

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**LUCAS RAMONE BORGES LOPIS SOUZA**

**SELEÇÃO DE FIBRAS NATURAIS COMO REFORÇO PARA COMPÓSITOS DA  
CARENAGEM DE UM VEÍCULO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**PATO BRANCO**

**2023**

**LUCAS RAMONE BORGES LOPIS SOUZA**

**SELEÇÃO DE FIBRAS NATURAIS COMO REFORÇO PARA COMPÓSITOS DA  
CARENAGEM DE UM VEÍCULO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**Selection of Natural Fibers as Reinforcement for Fairing Composites of an  
Energy Efficient Vehicle**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel/Licenciado em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Dalmarino Setti.

**PATO BRANCO**

**2023**



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

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

**LUCAS RAMONE BORGES LOPIS SOUZA**

**SELEÇÃO DE FIBRAS NATURAIS COMO REFORÇO PARA COMPÓSITOS DA  
CARENAGEM DE UM VEÍCULO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

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

Data de aprovação: 01/Dezembro/2023

---

Dalmarino Setti  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Maria Nalu Verona Gomes  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Bruno Bellini Medeiros  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PATO BRANCO**

**2023**

Dedico este trabalho às pessoas mais importantes da minha vida, meus amados amigos, companheiros e pais, Maria das Graças e Arlito Moreira.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Prof. Dr. Dalmarino Setti pelo apoio, confiança, dedicação, autonomia e amizade despendidos ao longo do trabalho.

À minha companheira Marcela Cristina pelo suporte nos momentos mais desafiadores da minha trajetória.

À minha família pelo apoio incondicional que se teve desde os meus primeiros instantes no curso de graduação.

Aos amigos de graduação, Advan Lanhi, Douglas Martins, Gabriel Froza, Ítalo Peres, Jeová Oliveira, Jhonathan Steffens, Mike Duarte, Públio Klein e Ricardo Ferreira pela amizade, boa convivência e companheirismo ao longo de toda a graduação.

Aos membros da equipe Pato a Jato pela troca de experiências e por todo o suporte prestado durante o trabalho.

A todos os colegas de turma com quem tive a honra de cursar pela troca de conhecimentos, experiências, vivências e histórias.

A todo o corpo docente da UTFPR Câmpus Pato Branco com quem eu tive o prazer de participar das aulas ministradas por toda fundamentação, sustentação, assistência e cooperação ofertadas, imprescindíveis para a conclusão da minha graduação.

Ao programa de graduação em Bacharelado/Licenciatura em Engenharia Mecânica ofertado pela UTFPR Câmpus Pato Branco pela estrutura ofertada e pela oportunidade concedida.

O insucesso é apenas uma oportunidade para  
recomeçar com mais inteligência.  
(FORD, Henry, 1947).

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver a seleção de fibras naturais como reforço para compósitos da carenagem de um veículo de eficiência energética, por meio de dois métodos aplicados a seleção de materiais, o método de multicritério TOPSIS e o método de comparação com a fibra original. Utilizando o método padrão de seleção de materiais, foram restringidas as variáveis do material compósito, direcionando o estudo à seleção de fibras de reforço e limitando a análise às fibras de origem vegetal. Em seguida foram definidos os critérios de seleção (i) massa específica; (ii) módulo elástico; (iii) resistência à tração; (iv) preço; e as necessidades de maximização ou minimização relacionadas aos critérios selecionados. A definição dos pesos de cada critério se deu por meio do uso do método *2-tuple*, onde três membros experientes da equipe Pato a Jato avaliaram a importância de cada critério por meio de variáveis linguísticas. Foram selecionadas dez fibras naturais alternativas à fibra de vidro que é atualmente utilizada na fabricação do projeto, onde por meio dos métodos de classificação de TOPSIS e comparação à fibra original, foi obtida uma matriz que representa a ordenação de classificação das fibras alternativas, para cada um dos métodos de classificação. Ao final, pelo método de TOPSIS a fibra de bambu foi a que apresentou o melhor desempenho demonstrando um coeficiente de similaridade com a solução ideal de 0.777 e pelo método de comparação com a fibra original, a fibra de juta estava no topo da classificação com o coeficiente de similaridade com a fibra original de 0.318. Para aplicações leves, em que o material não está sujeito à esforços mecânicos significativos, a utilização das fibras de bambu e juta representam uma opção sustentável em relação à fibra de vidro utilizada atualmente. Análises semelhantes poderiam ser aplicadas ao modelo proposto para outros contextos que envolvam seleção de fibras naturais.

Palavras-chave: Carenagem; compósito; fibra natural; *2-tuple*; TOPSIS.

## ABSTRACT

This work aims to develop the selection of natural fibers as reinforcement for composites in the fairing of an energy-efficient vehicle, using two methods applied to material selection: the TOPSIS multi-criteria method and the original fiber comparison method. The variables of the composite material were restricted, directing the study to the selection of reinforcing fibers and limiting the analysis to fibers of plant origin. The selection criteria were then defined: (i) specific mass, (ii) elastic modulus, (iii) tensile strength, (iv) price, and the maximization or minimization needs related to the selected criteria. The weights for each criterion were defined using the 2-tuple method, with three experienced members of the Pato a Jato team evaluating the importance of each criterion using linguistic variables. Ten natural fibers were selected as alternatives to the glass fiber currently used in the manufacture of the project. Using the TOPSIS classification methods and a comparison with the original fiber, a matrix was obtained representing the ranking of the alternative fibers for each classification method. In the end, using the TOPSIS method, the bamboo fiber was the best performer, showing a similarity coefficient with the ideal solution of 0.777, and using the comparison method with the original fiber, the jute fiber was at the top of the ranking with a similarity coefficient with the original fiber of 0.318. For light applications, where the material is not subject to significant mechanical stress, bamboo and jute fibers represent a sustainable option compared to the glass fiber currently used. Similar analyses could be applied to the proposed model for other contexts involving the selection of natural fibers.

Keywords: Fairing; composite; natural fiber; 2-tuple; TOPSIS.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Painéis, tampos e revestimentos internos utilizados no automóvel Classe E da Mercedes-Benz produzidos com material polimérico reforçado com fibras vegetais, como linho e sisal. ....	15
Figura 2 - Diagrama esquemático de seleção de materiais. ....	17
Figura 3 - Escolhendo um material. Requisitos de projeto são expressos em primeiro lugar como restrições e objetivos. As restrições são para triagem. Os sobreviventes são classificados pelo objetivo, expresso como um índice de material. ....	18
Figura 4 - A estratégia para seleção de materiais. As quatro etapas principais – tradução, triagem, classificação e documentação. ....	19
Figura 5 - Representação de um compósito reforçado com fibras contínuas e alinhadas. ....	21
Figura 6 - Produção mundial de fibra natural: 32 Milhões de Toneladas em 2018 .....	26
Figura 7 - Produção mundial de fibra. 110 milhões de toneladas em 2018. ....	26
Figura 8 - Estrutura química de um grupo 'epóxido' simples (Ethylene Oxide). ....	29
Figura 9 - Estrutura química dum 'epoxido', o Diglicidil - Éter do Bisfenol .....	30
Figura 10 - Representação esquemática da resina de epóxido (estrutura curada 3D) .....	30
Figura 11 - Veículo de eficiência energética tripulado da equipe Pato a Jato. ...	33
Figura 12 – A embalagem de alimentos feitas de compósito reforçado por fibra de bambu .....	48
Figura 13 – Bancos feitos de compósitos reforçados por fibra de juta. ....	49
Quadro 1 - Vantagens e deantagens dos polímeros termofixos e termoplásticos. ....	28
Quadro 2 - Relação entre restrições e necessidades. ....	34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variável linguística para classificação da importância dos critérios selecionados.....	35
Tabela 2 - Avaliações linguísticas de pesos de critérios, pesos de critérios linguísticos <i>2-tuple</i> e pesos de critérios de números reais para membros experientes da equipe Pato a Jato.....	41
Tabela 3 - Propriedades dos materiais.....	42
Tabela 4 - Matriz Normalizada. ....	42
Tabela 5 - Matriz Peso versus Normalização. ....	43
Tabela 6 - Distância a Solução Positiva Ideal. ....	43
Tabela 7 - Distância a Solução Negativa Ideal.....	44
Tabela 8 - Coeficiente de similaridade com a solução ideal.....	44
Tabela 9 - Critérios de seleção para a fibra de vidro-E. ....	45
Tabela 10 - Matriz de índices relativos ao material original.....	45
Tabela 11 - Coeficiente de similaridade com fibra original.....	46

