

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**LEONARDO PENTEADO**

**DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURA SANDUÍCHE SUSTENTÁVEL,  
FABRICADAS COM O REUSO DE TAMPAS DE PP E GARRAFAS PET**

**LONDRINA**

**2025**

**LEONARDO PENTEADO**

**DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURA SANDUÍCHE SUSTENTÁVEL,  
FABRICADAS COM O REUSO DE TAMPAS DE PP E GARRAFAS PET**

**DEVELOPMENT OF A SUSTAINABLE SANDWICH STRUCTURE  
MANUFACTURED USING RECYCLED PP CAPS AND PET BOTTLES**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia de Materiais, da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Luiz Eduardo de Carvalho

**LONDRINA**

**2025**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**LEONARDO PENTEADO**

**DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURA SANDUÍCHE SUSTENTÁVEL,  
FABRICADAS COM O REUSO DE TAMPAS DE PP E GARRAFAS PET**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia de Materiais, da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Data de aprovação: 27 de novembro de 2025

---

Prof. Dr. Márcio Florian  
Doutor em Ciências  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

---

Prof. Dr. Francisco Rosário  
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

---

Prof. Dr. Luiz Eduardo de Carvalho - orientador  
Doutor em Ciências  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

**LONDRINA**

**2025**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha sincera gratidão aos meus pais, que tornaram possível a realização deste curso ao me proporcionarem a oportunidade de estudar fora de minha cidade natal, sempre oferecendo todo o apoio necessário ao longo dessa trajetória.

Agradeço também ao meu orientador, **Luiz Eduardo de Carvalho**, pela orientação, pelos conhecimentos compartilhados e pelos conselhos fundamentais para o desenvolvimento deste e de outros trabalhos, bem como para meu crescimento acadêmico.

Por fim, deixo meu agradecimento a todos os professores, colaboradores e amigos que tive a oportunidade de conhecer e com quem convivi durante minha jornada na UTFPR.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma estrutura sanduíche sustentável utilizando materiais reciclados provenientes de garrafas PET e tampas de polipropileno (PP). As garrafas PET foram moídas e reprocessadas em prensa térmica para obtenção de filmes que atuaram como elementos de união e estabilização das tampas, empregadas como núcleo. Para validar a ideia foi realizada a laminação da estrutura sanduíche com o núcleo obtido e também com um núcleo comercial de PET - ARMACELL GR80 GSP. Para avaliação do desempenho estrutural, foram realizados ensaios mecânicos de compressão (ASTM C365) nos núcleos e ensaios de flexão em três pontos (ASTM D790) nas estruturas sanduíche completas. Os resultados demonstraram que a configuração desenvolvida apresentou melhoria de 18,75% no ensaio de flexão em relação ao núcleo comercial, e a resistência à compressão do núcleo de PP foi 44,45% menor, porém esse resultado pode ser considerado positivo visto que a compararmos os materiais PP e PET o polipropileno é 73,7% menos resistente. Desta forma é evidente o potencial de reaproveitamento de resíduos poliméricos em aplicações de maior valor agregado. O estudo confirma a viabilidade de integrar PET reciclado e tampas de PP em sistemas estruturais leves, oferecendo uma alternativa economicamente acessível, ambientalmente favorável e aplicável à indústria de compósitos.

Palavras-chave: reciclagem; garrafas PET; PP; estrutura sanduíche; compósitos.

## **ABSTRACT**

This work presents the development of a sustainable sandwich structure using recycled materials from PET bottles and polypropylene (PP) caps. The PET bottles were ground and reprocessed in a thermal press to obtain films that acted as joining and stabilizing elements for the caps, used as the core. To validate the idea, the sandwich structure was laminated with the obtained core and also with a commercial PET core - ARMACELL GR80 GSP. To evaluate the structural performance, mechanical compression tests (ASTM C365) were performed on the cores and three-point bending tests (ASTM D790) on the complete sandwich structures. The results showed that the developed configuration presented an 18.75% improvement in the bending test compared to the commercial core, and the compression resistance of the PP core was 44.45% lower; however, this result can be considered positive since, when comparing PP and PET materials, polypropylene is 73.7% less resistant. Thus, the potential for reusing polymer waste in higher value-added applications is evident. The study confirms the feasibility of integrating recycled PET and PP caps into lightweight structural systems, offering an economically accessible, environmentally friendly alternative applicable to the composites industry.

Keywords: recycling; PET bottles; PP; sandwich structure; composites.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>07</b>
1.1 Objetivo geral.....	07
1.2 objetivo específico.....	07
<b>2. JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>09</b>
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>10</b>
3.1 Compósitos estruturais.....	11
3.2 Poli(tereftalato) de etileno.....	12
3.3 Polipropileno.....	14
3.4 Núcleos de pet.....	14
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>16</b>
4.1 Materiais.....	16
4.2 Métodos.....	17
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>24</b>
5.1 Ensaio de compressão dos núcleos .....	24
5.2 Ensaio de flexão na estrutura sanduíche .....	24
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>26</b>
<b>7. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>27</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade, segundo a Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento, refere-se à capacidade de atender às necessidades do presente sem comprometer as futuras gerações, utilizando recursos naturais de forma consciente, reconhecendo sua finitude e relevância para a biodiversidade e o desenvolvimento econômico. Esse princípio é fundamental na reciclagem de materiais como o poli(tereftalato de etileno) (PET) e o polipropileno (PP) que apesar de não ser um polímero natural é proveniente do petróleo que é um recurso natural, amplamente utilizado (1).

Abordagens sustentáveis deixaram de ser uma opção e tornou-se uma premissa a ser considerada em todos os cenários, por se tratar de recursos de sobrevivência e futuro para a humanidade, do ponto de vista que existem polímeros que levam anos para se degradar e ocorrem descartes incorretos. A reciclagem é apenas um dos caminhos da aplicação do pensamento sustentável, sendo uma maneira de iniciar grandes mudanças para um futuro que não haja necessidade de novos componentes à base de petróleo.(1)

Dentro desse contexto, o PET é amplamente utilizado na fabricação de embalagens — especialmente como pré-formas — e já integra cadeias consolidadas de economia circular, como a reciclagem mecânica e a reutilização. Neste contexto, este estudo propõe uma alternativa inovadora ao explorar uma rota de reciclagem menos convencional, direcionada à aplicação da garrafa PET (com tampas de PP) em materiais compósitos, explorando um novo potencial de reaproveitamento para esse material, indo além de suas aplicações tradicionais.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Comparar mecanicamente (Flexão e Compressão) a estrutura sanduíche fabricado utilizando um núcleo de tampa (Polipropileno) e garrafa PET com uma fabricada utilizando um núcleo comercial de PET.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fabricar núcleo de materiais provenientes da garrafa PET;
- Obter estrutura sanduíche com núcleo comercial (PET - ARMACELL GR80 GSP) e com o núcleo fabricado (tampa de PP e garrafa PET);

- Avaliar a resistência à compressão dos núcleos (ASTM C365) e a resistência em flexão das estruturas sanduíche (ASTM D790).

