



**FLÁVIA APARECIDA MARIANA MEDEIROS**

**ESTUDO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE  
HÍBRIDO DE POLIPROPILENO RECICLADO EM  
SUBSTITUIÇÃO AO COMPÓSITO DE POLIPROPILENO  
VIRGEM**

**LAVRAS – MG**

**2021**

**FLÁVIA APARECIDA MARIANA MEDEIROS**

**ESTUDO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE HÍBRIDO DE  
POLIPROPILENO RECICLADO EM SUBSTITUIÇÃO AO COMPÓSITO DE  
POLIPROPILENO VIRGEM**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Materiais, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Camila Silva Brey Gil  
Orientadora

**LAVRAS – MG**

**2021**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Medeiros, Flávia Aparecida Mariana.

Estudo de propriedades físicas e mecânicas de híbrido de polipropileno reciclado em substituição ao compósito de polipropileno virgem / Flávia Aparecida Mariana Medeiros. - 2021.  
32 p.

Orientador(a): Camila Silva Brey Gil.

Monografia (graduação) - Universidade Federal de Lavras,  
2021.

Bibliografia.

1. Economia Circular. 2. Polipropileno Pós-Consumo. 3.  
Materiais Compósitos. I. Gil, Camila Silva Brey.

**FLÁVIA APARECIDA MARIANA MEDEIROS**

**ESTUDO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE HÍBRIDO DE  
POLIPROPILENO RECICLADO EM SUBSTITUIÇÃO AO COMPÓSITO DE  
POLIPROPILENO VIRGEM**

**STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF RECYCLED  
POLYPROPYLENE HYBRID IN REPLACEMENT OF VIRGIN POLYPROPYLENE  
COMPOSITE**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Materiais, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 18 de novembro de 2021.

Dr.<sup>a</sup>. Camila Silva Brey Gil UFLA

Dr. Alfredo Rodrigues de Sena Neto UFLA

Dr.<sup>a</sup>. Tatiane Michele Popiolski UFLA

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Camila Silva Brey Gil

Orientadora

**LAVRAS – MG**

**2021**

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por me dar força e direcionamento.

À minha mãe, por sonhar os meus sonhos comigo e acreditar em mim quando nem eu mesma acreditava.

Ao meu pai, por ser meu exemplo de honestidade e perseverança.

Às minhas irmãs, Carla e Mariana, por todo incentivo e cumplicidade.

À Mila, por ter sido minha família em Lavras e por partilhar das minhas alegrias e angústias, me ajudando a sempre seguir em frente.

À Ivana, Letícia, Lígia, Francine e Mariana, pelo acolhimento e momentos de troca e risadas.

À Stéfani e ao Jefferson, pela amizade e companheirismo de anos.

À Daniele, por se fazer sempre presente.

Ao Marco Aurélio e Ana Carolina, por estarem comigo durante toda a graduação.

À Cibele, por todo suporte e amizade nesse último ano.

À UFLA, por proporcionar os melhores anos da minha vida.

Aos professores da Engenharia de Materiais, em especial à minha orientadora Camila, por toda dedicação e por compartilharem comigo seus conhecimentos.

À Transforma Júnior, pelas amizades e experiências que muito me acrescentaram para chegar onde estou.

À Borealis, pela oportunidade de me desenvolver profissionalmente e conhecer tantas pessoas incríveis.

À Mariana, Tsuchida, Claudio e Chiquetto, pelos ensinamentos durante o estágio e por serem meus exemplos de profissionais.

Ao Wellington, por todos os conselhos e cada palavra de incentivo.

Muito obrigada!

## RESUMO

O uso de resina pós-consumo (PCR) fabricada com insumo reciclado de origem controlada é um diferencial uma vez que sua utilização ajuda a tirar do ambiente o plástico descartado, que ganha uma nova função, sem comprometer a eficiência da peça. Dessa forma, gera-se Economia Circular e “vende-se” sustentabilidade, algo desejável entre as montadoras. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo a substituição de um composto de matriz de polipropileno virgem e talco (PPT), material mais simples que é comercializado com uma margem de lucro pequena, por um composto híbrido de matriz polimérica, mais especificamente polipropileno virgem e polipropileno reciclado obtido de resina pós-consumo, reforçado com baixo teor de fibra de vidro e talco (PPH). Para caracterização, foram realizados ensaios de densidade, tração, flexão, impacto e HDT A e B, todos seguindo norma ISO. Dentre as propriedades caracterizadas, é importante destacar a densidade, onde houve uma redução de aproximadamente 6,8% comparada ao PPT. Tal redução impacta diretamente o custo do produto e faz com que a peça final tenha menor peso, contribuindo para a diminuição da emissão de gás carbônico e consumo de combustível. Uma vez que o material possui alto HDT, conclui-se que este possui temperatura de trabalho elevada possibilitando seu uso em peças de carcaças de sistema de ventilação e carcaças de filtro de ar, aplicações usuais do PPT. Em relação ao desempenho mecânico, o PPH possui rigidez semelhante, resistência ao impacto superior e maiores resistências à tração e flexão comparado ao PPT. Diante do exposto, o composto híbrido atendeu o objetivo de substituição ao produto com talco, uma vez que atingiu performance semelhante ou superior dependendo da propriedade e para a aplicação desejada cumpre aos requisitos e mostra-se viável sustentável e economicamente.

Palavras-chave: Economia Circular. Polipropileno Pós-Consumo. Compósito. Híbrido.

## ABSTRACT

The use of post-consumer resin (PCR) manufactured with recycled input of controlled origin is a differential since its use helps to remove the discarded plastic environment, which gains a new function, without compromising the efficiency of the part. In this way, Circular Economy is generated and sustainability is “sold”, something desirable among automakers. In this context, this project aimed to replace a composite of virgin polypropylene matrix and 20% (m/m) of talc (PPT), simpler material that is marketed with a small profit margin, by a hybrid composite of polymer matrix, more specifically virgin polypropylene and recycled polypropylene obtained from post-consumer resin, reinforced with a low content of glass fiber and talc (PPH). For characterization, density, traction, flexural, impact and HDT A and B tests were carried out, all following the ISO standard. Among the properties characterized, it is important to highlight the density, which had a reduction of approximately 6,8% compared to PPT. This reduction impacts directly the cost of the product and makes the final part have less weight, contributing to a reduction in carbon dioxide emissions and fuel consumption. Once the material has high HDT, it is concluded that it has a high working temperature enabling its use in parts of ventilation system housings and air filter housings, common applications of the PPT. Regarding mechanical performance, PPH has similar stiffness, superior impact strength and greater tensile and flexural strength compared to PPT. Given the above, the hybrid compound met the objective of replacing product with talc, as it achieved similar or higher performance depending on the property and for the desired application, it meets the requirements and proves to be sustainable viable and economically.

Keywords: Circular Economy. Post-Consumer Polypropylene. Composite. Hybrid.

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Revisão da literatura.....</b>	<b>3</b>
2.1. Economia Circular.....	3
2.2. Resina Pós-Consumo.....	4
2.3. Polipropileno.....	5
2.4. Materiais Compósitos.....	6
2.5. Materiais Híbridos.....	8
<b>3. Material e métodos.....</b>	<b>10</b>
3.1. Materiais.....	10
3.2. Preparo dos compósitos.....	10
3.3. Densidade.....	10
3.4. Flexão.....	10
3.5. Tração.....	11
3.6. Impacto.....	11
3.7. Temperatura de Deflexão Térmica (HDT).....	12
<b>4. Resultados e discussão.....</b>	<b>14</b>
4.1. Densidade.....	14
4.2. Flexão.....	15
4.3. Tração.....	16
4.4. Impacto.....	17
4.5. Temperatura de Deflexão Térmica.....	18
<b>5. Conclusão.....</b>	<b>20</b>
<b>6. Referências.....</b>	<b>21</b>

## 1. Introdução

A necessidade de melhorar o desempenho dos materiais em termos de propriedades e redução de custos, aliada à sustentabilidade para fazer frente ao rápido crescimento da indústria, tem levado ao desenvolvimento de materiais compósitos que permitem uma ampla variedade de aplicações, incluindo os mercados aeroespacial, balística, construção civil, náutico, de infraestrutura, transporte, bens de consumo, automotivo, artigos esportivos, entre outros (RAJAK et al, 2019).