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>13</b>
1.1.1	Objetivo principal .....	13
1.1.2	Objetivos específicos .....	13
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Engenharia sustentável</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Seleção de materiais</b> .....	<b>16</b>
2.2.1	Classificação pelo método TOPSIS .....	19
<b>2.3</b>	<b>Materiais compósitos</b> .....	<b>20</b>
2.3.1	Compósitos reforçados com fibras alinhadas e contínuas .....	21
2.3.2	Processos de fabricação de compósitos .....	22
<u>2.3.2.1</u>	<u>Moldagem por contato ou laminação manual</u> .....	<u>22</u>
<b>2.4</b>	<b>Reforço de fibra de vidro</b> .....	<b>23</b>
<b>2.5</b>	<b>Reforço de fibras naturais</b> .....	<b>23</b>
<b>2.6</b>	<b>Custos e mercado</b> .....	<b>25</b>
<b>2.7</b>	<b>Matriz polimérica</b> .....	<b>27</b>
2.7.1	Resina Epóxi .....	29
<b>2.8</b>	<b>Carenagem</b> .....	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>O projeto</b> .....	<b>33</b>
3.1.1	Compósito Fibra de Vidro/Epóxi .....	33
<b>3.2</b>	<b>Metodologia de seleção de materiais</b> .....	<b>34</b>
<b>3.3</b>	<b>Tradução e dedução do índice</b> .....	<b>34</b>
<b>3.4</b>	<b>Triagem</b> .....	<b>34</b>
<b>3.5</b>	<b>Classificação</b> .....	<b>35</b>
3.5.1	Cálculo dos pesos pelo modelo computacional linguístico <i>2-tuple</i> .....	35
3.5.2	Método TOPSIS .....	37
<u>3.5.2.1</u>	<u>Normalização da matriz original</u> .....	<u>37</u>
<u>3.5.2.2</u>	<u>Identificar as soluções Positivas e Negativas Ideais</u> .....	<u>38</u>
3.5.3	Método de classificação por comparação à fibra original .....	39
<b>3.6</b>	<b>Documentação</b> .....	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>41</b>

<b>4.1</b>	<b>Cálculo dos pesos pelo método <i>2-tuple</i></b> .....	<b>41</b>
<b>4.2</b>	<b>Classificação dos materiais por TOPISIS</b> .....	<b>41</b>
<b>4.3</b>	<b>Classificação por comparação à fibra original</b> .....	<b>44</b>
<b>4.4</b>	<b>Estudos relacionados às fibras de bambu e juta em cenários análogos</b> .....	<b>46</b>
4.4.1	Propriedades e aplicações de bambu e compósitos de fibra de bambu.	46
4.4.2	Investigação experimental de propriedades mecânicas de compósitos de matriz polimérica híbrida reforçada com bambu/fibra de carbono.....	46
4.4.3	Preparação e caracterização de compósito estratificado de tecido de juta utilizando polímeros reforçados com fibra de bambu como matriz de resina .....	47
4.4.4	Investigação experimental do comportamento mecânico do compósito juta/fibra de vidro infundido com MWCNT .....	47
<b>4.5</b>	<b>Discussões</b> .....	<b>48</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os danos ambientais causados pelo uso e descarte de plásticos e compósitos são preocupantes. Se esta tendência continuar, poderá causar danos sem precedentes aos nossos recursos naturais. Por exemplo, com novas legislações ambientais, a regulamentação ambiental da União Europeia (Erbach, G., 2014) visa reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em componentes automóveis através da utilização de novas tecnologias, design melhorado e redução geral do peso. Materiais compósitos reforçados com fibras de carbono e vidro são amplamente utilizados como materiais estruturais, devido às suas excelentes resistências e relações rigidez-peso.

Esses atributos tornam esses materiais opções muito atraentes para setores industriais críticos, como aeroespacial, marítimo e automotivo. É lógico pensar que ser capaz de reduzir a massa total resulta numa redução significativa do volume, o que conseqüentemente leva à utilização de menos matérias-primas e à redução global de CO<sub>2</sub> (Dhakal, 2021).

No entanto, os reforços compósitos, como as fibras de vidro e de carbono, atualmente utilizados nos setores de transporte acima mencionados, apresentam baixa reciclabilidade após o fim da vida útil e elevado consumo global de energia durante a sua produção. Devido a estas preocupações ambientais e de utilização energética, uma nova classe de materiais, incluindo compósitos reforçados com fibras vegetais naturais, está a ser introduzida nestes sectores críticos (Dhakal, 2021).

### 1.1 Objetivos

#### 1.1.1 Objetivo principal

Este trabalho tem como objetivo desenvolver a seleção de fibras naturais como reforço para compósitos da carenagem de um veículo de eficiência energética, por meio de dois métodos aplicados a seleção de materiais, o método de multicritério TOPSIS e o método de comparação com a fibra original.

#### 1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, destacam-se: (i) Identificar as restrições dos materiais e definir os critérios de para o estudo de seleção. (ii) Selecionar as fibras naturais por meio dos dois métodos de classificação: TOPSIS e comparação à fibra

original. (iii) Realizar um estudo de documentação no qual é avaliada a aplicabilidade dos resultados obtidos pelo método de seleção de materiais.

## **1.2 Justificativa**

A pesquisa atual é impulsionada pela necessidade imperativa de implementar uma engenharia sustentável no âmbito universitário considerando que o engenheiro é a pessoa cuja função é projetar ou construir máquinas, motores ou equipamentos elétricos, estradas, ferrovias ou pontes, produtos domésticos, materiais agrícolas e outros bens desejados pela sociedade, utilizando princípios científicos onde o engenheiro desenvolve processos utilizando uma coleção de matérias-primas e energia e os converte na forma desejada.

A fabricação dos produtos que a sociedade deseja é acompanhada pela produção de resíduos, alguns dos quais não podem ser evitados. Historicamente, o engenheiro tem conseguido otimizar o processo para ser mais eficiente com base no lucro máximo que pode ser obtido pelo processo de conversão, pegando materiais de pouco ou nenhum valor e transformando-os em materiais de maior valor. Pressões internacionais impulsionadas por questões ambientais demandam que a curva de aprendizado dessas habilidades de otimização no âmbito da engenharia esteja em constante crescimento (Abraham, 2006).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Engenharia sustentável

A Engenharia Sustentável reconfigura as disciplinas e práticas de engenharia para integrar aqueles que favorecem a sustentabilidade. Este campo engloba o desenvolvimento e implementação de tecnologias economicamente viáveis em produtos, processos e sistemas, visando promover o bem-estar humano enquanto preserva a saúde humana e eleva a proteção da biosfera como distribuídos primordiais nas soluções de engenharia (Abraham, 2006). Essa abordagem paradigmática busca harmonizar avanços tecnológicos com imperativos ambientais, estabelecendo um equilíbrio entre progresso industrial e preservação ambiental para garantir um futuro sustentável.

Na Figura 1, são representados painéis, tampos e revestimentos internos do automóvel Classe E da Mercedes-Benz, fabricados através de uma aplicação de material polimérico reforçado com fibras vegetais, tais como linho e sisal, evidenciando a incorporação desses componentes de base biológica na indústria automotiva.

**Figura 1 - Painéis, tampos e revestimentos internos utilizados no automóvel Classe E da Mercedes-Benz produzidos com material polimérico reforçado com fibras vegetais, como linho e sisal.**



Fonte: Akampumuza et al. (2017)

Segundo Abraham, para implementar totalmente as soluções de engenharia sustentáveis, os engenheiros devem utilizar os seguintes princípios: (i) Projeto de processos e produtos de forma holística, usando análise de sistemas e integração ferramentas de avaliação de impacto ambiental. (ii) Conservação e melhoria dos ecossistemas naturais, protegendo a saúde humana e bem-estar. (iii) Uso do pensamento do ciclo de vida em todas as atividades de engenharia. (iv) Certificação de que todas as entradas e saídas de material e energia são inerentemente seguras e tão benignas quanto possível. (v) Minimização do esgotamento dos recursos naturais. (vi) Esforço para evitar o desperdício. (vi) Desenvolvimento e aplicação de soluções de engenharia, estando ciente do local geografia, aspirações e culturas. (vii) Criação de soluções de engenharia além das tecnologias atuais ou dominantes; melhorias, inovações e invenções tecnológicas para alcançar a sustentabilidade. (viii) Envolvimento ativo das comunidades e das partes interessadas no desenvolvimento da engenharia de soluções.