## 2. JUSTIFICATIVA

No Brasil, o setor de reciclagem de PET é destaque mundial, além disso, legislações nacionais buscam ampliar o uso do material reciclado, reforçando o compromisso com a economia circular (2).

No campo dos materiais, os compósitos estruturais são essenciais para a inovação tecnológica, tanto como compósitos laminados quanto como estruturas tipo sanduíche, que equilibram de forma excepcional rigidez em flexão e peso reduzido. Embora os custos variem, os compósitos são fundamentais para soluções sustentáveis e de alto desempenho. Nesse contexto se faz o presente estudo que visa contribuir com uma possibilidade de uma outra alternativa para a reciclagem de garrafas PET, onde normalmente são utilizados materiais e processos altamente tecnológicos (3).

O estudo propõe criar uma alternativa sustentável, escalável e reprodutiva no segmento de materiais compósitos, como opção de um núcleo para fabricação de uma estrutura sanduíche.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

Os materiais compósitos podem ser definidos como misturas não solúveis de dois ou mais constituintes com distintas composições, estruturas e propriedades que se combinam e em que um dos materiais (matriz) garante a aglutinação e o outro (reforço) o aprimoramento da propriedade de interesse. O reforço, de maneira geral, é encontrado sob a forma de partículas, fibras curtas ou fibras longas (3).

Diversas conquistas tecnológicas, principalmente em áreas como aeronáutica, aeroespacial, petroquímica, naval, bioengenharia, automobilística, construção civil, se tornaram viáveis após o advento dos compósitos estruturais. E essa classe de materiais é bastante ampla e abrangente, compreendendo desde os polímeros reforçados com fibras, os materiais híbridos e os concretos estruturais, além dos tradicionais compósitos de matriz metálicas, cerâmicas ou poliméricas (3).

Em muitos casos, é possível obter-se efeito sinérgico ao se combinar diferentes materiais na criação de compósitos, aos quais, apresentam propriedades especiais que nenhum de seus constituintes possui isoladamente e dessa forma obtendo um material com propriedades distintas. Inúmeros tipos de compósitos são conhecidos por apresentarem simultaneamente altos índices de resistência a flexão e rigidez por unidade de peso, mesmo quando submetidos a esforços combinados de tração/compressão, flexão/torção, resistência à corrosão em muitos ambientes que são agressivos aos metais e boa tenacidade à fratura em diversos casos (3).

Em aplicações aeronáuticas, aeroespaciais e biomédicas o desempenho estrutural dos componentes manufaturados em compósitos é de vital importância, ao passo que os fatores econômicos envolvidos em sua utilização têm menor relevância, já que o fator principal é o desempenho. Na indústria automobilística e na construção civil, por outro lado, essa situação tende a se inverter, ou seja, o custo passa a ser um parâmetro preponderante, em detrimento do desempenho (3).

A laminação é um dos principais processos de fabricação de materiais compósitos, consistindo na deposição sucessiva de camadas de reforço — geralmente fibras — impregnadas por uma matriz. Esse método permite o controle da espessura, da orientação das fibras e da distribuição da matriz, resultando em estruturas com elevada resistência específica como excelente desempenho mecânico em flexão. Nos compósitos tipo sanduíche, a laminação assume papel essencial ao garantir a transferência de esforços, a rigidez estrutural e a integridade

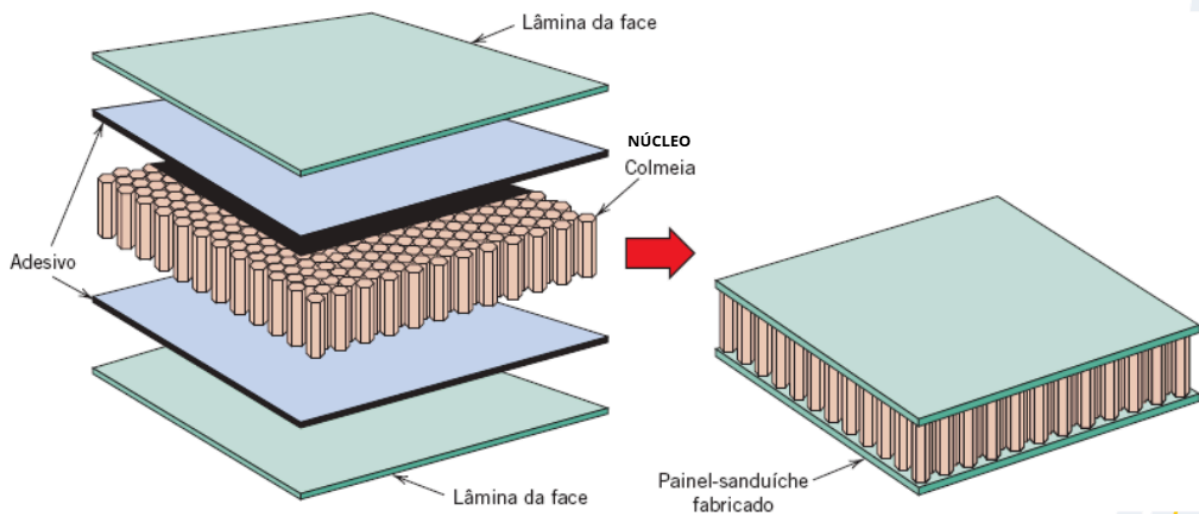
do conjunto. A versatilidade do processo possibilita a incorporação de diferentes materiais, incluindo reciclados, como filmes de PET ou tampas de PP, ampliando o potencial de sustentabilidade sem comprometer a performance.(3)

### 3.1 Compósitos estruturais

São formados por materiais, cujas propriedades dependem não somente das propriedades dos materiais constituintes, mas também de fatores geométricos dos vários elementos estruturais, definidos no projeto (4).

