fly Ash in Polypropylene-Based Composites for Automotive Applications. *J Polym Environ* 29, 1298–1309 (2021). Disponível em: <doi.org/10.1007/s10924-020-01961-y>. Último acesso em: 27/06/2024.

ALBEDAH, A.; ABDO, H.; MOHAMMED, S.; BOUIADJRA, B.; AL-GHURABI, E.; ALOTHMAN, O. Potential of recycled polypropylene: A study on effect of natural fiber on the morphology and properties of biocomposite. *Journal of King Saud University - Science*, Volume 36, (2024). Disponível em: <doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103167>. Último acesso em: 27/06/2024.

ANKE, B.; JAN, B.; RAF, D. Recycling and recovery of post-consumer plastic solid waste in a European context. *Thermal Science*, Volume 16, pages 669-685 (2012). Disponível em: <doi.org/10.2298/TSCI120111121B>. Último acesso em: 27/06/2024.

ASTM D638: Standard Test Method for tensile properties of plastics. United States, 2014.

BASELL, LYON DELL. Compunded Polyolefin, Data sheet R061/R129/R135 (2023).

BATISTA, N. Estudo do efeito da cristalinidade nas propriedades mecânicas de compósitos termoplásticos com aplicações aeronáuticas. 2015. 180 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, (2015). Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/132187>>. Último acesso em: 12/07/2024.

BELVISO, C.; MONTANO, P.; LETTINO, A. Determining the role of the method used to recycle polypropylene waste materials from automotive industry using sepiolite and zeolite fillers. *J Mater Cycles Waste Manag* 23, 965–975 (2021). Disponível em: <doi.org/10.1007/s10163-021-01184-w>. Último acesso em: 27/06/2024.

BUNJES, A.; ARNDT, J.; GEERTZ, G.; BARTON, B. Characterization and chemometric modelling of mechanically recycled polypropylene for automotive manufacturing. *Polymer*, Volume 249, (2022). Disponível em: <doi.org/10.1016/j.polymer.2022.124823>.

CEIC DATA. Motor Vehicle Production in United States (2023). Disponível em: <<https://www.ceicdata.com/pt/indicator/united-states/motor-vehicle-production>>. Último acesso em: 27/06/2024.

FERNANDES, B.; DOMINGUES, A. Mechanical characterization of recycled polypropylene for automotive industry. SciELO - Scientific Electronic Library Online. Seção Técnica • Polímeros 17 (2) (2007). Disponível em: <doi.org/10.1590/S0104-14282007000200005>. Último acesso em: 27/06/2024.

GU, F.; HALL, P.; MILES, N. Development of composites based on recycled polypropylene for injection moulding automobile parts using hierarchical clustering analysis and principal component estimate. *Journal of Cleaner Production*, Volume 137, pages 632-643 (2016). Disponível em: <doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.028>. Último acesso em: 27/06/2024.

GRAZIANO, A.; JAFFER, S.; SAIN, M. Review on modification strategies of polyethylene/polypropylene immiscible thermoplastic polymer blends for enhancing their mechanical behavior. *Journal of Elastomers & Plastics*, pages 291-336, (2018).

HANEMANN, T.; KLEIN, A.; BAUMGÄRTNER, S.; JUNG, J.; WILHELM, D.; ANTUSCH, S. Material Extrusion 3D Printing of PEEK-Based Composites. *Polymers* (2023), 15, 3412. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/polym15163412>>. Último acesso em: 12/07/2024.

IPEA. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (2022). Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/portal/>>. Último acesso em: 27/06/2024.

IUNOLAINEN, E. Suitability of recycled PP for 3D printing filament. Degree Thesis, Yrkeshögskolan Arcada (2017). Disponível em: <<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2017112418109>>. Último acesso em: 27/06/2024.

IRINEU, Clistian de Paiva. Influência de carga mineral talco na degradação térmica e nas propriedades dos compósitos de polipropileno para aplicação na indústria automotiva. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena SP (2022). Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97134/tde-28042022-164132/publico/EMD21010_C.pdf>. Último acesso em: 01/07/2024.

KERDLAP, P.; PURNAMA, A.; LOW, J.; TAN, D.; BARLOW, C.; RAMAKRISHNA, S. Comparing the environmental performance of distributed versus centralized plastic recycling systems: Applying hybrid simulation modeling to life cycle assessment. *Journal of industrial ecology*. Volume 21, pages 252-271 (2022). Disponível em: <doi.org/10.1111/jiec.13151>. Último acesso em: 27/06/2024.