## **2.2 Seleção de materiais**

A seleção de materiais é feita com o propósito de escolha, para uma aplicação específica, o material mais adequado em termos de propriedades e características desejadas. Diversos atributos, como densidade, resistência mecânica, custo e resistência à corrosão, entre outros, são considerados. Um projeto específico exige um conjunto específico dessas propriedades, como baixa densidade, elevada resistência mecânica, custo moderado e resistência à corrosão em ambientes marítimos, por exemplo (Michael F. Ashby, 2011).

No contexto da engenharia de materiais, a seleção é essencial para melhorar o desempenho do material de acordo com os requisitos do projeto. A ponderação cuidadosa desses atributos é crucial, uma vez que influencia diretamente na funcionalidade e durabilidade do produto. A busca por um material ideal envolve análises de propriedades físicas e mecânicas, bem como considerações econômicas e ambientais (Michael F. Ashby, 2011).

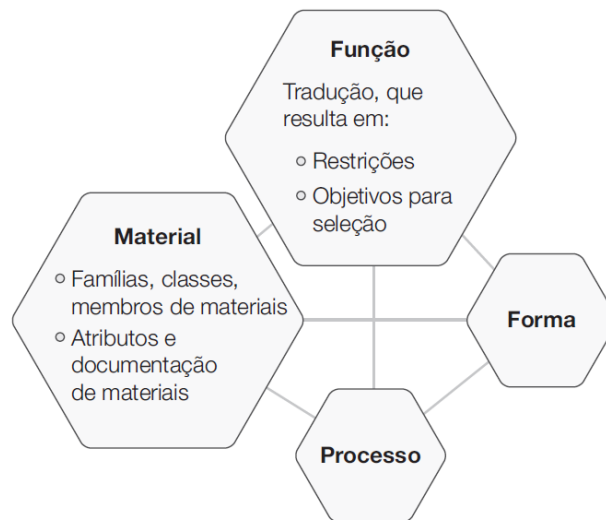
Portanto, a seleção de materiais não é apenas uma escolha técnica, mas uma decisão estratégica que visa atender às demandas específicas de uma aplicação, maximizando a eficiência do projeto e minimizando impactos adversos. Este processo, fundamental na engenharia de materiais, destaca-se como um elemento central na



busca por inovação, sustentabilidade e excelência no desenvolvimento de produtos e sistemas (Michael F. Ashby, 2011).

A Figura 2 representa um diagrama esquemático que exemplifica o processo de seleção de materiais, destacando os critérios e considerações pertinentes à escolha de materiais para uma aplicação específica, evidenciando a abordagem sistemática exigida na engenharia de materiais (Michael F. Ashby, 2011).

**Figura 2 - Diagrama esquemático de seleção de materiais.**



**Fonte: Michael F. Ashby (2011)**

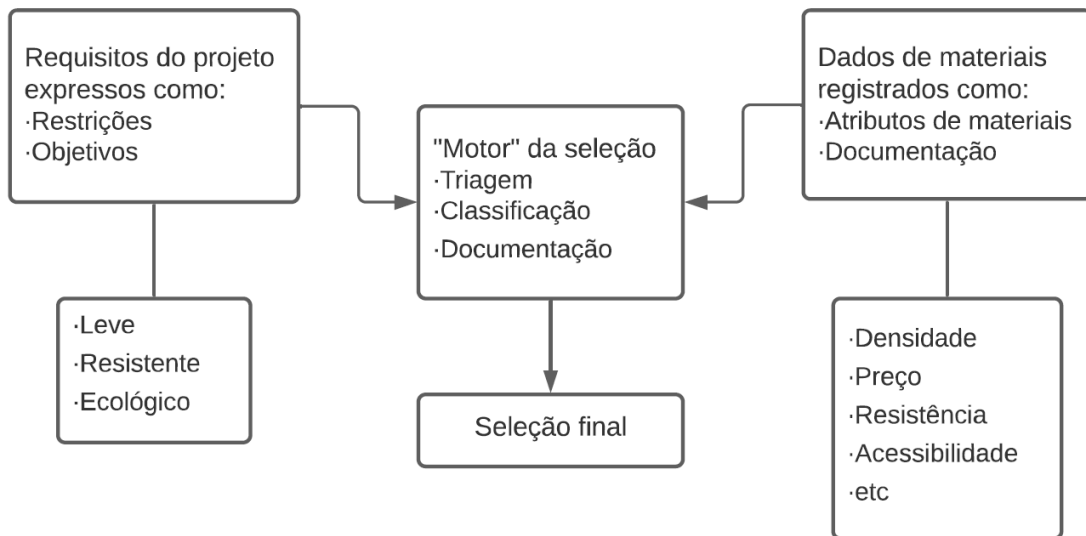
É importante começar com a lista completa de materiais como opções; não fazer isso pode significar uma oportunidade perdida por deixar de fora algum material com potencial (Michael F. Ashby, 2011).

A seleção de materiais consiste em duas grandes etapas: (i) Identificar o perfil de atributos desejado; e então (ii) Compará-lo com os dos materiais de engenharia reais para encontrar a melhor combinação.

Um material tem atributos: sua densidade, resistência mecânica, custo, resistência à corrosão e assim por diante. Um projeto exige certo perfil dessas propriedades: baixa densidade, alta resistência, custo modesto e resistência à água do mar, talvez. É importante começar com a lista completa de materiais como opções; não fazer isso pode significar uma oportunidade perdida. (Michael F. Ashby, 2011).

Foi utilizado o método padrão de seleção de materiais para um projeto mecânico, onde é estabelecido a ligação entre material e função. A estratégia de seleção de materiais que foi aplicada é retratada na Figura 3 a seguir.

**Figura 3 - Escolhendo um material. Requisitos de projeto são expressos em primeiro lugar como restrições e objetivos. As restrições são para triagem. Os sobreviventes são classificados pelo objetivo, expresso como um índice de material.**



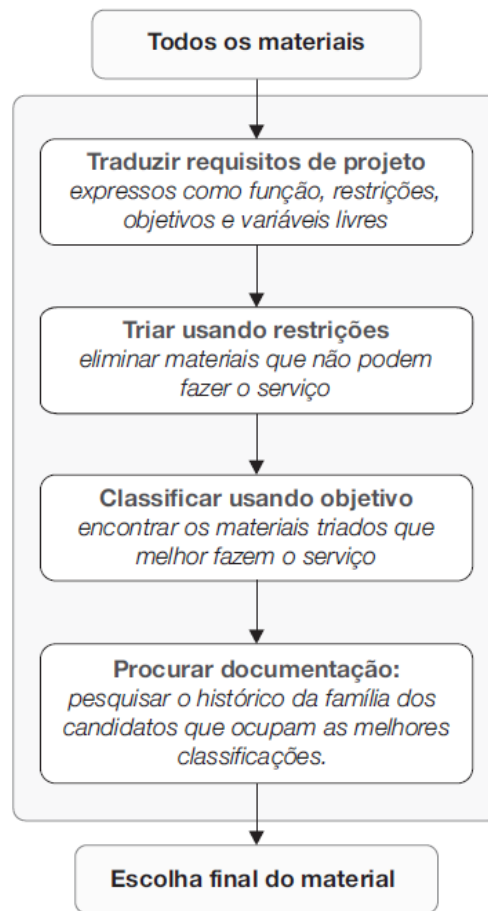
**Fonte: Michael F. Ashby (2011). Adaptado.**

Selecionar materiais envolve procurar a melhor combinação entre os requisitos de projeto e as propriedades dos materiais que poderiam ser usados para elaborar o projeto. À esquerda na Figura 3 estão os requisitos que o material deve cumprir, expressos como restrições e objetivos (Michael F. Ashby, 2011).

À direita está o banco de dados de atributos de materiais, retirado de planilhas de dados de fornecedores, manuais, fontes da *web* ou *software* projetado especificamente para seleção de materiais. O método de comparação aplica as restrições à esquerda aos materiais à direita, tria e elimina materiais que não as cumprem e apresenta uma lista de candidatos viáveis (Michael F. Ashby, 2011).

A primeira etapa da seleção é a tradução – examinar os requisitos de projeto para identificar as restrições que eles impõem à escolha do material. A imensa amplitude de escolha é reduzida, em primeiro lugar, por triagem e eliminação dos materiais que não podem cumprir as restrições. Reduz-se ainda mais a amplitude por classificação dos candidatos conforme sua capacidade de maximizar desempenho (Ashby, 2011).

**Figura 4 - A estratégia para seleção de materiais. As quatro etapas principais – tradução, triagem, classificação e documentação.**



**Fonte: Michael F. Ashby (2011)**

A Figura 4 exemplifica a estratégia adotada na seleção de materiais, compreendendo quatro fases fundamentais: tradução, triagem, classificação e documentação. Este esquema visual representa o processo científico contínuo para a identificação, avaliação e registro sistemático de materiais, demonstrando as etapas sequenciais necessárias para a tomada de decisões embasadas na seleção de materiais para uma aplicação específica (Michael F. Ashby, 2011).