Os compósitos formados por estruturas tipo sanduíche, são constituídos por duas lâminas (placas de face), cuja função é promover a resistência à tração e à compressão, bem como as solicitações cisalhantes no plano das placas. Essas placas são separadas por um núcleo que tem a função de elevar o momento de inércia e conseqüentemente a rigidez à flexão da estrutura sem proporcionar um aumento correspondente de peso (Figura 1) (4).

**Figura 1 – Representação de um painel sanduíche. (ADAPTADO)**



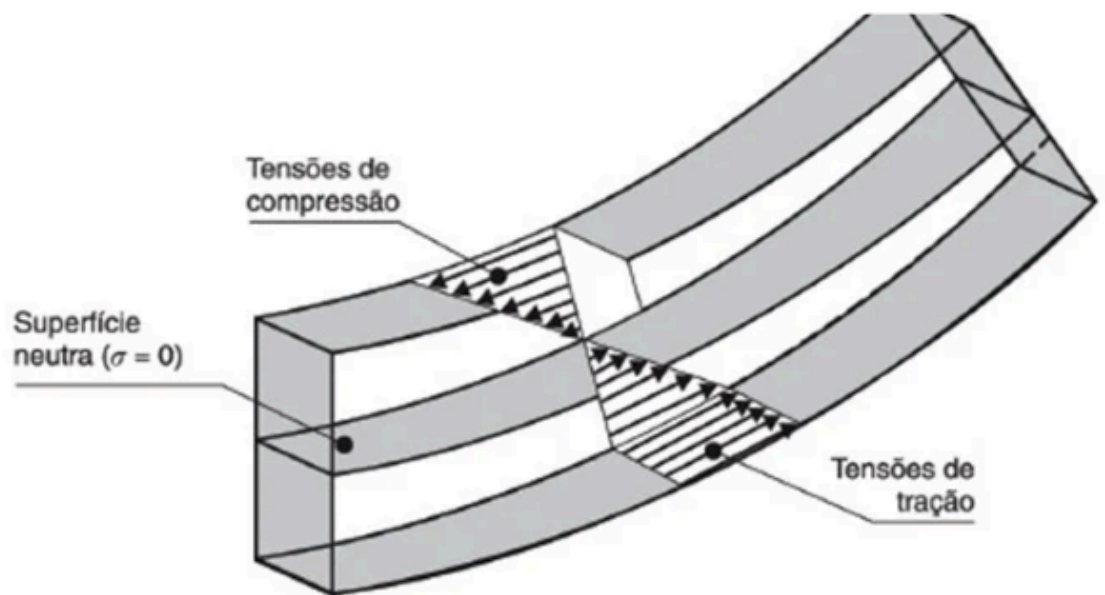
**Fonte: (4)**

Uma estrutura sanduíche, deve conter as seguintes características para atender as propriedades supracitadas:

- O núcleo, que pode ser do tipo “Colmeia” ou de polímeros expandidos (espuma) ou materiais naturais, apesar de leve deve ser suficientemente rígido para manter estável a distância entre as duas placas de compósito que envolvem o núcleo;

- O núcleo não deve ser frágil a ponto de apresentar trincas paralelas às faces;
- A adesão da interface entre as lâminas e o núcleo deve assegurar a permanência da estrutura (4).
- Em uma estrutura sanduíche submetida a esforços, a distribuição de tensões ocorre de maneira que as maiores solicitações de tração e compressão se concentram nas lâminas externas, enquanto o núcleo é submetido a menores níveis de tensões. (FIGURA 2)

**Figura 2 – representação da distribuição de tensão.**



**Fonte:(5)**

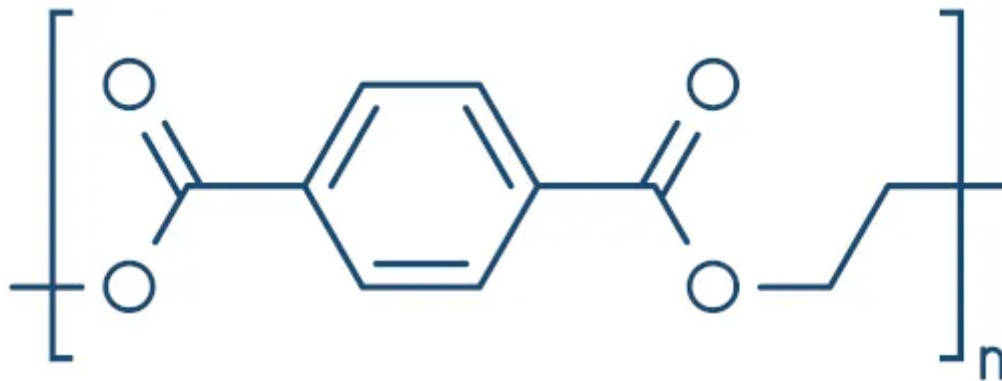
Em relação aos custos, estes são determinados pelas condições de aplicação e, portanto, variam conforme o material empregado. Os materiais mais comuns utilizados como núcleos incluem espumas, borrachas sintéticas, cimentos inorgânicos, madeira balsa e estruturas em colmeia (honeycomb). No caso específico dos honeycombs, geralmente fabricados a partir de aramidas combinadas com lâminas ou laminados de fibras de carbono e resina epóxi, o custo é significativamente elevado. Isso ocorre devido às excelentes propriedades mecânicas e ao alto desempenho desses materiais, o que agrega valor ao produto final (6).

### 3.2 Poli (tereftalato de etileno) – PET

Em 1946 o poli(tereftalato de etileno) – PET foi descoberto por Whinfield e Dickson, cuja temperaturas de fusão é alta em relação aos polímeros (265°C) e

possui estabilidade hidrolítica em temperatura ambiente, isso por conta dos anéis aromáticos na sua cadeia principal (Figura 3). Desde então, o PET foi um sucesso, devido a ótima relação entre as propriedades mecânicas, térmicas e custo. Atualmente, o PET é um dos termoplásticos mais produzidos no mundo, alcançando já no final da década de 90 uma produção mundial em torno de  $2,4 \times 10^{10}$  kg (7).