KNAUF INDUSTRIES AUTOMOTIVE (2020). Longo caminho para a reciclagem de plásticos na indústria automotiva. Disponível em: <<https://knaufautomotive.com/pt-br/plasticos-reciclados-na-industria-automotiva/>>. Último acesso em: 27/06/2024.

KOZDERKA, M.; ROSE, B.; BAHLOULI, N. Recycled high impact polypropylene in the automotive industry - mechanical and environmental properties. *Int J Interact Des Manuf* 11, 737–750 (2017). Disponível em: <doi.org/10.1007/s12008-016-0365-9>. Último acesso em: 27/06/2024.

KRISTIAWAN, R.B.; IMADUDDIN, F.; ARIAWAN, D.; UBAIDILLAH AND ARIFIN, Z. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, pages 639-649, (2021).

LADHARI, A.; KUCUKPINAR, E.; STOLL, H.; SÄNGERLAUB, S. Comparison of Properties with Relevance for the Automotive Sector in Mechanically Recycled and Virgin Polypropylene. *Recycling*, 6, 76 (2021). Disponível em: <doi.org/10.3390/recycling6040076>. Último acesso em: 27/06/2024.

LEI nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, Política Nacional de Resíduos Sólidos, (2010). Brasil.

MARKETWATCH. Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing Market Research Report (2021).

MADDAH, H.A. Polypropylene as a promising plastic: A review. *American Journal of Polymer Science*, pages 1-11 (2016).

MARIA A. MORALES, ALEJANDRO MARANON, CAMILO HERNANDEZ and ALICIA PORRAS, et al. Desenvolvimento e caracterização de um filamento de impressão 3D à base de polipropileno reciclado e cascas de grãos de cacau, Faculdade de Engenharia Mecânica de Los Andes. Bogotá/Colombia: 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/13/18/3162>>. Último acesso em: 27/06/2024.

MARIA A. MORALES, CINDY L. ATENCIO MARTINEZ, ALEJANDRO MARANON, CAMILO HERNANDEZ, VERONIQUE MICHAUD and ALICIA PORRAS, et al. Desenvolvimento e caracterização de filamentos em polipropileno reciclado com casca de arroz para impressão 3D, Faculdade de Engenharia Mecânica de Los Andes. Bogotá/Colombia: 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/13/7/1067>>. Último acesso em: 27/06/2024.

MARLEAU, T. Polypropylene: Advances in Research and Applications. Chemistry Research and Applications. Nova Science publisher, (2021). Disponível em: <doi.org/10.52305/PKXW6412>. Último acesso em: 27/06/2024.

O GLOBO (2024). Produção de veículos no Brasil encolheu 1,9% em 2023; importações da China cresceram 431%. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/economia/negocios/noticia/2024/01/10/producao-de-veiculos-no-brasil-encolheu-19percent-em-2023-importacoes-da-china-cresceram-431percent.ghtml>>. Último acesso em: 27/06/2024.

OpenAI. Geração de resíduos na indústria automotiva (2022). Informação fornecida pelo modelo de linguagem da OpenAI.

ORTH, C.; BALDIN, N.; ZANOTELLI, C. A geração de resíduos sólidos em um processo produtivo de uma indústria automobilística: uma contribuição para a redução. *Gestão Produção*, v. 21, p. 447–460 (2024).

PASQUINI, N ADDEIO. Polypropylene Handbook. New York: Hanser, 2005.

PHUANGMALI, I.; XU, Y.; HUANG, M.; SUN, C. ; LIN, L. ; SCHLARB, A. Local thermal conditions influencing the mechanical properties of recycled polypropylene as a filament for fused filament fabrication. *Polymer*, Volume 296 (2024). Disponível em: <doi.org/10.1016/j.polymer.2024.126812>. Último acesso em: 27/06/2024.

POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Último acesso em: 27/06/2024.

PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS (2023). Reciclagem de Automóveis. Disponível em: <<https://www.portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-automoveis/>>. Último acesso em: 27/06/2024.

RODRIGUES, Marinele Tolentino. Estudos de propriedades de polipropileno puro e reciclado. Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda RJ (2020). Disponível em: <https://patrimonio.uff.br/wp-content/uploads/sites/182/2021/06/Marinele-Tolentino-Rodrigues_vers%C3%A3o-final.pdf>. Último acesso em: 01/07/2024.