### 2.2.1 Classificação pelo método TOPSIS

O método TOPSIS, descrito por Hwang e Yoon (1981), é utilizado para avaliar o desempenho de múltiplos atributos para identificar soluções por similaridade a partir de um conjunto finito de alternativas, sendo que, a alternativa escolhida deve possuir a menor distância possível com a solução positiva ideal ( $A^+$ ) e a maior distância possível da solução ideal negativa ( $A^-$ ). O método TOPSIS foi adaptado para o modelo

2-tuple por Wei (2010), a versão desse autor foi adequada ao desenvolvimento deste trabalho.

### **2.3 Materiais compósitos**

Um material compósito é composto de pelo menos dois materiais visualmente distintos, que se combinam para dar propriedades superiores às dos constituintes individuais, mantendo suas respectivas propriedades químicas, físicas e mecânicas, contribuindo propriedades desejáveis para o todo (Hull e Clyne, 1996; Matthews e Rawlings, 1994). A principal razão pela qual os materiais compósitos são usados para aplicações de engenharia é devida ao seu alto desempenho em relação à resistência e rigidez específicas aprimoradas (relação força / peso). Este atributo ajuda a reduzir o peso geral de componentes. Se considerarmos uma peça automotiva, por exemplo, a redução do total peso leva à redução do consumo de combustível, aumento do desempenho e, eventualmente, leva à redução das emissões de CO<sub>2</sub> (Erbach, 2014).

A demanda por materiais de propriedades específicas e não convencionais é imperativa em diversas aplicações de alta tecnologia, especialmente nas indústrias aeroespacial, submarina, bioengenharia e de transporte. Engenheiros aeronáuticos, por exemplo, buscam incessantemente materiais estruturais com baixa massa específica, resistência, resistência à abrasão e impacto, e resistência à corrosão. Essa combinação de características representa um desafio, pois materiais monolíticos resistentes geralmente exibem densidade significativa, sendo que o aumento da resistência ou tensão frequentemente resulta em redução da tenacidade (Callister, 2007).

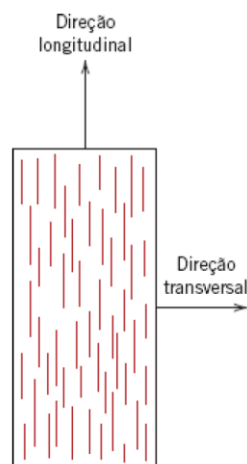
Os materiais compósitos, muitas vezes constituídos por duas fases, denominadas matriz e dispersão de fase, desempenham papel crucial nesse cenário. As essas propriedades compostas estão intrinsecamente ligadas às características das fases constituintes, à sua proporção e à geometria da dispersão de fase. No contexto desta análise, a geometria da dispersão de fase engloba a forma, tamanho, distribuição e orientação das partículas (Callister, 2007). Compreender e otimizar essas configurações torna-se fundamental para desenvolver materiais que atendam aos requisitos exigidos das aplicações tecnológicas avançadas, contribuindo para avanços significativos nas áreas mencionadas.

### 2.3.1 Compósitos reforçados com fibras alinhadas e contínuas

Tecnologicamente, os compósitos mais importantes são aqueles em que a fase dispersa está na forma de uma fibra. Os objetivos de projeto dos compósitos reforçados com fibras incluem, com frequência, alta resistência e/ou rigidez em relação ao peso. Essas características são expressas em termos dos parâmetros resistência específica e módulo específico, que correspondem, respectivamente, às razões entre o limite de resistência à tração e a massa específica e entre o módulo de elasticidade e a massa específica. Compósitos reforçados com fibras com resistências e módulos específicos excepcionalmente elevados são produzidos empregando fibras e matrizes de baixa massa específica (Callister, 2007).

Na Figura 5 é apresentada uma representação gráfica de um compósito reforçado por fibras contínuas e homologadas. A visualização destaca a disposição estruturada das fibras ao longo da matriz, evidenciando a configuração específica que contribui para as propriedades mecânicas distintas desse material compósito na engenharia de materiais (Callister, 2007).

**Figura 5 - Representação de um compósito reforçado com fibras contínuas e alinhadas.**



**Fonte: Callister (2007)**

As respostas mecânicas em compósitos desse tipo são intrinsecamente dependentes de diversos fatores, incluindo os comportamentos de tensão-deformação das fases fibra e matriz, como frações volumétricas das fases apresentadas e a orientação em que a carga ou tensão é aplicada. Além disso, as propriedades desses compósitos, nas quais as fibras estão homologadas, manifestam

uma alta anisotropia, ou seja, variação significativamente conforme a direção em que são avaliadas (Callister, 2007).

Para compreender tal comportamento, é fundamental analisar a resposta tensão-deformação quando a carga é aplicada ao longo da direção de alinhamento, conhecida como direção longitudinal (Callister, 2007). Nesse contexto, a anisotropia das propriedades torna-se evidente, revelando que as características mecânicas do compósito são distintas ao longo dessa direção específica. Essa análise analítica é crucial para projetar e utilizar composições alinhadas de maneira eficaz, fornecendo insights fundamentais para aplicações específicas nas quais a orientação das fibras exerce influência significativa no desempenho do material.

### 2.3.2 Processos de fabricação de compósitos

Existem diversos processos de fabricação de compósitos, dos mais simples aos mais complexos e especializados. Através deles transforma-se as matérias-primas, resinas, fibras, cargas, aditivos etc., em peças e produtos. Os processos mais conhecidos e utilizados são: moldagem por contato ou laminação manual, laminação por projeção simultânea, laminação contínua, bolsa de vácuo, infusão a vácuo, moldagem por transferência de resina ou RTM (light e alta pressão), enrolamento filamentar, pultrusão, processos de moldagem a quente como o SMC e o BMC, preenchimento e autoclave, dentre muitos outros especializados e com variações (Abmaco, 2009).

#### 2.3.2.1 Moldagem por contato ou laminação manual

É o mais simples de todos os processos de fabricação de compósitos e consiste em impregnar com uma resina termofixa diversas camadas de reforço usualmente dispostas em um molde côncavo. Para tal impregnação, utiliza-se rolos ou pincéis e, após a laminação do laminado este pode ser submetido a uma compressão para que haja melhor adesão entre as camadas e que as bolhas em excesso sejam expulsas (Targa, 2011).

É um método simples, que requer poucos investimentos e equipamento, porém custoso do ponto de vista da mão de obra e ineficiente do ponto de vista da produtividade. É aplicado principalmente na fabricação de cascos de barcos, piscinas, carenagens de veículos, entre outros (Abmaco, 2009).

## 2.4 Reforço de fibra de vidro

A maior parte da fibra de vidro utilizada no compósito é feita de vidro fundido combinado com sílica. Isso confere à fibra de vidro propriedades superiores de volume, como resistência, rigidez, flexibilidade e dureza. Devido a esses atributos, as fibras de vidro são utilizadas em compósitos estruturais. Os principais tipos de fibra de vidro utilizados na produção de compósitos reforçados são o vidro S e o vidro E. As fibras de vidro normalmente vêm em dois tipos: (i) as fibras de uso geral de baixo custo (vidro E) e (ii) as fibras premium para fins especiais.

Entre as principais vantagens da utilização de fibras de vidro estão a redução de custos, a incapacidade de conduzir calor e, portanto, o aumento do potencial de isolamento, bem como as suas boas propriedades mecânicas e anticorrosividade. Essas fibras são amplamente utilizadas nos setores automotivo e marítimo. No entanto, hoje em dia, as fibras de carbono são utilizadas nestas aplicações em vez das fibras de vidro devido à sua elevada relação resistência/peso.

## 2.5 Reforço de fibras naturais

Após a Segunda Guerra Mundial, foram iniciados os compósitos produzidos a partir de polímeros de reforço com fibras sintéticas. As propriedades mecânicas dos compósitos finais foram dramaticamente aprimoradas em comparação com as propriedades dos polímeros envolvidos. No início da década de 1960, esses compósitos de base polimérica eram muito caros e eram usados em aplicações muito limitadas (Al-Oqla et al, 2014).

No entanto, na década de 1990, seus custos diminuíram drasticamente e, portanto, foram utilizados em uma gama mais ampla de aplicações. Mas isso gerou uma enorme quantidade de produção e, substancialmente, em seus resíduos, gerou um sério problema ambiental. Ao lado disso, o aumento dos preços do petróleo e o esgotamento de seus recursos desenvolveram uma nova tendência de utilização de recursos naturais e dos compósitos de base biológica.