Figura 3 - estrutura molecular do PET.



PET

Fonte:(8)

No Brasil, a principal aplicação do PET é na indústria de embalagens, que corresponde a cerca de 71% de seu uso. Dentre as possíveis embalagens que o PET pode ser utilizado, aproximadamente 32% são para embalagens de bebidas carbonatadas (que contém dióxido de carbono) como, refrigerantes e bebidas gaseificadas de modo geral (7).

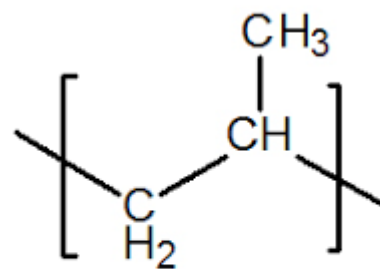
A amplitude no uso do PET, principalmente no reciclado, acontece porque o Brasil é um líder mundial em diferentes aplicações para o PET reciclado, o que gera demanda pelo produto, revertido em faturamento e renda para diversos elos da sociedade. Os principais consumidores/aplicadores de PET no Brasil são os fabricantes de pré-formas e garrafas, com 29% do total, num processo conhecido como “*bottle to bottle*”, principalmente em decorrência do aumento da produção de embalagens em grau alimentício (food grade), que nos últimos anos mostrou uma grande evolução tecnológica. Em seguida vem a indústria têxtil (24%), bobinas e

termoformados (17%), setor químico (13%) e fitas de arquear (11%). Outras aplicações respondem pelo uso dos 6% restantes do PET reciclado (2).

### 3.3 Polipropileno

O Polipropileno (PP) é um termoplástico e é considerado um polímero semicristalino formado por átomos de carbono com grupos metil pendurados em cada átomo de carbono da cadeia principal (Figura 4). Sua temperatura de fusão pode chegar a cerca de 170°C e com uma densidade de 0,90g/cm<sup>3</sup>. (9)

**Figura 4 - estrutura molecular do PP.**



**PP (polipropileno)**

**Fonte:(10)**

Juntamente com o PET, em sua maior parte das embalagens, são acopladas as tampas do gargalo, que normalmente são fabricadas de polipropileno (PP) e possui um uso industrial significativo, e que também possui variedades no processo de reciclagem. As tampas de PP possuem diversas possibilidades de reciclagem e possuem valores de revendas próximos do PET, sendo viabilizado o retrabalho com o produto. (11)

De acordo com Dantas e Barbosa “avaliação de propriedades mecânicas do polipropileno” a resistência à compressão do PP virgem foi de 31 MPa. Neste estudo, não foram citados detalhes de estrutura e processamento para a fabricação deste PP.(11)

### 3.4 Núcleos de materiais reciclados

Oliveira e Panzera, 2020 estudaram painéis sanduíche fabricados com tampas de garrafas recicladas como núcleo, propondo alternativas sustentáveis

tanto para o revestimento quanto para o adesivo. Os autores testam uma película de PET reciclado e um biopoliuretano à base de óleo de rícino, comparando-os a sistemas tradicionais de alumínio e resina epóxi e para caracterizar as tampas, foi desenvolvido um ensaio de micro-punção.(12)

Nos testes de flexão e cisalhamento, os painéis sustentáveis demonstraram desempenho semelhante ou superior aos painéis convencionais, especialmente em termos de rigidez e resistência à flexão. O biopolímero reforçado com cimento se destacou por apresentar falha mais progressiva e boa adesão, enquanto os sistemas com epóxi apresentaram descolamento visível. Além disso, os painéis com película de PET mostraram redução de peso, contribuindo para maior eficiência estrutural. (12)

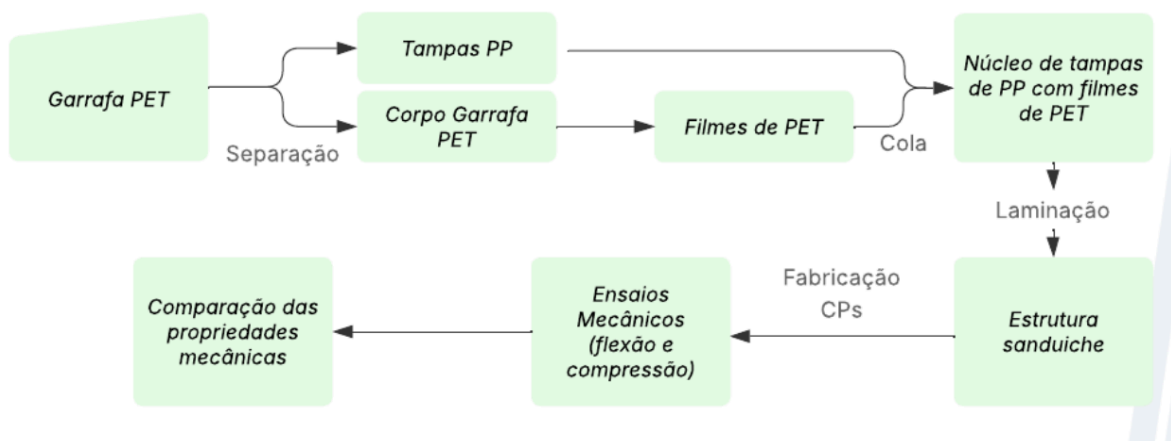
Com base nos resultados, o estudo conclui que o uso de tampas de garrafa recicladas, aliado a adesivos e revestimentos de fonte renovável, é viável para aplicações estruturais leves, como o caso de estruturas sanduíches. (12)

Neste cenário, é enfatizado ainda mais a utilização de materiais reciclados para compósitos de PET, por exemplo, que é possível transformar um produto que seria descartado em um novo material de valor agregado. Um material feito com 85% de reciclados PET, sendo bastante significativo para redução da poluição. O trabalho consistiu no corte de garrafas plásticas de reciclagem em um moedor mecânico, resultando em escamas côncavas e mais tarde impregnadas em uma matriz de resina poliéster como aglutinante, com o objetivo de obter propriedades de absorção acústica. Foram fabricadas amostras com espessuras de 10, 20, 30 mm onde o laminado de PET mostrou ser entre 50 e 175 vezes melhor do que a solução comercial nas faixas de frequência de 125 Hz, 1 kHz e 4 kHz, com coeficiente de absorção em incidência normal de 0,8, 0,3 e 0,2, respectivamente. Com isso, o trabalho conclui que o material é capaz de ser utilizado como isolamento em painéis sanduíches, por ter apresentado propriedades acústicas (13).