Os materiais compósitos podem ser definidos como a combinação de dois ou mais materiais que propiciam ao produto final propriedades superiores às de cada um dos seus materiais constituintes e são formados por duas fases diferentes quanto às suas composições químicas e/ou morfológicas, a matriz e a fase dispersa (KARTHI *et al*, 2020). A matriz garante coesão e orientação do reforço (fase dispersa), além de possibilitar a transmissão das tensões à que o compósito está sujeito ao reforço. Os materiais compósitos apresentam inúmeras vantagens quando comparados aos materiais tradicionais e suas propriedades são influenciadas por alguns parâmetros, dentre eles a forma e a proporção da fase dispersa, a qualidade da interface matriz/reforço, processo de produção e natureza da matriz e do reforço (HSISSOU *et al.*, 2021).

Os materiais híbridos são compostos resultantes da combinação de dois ou mais componentes (geralmente orgânicos e inorgânicos) na fase dispersa atendendo de maneira satisfatória a um propósito específico de engenharia. A junção de materiais com propriedades físicas e químicas distintas confere, além de permitir que as propriedades dos componentes brutos sejam fundidos, novos efeitos sinérgicos decorrentes da criação de interfaces. Em consequência das suas propriedades notáveis, os materiais híbridos têm sido cada vez mais difundidos e podem ser usados para aplicações em diversos setores, como o automotivo, aeroespacial, construção, biomédico e indústria de revestimento (BEYOU; LAMI, 2021), com destaque para o mercado de materiais híbridos com matriz polimérica voltados para o setor automotivo, que foi avaliado em US \$ 6,40 bilhões em 2016 e tem perspectiva de crescimento para US \$ 11,62 bilhões, até o ano de 2025 (DAS *et al*, 2021).

Em geral, os materiais poliméricos apresentam alta resistência à degradação, o que gera impactos ambientais. No mundo, em 2015, foram produzidos cerca de 6300 milhões de toneladas métricas de resíduos plásticos, dos quais apenas 9% foram reciclados (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017). Um dos polímeros mais utilizados na indústria de manufatura é o polipropileno (PP) e, por ser utilizado em produtos com vida útil curta, é responsável por parte

significativa dos resíduos plásticos pós-consumo (PCR) (GALL; STEINBICHLER; LANG, 2021).

As economias seguem o modelo linear desde a revolução industrial, modelo este que considera os recursos como abundantes, fáceis de se obter e disponíveis (GEN; LOZANO, 2020). A economia circular emerge como um caminho para a substituição da economia linear com o intuito de eliminar desperdícios e aumentar a vida útil dos materiais, produtos e componentes em circulação sem a ocorrência de perda de valor. Nesse contexto, pode-se dizer que a economia circular é um sistema econômico fundamentado em modelos de negócios que substituem o fim da vida útil dos materiais por reciclagem, redução, reutilização e recuperação (MACHADO; MORIOKA, 2021).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um material híbrido de matriz polimérica, mais especificamente polipropileno virgem e polipropileno reciclado obtido de resina pós-consumo, reforçado com fibra de vidro e talco (PPH) em substituição à um compósito de matriz de polipropileno virgem e talco (PPT), amplamente utilizado na indústria automotiva.

## 2. Revisão de literatura

### 2.1. Economia Circular

Mesmo com o empenho em se discutir sobre questões ecológicas há alguns anos, as pressões sobre o meio ambiente ainda têm impacto crescente e, em um sistema com capacidade limitada de absorção de resíduos e recursos finitos, torna-se insustentável o crescimento econômico pautado em um modelo de produção linear. Nesse cenário, a alternativa considerada mais viável e que pode gerar benefícios ecológicos e econômicos é a economia circular (EC) (SUAREZ-EIROA *et al*, 2018).

O termo economia circular engloba todas as atividades que reutilizam, reduzem e reciclam materiais nos processos de produção, distribuição e consumo (BLOMSMA; BRENNAN, 2017) e estabelece a continuidade do valor dos recursos extraídos e produzidos por meio de cadeias produtivas integradas. Com intuito de aumentar a eficiência do uso destes recursos, especialmente de resíduos urbanos e industriais, e assim atingir uma melhor harmonia entre meio ambiente, economia e sociedade, o destino final de um produto se torna parte do processo de design de sistemas e produtos e não mais uma questão de gerenciamento de resíduos (OLIVEIRA; SILVA; MOREIRA, 2019).

Enquanto os modelos de economia linear tendem a evitar a utilização irresponsável de recursos limitados e sugerem um processo incompleto no qual a indústria fornece os materiais processados e coleta, depois de usados, os seus resíduos, os modelos de economia circular permitem a reutilização de recursos, além de prolongar a utilização do produto pelo maior tempo possível e a sua reciclagem no final de sua vida útil, proporcionando um sistema mais sustentável ambiental e economicamente (YILDIDIZBASI, 2021).

Para alcançar uma EC, as organizações estipularam algumas metas, dentre elas reciclagem, recuperação, redução, eficiência e design, onde todas estão interconectadas como mostra a figura a seguir. Um exemplo de interconexão que pode ser citado é a relação direta da meta de redução de resíduos com a eficiência do material, pois quanto maior o tempo de uso de um produto, menos resíduo é descartado (MORSELETTI, 2019).

Figura 1 - Principais metas de EC existentes por áreas de aplicação.



Fonte: Adaptado de MORSELETTO (2019).

A economia circular sustentável (SCE), como é chamada a integração entre EC e sustentabilidade, pode promover vários impactos benéficos, como eficiência de recursos, circularidade no nível macro, crescimento econômico contínuo e recuperação de energia (KAYIKCI et al, 2021). Diante disso, têm-se o 6 Rs: reciclar, reutilizar, reduzir, recusar, repensar e reparar. No contexto automotivo, reciclar significa reprocessar um material para uso em um novo produto; reutilizar refere-se à utilização de um material que chegou ao fim de sua vida útil, sem reprocessamento, para uma nova aplicação; reduzir diz respeito à diminuição da quantidade de energia e material usados durante a utilização do produto; recusa se refere à não aceitação de um material caso este não seja necessário ou se for social ou ambientalmente insustentável; repensar significa otimizar o design da peça; reparar refere-se à correções imediatas de qualquer falha que ocorra na estrutura do processo (YADAV et al, 2020).

## 2.2. Resina Pós-Consumo

De maneira geral, os materiais poliméricos possuem elevada resistência à degradação, o que gera impactos ambientais. Em 2015, foram produzidos aproximadamente 6300 milhões de toneladas métricas de resíduos plásticos, dos quais apenas 9% foram reciclados e, do montante restante, 12% foram incinerados e 79% ficaram acumulados em aterros ou no ambiente natural. Sendo assim, estima-se que cerca de 12000 milhões de toneladas métricas de resíduos plásticos serão alocados em aterros ou na natureza até 2050 caso não haja mudanças na produção e gestão de resíduos (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Por isso, é de extrema importância o incentivo e a prática do reaproveitamento de resíduos de polímeros pós-consumo, tanto no que se refere à redução dos impactos ambientais negativos, como pelo fato de permitir a valorização do material a ser descartado (LUNA et al, 2020), uma vez que a reciclagem gera uma economia de custo de 10% a 50% em relação ao material virgem, além de promover redução de emissão de gases de efeito estufa (BIRON, 2020).

Um dos polímeros amplamente utilizados na indústria de manufatura é o polipropileno (PP) e por ser usado em produtos com vida útil curta, o PP é responsável por uma parcela significativa dos resíduos plásticos pós-consumo (GALL; STEINBICHLER; LANG, 2021). No Brasil, aproximadamente 8,2% do PP pós-consumo é reciclado, sendo peletizado através de reciclagem mecânica e, em seguida, utilizado na produção de componentes automotivos, embalagens e outros produtos reciclados (BARBOSA; PIAIA; CENI, 2017).