As fibras naturais são consideradas o principal tipo de constituinte nos compósitos de polímero reforçado com fibra natural, uma vez que é o constituinte independente do compósito. Ou seja, o termo “constituinte independente” é proposto porque a matriz polimérica é tipicamente indicada para ser adequada para um tipo particular de fibra natural, mas não o contrário. Isso ocorre porque as fibras naturais

têm suas próprias características naturais que não podem ser alteradas ou modificadas drasticamente (pois fazem parte de fontes naturais como as plantas) em comparação com as dos polímeros, que têm características que podem ser alteradas no futuro, ou é possível produzir novos polímeros com capacidades mais desejáveis, mas as capacidades das fibras naturais podem não ser alteradas significativamente, mesmo se alguns tratamentos forem considerados (Al-Oqla et al, 2014).

Fibras vegetais naturais como cânhamo, linho, juta e quenafe precisam ser separadas de suas cascas. As fibras dessas plantas são normalmente extraídas por maceração, seguida de processamento mecânico (Sultana, 1992).

Os processos utilizados para fabricar reforços convencionais, como carbono e vidro, são inerentemente diferentes daqueles utilizados na produção de fibras naturais como reforços compósitos. No que diz respeito às propriedades mecânicas das fibras naturais comumente usadas, como cânhamo, linho, quenafe e juta, por exemplo, suas propriedades são relativamente altas, mas transformar essas propriedades mecânicas de alta qualidade nos compósitos resultantes tem sido um desafio à medida que o processamento de fibras etapas influencia ou afeta as propriedades finais das fibras (Al-Oqla et al, 2014).

As técnicas de processamento de fibras introduzem defeitos nas fibras em níveis micro e macro. Esses defeitos criados na superfície da fibra acabam degradando as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibra natural (Gager et al., 2019). No processo de separação, diferentes processos, como maceração e cunhagem são utilizados. Estes processos têm efeitos significativos na qualidade das fibras, bem como na composição química destas fibras (Merotte et al., 2016).

Defeitos nas superfícies das fibras, podem ser facilmente introduzidos durante esses processos. Estes defeitos podem afetar significativamente as propriedades mecânicas e térmicas globais destas fibras. As propriedades globais, portanto, dependem da variabilidade natural, bem como dos danos sofridos durante o seu processamento (Merotte et al., 2016).

Esses compósitos são baseados em plantas e estoques agrícolas que são renováveis. Sem dúvida, não é possível substituir completamente todos os produtos à base de petróleo por produtos de base biológica (Sultana, 1992).

No entanto, uma combinação de ambos pode levar a produtos úteis. Por outro lado, o baixo custo e o meio ambiente, bem como as baixas densidades dos



compósitos de fibra natural, aumentaram drasticamente sua importância para a produção de produtos verdes sustentáveis. Além disso, sua menor abrasividade, capacidade de renovação e menor consumo de energia durante o processamento são recursos adicionais que demonstram sua popularidade crescente (Sultana, 1992).

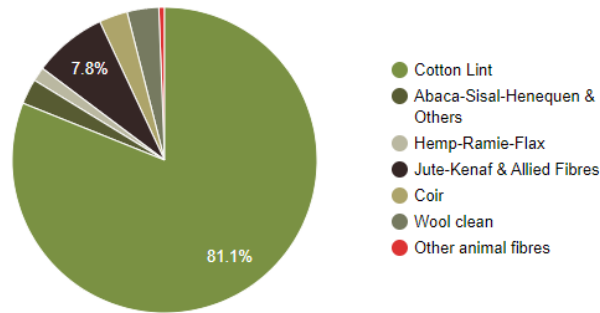
Porém, alguns desafios estão enfrentando a tendência de utilizar as fibras naturais em diferentes aplicações na indústria. Um desafio importante é a incompatibilidade com os polímeros, visto que as fibras naturais são hidrofílicas por natureza, enquanto a maioria dos polímeros usados são hidrofóbicos. Muitas investigações e testes têm sido realizados para reduzir essa incompatibilidade por meio de agentes de acoplamento e por meio de tratamentos físicos e químicos. A baixa temperatura permissível é outro desafio durante a formação dos compósitos de fibras naturais para evitar a degradação térmica das fibras, o que também limita a seleção do polímero para tais fibras naturais (Al-Oqla e Salit, 2017).

## **2.6 Custos e mercado**

A produção mundial de fibra natural em 2018 foi de 32 milhões de toneladas métricas. A DNFI, em cooperação com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), recolhe estatísticas sobre 14 categorias de fibras naturais, desde Abacá até Lã e Outras Fibras Animais. Durante a última década, a produção mundial de fibra natural variou entre 28 milhões de toneladas e 35 milhões de toneladas, sendo a maior parte da variação anual causada por alterações nos rendimentos ligadas ao clima. O algodão representou 81% da produção de fibra natural em peso em 2018, a juta representou 7%, enquanto a fibra de coco e a lã representaram cada uma 3%, conforme ilustra a Figura 6 (<https://dnfi.org/>. Acesso em agosto).

O valor agrícola da produção mundial de fibra natural em 2018 é estimado em 60 mil milhões de dólares, acima dos 40 mil milhões de dólares em 2016 e 2017. O algodão representou dois terços da produção de fibra natural em valor e a lã representou um quarto. Os preços do algodão têm estado acima da média nos últimos anos, uma vez que o Governo da China reteve o abastecimento do mercado através do funcionamento de uma Reserva Estatal. Os preços da lã atingiram níveis recorde em 2018, devido ao declínio do número de ovinos associado à seca no Hemisfério Sul (<https://dnfi.org/>. Acesso em agosto).

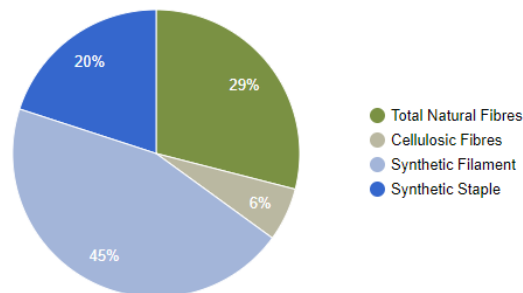
**Figura 6 - Produção mundial de fibra natural: 32 Milhões de Toneladas em 2018**



Fonte: <https://dnfi.org/> (2023)

A produção mundial de todas as fibras têxteis e de vestuário atingiu 110 milhões de toneladas em 2018, e as fibras naturais representaram 29% do total, abaixo dos 41% em 2008. A produção de fibras celulósicas representou 6% do total em 2018, os filamentos sintéticos representaram 45% e fibra sintética 20%. As fibras sintéticas são dominadas pelo poliéster, que representa quase 90% da produção mundial de filamentos e 70% da produção mundial de fibras sintéticas como mostra a Figura 7. As restantes fibras sintéticas são compostas majoritariamente por nylon, acrílico e polipropileno (<https://dnfi.org/>. Acesso em agosto).

**Figura 7 - Produção mundial de fibra. 110 milhões de toneladas em 2018.**



Fonte: <https://dnfi.org/> (2023)

O declínio da participação das fibras naturais na produção total de fibras na última década é o resultado do crescimento exponencial da produção de poliéster. Entre 2008 e 2018, a produção de filamentos sintéticos (utilizados principalmente em vestuário fast-fashion) quase duplicou, passando de 26 milhões de toneladas para 50 milhões. Durante o mesmo período, a produção de produtos básicos sintéticos aumentou de 15 milhões de toneladas para 22 milhões, e a produção de fibras naturais aumentou apenas de 31 milhões de toneladas para 32 milhões (<https://dnfi.org/>. Acesso em agosto).

## 2.7 Matriz polimérica

A palavra “matriz” é uma palavra polivalente com amplas aplicações e interpretações. No caso da ciência dos materiais, matriz refere-se a matrizes cerâmicas, metálicas ou poliméricas de um material compósito. No campo da ciência dos compósitos, as matrizes poliméricas são os materiais mais utilizados. “Poli” vem da palavra grega para “muitos” e “mero” vem da palavra grega para “partes”. Portanto, um polímero é uma longa cadeia de moléculas composta por uma série de unidades básicas repetidas chamadas “meros”. Os materiais poliméricos são mais comumente usados em todos os aspectos de nossas vidas (Stewart, 2011).

Esses materiais são geralmente conhecidos como plástico e são os mais amplamente utilizados na fabricação de compósitos. Estas matrizes são subdivididas em dois tipos; termoplásticos e polímeros termofixos. As principais diferenças entre estes dois tipos de matrizes são que os termoplásticos podem ser reaquecidos e reformados para alterar a forma ou permitir que a forma de um componente seja reformada, ou seja, são retrabalhados à temperatura.