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho visa a utilização de garrafas PET e tampas de polipropileno para manufatura de núcleos para utilização em estrutura sanduíche, de modo que as tampas de PP são unidas por um filme polimérico de PET fabricado a partir do restante da garrafa triturada e reprocessada. Esse núcleo foi utilizado para a fabricação da estrutura sanduíche, que consiste na laminação com resina poliéster e manta de fibra de vidro e foi realizado o mesmo processo de fabricação em um núcleo comercial para comparação. Para melhor entendimento das etapas do desenvolvimento, foi elaborado um fluxograma (Figura 5).

Figura 5 – Fluxograma do desenvolvimento.



Fonte (autoria própria)

##### 4.1 Materiais:

- Garrafas PET com tampas de PP;
- Resina poliéster (Oswaldo Cruz);
- Peróxido de metil-etil-cetona PMEK (Oswaldo Cruz);
- Reforço: manta de fibra de vidro (Oswaldo Cruz);
- Núcleos: tampas e garrafas PET reprocessadas, e núcleo PET ARMACELL GR80 GSP 20MM (comercial);
- Manta de teflon (desmoldante);
- Cola de contato (cascola sem toluol);
- Balança Analítica (Bel Engineering);
- Moinho de facas Willye;

- Prensa térmica (Marconi);
- Paquímetro digital (digimess);

Todos os equipamentos utilizados foram da UTFPR presente nos laboratórios B001, B006 da Engenharia de Materiais, campus Londrina-PR.

#### 4.2 Métodos

O processo de fabricação se inicia com a utilização de um moinho de facas de tensão de 220V e potência de 750W, o que é apresentado na Figura 6, utilizado para a moagem de garrafas PET e obter grânulos de PET que foram utilizados para formar a os filmes de PET posteriormente na prensa térmica.

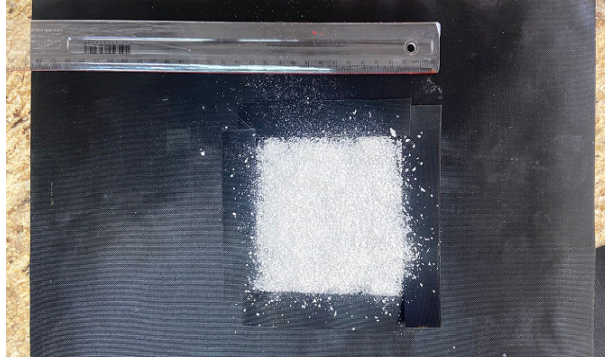
**Figura 6 - Moinho de facas star ft 50 disponível no LAB 002 UTFPR/LD.**



**Fonte (autoria própria)**

Após a definição dos parâmetros de processamento, para a confecção das placas de PET e inicia-se o processo de fabricação dos filmes de PET, que consiste em aplicar pressão e temperatura no PET moído (Figura 7) utilizando uma prensa hidráulica aquecida, com tensão de 220V, carga de prensagem de 15 toneladas e temperatura de trabalho de 310°C (Figura 8). O resfriamento é realizado em temperatura ambiente, com as placas sendo apoiadas sobre a bancada, e então desmoldado o filme de PET reciclado (Figura 9).

**Figura 7 – PET moído posicionado sobre a manta desmoldante.**



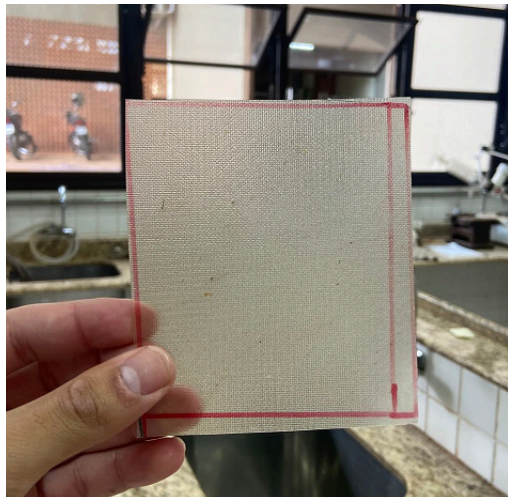
**Fonte (autoria própria)**

**Figura 8 - Prensa aquecida disponível no LAB 001 UTFPR/LD.**



**Fonte (autoria própria)**

**Figura 9 - Filme de PET reciclado pós processamento.**



**Fonte (autoria própria)**

A partir dos filmes de PET confeccionados, inicia-se o processo de adesão das tampas, formando o núcleo para a utilização em uma estrutura sanduíche. Para realizar a adesão foi utilizado uma cola de contato (cascola). A adesão dos filmes de PET em cima e embaixo das tampas se faz necessário para manter a posição e ter um comportamento correto como núcleo. As tampas foram posicionadas de formas alternadas com o objetivo de obter unidade de repetição.