O emprego de resinas pós-consumo (PCR) vem sendo pesquisado pela comunidade científica com intuito de avaliar a capacidade tecnológica da substituição parcial ou total do PP virgem pelo reciclado. Barbosa, Piaia e Ceni (2017) avaliaram as propriedades de tração e impacto do polipropileno virgem, polipropileno reciclado e misturas com proporções diferentes de ambos, concluindo-se que o PP reciclado pode substituir o PP virgem em aplicações que exijam boa performance de tração, já que os resultados para esta propriedade indicaram que atingem resultados semelhantes, mas não para aplicações onde é necessário bom desempenho de impacto, pois a energia absorvida pela resina reciclada foi menor do que a virgem. De acordo com Ashton et al. (2015), a redução de algumas propriedades dos PCR estão atreladas, em alguns casos, à incerteza da composição da resina, uma vez que é oriunda de variadas fontes secundárias.

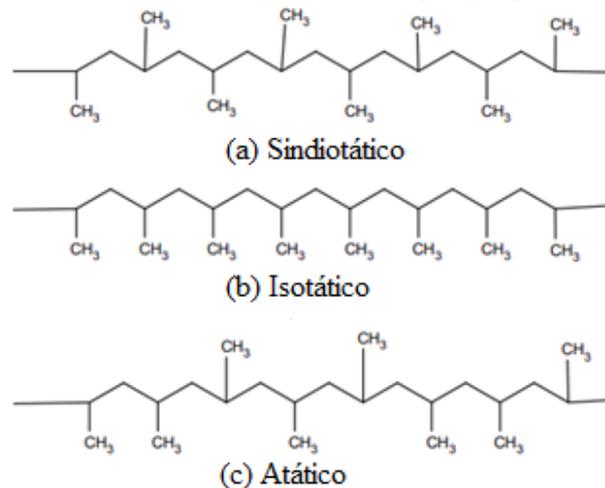
### **2.3. Polipropileno**

O polímero termoplástico com maior consumo no Brasil é o polipropileno (PP), com 20,3% do consumo nacional (ABIPLAST, 2018). O polipropileno possui fórmula molecular  $(C_3H_6)_n$ , é um termoplástico polimerizado a partir do propeno e é uma das poliolefinas mais relevantes disponíveis no mercado. Apresenta um bom equilíbrio entre suas propriedades mecânicas, elétricas, químicas e térmicas e é largamente usado na produção de embalagens, brinquedos, tanques de armazenamento, revestimentos, sacos, copos, garrafas, entre outros (AUD et al, 2021). Pode também ser utilizado para aplicações que exigem melhor desempenho de suas propriedades quando reforçado, assim formando um compósito.

O polipropileno é um polímero termoplástico por suas cadeias serem do tipo linear ou ramificada, mas com a ausência de ligações cruzadas (CATTO *et al.*, 2019) e foi sintetizado pela primeira vez no início da década de 1950 na Itália a partir dos catalisadores desenvolvidos na Alemanha por Karl Ziegler para polimerização de olefinas. Inicialmente, foi produzido o polipropileno isotático e o seu interesse comercial foi tão significativo que em 1957 iniciou-se a produção em larga escala (MAHMOUD, 2018).

Na Figura 2 a seguir é mostrado as três possíveis configurações do polipropileno considerando-se a disposição do carbono assimétrico na molécula do monômero, onde (a) configura o sindiotático, pois o grupo metil está organizado cada um de um lado da cadeia; (b) isotático, onde o grupo metil é alinhado no mesmo lado da cadeia; (c) atático, ou seja, os grupos metil são posicionados aleatoriamente (TZOUNIS *et al.*, 2018). Os polímeros que possuem regularidade, ou seja, os isotáticos e os sindiotáticos, apresentam cristalinidade e os atáticos são amorfos, sendo que a maior parte dos polipropilenos comerciais tem cristalinidade que varia entre 40% e 60%. O PP perfeitamente isotático possui ponto de fusão de 171°C, o PP sindiotático com 30% de cristalinidade possui 130°C de ponto de fusão e o PP isotático comercial tem ponto de fusão entre 160°C e 166°C (SHUBHRA; ALAM; QUAIYYUM, 2011).

Figura 2 – Possíveis configurações do polipropileno.



Fonte: CANEVAROLLO (2006).

#### 2.4. Materiais Compósitos

A necessidade de melhoria da performance dos materiais em termos de densidade, rigidez, resistência e da redução de custo atrelado à sustentabilidade para atender ao rápido crescimento das indústrias, acarretou o desenvolvimento dos materiais compósitos que viabilizam uma variedade de aplicações (RAJAK *et al.*, 2019).

Segundo Callister (2008), compósito é “qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades”, sendo que tais fases são chamadas de matriz e fase dispersa. A matriz é contínua e envolve a fase dispersa, protegendo-a de efeitos ambientais (temperatura, luz, água, entre outros), além de ser responsável pela forma do composto e aparência superficial. A fase dispersa carrega grande parte das cargas estruturais, por isso influencia diretamente na rigidez e resistência (TIMBÓ *et al*, 2020).

Dessa forma, as propriedades destes materiais são definidas pelas quantidades relativas e propriedades das suas fases e da geometria da fase dispersa, como o tamanho, formato, orientação e distribuição de suas partículas ou fibras (CALLISTER, 2008).

Na Figura 3 está representada a classificação dos compósitos: reforçados com partículas, onde a fase dispersa é equiaxial, ou seja, as partículas possuem as mesmas dimensões em todas as direções; reforçados com fibras, caracterizados pela fase dispersa em geometria de fibra, onde há uma grande razão entre o comprimento e o diâmetro; e os estruturais, constituídos tanto por materiais homogêneos quanto por compósitos, sendo os laminados e os painéis-sanduíche os mais comuns (PRASANNA *et al*, 2019).



Fonte: Adaptado de HASSANI; BOUHFID; QAISS (2021).

Os materiais compósitos apresentam várias vantagens quando comparados aos materiais tradicionais, como altas razões resistência/ peso e rigidez/ peso, que permitem seu uso em diversas aplicações, bom comportamento à fadiga, resistência à corrosão e baixa expansão térmica, que prolongam o ciclo de vida do produto (ZAGHLOUL *et al*, 2021).

As aplicações dos compósitos incluem os mercados aeroespacial, balística, construção civil, náutico, de infraestrutura, transporte, bens de consumo, automotivo, artigos esportivos, entre outros. Na indústria automotiva, setor com amplo uso destes materiais, são utilizados em

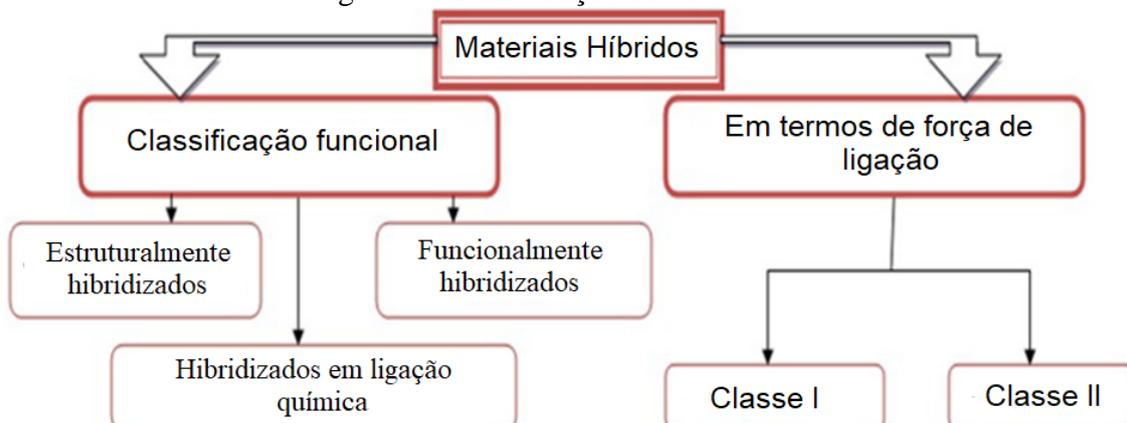
estruturas externas, como painéis e parte inferior da carroceria, em partes internas (painéis de instrumentos, cabine, assentos, pedal, etc.), componentes elétricos e eletrônicos, no motor, no compartimento de combustível e em componentes mecânicos, entre eles sistemas de exaustão, suspensões e eixos (RAJAK *et al*, 2019).