Matrizes termoplásticas são moléculas de alto peso molecular e cadeia longa que podem ser amorfas ou parcialmente cristalinas (Stewart, 2011). Os materiais compósitos reforçados com termoplástico são vantajosos quando a resistência, bem como o comportamento melhorado da tenacidade são importantes.

O Quadro 1 apresenta uma exposição das vantagens e desvantagens dos polímeros termofixos e termoplásticos. Essa análise comparativa destaca as características distintivas dessas classes de polímeros, proporcionando uma visão abrangente sobre os benefícios e limitações associadas a cada tipo, fundamental para a seleção criteriosa em aplicações específicas na engenharia de materiais (Gurit, 2011).

**Quadro 1 - Vantagens e deantagens dos polímeros termofixos e termoplásticos.**

	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Termofixos</b>	baixa viscosidade da resina. boa umectação das fibras. excelente estabilidade térmica depois de curada. quimicamente resistente. melhor resistência à fluência do que os termoplásticos.	propenso a fragilidade. não pós-formável. não reciclável através de técnicas padrão.
<b>Termoplásticos</b>	reciclável. fácil de reparar por soldagem e colagem com solvente. pós-formável. boa resistência ao impacto.	baixo ponto de fusão. precisam ser aquecidos acima do ponto de fusão para fins de processamento.

**Fonte: Armentia et al., (2019). Adaptado.**

A capacidade de reaquecer matrizes termoplásticas oferece retrabalho e capacidade de formular pellets, o que permite maior liberdade na fabricação (Mallick, 2008; Stewart, 2011). Os termoplásticos, como matriz em materiais compósitos, vêm crescendo gradativamente devido à sua capacidade de reciclagem e rápido ciclo de produção (Armentia et al., 2019).

Matrizes termofixas são resinas que se reticulam durante a cura (endurecimento), resultando em sólidos vítreos quebradiços, como epóxi, éster vinílico e poliésteres. As estruturas reticuladas evitam que o polímero flua e derreta, o que pode proporcionar a estabilidade térmica do polímero. Os termofixos usados ou descartados não podem ser reutilizados ou reciclados (Armentia et al., 2019).

Para obter propriedades ótimas do compósito, uma cura adequada da matriz (reação química) é muito importante. As funções de uma matriz são as seguintes: (i) Ligação das fibras (reforços) e transferência da carga aplicada às fibras. (ii) Isola as fibras para que fibras individuais possam agir separadamente (interface fibra-matriz). (iii) Oferece bom acabamento superficial e usinabilidade. (iv) Fornece proteção às fibras contra ataques químicos e outros desgastes mecânicos. (v) Fornece outras propriedades secundárias.

Em resumo, as principais funções da matriz em compósitos reforçados são suportar e transferir as tensões para as fibras (reforços), que suportam a maior parte da carga e protegem as fibras contra danos físicos e ambientais (Armentia et al., 2019).

### 2.7.1 Resina Epóxi

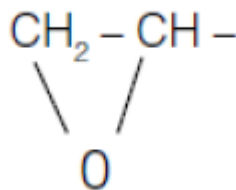
Essas resinas são matrizes de alto desempenho em termos de propriedades mecânicas. Devido à estrutura reticulada, a matriz epóxi apresenta boa estabilidade dimensional. Eles apresentam alta tensão até a falha em comparação com outras resinas, como poliésteres e ésteres vinílicos (Duro, 2013).

A resina epóxi possui boa resistência química, além de ser menos propensa à umidade em comparação aos poliésteres e éster vinílico. No entanto, os epóxios são polímeros frágeis e muitas vezes a tenacidade desta resina é aumentada pelo uso de alguns aditivos. Geralmente, quando a tenacidade aumenta, o módulo e a temperatura de transição vítrea diminuem (Gurit, 2011).

As resinas de epóxi, em comparação com as outras resinas termoendurecíveis, são as que apresentam maior desempenho, pois possuem propriedades mecânicas e resistência à degradação ambiental superiores. Por esse motivo, aplicam-se sobretudo nas indústrias aeroespacial e aeronáutica. Elas podem ainda ser utilizadas como adesivos, revestimentos, tintas e vernizes (Duro, 2013).

Caracterizam-se por apresentarem grupos epóxido, constituído por um átomo de oxigênio que se liga a dois átomos de carbono, na sua molécula (Duro, 2013). Eles formam habitualmente anéis, conhecido por 'alfa-epoxidos' ou 'epoxidos', tal como podemos observar na Figura 8.

**Figura 8 - Estrutura química de um grupo 'epóxido' simples (Ethylene Oxide).**

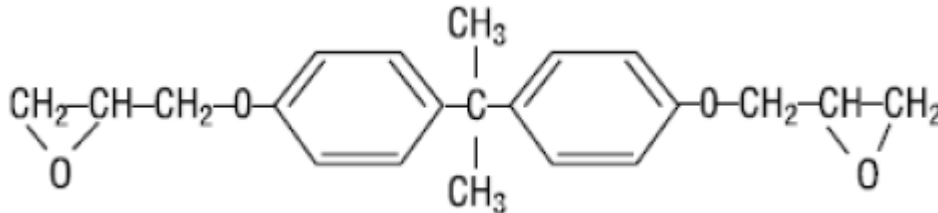


**Fonte: Gurit (2011)**

As resinas de epóxido são geradas a partir de uma longa cadeia molecular com grupos radicais ativos “epóxido” nas extremidades, que lhes conferem uma boa resistência à humidade (Gurit, 2011). Os dois grupos aromáticos que se encontra no centro da estrutura molecular da resina de epóxido absorvem tensões mecânicas e

térmicas, atribuindo-lhe boa rigidez, resistência e propriedades de resistência ao calor, tal como se pode observar na Figura 9.

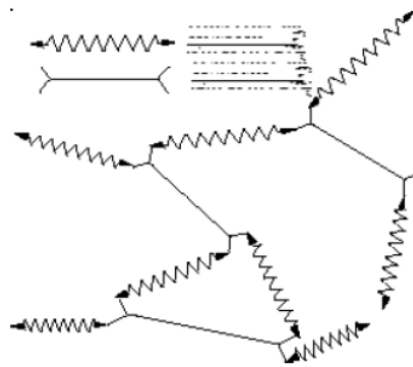
**Figura 9 - Estrutura química dum 'epóxido', o Diglicidil - Éter do Bisfenol**



**Fonte: Gurit (2011)**

Para que ocorra a reação de cura numa resina de epóxido é necessário adicionar-lhe um endurecedor. Após cura, as propriedades finais da resina dependem do endurecedor utilizado, do seu teor, da temperatura de cura e do tratamento de pós-cura (Gurit, 2011). O endurecedor, normalmente uma amina, quando adicionado à resina, gera uma reação de adição. Existem dois grupos ativos na cadeia molecular da resina de epóxido que se ligam aos grupos ativos da amina, formando uma estrutura molecular tridimensional complexa, como se pode observar na Figura 10.

**Figura 10 - Representação esquemática da resina de epóxido (estrutura curada 3D)**



**Fonte: Gurit (2011)**

O teor de endurecedor a utilizar na mistura deve corresponder ao definido pelo fornecedor, para assegurar uma reação completa, visto que as moléculas de amina reagem com as moléculas 'epóxido' numa proporção fixa. Para que ocorra uma mistura correta, os fornecedores calculam a proporção a utilizar a partir da formulação dos componentes. É ainda possível controlar o tempo de gel da mistura durante o processo, através da alteração de temperatura, teor do endurecedor ou seleção de

um tipo específico de endurecedor (endurecedor do tipo lento, médio ou rápido). Estas resinas apresentam, normalmente, excelentes propriedades mecânicas, bom isolamento elétrico e excelente estabilidade dimensional, resistência à corrosão, propriedades de adesão e ao contacto com a humidade, baixa contração após a cura e uma boa resistência à abrasão. A sua baixa contração após a cura, no máximo cerca de 2%, permite limitar o nível tensões internas no compósito final o que também contribuí para a sua boa estabilidade dimensional e resistência à fadiga. A resina de epóxi possui tipicamente uma cor âmbar ou castanho (Gurit, 2011).