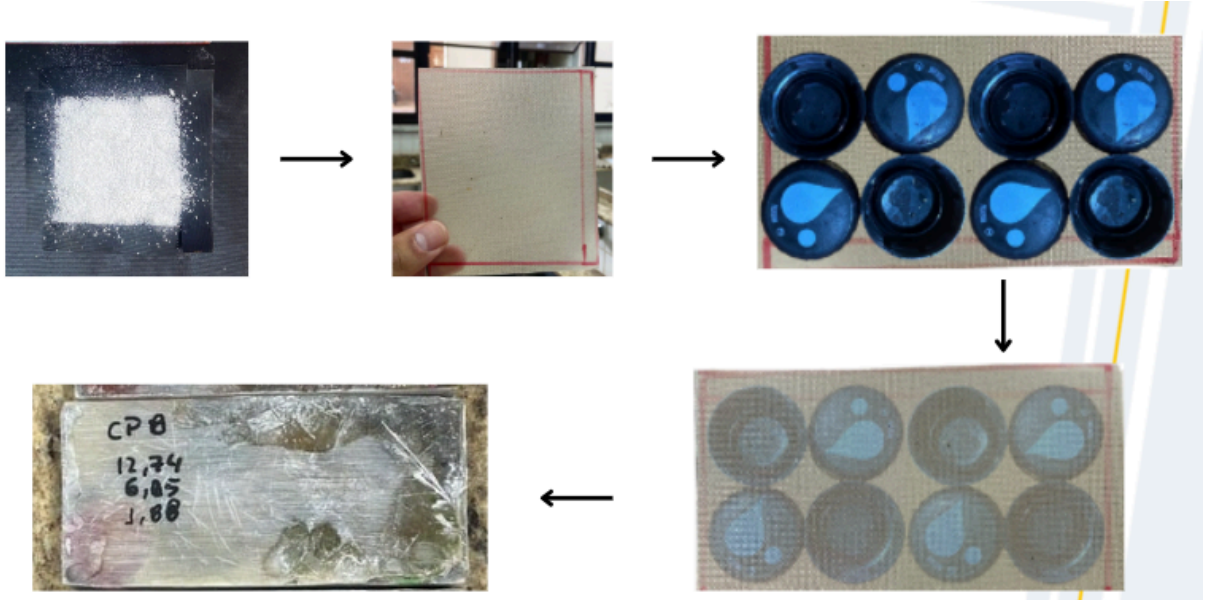
Após a confecção do núcleo, iniciou a laminação nas faces do Núcleo para a obtenção das estruturas sanduíche com núcleo comercial e com o fabricado, onde foi possível realizar a comparação com o núcleo PET armacell GR80 GSP. Ambos núcleos foram laminados com 50g de resina poliéster (com agente de cura PMEK 1%) e 1g de manta de fibra de vidro para cada lado do núcleo.

As propriedades dos compósitos foram analisadas mecanicamente utilizando as normas: ASTM C365 para compressão nos núcleos e ASTM D790 flexão na estrutura sanduíche.

O processo de manufatura dos compósitos foi o Laminação manual - *hand lay up*. As moldagens foram realizadas utilizando um modelo de corpo de prova fabricado em silicone que permitiu a execução da laminação completa em uma única etapa, garantindo melhor uniformidade, com as dimensões necessárias de acordo com ASTM D790 (flexão).

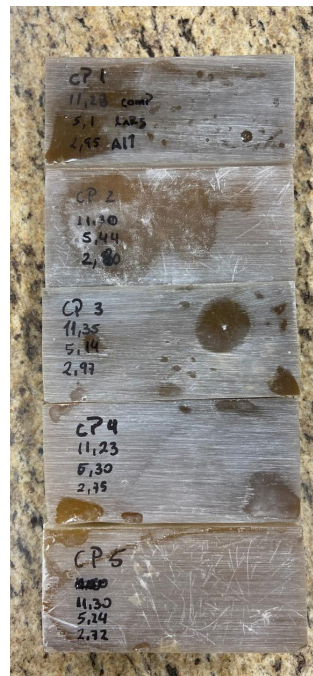
Com base na descrição dos procedimentos utilizados, as Figuras 10, 11 e 12 representam as etapas supracitadas bem como as Figuras 13 e 14 mostram os núcleos utilizados.

Figura 10 - Fluxo visual das etapas.



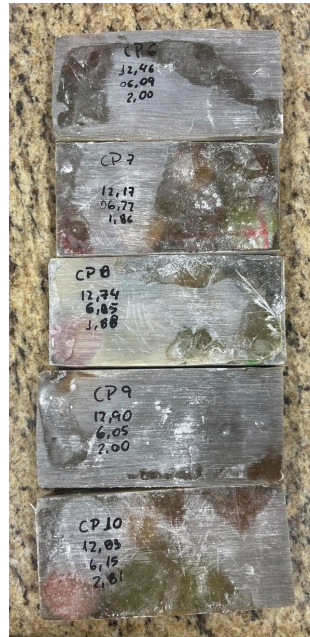
Fonte (autoria própria)

Figura 11 - corpos de prova de flexão (núcleo comercial)



Fonte (autoria própria)

**Figura 12 - corpos de prova de flexão (núcleo fabricado com garrafas PET)**



**Fonte (autoria própria)**

Para os ensaios de compressão, os corpos de provas consistiam apenas no núcleo utilizado, sendo assim seguem as medidas aferidas:

Núcleo comercial:

CP1 - 24,25 x 24,25 x 20,60 (mm)

CP2- 25,50 x 24,85 x 20,60 (mm)

CP3- 25,15 x 24,50 x 20,50 (mm)

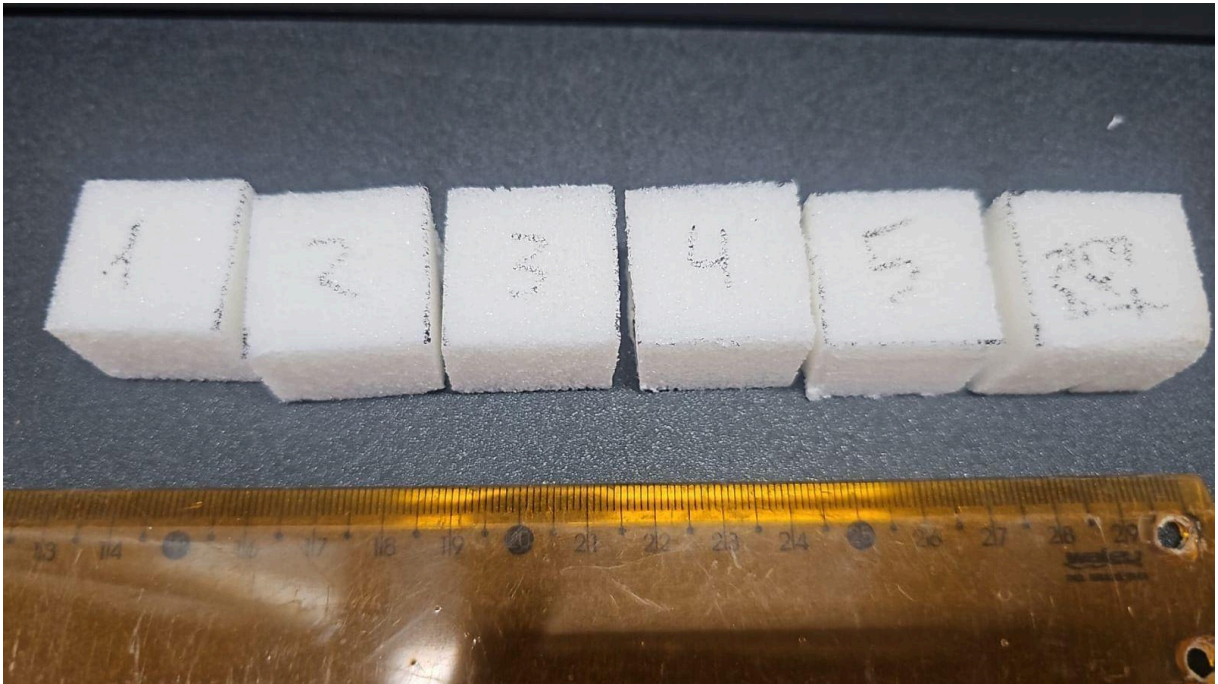
CP4- 24,60 x 25,15 x 20,60 (mm)