## 2.5. Materiais Híbridos

Os materiais híbridos são compósitos obtidos utilizando dois ou mais tipos de reforços diferentes em uma matriz, sendo que tais reforços podem ter formas e tamanhos distintos. Esses compostos combinam as propriedades da matriz e dos enchimentos de maneira sinérgica e, por isso, oferecem a possibilidade de melhoria de performance não atingida com apenas um reforço. Desse modo, pode-se dizer que a hibridização pode compensar desvantagens de um composto com a incorporação de mais um reforço (ASHORI, 2017).

Estes materiais podem ser classificados com base em dois diferentes conceitos: quanto à classificação funcional e em termos de força de ligação, como esquematizado na Figura 4. Quando classificados funcionalmente, se dividem em materiais estruturalmente hibridizados, materiais hibridizados em ligação química e funcionalmente hibridizados. Quando classificados considerando-se as forças de ligação, são categorizados em Classe I, que essencialmente possuem interações de van der Waals, eletrostáticas ou ligações de hidrogênio fracas entre a espécie orgânica e a inorgânica, e Classe II, onde as partes orgânica e inorgânica são constituídas por ligações covalentes ou iônicas. No entanto, também há materiais que apresentam características da Classe I e II (SINGH; VERMA; KUMAR; 2019).

Figura 4 - Classificação de materiais híbridos.



Fonte: Adaptado de SINGH; VERMA; KUMAR (2019).

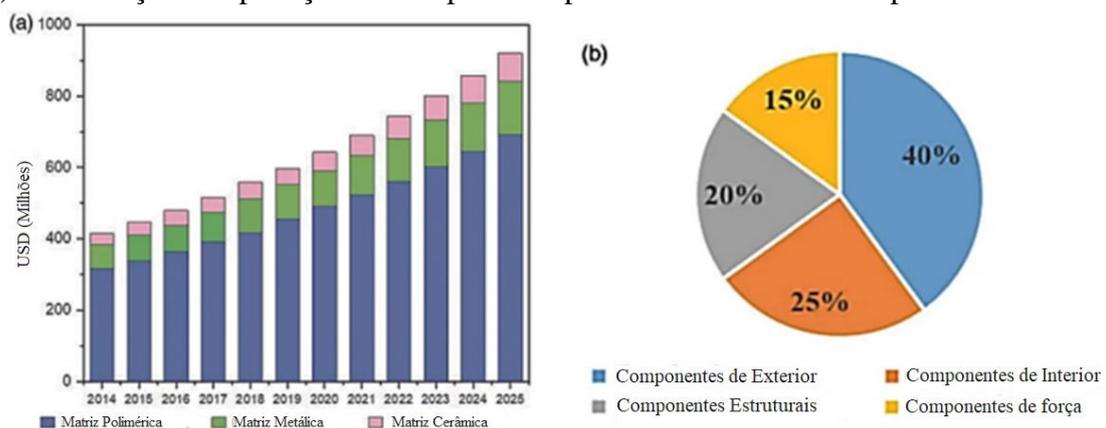
A combinação de cargas minerais e fibra de vidro, como exemplo de compósito híbrido, traz algumas vantagens, como redução de custo e melhoria em propriedades mecânicas. Younis,

Olewi e Mohammed (2018), estudaram o efeito da inserção de nanopartículas de sílica (1%, 3% e 5%) como reforço para uma matriz de poliéster insaturado com 4% de fibra de vidro (picada e tecido) e os resultados mostraram que a amostra com tecido de fibra de vidro e 5% de nanopartículas de sílica apresentou propriedades mecânicas superiores quando comparada às demais amostras com aumento nos valores de resistência à tração, resistência ao impacto, tenacidade à fratura e dureza Shore D.

A vantagem econômica se dá pela substituição total ou parcial de uma matéria-prima, da matriz ou do reforço, pela carga mineral, que é um componente mais barato se comparado a outros. Já a variação de proporções de peso de cada reforço confere ao produto uma vasta combinação de propriedades mecânicas e a substituição de reforços fibrosos de alta razão de aspecto por um enchimento mineral lamelar reduz a anisotropia gerando melhoria nas propriedades mecânicas do compósito (KURAM, 2019).

Dentre as possíveis aplicações para os materiais híbridos, principalmente dos híbridos de matriz polimérica, destaca-se o setor automotivo, que em 2016 foi avaliado em US \$ 6,40 bilhões e tem perspectiva de crescimento para US \$ 11,62 bilhões, expansão de 6,8% na Taxa de Crescimento Anual Composta (CAGR), até o ano de 2025 (DAS *et al*, 2021). Na Figura 5 (a), é possível visualizar esta estimativa de crescimento para a indústria automotiva e, em (b), a distribuição de aplicação de composto de polímero híbrido em componentes automotivos.

Figura 5 - (a) Projeção de mercado para materiais híbridos na indústria automotiva até 2025. (b) Distribuição de aplicação de composto de polímero híbrido em componentes automotivos.



Fonte: Adaptado de RAVISHANKAR, NAYAK, KADER (2019).

### **3. Material e métodos**

#### **3.1. Materiais**

Para realização deste trabalho foi utilizado polipropileno virgem fornecido pela Braskem, polipropileno reciclado fornecido pela Polibalbino Termoplásticos, talco adquirido da Xilolite S.A. e fibra de vidro da Owens Corning. Os aditivos e pigmentos usados para ambos os materiais, PPT e PPH, não podem ser descritos por questões de confidencialidade.

#### **3.2. Preparo dos compósitos**

Os compósitos foram produzidos em escala laboratorial por meio de extrusão em extrusora dupla rosca da marca Coperion, modelo ZSK 26Mc, e em seguida foi feito a injeção dos corpos de prova em injetora da marca Krauss Maffei, modelo 110-390 C1.

Para produção do compósito PPT, foi utilizado polipropileno virgem, talco, aditivos e pigmentos. Os parâmetros de extrusão foram 45 kg/h de vazão, 900 rpm, energia específica de 0,297 Kwh/kg e torque de 50,38%. O material compósito PPH foi produzido com polipropileno virgem, polipropileno reciclado, fibra de vidro, talco, aditivos e pigmentos. O perfil de rosca usado foi o de fibra de vidro e teve-se como parâmetros de extrusão 60 kg/h de vazão, 700 rpm, energia específica de 0,21 Kwh/kg e torque de 65%. A composição dos materiais produzidos foram omitidas por questões de confidencialidade.

Após extrusão dos compósitos, estes foram peletizados. Em seguida, injetados nos formatos dos corpos de prova e acondicionados à temperatura ambiente por 96h para realização dos testes.

#### **3.3. Densidade**

A caracterização física foi obtida a partir do ensaio de densidade conforme norma ISO 1183-1 (ISO, 2019) que utiliza o método de Arquimedes para determinação desta propriedade. Para isso, foi usado um corpo de prova cortado de forma livre e pesado em balança de densidade da marca Sartorius, modelo LA 230S. O pedaço cortado foi então imerso no álcool isopropílico contido em um béquer e, pelo aumento do volume, a balança gerou o valor da densidade. Este procedimento foi realizado em triplicata para cada material (PPT e PPH).