SILVA, P. Nano compósito de polipropileno reforçado com grafeno. Centro federal de educação tecnológica de minas gerais, departamento de engenharia de materiais, (2016). Disponível em: <https://www.demat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/25/2018/06/TCC_2%C2%B0_2016-Philippe-Pocidonio-Silva-vers%C3%A3o-final.pdf>. Último acesso em: 25/07/2024.

SINGH, J.; CHAWLA, K.; SINGH, R. Applications of Thermoplastic Polymers in 3D Printing. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, pages 1–10, (2020).

SOUZA, R. G. d.; CORDEIRO, J. S. Gestão estratégica de resíduos sólidos: Utilização do balanced scorecard. Planejamento e Políticas Públicas, Vol 32 (2022). Disponível em: <<http://www.ipea.gov.br/ppp/index.php/PPP/article/view/16>>. Último acesso em: 27/06/2024.

SUN, H.; WANG, L.; YI, J.; WANG, F.; GAO, Y.; SHA, X.; FENG, J. The influence of melt temperature on the crystal orientation of polypropylene containing talc. *Polymer* (2022), Vol 256). Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125179>>. Último acesso em: 12/07/2024.

TABLIT, S.; KRACHE, R.; AMROUNE, S.; JAWAID, M.; HACHAICHI, A.; ISMAIL, A.; MERAJ, A. Effect of chemical treatments of arundo donax L. fibre on mechanical and thermal properties of the PLA/PP blend composite filament for FDM 3D printing. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol 152 (2024). Disponível em: <doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106438>. Último acesso em: 27/06/2024.

TERRA (2023). Indústria automotiva investe em plástico reciclado, mostra estudo. Disponível em: <https://www.terra.com.br/mobilidade/carros/industria-automotiva-investe-em-plastico-reciclado-mostra-estudo,28d613615f299c485ac0a1de7052a3b2a160hj3o.html?utm_source=clipboard>. Último acesso em: 27/06/2024.

TSIOPTSIAS, C.; LEONTIADIS, K.; TZIMPILIS, E; TSIVINTZELIS, I. Polypropylene nanocomposite fibers: A review of current trends and new developments. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, Pages 1-29, (2020).

VERTOWN (2024). Como a gestão de resíduos da indústria automotiva aumenta sua produtividade. Disponível em: <<https://www.vertown.com/blog/como-a-gestao-de-residuos-da-industria-automotiva-pode-aumentar-produtividade/>>. Último acesso em: 27/06/2024.

VIDAKIS, N.; PETOUSIS, M.; TZOUNIS, L.; MANIADI, A.; VELIDAKIS, E.; MOUNTAKIS, N.; PAPAGEORGIU, D.; LIEBSCHER, M.; MECHTCHERINE, V. Sustainable additive manufacturing: mechanical response of polypropylene over Multiple recycling processes. *Sustainability*, 159. (2021). Disponível em: <doi.org/10.3390/su13010159>. Último acesso em: 27/06/2024.

VIDAKIS, N.; PETOUSIS, M.; VELIDAKIS, E.; MOUNTAKIS, N.; GRIFFITHS, P.; GRAMMATIKOS, S.; TZOUNIS, L. *Polymer Testing - Fused Filament Fabrication 3D printed polypropylene/ alumina nanocomposites: Effect of filler loading on the mechanical reinforcement* (2022). Disponível em: <doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107545 >. Último acesso em: 27/06/2024.

ZHANG, D.; QIU, D.; GIBSON, M.A.; ZHENG, Y.; FRASER, H.L.; ST JOHN, D.H.; EASTON, M.A. Additive manufacturing of ultrafine-grained high-strength titanium alloys. *Nature*, pages 91–95, (2019).

ANEXOS

Anexo A (Datasheet PP/20% m/m).