## 2.8 Carenagem

A etimologia da palavra "carenagem" remonta ao latim "carina" ou "carena", aludindo ao perfil aerodinâmico do peito de aves voadoras, que era replicado na estrutura de cascos de embarcações que moviam a velocidade aquática, minimizando a resistência ao deslocamento. Até o final do século XIX, a prática de "carenar" uma embarcação, consistindo em virá-la de cabeça para baixo, era empregada para realizar a manutenção do casco. Este procedimento foi conduzido em dias secos, mas ao longo do tempo, evoluiu para métodos mais eficientes, extinguindo a necessidade dessa prática. Atualmente, a carenagem representa uma técnica moderna e especializada para aprimoramento da hidrodinâmica de embarcações, sendo a manutenção de cascos realizada em instalações específicas, marcando uma transição notável na engenharia naval e na preservação de embarcações (Hemp, 1976).

Na contemporaneidade, o termo "carenagem" refere-se à cobertura externa que envolve uma estrutura de veículos em movimento em meios fluidos, incluindo mar, terra e ar, como lanchas, aerobarcos, automóveis, aeronaves e motocicletas. A principal função da carenagem é otimizar o desempenho de deslocamento rápido, focando a aerodinâmica ou hidrodinâmica para mitigar o arrasto induzido pelo movimento (Hemp, 1976).

Entretanto, o aumento constante da velocidade pode transformar o casco de uma embarcação em um obstáculo ao posicionamento veloz, levando ao desenvolvimento de barças que elevam a carenagem acima da linha d'água em velocidades mais elevadas. Carros de corrida, por sua vez, incorporam não apenas carenagem aerodinâmica penetrante, mas também spoilers, resultando em configurações semelhantes aos hidrofólios. Enquanto os hidrofólios mantêm uma

manutenção totalmente fora da água, sustentados pelos spoilers, os carros de corrida utilizam spoilers para forçar o veículo contra o solo (Hemp, 1976).

São feitas normalmente de plástico, fibra de vidro ou até mesmo de fibra de carbono ou outros materiais mais leves, e tem como principais funções cobrir o motor dando um fluxo certo para o ar dentro (refrigeração do motor) e fora da carenagem e dando um acabamento mais bonito à moto, e também contribuir para diminuir a resistência do vento em altas velocidades, melhorando o conforto do piloto quando as mesmas possuem dimensões maiores ou melhor penetração aerodinâmica quando menores exigindo que o piloto fique deitado sobre o tanque para uma tocada mais rápida e também para se esconder da turbulência do ar (Hemp, 1976).



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 O projeto

O objeto de estudo deste trabalho se trata de parte do projeto desenvolvido pela equipe de eficiência energética Pato a Jato, da UTFPR campus Pato Branco, mais precisamente as carenagens do veículo de eficiência energética tripulado que não estão sob esforços mecânicos, o veículo foi ilustrado como na Figura 11.

**Figura 11 - Veículo de eficiência energética tripulado da equipe Pato a Jato.**



**Fonte: Pato a Jato/ Facebook (2023)**

A carenagem atual do veículo foi fabricada utilizando um compósito reforçado com fibra de vidro, que física e mecanicamente atende as necessidades do protejo, mas não é o ideal quando se toma como um fator de restrição de material as recomendações de engenharia sustentável.

Em contrapartida a isso, foi avaliada a composição do compósito constituinte da carenagem do veículo e apontado as possibilidades de atualização do modo de fabricação atual para um que priorize ao máximo os recursos renováveis e ecologicamente apropriados.

##### 3.1.1 Compósito Fibra de Vidro/Epóxi

A fabricação artesanal das carenagens adota o processo de laminação de compósitos, utilizando matriz epóxi reforçada com fibra de vidro, é o mais simples de

todos os processos de fabricação de compósitos e consiste em impregnar com uma resina termofixa diversas camadas de reforço usualmente dispostas em um molde côncavo. Para tal impregnação, utiliza-se rolos ou pincéis e, após a laminação do laminado este pode ser submetido a uma compressão para que haja melhor adesão entre as camadas e que as bolhas em excesso sejam expulsas. A fração de fibras obtida na laminação é de cerca de 30 %m/m, porém maiores valores podem ser alcançados com a maior permeabilidade do reforço, menor viscosidade da resina e maior pressão de compressão (Targa, 2011).

Diante desse contexto, para a diminuição do máximo de variáveis possíveis, esta pesquisa de seleção de materiais concentra-se na exploração de alternativas apenas em relação à fibra de reforço atualmente utilizadas no processo de fabricação em questão. Embora as opções de fibras naturais sejam limitadas, elas emergem como escolhas viáveis para reforço em compósitos.

### 3.2 Metodologia de seleção de materiais

Foi empregado o método convencional de seleção de materiais para um projeto mecânico, estabelecendo a clareza entre as propriedades dos materiais e a especificação funcional.

### 3.3 Tradução e dedução do índice

O Quadro 2, apresentada a seguir, destaca as restrições a serem atendidas, maximizadas ou minimizadas.

**Quadro 2 - Relação entre restrições e necessidades.**

<b>Restrição</b>	<b>Necessidade</b>
Fonte renovável	Atender
Origem vegetal	Atender
Peso	Minimizar
Propriedades mecânicas	Atender
Preço	Minimizar

Fonte: Autoria própria.

### 3.4 Triagem

Nesse estágio do processo de seleção o grande fator de restrição se deu pela necessidade da utilização de fibras renováveis de origem vegetal, que apesar da

diminuição nas alternativas disponíveis ainda nos fornece uma ampla gama de opções com as mais variadas espécies de vegetais.

### 3.5 Classificação

Nessa etapa foram utilizados dois procedimentos de classificação, o método multicritérios TOPSIS e um método de classificação por comparação ao material original.

#### 3.5.1 Cálculo dos pesos pelo modelo computacional linguístico *2-tuple*

Introduzido por Martínez e Herrera (2000), sendo utilizado para elevar a acurácia da computação linguística. O modelo simbólico *2-tuple* realiza a extensão do uso de índices para modificar a representação da aproximação linguística fuzzy, incluindo um novo parâmetro à representação linguística básica.

Foi avaliado pelos membros experientes da equipe Pato a Jato o grau de importância dos critérios selecionados conforme ilustra a Tabela 1.

**Tabela 1 - Variável linguística para classificação da importância dos critérios selecionados.**

Variável Linguística	Variável linguística <i>2-tuple</i>
Muito Baixa (MB)	(S <sub>0</sub> ,0)
Baixa (B)	(S <sub>1</sub> ,0)
Razoavelmente Baixa (RB)	(S <sub>2</sub> ,0)
Razoável (R)	(S <sub>3</sub> ,0)
Razoavelmente Alta (RA)	(S <sub>4</sub> ,0)
Alta (A)	(S <sub>5</sub> ,0)
Muito Alta (MA)	(S <sub>6</sub> ,0)

Fonte: Autoria própria.

Definição 1: A tradução simbólica é um valor numérico acessado entre  $[-0,5; 0,5)$  que se refere a diferença de informação na contagem de informação  $\beta$ , avaliada no intervalo  $[0; g]$  do conjunto  $S$  e o valor mais próximo de  $\{0; \dots; g\}$ , que indica o índice do termo linguístico mais próximo em  $S$ .

Este modelo define um conjunto de funções de transformação entre valores numéricos e a variável linguística *2-tuple*, facilitando os processos computacionais.

Definição 2: Sendo  $S = \{S_0, \dots, S_g\}$  um conjunto de termos linguísticos e  $\beta \in [0, g]$  um valor que suporta o resultado de uma operação de agregação

simbólica. Uma variável linguística *2-tuple* que expressa a informação equivalente a  $\beta$ , considerando que  $\Delta: [0, g] \rightarrow \bar{S}$ , é obtida com  $\Delta(\beta) = (s_i, \alpha)$ , sendo que  $s_i$  é o termo com índice  $i = \text{round}(\beta)$  e  $\alpha = \beta - i, \alpha \in [-0.5; 0.5)$ , assim, temos a Equação (1) com  $\text{round}$  definindo que o índice  $i$  representa o inteiro mais próximo de  $\beta$ , e  $\alpha$  sendo o valor numérico (Martínez e Herrera, 2000).

$$\Delta^{-1} = (S_i, \alpha) = i + \alpha \quad (1)$$

Definição 3: Sendo  $S = \{S_0, \dots, S_g\}$  um conjunto de termos linguísticos e  $(s_i, \alpha_i)$  seja um *2-tuple*. Sempre existe uma função  $\Delta^{-1}$  que pode ser definida, tal que, a partir de um *2-tuple*  $(s_i, \alpha_i)$ , retorna seu valor numérico equivalente  $\beta \in [0, g]$ , que é (Martínez e Herrera, 2000):

$$\Delta^{-1}: S \times [-0.5, 0.5) \rightarrow [0, g] \quad (2)$$

$$\Delta^{-1}(s_i, \alpha_i) = i + \alpha_i = \beta \quad (3)$$

A partir das Definições 1 e 2, podemos concluir que a conversão de um termo linguístico em uma *2-tuple* linguística consiste em adicionar um valor 0 como tradução simbólica:  $\Delta(s_i) = (s_i, 0)$ .