#### **3.4. Flexão**

Para determinação do módulo e resistência à flexão, foi realizado o ensaio de flexão de três pontos seguindo a norma ISO 178 (ISO, 2019), método de teste para definir as propriedades de flexão de plásticos rígidos e semirrígidos. Usou-se uma máquina universal de ensaios da

marca Instron®, modelo 5900R, com velocidade de deslocamento das garras de 2mm/min, distância entre os apoios de 64mm e à temperatura controlada de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ . Os corpos de prova foram injetados em formato retangular, conforme mostrado na Figura 6, com 80mm de comprimento, 10mm de largura e 4mm de espessura e realizado o ensaio em 5 corpos de prova tanto para ambas as amostras.

Figura 6 - Corpo de prova de flexão.

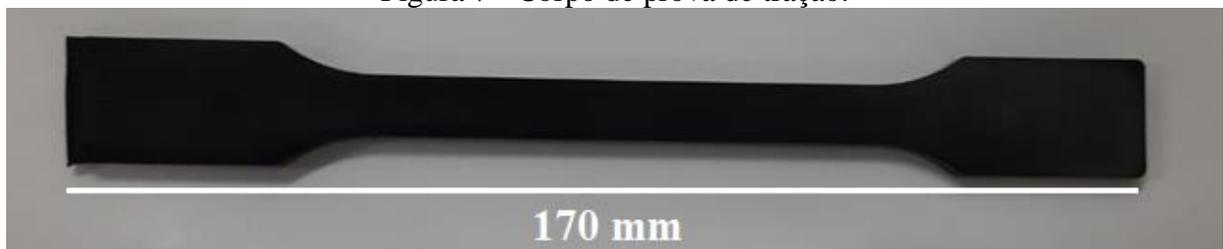


Fonte: Do autor (2021).

### 3.5. Tração

No ensaio de tração foram testados 5 corpos de prova para cada material de acordo com a norma ISO 527-2 (ISO, 2012), método para determinação das propriedades de tração de plásticos moldados e extrusados. Para tal, utilizou-se uma máquina de ensaios universal da marca Instron®, modelo 5900R usando-se temperatura controlada de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e velocidades de 1mm/min para obtenção do módulo e 50mm/min para as demais propriedades, com e sem extensômetro, respectivamente. Os corpos de prova foram produzidos considerando tipo 1A (170mm de comprimento, 10mm de largura e 4mm de espessura) em formato de gravata, como visto na Figura 7.

Figura 7 - Corpo de prova de tração.



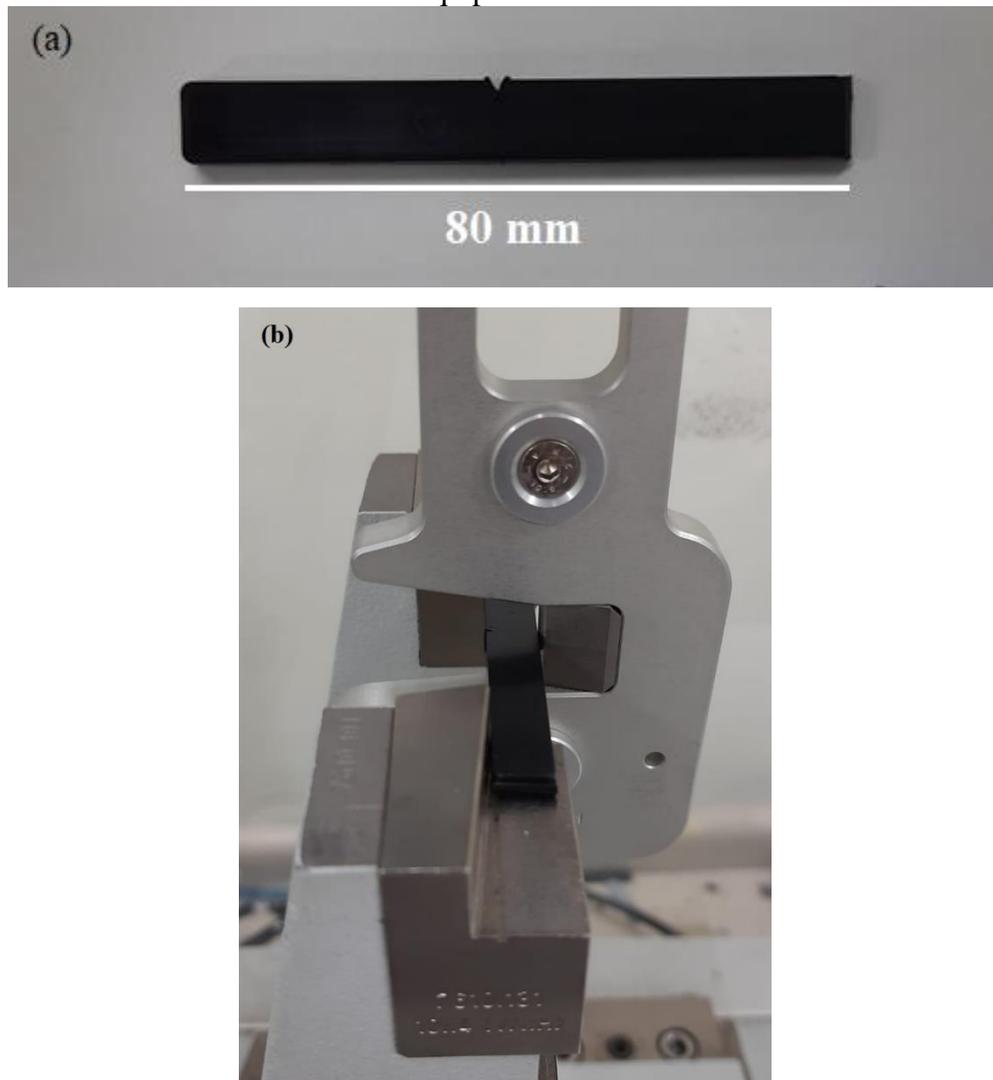
Fonte: Do autor (2021).

### 3.6. Impacto

Para determinação do impacto seguiu-se norma ISO 179-1 (ISO, 2010) que estabelece parâmetros para ensaio de resistência ao impacto Charpy através da medição de energia cinética

armazenada em pêndulo e liberada ao se chocar com o corpo de prova. O teste foi realizado em equipamento da marca Instron®, modelo CEAST 9050 e 10 corpos de prova, representados na Figura 8(a), foram testados para cada material com dimensões de 80mm de comprimento, 10mm de largura e 4mm de espessura todos entalhados. Os corpos de prova foram posicionados no equipamento horizontalmente, como mostrado na Figura 8(b), e o teste realizado à temperatura controlada de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Figura 8 - (a) Corpo de prova de impacto. (b) Posicionamento do corpo de prova no equipamento.



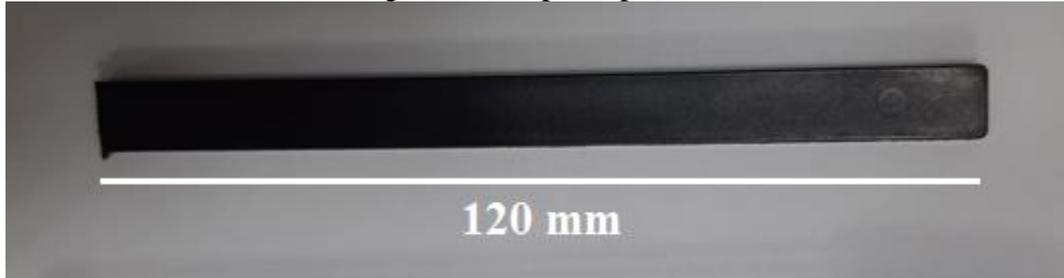
Fonte: Do autor (2021).

### 3.7. Temperatura de Deflexão Térmica (HDT)

Para definição da temperatura máxima de trabalho em que o material pode ser submetido sob a aplicação, fez-se os ensaios de HDT A e HDT B usando uma tensão de flexão de 1,80MPa

e 0,45MPa, respectivamente, de acordo com a norma ISO 75-2 (ISO, 2013). Foram usados 3 corpos de prova em formato retangular com 120mm de comprimento, 10mm de largura e 4mm de espessura tanto para o PPT quanto para o híbrido para cada condição de ensaio (A e B) conforme figura abaixo. O equipamento utilizado é da marca Instron®, modelo CEAST HV6 e os corpos de prova foram posicionados com base edgewise.