CP5- 24,75 x 25,25 x 20,60 (mm)

Núcleo com tampas de polipropileno e filme de garrafa PET: medidas padrão 30,60 x 12,70 (mm)

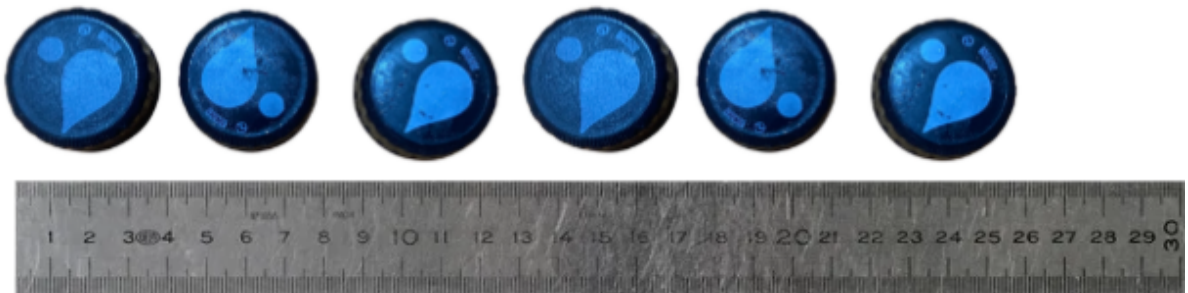
Para aferição de todas as medidas foi utilizado o paquímetro digital digimess.

**Figura 13 - corpos de prova de compressão (núcleo comercial)**



**Fonte (autoria própria)**

**Figura 14 - corpos de prova de compressão (núcleo tampa de PP)**



**Fonte (autoria própria)**

Os parâmetros utilizados no ensaio de compressão foram: Pré carga de 45N seguido de uma velocidade de avanço de 0,5mm/min e o ensaio foi interrompido com 2% de deslocamento da espessura do núcleo. O ensaio de flexão utilizou uma taxa de 1,2mm/min e o ensaio foi interrompido com 5% de deformação, sendo equivalente a um deslocamento de 6mm e vão entre apoios de 45mm, para o núcleo de PET PET ARMACELL GR80 GSP 20MM, enquanto para o núcleo de tampas foi uma taxa de 0,85mm/min e o ensaio interrompido com 5% de deformação, sendo

equivalente a uma deformação de 4,27mm, e o vão entre apoios de 32mm. A velocidade e a distância entre os apoios foram alterados para os diferentes materiais baseado na norma ASTM D790, que é calculada em função da espessura da estrutura sanduíche.

## 5. RESULTADOS

A fabricação dos corpos de prova utilizando núcleos provenientes de tampas de garrafas de polipropileno e filme de PET apresentou maiores desafios em comparação ao núcleo de referência comercial. Mesmo com a utilização de um molde de silicone padronizado para o processo de laminação, o núcleo comercial foi mais fácil de processar, principalmente pelo seu formato. Além disso, os materiais utilizados neste trabalho já possuem propriedades intrínsecas interessantes, como mencionadas anteriormente.

### 5.1 Ensaio de Compressão dos Núcleos

Os resultados do ensaio de compressão demonstraram um comportamento satisfatório para o núcleo de referência (PET PET ARMACELL GR80 GSP 20MM.), com uma resistência média de 17,48 MPa. Já os núcleos produzidos a partir de tampas de garrafas PET (polipropileno) apresentaram maior variabilidade nos resultados, com uma média de 9,71 MPa (em acordo com ASTM C365), conforme demonstrado na Tabela 1.

**Tabela 1 - dados de resistência máxima em compressão.**

Núcleos	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	CP5 (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão
<b>PET ARMACELL GR80</b>	16,75	16,42	18,66	16,32	19,27	17,48	1,38
<b>Tampas de PP e filme de PET</b>	3,12	7,05	18,82	11,57	8,01	9,71	5,91

Fonte (autoria própria)

### 5.2 Ensaio de Flexão nas Estruturas Sanduíche

Os ensaios de flexão foram realizados de acordo com os parâmetros estabelecidos na norma ASTM D790. Para a estrutura sanduíche fabricada com o núcleo comercial (PET ARMACELL GR80 GSP 20MM), foi obtida uma resistência média à flexão de 28,74 MPa, enquanto a estrutura sanduíche fabricada com o núcleo de tampas de polipropileno e lâminas de garrafas PET reprocessadas

apresentou uma média superior, de 34,13 MPa (em acordo com ASTM D790), conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2 - dados de resistência máxima em flexão.**

Núcleos	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	CP5 (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão
<b>PET ARMACELL GR80</b>	36,56	25,36	33,32	23,15	25,30	28,74	5,84
<b>Tampas de PP e filme de PET</b>	31,02	46,18	21,79	31,54	40,11	34,13	9,35

**Fonte (autoria própria)**

Os resultados obtidos permitem afirmar que a proposta de desenvolvimento de um núcleo sustentável, produzido a partir do reuso de tampas de PP e garrafas PET, mostrou-se tecnicamente viável e coerente com as propriedades intrínsecas dos materiais empregados. A comparação entre o núcleo desenvolvido e o núcleo comercial de PET (Armacell GR80 GSP) evidencia que, embora o núcleo de PP apresente resistência à compressão 44,45% inferior ao comercial, tal comportamento é compatível com as características naturais do material, visto que o PP possui resistência mecânica cerca de 73,7% menor que o PET, conforme discutido no referencial teórico. Assim, mesmo com propriedades inferiores, o núcleo obtido apresentou desempenho proporcionalmente melhor ao esperado para o material utilizado, demonstrando eficiência estrutural.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta de desenvolver um núcleo para estruturas sanduíche a partir de garrafas PET descartadas e comparar um referencial disponível comercialmente sugere o potencial de utilização do PET reciclado e tampas em aplicações estruturais de materiais compósitos, como também reforçam seu papel na promoção da sustentabilidade ao agregar valor aos resíduos plásticos.