			
R 061 Compounded Polyolefin			
Product Description R 061 is a 20% talc filled polypropylene homopolymer, designed for injection molding process. This high melt flow grade has high stiffness and good impact resistance, being used in automotive applications. This grade is available in black pellet form.			
Product Characteristics			
Status	Commercial: Active		
Test Method Used	ISO		
Availability	Brazil		
Features	High melt flow rate, high stiffness, good impact resistance		
Typical Customer Applications	Automotive components		
Typical Properties	Method	Value	Unit
Physical			
Specific Gravity	ISO 1183	1.05	g/cm ³
Melt Flow Rate (230°C/2.16Kg)	ISO 1133	16.0 - 20.0	g/10 min
Ash Content	ISO 3451-1	18.0 - 22.0	%
Mechanical			
Flexural Modulus	ISO 178	2750	MPa
Flexural Strength	ISO 178	45.0	MPa
Tensile Strength at Yield	ISO 527-1, -2	32.0	MPa
Elongation at break	ISO 527-1, -2	20.0	%
Impact			
Izod, Notched (23 °C, Type 4, Notch A)	ISO 180	3.0	KJ/m ²
Thermal			
H.D.T. (1,82 MPa)	ISO 75-2A	85.0	°C
H.D.T. (0,45 MPa)	ISO 75-2B	125.0	°C
Heat Aging Performance (150°C)	ISO 4577	400	hours

Anexo B (Datasheet PP/30% m/m).

			
<h2>Hostacom R 129</h2>			
Compounded Polyolefin			
Product Description			
<p>R 129 is a 33% talc filled polypropylene homopolymer, designed for injection molding process. This grade has high stiffness and good impact resistance, being used in automotive applications</p> <p>This grade is available in black pellet form.</p>			
Product Characteristics			
Status	Commercial: Active		
Test Method Used	ISO		
Availability	Brazil		
Features	High melt flow rate, good impact resistance		
Typical Customer Applications	Automotive components		
Typical Properties	Method	Value	Unit
Physical			
Specific Gravity	ISO 1183	1.16	g/cm ³
Melt Flow Rate (230°C/2.16Kg)	ISO 1133	27.0 – 32.0	g/10 min
Ash Content	ISO 3451-1	30.0 – 36.0	%
Mechanical			
Flexural Modulus	ISO 178	3300	MPa
Tensile Strength at Yield	ISO 527-1, -2	27.0	MPa
Elongation at Break	ISO 527-1, -2	12.0	%
Impact			
Izod, Notched (23 °C, Type 4, Notch A)	ISO 180	2.5	KJ/m ²
Thermal			
H.D.T. (0,45 MPa)	ISO 75-2B	123.0	°C
H.D.T. (1,82 MPa)	ISO 75-2A	67.0	°C

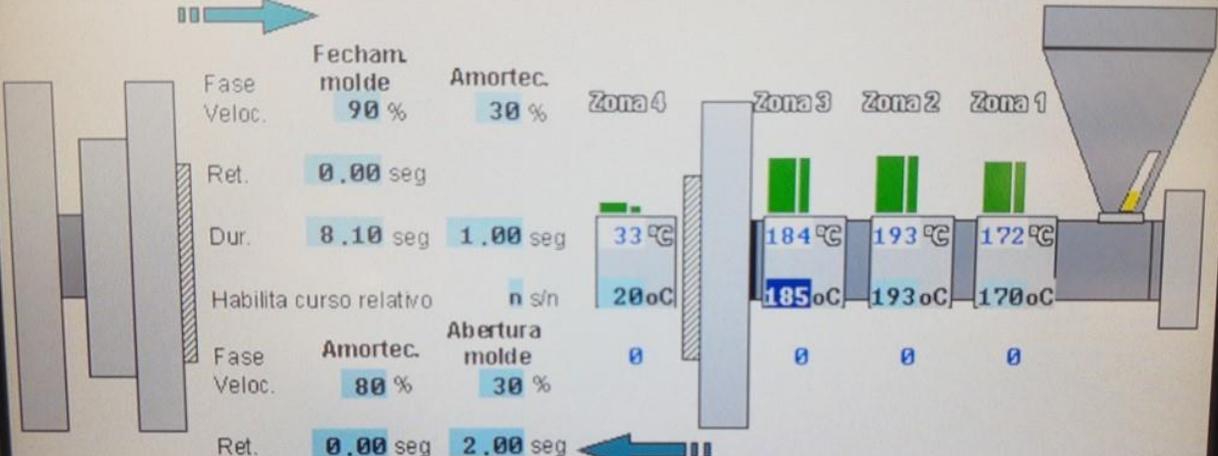
Anexo C (Datasheet PP/40% m/m).