Figura 9 - Corpo de prova de HDT.



Fonte: Do autor (2021).

## 4. Resultados e discussão

### 4.1. Densidade

Os valores obtidos no ensaio de densidade estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Média e desvio padrão dos ensaios de densidade.

	PPT	PPH
<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,046 ± 0,002	0,975 ± 0,013

Fonte: Do autor (2021).

É possível observar que o PPT possui densidade de 1,046 g/cm<sup>3</sup> enquanto o PPH tem 0,975 g/cm<sup>3</sup>, o que representa uma redução de aproximadamente 6,8%. Esta diminuição está atrelada ao percentual de talco de cada material, consequentemente maior teor de resina, e ao uso de fibra de vidro no PPH. O talco possui densidade mais alta que a resina virgem, 2,75 g/cm<sup>3</sup> e 0,90 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, de acordo com dados disponibilizados pelos fornecedores. Dessa forma, quanto maior o teor de talco, menor percentual de resina e, assim, maior a densidade final do produto. No estudo realizado por Antunes, Sousa e Bettini (2013) verificou-se a influência da adição de diferentes concentrações (10, 20 e 30%) de talco nos compósitos de PP reforçados com fibra de coco, onde foi observado que a densidade dos materiais aumentou com o acréscimo da carga mineral. O PPH possui menor percentual de talco que o PPT, gerando assim, redução de densidade. A substituição de parte do talco do PPT por fibra de vidro, que possui menor densidade, 2,55 g/cm<sup>3</sup>, conforme especificado pelo fornecedor, no PPH, também auxiliou na redução de densidade.

A redução de densidade traz ganhos relevantes para a companhia, pois tem impacto direto no custo para se produzir o produto, uma vez que o custo final se relaciona com a densidade, como mostrado na Equação 1. Neste caso, como os produtos têm custo para produção muito próximos, é possível visualizar uma redução de 6,8%, aproximadamente, no custo final do PPH em relação ao PPT. Além disso, a redução de densidade vai ao encontro do viés de redução de peso das peças constituintes dos automóveis que, consequentemente, gera menor consumo de combustível e emissões de gases causadores de efeito estufa.

$$\text{Custo final} = \text{Custo do produto} \times \text{densidade} \quad (1)$$

#### 4.2. Flexão

A Tabela 2 apresenta a média dos resultados de módulo de flexão e resistência à flexão para ambos os compostos (PPT e PPH).

Tabela 2 – Média e desvio padrão dos ensaios de flexão.

	<b>PPT</b>	<b>PPH</b>
<b>Módulo de Flexão (MPa)</b>	2697,1 ± 22,2	2666,3 ± 55,0
<b>Resistência à Flexão (MPa)</b>	44,0 ± 0,1	64,3 ± 0,5

Fonte: Do autor (2021).

Pode-se verificar que o PPT apresenta módulo de flexão de 2697,1 MPa e o PPH, 2666,3 MPa. Dessa forma, pode-se dizer que os produtos possuem desempenho similar em relação à esta propriedade considerando-se os desvios padrões. O fato do PPT apresentar rigidez ligeiramente maior relaciona-se com o maior percentual de talco quando comparado ao PPH, isso porquê a presença da estrutura lamelar do talco contribui para a melhoria de propriedades de compósitos de PP, principalmente quanto à relação de rigidez-tenacidade. Sabendo-se disso, no PPH foi usado uma resina virgem com maior módulo para que esta propriedade atingisse valor próximo ao obtido no PPT. Além disso, o valor encontrado para o PPT está próximo ao indicado na literatura, como apresentado no estudo feito por Karian (2003), onde o composto de PP homopolímero com talco obteve módulo de flexão de 2900 MPa.

O que se refere à resistência à flexão, nota-se que o PPH possui melhor performance quando comparado ao PPT, mais especificamente 46%, pois o PPT apresentou resistência à flexão de 44,0 MPa e o PPH, 64,3 MPa. O aumento de resistência à flexão do PPH comparado ao PPT tem relação com o fato de que a fibra de vidro, presente no PPH, confere maior reforço mecânico que o talco. Tal comportamento também foi observado por Morelli, Pouzada e Sousa (2009) em um estudo sobre o efeito da hibridização de PP copolímero com fibra de vidro e talco, onde obtiveram melhor desempenho de resistência à flexão na amostra com 30% de fibra de vidro e 10% de talco (GF30T10), em relação aos materiais produzidos com menor teor de fibra e maior teor de talco. Este comportamento foi atribuído à maior eficácia de transferência de tensão da matriz polimérica para a fase dispersa quando se aumenta a proporção de fibra de vidro.

### 4.3. Tração

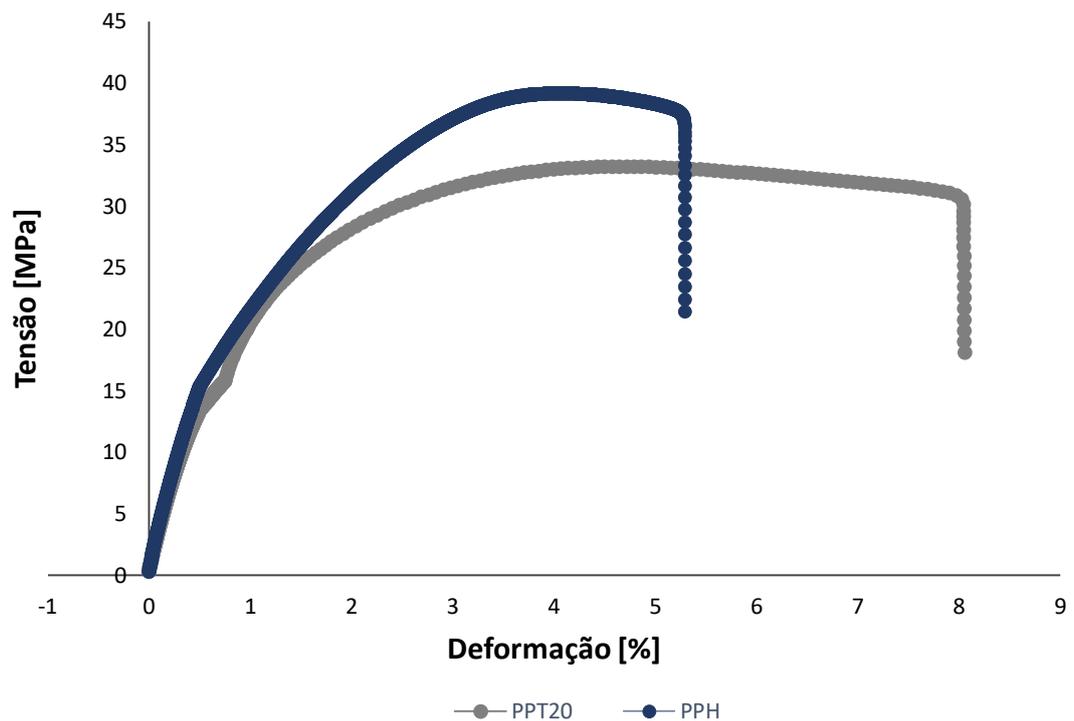
Os valores obtidos no ensaio de tração estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Média e desvio padrão dos ensaios de tração.

	PPT	PPH
<b>Módulo de Tração (MPa)</b>	2827 ± 95	2846 ± 87
<b>Tensão no Escoamento (MPa)</b>	33,0 ± 0,2	46,2 ± 0,1
<b>Tensão na Ruptura (MPa)</b>	29,8 ± 0,2	45,8 ± 0,1
<b>Deformação no Escoamento (%)</b>	5,22 ± 0,18	3,46 ± 0,07
<b>Deformação na Ruptura (%)</b>	9,35 ± 0,12	3,66 ± 0,08

Fonte: Do autor (2021).

Figura 10 – Gráfico Tensão x Deformação à 1mm/min.