Dada a relevância e o potencial de impacto desta pesquisa, estudos práticos foram realizados para aprofundar a análise das propriedades mecânicas, já que os materiais utilizados por si só possuem propriedades interessantes. O estudo se faz eficiente, já que os resultados foram condizentes com a opção disponível no mercado no que tange o foco principal deste estudo, e mesmo os resultados em compressão serem inferiores não inviabilizam sua utilização como núcleo em uma estrutura sanduíche, seguindo a teoria de distribuição de tensões.

Além disso, a continuidade da pesquisa no contexto de explorar otimizações no processo de fabricação, possíveis adaptações para aplicações industriais e estudos de propriedades específicas como absorção acústica, térmica em novos estudos podem se tornar cada vez mais próximo a realidade o uso como estrutura sanduíche em que o núcleo como parte central não deve sofrer grandes deformações, e considerando que o resultado de uma matéria prima reciclada se mostrou 18,75% melhor do que o PET ARMACELL GR80 em flexão.

O desvio padrão encontrado, pode ser explicado pela variação de lote das tampas de garrafas utilizadas, assim como um possível baixo padrão e controle de produção. Isso poderia ser validado com maiores quantidades de amostra para obter um cenário mais amplo.

Outro ponto importante de se ressaltar é que o custo de produção é potencialmente menor, já que se trata de uma matéria prima amplamente utilizada e com valores de vendas baixas e acessíveis. Assim, este trabalho contribui para o avanço de soluções sustentáveis e inovadoras no campo dos materiais compósitos, abrindo caminhos para aplicações mais amplas e desafiadoras no futuro.

## REFERÊNCIAS

- (1) WWF BRASIL. Sustentabilidade: o que é e como ela impacta a sociedade. Disponível em: [https://www.wwf.org.br/participe/porque\\_participar/sustentabilidade/#:~:text=%C3%89%20o%20desenvolvimento%20que%20n%C3%A3o,econ%C3%B4mico%20e%20a%20conserva%C3%A7%C3%A3o%20ambiental](https://www.wwf.org.br/participe/porque_participar/sustentabilidade/#:~:text=%C3%89%20o%20desenvolvimento%20que%20n%C3%A3o,econ%C3%B4mico%20e%20a%20conserva%C3%A7%C3%A3o%20ambiental). Acesso em: 20 dez. 2024.
- (2) ABIPET (Associação Brasileira da Indústria de PET). Reciclagem de PET no Brasil. Disponível em: <https://abipet.org.br/reciclagem/#:~:text=n%C3%BAmero%20em%20reciclagem&text=O%20%C3%ADndice%20de%20reciclagem%20brasileiro,o%20volume%20registrado%20m%202019>. Acesso em: 19 dez. 2024.
- (3) NETO, Flaminio L.; PARDINI, Luiz C. *Compósitos estruturais: ciência e tecnologia*. São Paulo: Blucher, 2016.
- (4) MARINUCCI, Gerson. *Materiais compósitos poliméricos: fundamentos e tecnologia*. São Paulo: Artliber, 2011.
- (5) GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A.; SANTOS, Carlos Alexandre dos. *Ensaio dos Materiais*, 2ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2012. E-book. p.176. ISBN 978-85-216-2114-0. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2114-0/>. Acesso em: 26 nov. 2025.
- (6) UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto). *Compostos 2019 - Alunos, Parte 2*. Disponível em: [http://professor.ufop.br/sites/default/files/claudio/files/compositos\\_2019\\_alunos\\_parte\\_2.pdf](http://professor.ufop.br/sites/default/files/claudio/files/compositos_2019_alunos_parte_2.pdf). Acesso em: 26 nov. 2024.
- (7) POLÍMEROS: ciência e tecnologia. *Poli(Tereftalato de Etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem*. v. 19, 2009.
- (8) NOVAIS, Stéfano Araújo. Plástico PET: o que é, características, aplicações. *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/pet-plastico-momento.htm>. Acesso em: 30 nov. 2025.
- (9) RODRIGUES, Marinele Tolentino. *Estudo de propriedades de propileno puro e reciclado*. 2020. 96 f. Disponível em: [http://ppgem.sites.uff.br/wp-content/uploads/sites/182/2021/06/Marinele-Tolentino-Rodrigues\\_vers%C3%A3o-final.pdf](http://ppgem.sites.uff.br/wp-content/uploads/sites/182/2021/06/Marinele-Tolentino-Rodrigues_vers%C3%A3o-final.pdf). Acesso em: 30 nov. 2025.
- (10) CRQ-SP. O que são plásticos? Disponível em: <https://crqsp.org.br/plasticos/>. Acesso em: 30 nov. 2025

- (11) Matheus Dantas; Luiz Gustavo de Moura da Silva Barbosa. *Avaliação de propriedades mecânicas do polipropileno*. In: JEPExErechim 2018 – Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão, 7., Erechim, RS, 2018. Anais... Disponível em:  
<https://eventos.ifrs.edu.br/index.php/JEPEXErechim/JepexErechim2018/paper/viewFile/6031/2194>. Acesso em: 30 nov. 2025.
- (12) OLIVEIRA, Pablo Resende; MAY, Michael; PANZERA, Tulio Hallak; SCARPA, Fabrizio; HIERMAIER, Stefan. Improved sustainable sandwich panels based on bottle caps core. *Composites Part B: Engineering*, v. 199, p. 108165, 2020. ISSN 1359-8368. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836820319235>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- (13) COLORADO, H. A.; SALDARRIAGA, L.; RENDÓN, J.; CORREA-OCHOA, M. A. *Polymer composite material fabricated from recycled polyethylene terephthalate (PET) with polyurethane binder for potential noise control applications*. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, [S. l.], v. 24, p. 466-476, 2022. DOI: 10.1007/s10163-021-01330-4. Disponível em:  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-021-01330-4>. Acesso em: 19 nov. 2025.