			
Hostacom R 135 Compounded Polyolefin			
Product Description			
R 135 is a 40% talc filled polypropylene homopolymer, designed for injection molding process. This grade has high stiffness, good impact resistance and is thermal stabilized, being used in automotive applications. This grade is available in black pellet form.			
Product Characteristics			
Status	Commercial: Active		
Test Method Used	ISO		
Availability	Brazil		
Features	High stiffness, good impact resistance, thermal stabilized		
Typical Customer Applications	Automotive components		
Typical Properties	Method	Value	Unit
Physical			
Specific Gravity	ISO 1183	1.23	g/cm ³
Melt Flow Rate (230°C/2.16Kg)	ISO 1133	4.0 – 9.0	g/10 min
Ash Content	ISO 3451-1	37.0 – 41.0	%
Mechanical			
Flexural Modulus	ISO 178	4450	MPa
Tensile Strength at Yield	ISO 527-1, -2	30.0	MPa
Ultimate Elongation	ISO 527-1, -2	4.0	%
Impact			
Izod, Notched (23 °C, Type 4, Notch A)	ISO 180	26.0	J/m
Thermal			
H.D.T. (1,82 MPa)	ISO 75-2A	85.0	°C
H.D.T. (0,45 MPa)	ISO 75-2B	130.0	°C
Vicat (50N / Method B)	ISO 306	90.0	°C
Heat Aging Performance (150°C)	ISO 4577	760	hours

Anexo D (Parâmetros de Injeção).

Fechamento/Aquecimento



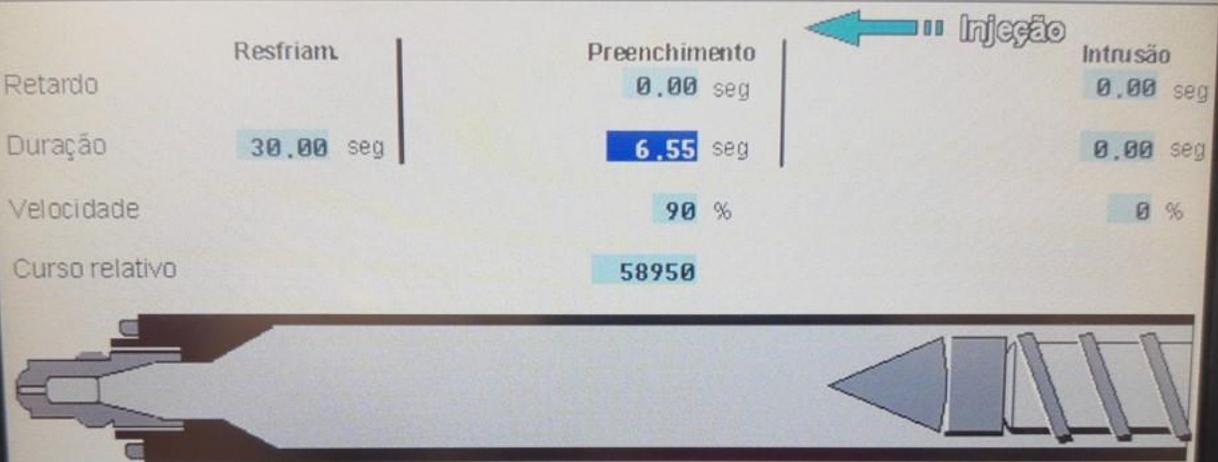


Fecham. molde		Amortec.		Zona			
Fase Veloc.	90 %		30 %	Zona 4	Zona 3	Zona 2	Zona 1
Ret.	0.00 seg			33 °C	184 °C	193 °C	172 °C
Dur.	8.10 seg		1.00 seg	20 °C	185 °C	193 °C	170 °C
Habilita curso relativo			n s/n				
Abertura molde		Amortec.					
Fase Veloc.	80 %		30 %	0	0	0	0
Ret.	0.00 seg		2.00 seg				

Pré - Avançamento		Aquecimento	
Número de pré-avanços	0 qtd	Liga aquecimento	s s/n
Duração pré-avanço	0.00 seg	Banda de alarme	30 °C
		Banda de resfriamento	30 °C

Injeção/Dosagem





	Resfriam.	Preenchimento	Injeção	Intrusão
Retardo		0.00 seg		0.00 seg
Duração	30.00 seg	6.55 seg		0.00 seg
Velocidade		90 %		0 %
Curso relativo		58950		

Dosagem	
Retardo de dosagem	0.38 seg
Velocidade de recuo da rosca	30 %
Velocidade de giro da rosca	65 %