Fonte: Do autor (2021).

A partir do ensaio de tração, determinou-se a rigidez dos materiais, expressa pelo módulo de tração. Observa-se que o PPH tem módulo muito próximo ao PPT, tendo desempenho satisfatório. Segundo Al-Maadeed e colaboradores (2012), que analisaram a performance de um composto híbrido com matriz de PP reciclado e variações de concentração

da fase dispersa constituída por farinha de madeira e fibra de vidro, os melhores resultados de módulo de tração foram obtidos quando houve a incorporação de fibra de vidro, pois estudos morfológicos indicaram que a fibra de vidro apresenta boa adesão ao PP reciclado auxiliando na melhoria das propriedades mecânicas.

Analisando as tensões no escoamento e na ruptura, nota-se que há um aumento significativo nos valores encontrados para o PPH comparado ao PPT. O PPT possui tensão no escoamento de 33,0 MPa enquanto o PPH tem 46,2 MPa, o que representa um acréscimo de 40% na tensão a partir da qual o material passa a ter deformação permanente. Em relação à tensão na ruptura, que indica a tensão máxima que o material suporta, o PPT obteve média de 29,8 MPa e o PPH, 45,8 MPa, caracterizando um aumento de 53,7%. Este resultado pode estar relacionado à variabilidade dos tipos de PP encontrados nos resíduos pós-consumo e à fibra de vidro utilizados no PPH. No estudo de Catto e colaboradores (2019), foi analisado o desempenho comparativo de compósitos com matrizes de PP virgem e de PCR onde a matriz de PP pós-consumo apresentou maior resistência à tração do que a de PP puro. Al-Maadeed e colaboradores (2012) verificaram que o PCR reforçado com farinha de madeira e com adição de apenas 5% de fibra de vidro conferiu um aumento na resistência à tração em cerca de 18% em relação ao reforço de farinha de madeira sozinho, o que corrobora com o presente trabalho. Além disso, pode-se dizer que os valores atingidos pelo PPH indicam que houve boa adesão entre a fibra e a matriz e esta é responsável pela transferência eficiente da resistência à tração da matriz para o reforço.

#### 4.4. Impacto

A Tabela 4 apresenta a média dos resultados de impacto Charpy com entalhe para o PPT e o PPH.

Tabela 4 – Média e desvio padrão dos ensaios de impacto.

	PPT	PPH
<b>Impacto Charpy com entalhe (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	2,78 ± 0,10 CB	3,46 ± 0,24 (9CB; 1HB)

Fonte: Do autor (2021).

Observa-se que o PPH possui maior resistência ao impacto (3,46 kJ/m<sup>2</sup>) que o PPT (2,78 kJ/m<sup>2</sup>), o que equivale à um aumento de aproximadamente 24,5%. Esta melhoria pode estar atrelada ao fato de que no PPT há maior percentual de talco do que no PPH, o que causa maior

redução de mobilidade das cadeias poliméricas limitando a habilidade desta de se adaptar a deformação. Outro fator a ser considerado é que o PPH possui fibra de vidro, ou seja, os corpos de prova são injetados de maneira que as fibras tenham orientação longitudinal em relação à injeção e perpendicular à propagação da trinca induzida pelo entalhe, tornando-se mais complexo de se romper o sistema PP/fibra/talco. Soy e colaboradores (2017) estudaram a resistência ao impacto de polipropileno reciclado com três diferentes reforços: fibra de vidro, talco e carbonato de cálcio, e puderam observar que o PCR com fibra de vidro atingiu maior valor entre os três reforços, sendo 175% mais resistente em relação à amostra com talco e 151% comparado ao carbonato de cálcio como fase dispersa.

Em relação ao tipo de fratura, houve similaridade entre o PPT e PPH. O PPT obteve fratura completa (CB) para os 10 corpos de prova testados, enquanto o PPH apresentou 9 corpos de prova com fratura completa e 1 com quebra de dobradiça (HB), indicando que, caso os materiais sejam solicitados mecanicamente, terão o mesmo tipo de quebra.

#### 4.5. Temperatura de Deflexão Térmica (HDT)

Na Tabela 5, têm-se a média dos resultados obtidos no ensaio de HDT, tanto HDT A quanto HDT B.

Tabela 5 – Média e desvio padrão dos ensaios de HDT.

	PPT	PPH
<b>HDT A (°C)</b>	67,1 ± 2,0	107,1 ± 6,8
<b>HDT B (°C)</b>	121,2 ± 3,2	151,5 ± 2,7

Fonte: Do autor (2021).

No ensaio de HDT A, onde utiliza uma tensão de flexão de 1,80 MPa, o PPH obteve valor médio de 107,1°C, enquanto o PPT apresentou média de 67,1°C, o que representa um acréscimo de aproximadamente 60%. Já no teste de HDT B, que usa uma tensão de flexão de 0,45 MPa, houve um aumento de 25%, pois o PPT possui temperatura de deflexão ao calor de 121,2°C e o PPH, 151,5°C. Nota-se que para os dois testes, HDT A e HDT B, houve aumento significativo na temperatura de deflexão térmica no PPH quando comparado ao PPT, ou seja, a temperatura máxima de trabalho em que o material pode ser submetido é maior para o PPH do que o PPT. Este comportamento também foi observado por Parhizkar, Nezhad e Rezaei (2016) em estudo onde avaliaram a performance mecânica e térmica de compósitos de PP

homopolímero e 10% de fibra de vidro comparada à da resina pura. Os autores obtiveram um aumento de 31% na temperatura de deformação sob carga nos corpos de prova contendo fibra de vidro em relação ao PP puro e atribuíram o acréscimo à incorporação deste reforço, pois a fibra de vidro possui alta capacidade de suporte de carga em temperaturas elevadas e possibilita a transferência de tensão da matriz para a fibra.

Devido às aplicações no qual o PPT é empregado, como carcaça de filtro de ar e carcaça de sistema de ventilação, é imprescindível que a temperatura de deflexão atinja a especificação requerida pela montadora. No caso, como o PPT atende às normas de HDT especificadas, o PPH está apto como substituto ao PPT para esta propriedade.

## 5. Conclusão

A partir dos resultados encontrados para comparativo entre o PPT, já amplamente utilizado para aplicações no setor automotivo, e o PPH, híbrido com matriz parcialmente constituída por polipropileno reciclado e reforçada com fibra de vidro e talco, conclui-se que a substituição do PPT pelo PPH é possível, considerando que as propriedades encontradas para o PPT atendem às especificações requeridas e a performance do PPH foi similar ou superior, dependendo da propriedade avaliada.

O desempenho em relação às propriedades mecânicas (flexão, tração e impacto) são importantes para garantir que o material suporte as solicitações que ocorrerão ao longo da sua vida útil e percebe-se que foi satisfatório, com destaque para o aumento na resistência ao impacto de 24,5%, indicando que o PPH necessita de maior força aplicada para se romper que o PPT, e para os módulos de tração e flexão que são muito próximos em ambos os materiais, demonstrando que estes possuem rigidez similar. Assim, o presente estudo mostrou que é possível agregar valor técnico ao PCR para a produção de materiais com sinergismo de propriedades relacionadas à rigidez e resistência ao impacto.

Os resultados de HDT mostram que o PPH possui temperatura máxima de trabalho muito superior ao PPT, algo desejável para as aplicações de carcaça de filtro de ar e carcaça de sistema de ventilação em que o PPT usualmente é utilizado, pois são peças que estão em constante contato com calor.

A densidade é outro fator importante, pois indica um ganho financeiro para a produção do PPH e viabiliza economicamente a substituição do PPT. Além disso, a redução de densidade tem impacto na geração de valor do produto, uma vez que esta característica é algo desejável pelas montadoras para redução de peso das peças, gerando menor emissão de gás carbônico e consumo de combustível.

O uso de resina pós-consumo vai de encontro à tendência do mercado de investir em economia circular, oferecendo ao cliente uma solução sustentável e auxiliando na redução dos impactos ambientais. Dessa forma, capturando valor econômico, ambiental e social para ambas as partes.

## 6. Referências

- ABIPLAST. **Perfil 2018**. Disponível em: <<http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2019/08/perfil-2018-web.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2021.
- AL-MAADEED, M. A. et al. Date palm wood flour/glass fibre reinforced hybrid composites of recycled polypropylene: Mechanical and thermal properties. **Materials and Design**, v. 42, p. 289-294, 2012.
- ANTUNES, M. C.; SOUSA, A.; BETTINI, S. H. P. Estudo da influência da adição de talco em compósitos de polipropileno reforçado com fibra de coco. *In*: 12º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 2013, Florianópolis. **Anais Eletrônicos** [...]. Disponível em: <<http://e-democracia.com.br/cbpol/anais/2013/pdf/6GCH.pdf>>. Acesso em 29 out. 2021.
- ASHORI, A. **Hybrid Polymer Composite Materials: Properties and Characterisation**. 1ª ed. Woodhead Publishing, p. 39-56, 2017.
- ASHTON, E. G. et al. Design, materiais e sustentabilidade: micronização de produto multi-material visando sua reciclagem. **DAPesquisa**, v. 10, n. 14, p. 138-155, 2015.
- AUD, B. N. et al. Modificação química do polipropileno através da introdução de grupos sulfônicos para aplicação como catalisador em reações de esterificação. **Quim. Nova**, v. 44, n. 4, p. 415-424, 2021.
- BARBOSA, L. G.; PIAIA, M.; CENI, G. H. Analysis of Impact and Tensile Properties of Recycled Polypropylene. **International Journal of Materials Engineering**, v. 7, p. 117-120, 2017.
- BEYOU, E.; LAMI, E. B. Organic–inorganic hybrid functional materials by nitroxide-mediated polymerization. **Progress in Polymer Science**, v. 121, 2021.
- BIRON, M. **A Practical Guide to Plastics Sustainability: Concept, Solutions, and Implementation**. 1ª ed. William Andrew, 2020.
- BLOMSMA, F; BRENNAN, G. The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 603-614, 2017.
- CALLISTER JR., W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma introdução**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2008.
- CANEVAROLLO JR., S. V., **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ª ed. São Carlos: Artliber. 2006.
- CATTO, L. A. et al. Characterization of polypropylene composites using yerba mate fibers as reinforcing filler. **Composites Part B**, v. 174, p. 1-9, 2019.
- DAS, P. P. et al. Advancement in hybrid materials, its applications and future challenges: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. xxx, n. xxx, p. xxx, 2021.

GALL, M.; STEINBICHLER, G.; LANG, R. W. Learnings about design from recycling by using post-consumer polypropylene as a core layer in a co-injection molded sandwich structure product. **Materials and Design**, v. 202, p. 1-12, 2021.

GEN, M. B.; LOZANO, R. How circular is the circular economy? Analysing the implementation of circular economy in organisations. **Business Strategy and the Environment**, v. 29, n. 8, p. 3484-3494, 2020.

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

HASSANI, F. Z. S. A.; BOUHFID, R.; QAISS, A. **Hybrid Natural Fiber Composites**. 1<sup>a</sup> ed. Woodhead Publishing, p. 113-131, 2021.

HSISSOU, R. et al. Polymer composite materials: A comprehensive review. **Composite Structures**, v. 262, p. 1-15, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1183-1: Plastics - Methods for determining the density of non-cellular plastics. 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 178: Plastics - Determination of flexural properties. 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 179-1: Plastics – Determination of Charpy impact properties. 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 527-2: Plastics - Determination of tensile properties. 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 75-2: Plastics - Determination of temperature of deflection under load. 2013.

KARIAN, H. G. **Handbook of polypropylene and polypropylene composites**. 2<sup>a</sup> ed. USA: CRC Press. 2003.

KARTHI, N. et al. An overview: Natural fiber reinforced hybrid composites, chemical treatments and application areas. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, n. 3, p. 2828-2834, 2020.

KAYIKCI, Y. et al. Exploring barriers to smart and sustainable circular economy: The case of an automotive eco-cluster. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, p. 1-14, 2021.

KURAM, E. Hybridization effect of talc/glass fiber as a filler in polycarbonate/ acrylonitrile-butadiene-styrene composites. **Composites Part B**, v. 173, p. 1-10, 2019.

LUNA, C. B. B. et al. Propriedades reológicas de blendas de polipropileno copolímero/polipropileno reciclado oriundo de recipientes industriais. **Revista Matéria**, v. 25, n. 3, 2020.

MACHADO, N.; MORIOKA, S. N. Contributions of modularity to the circular economy: A systematic review of literature. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 1-11, 2021.

MAHMOUD, B. **Improved catalytic productivity and performance of a Polypropylene polymerization plant**. 1<sup>a</sup> ed. 2018.

MORELLI, C. L.; POUZADA, A. S.; SOUSA, J. A. Influence of Hybridization of Glass Fiber and Talc on the Mechanical Performance of Polypropylene Composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v.114, p. 3592-3601, 2009.

OLIVEIRA, A. C. V.; SILVA, A. S.; MOREIRA, I. T. A. Economia Circular: Conceitos e contribuições na gestão de resíduos urbanos. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 135, p. 202-209, 2019.

PARHIZKAR, M.; NEZHAD, K. S.; REZAEI, A. Mechanical and thermal properties of Homo-PP/GF/CaCO<sub>3</sub> hybrid nanocomposites. **Advances in Materials Research**, v. 5, n. 2, p. 121-130, 2016.

PRASANNA, S. M. et al. Mechanical and Tribological Characterization of Hybrid Composites: A Review. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 2351-2358, 2019

RAJAK, D. K. et al. Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. **Polymers**, v. 11, p. 1-37, 2019.

RAVISHANKAR, B.; NAYAK, S. K.; KADER, M. A. Hybrid composites for automotive applications – A review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 38, n. 18, p. 835-845, 2019.

ROTHON, C. D. R. Fillers and Surface treatment. **Plastics Aditives & Compounding**, 2002.

SHUBHRA, Q. T.; ALAM, A.; QUAIYYUM, M. Mechanical properties of polypropylene composites: A review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 26, n. 3, p. 362-391, 2011.

SINGH, A.; VERMA, N.; KUMAR, K. **Materials for Biomedical Engineering: Bioactive Materials, Properties, and Applications**. 1<sup>a</sup> ed. Elsevier, 2019.

SOY, U. et al. Fabrication and Mechanical Properties of Glass Fiber/Talc/CaCO<sub>3</sub> Filled Recycled PP Composites. **American Journal of Applied Sciences**, v. 14, n. 9, p. 878-885, 2017.

SUAREZ-EIROA, B. et al. Operational principles of circular economy for sustainable development: Linking theory and practice. **Journal of Cleaner Production**, v. 214, p. 952-961, 2018.

TIMBÓ, K. F. et al. A Influência do posicionamento das fibras na resistência mecânica dos compósitos. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 86078-86093, 2020.

TZOUNIS, P. N. et al. Tacticity Effect on the Conformational Properties of Polypropylene and Poly(ethylene-propylene) Copolymers. **Macromolecules**, v. 51, n. 17, p. 6878–6891, 2018.

YADAV, G. A framework to overcome sustainable supply chain challenges through solution measures of industry 4.0 and circular economy: An automotive case. **Journal of Cleaner Production**, v. 254, p. 1-15, 2020.

YILDIDIZBASI, A. Blockchain and renewable energy: Integration challenges in circular economy era. **Renewable Energy**, v. 176, p. 183-197, 2021.

YOUNIS, S. I.; OLEIWI, J. K.; MOHAMMED, R. A. Some Mechanical Properties of Polymer Matrix Composites Reinforced by Nano Silica Particles and Glass Fibers. **Engineering and Technology Journal**, v. 36, n. 12, p. 1283-1289, 2018.

ZAGHLOUL, M. Y. M. et al. Developments in polyester composite materials – An in-depth review on natural fibres and nano fillers. **Composite Structures**, v. 278, p. 1-25, 2021.