Definição 4: Sejam  $a = (s_k, \alpha_k)$  e  $b = (s_l, \alpha_l)$  duas *2-tuple*, elas devem ter as seguintes propriedades:

Se  $k < l$ , então  $a < b$ .

Se  $k = l$ , então

Se  $\alpha_k = \alpha_l$ , então  $a = b$ ;

Se  $\alpha_k < \alpha_l$ , então  $a < b$ ;

Se  $\alpha_k > \alpha_l$ , então  $a > b$ ;

Existe um operador negativo:  $Neg(s_i, \alpha) = \Delta(g - (\Delta^{-1}(s_i, \alpha)))$ , onde  $(s_i, \alpha_i)$  é uma *2-tuple* arbitrária,  $g + 1$  é a cardinalidade de  $S$ ,  $S = \{S_0, \dots, S_g\}$ .

O peso linguístico agregado dos critérios foi obtido pela Equação (4), e o peso dos critérios na forma de números reais foi obtido pela Equação (5) conforme proposto por (Setti et al., 2019).

$$(w_i, \alpha_i) = \Delta \left( \frac{1}{k} \sum_l^k = \Delta^{-1}(w_{kj}, \alpha_{kj}) \right) \quad (4)$$

$$w_j = \frac{\Delta^{-1}(w_j, \alpha_{w_j})}{\sum_{j=1}^n \Delta^{-1}(w_j, \alpha_{w_j})} \quad (5)$$

Onde  $(w_j, \alpha_j)$  = peso linguístico agregado do critério  $j$  na forma de uma variável linguística *2-tuple* e  $w_j$  = peso do critério  $j$ , na forma de número real.

### 3.5.2 Método TOPSIS

A escolha criteriosa, respaldada pelo TOPSIS, foi realizada com o intuito de fornecer uma base objetiva para a seleção das fibras naturais mais adequadas, considerando diversas propriedades e características.

#### 3.5.2.1 Normalização da matriz original

Foi elaborada uma matriz de índices, composta por  $n$  materiais alternativos e  $m$  critérios para classificação. Cada célula representa o módulo da propriedade avaliada, estipulado como estratégia de seleção para o material correspondente, expresso pela Equação (6).

$$A = (x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{im}), \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

A matriz  $A$  é submetida a um processo de normalização, e a matriz normalizada resultante é denotada como  $R$ . Cada elemento  $r_{ij}$  na matriz  $R$  é calculado de acordo com a Equação (7). A matriz padronizada  $R$  é representada como Equação (8).

$$r_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$R = (r_{i1}, \dots, r_{ij}, \dots, r_{in}), \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

Os valores de peso de cada critério são incorporados na matriz normalizada apor meio da Equação (9).

$$v_{ij} = w_j r_{ij}, \quad i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m \quad (9)$$

### 3.5.2.2 Identificar as soluções Positivas e Negativas Ideais.

Para a matriz normalizada  $A$  representada pela Equação (8), o vetor  $A^+$  que representa o valor máximo do índice de avaliação é definido conforme mostrado na Equação (10), enquanto o vetor  $A^-$  representando o valor mínimo do índice de avaliação é definido conforme mostrado na Equação (11).

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_m^+\} = \left\{ \left( \max_i v_{ij} | j \in J_1 \right), \left( \min_i v_{ij} | j \in J_2 \right) | i = 1, 2, \dots, n \right\} \quad (10)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_m^-\} = \left\{ \left( \min_i v_{ij} | j \in J_1 \right), \left( \max_i v_{ij} | j \in J_2 \right) | i = 1, 2, \dots, n \right\} \quad (11)$$

Então, a distância  $D_i^+$  entre o  $i$ -ésimo objeto de avaliação e o alvo ideal é definida como mostrado na Equação (12), e a distância  $D_i^-$  entre o  $i$ -ésimo objeto de avaliação e o alvo não ideal é definido conforme mostrado na Equação (13).

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_j^+ - v_{ij})^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_j^- - v_{ij})^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

Por fim, o cálculo dos coeficientes de similaridade com a solução ideal para o  $i$ -ésimo objeto de avaliação é dado pela Equação (14). Pode-se observar que um

valor maior de  $S_i$  indica um valor menor de  $D_i^+$ , indicando que o objeto de avaliação está mais próximo do alvo ideal.

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

### 3.5.3 Método de classificação por comparação à fibra original

Fazendo uso da Equação (6), nesse procedimento, os índices dos critérios de seleção das fibras alternativas foram comparados com os da fibra de vidro-E utilizada atualmente na fabricação da carenagem.

Para critérios de maximização o índice foi calculado conforme a Equação (15), onde  $G = (g, \dots, g_m)$  que se refere aos critérios de seleção correspondentes à fibra de vidro-E.

$$h_{ij}^+ = \frac{x_{ij}}{g_j}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

Já para critérios de minimização o índice foi calculado conforme a Equação (16).

$$h_{ij}^- = \frac{g_j}{x_{ij}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

Para a obtenção do ranking geral foi feito o uso da Equação (17) e para o ranking geral normalizado foi empregada a Equação (18).

$$R = (h_1^+ \cdot h_2^- \cdot \dots \cdot h_m^+) \quad (17)$$

$$R'_i = R_i / \sum_{i=1}^n R_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

## 3.6 Documentação

Das etapas anteriores até aqui uma lista com diversos candidatos foi reduzida a uma curta e ordenada lista de dois candidatos que cumprem as restrições e maximizam ou minimizam o critério de excelência, seja qual for o exigido. Para seguir adiante procuramos um perfil detalhado de cada candidato: sua documentação.

A documentação consiste em estudos onde os materiais mais bem colocados nas ordenações de cada processo de classificação foram submetidos a aplicações semelhantes às necessitadas neste projeto.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Cálculo dos pesos pelo método 2-tuple

Foram adquiridos os valores dos pesos correspondendo considerando a avaliação de três membros experientes da equipe Pato a Jato e os valores de peso através do uso das Equações (4) e (5) os quais são exibidos na Tabela 2.

**Tabela 2 - Avaliações linguísticas de pesos de critérios, pesos de critérios linguísticos 2-tuple e pesos de critérios de números reais para membros experientes da equipe Pato a Jato.**

Membros experientes da Pato a Jato	Critério			
	Massa específica	Módulo elástico	Resistência à tração	Preço
Avaliação 1	A	RA	RA	RA
Avaliação 2	RA	A	A	RB
Avaliação 3	MA	MA	MA	MA
Equação (4)	(S <sub>4</sub> , +0.33)	(S <sub>5</sub> , 0.00)	(S <sub>5</sub> , 0.00)	(S <sub>4</sub> , 0.00)
Equação (5)	0,236	0,273	0,273	0,218

Fonte: Autoria própria.

### 4.2 Classificação dos materiais por TOPISIS

Foi realizada uma avaliação das propriedades mecânicas das principais fibras de origem vegetal por meio de uma revisão abrangente da literatura especializada. Esta análise abrangeu diversas fontes científicas, possibilitando a compilação e comparação das características mecânicas dessas fibras. Aspectos como resistência à tração, módulo de elasticidade e custo do material foram minuciosamente examinados, estabelecendo uma base sólida para a compreensão das propriedades mecânicas dessas fibras vegetais. Essa abordagem sistemática visa fornecer insights específicos para o estudo de seleção de materiais, permitindo a identificação das fibras mais específicas para aplicações específicas, considerando seu desempenho mecânico sob diversas condições e demandas.

Utilizando como referência as espécies e os métodos de processamento de cada material, com foco em usos análogos como reforços para compósitos, foram delineados os índices de seleção conforme apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3 - Propriedades dos materiais.**

Alternativas	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo elástico (Gpa)	Resistência à tração (Mpa)	Preço (US\$/kg)
Fibra	C1 (-)	C2 (+)	C3 (+)	C4 (-)
Juta	1,40 <sup>a</sup>	20,00 <sup>a</sup>	835,00 <sup>a</sup>	0,63 <sup>e</sup>
Cânhamo	1,47 <sup>b</sup>	70,00 <sup>b</sup>	690,00 <sup>b</sup>	9,20 <sup>e</sup>
Linho	1,50 <sup>a</sup>	27,60 <sup>a</sup>	10,45 <sup>a</sup>	3,34 <sup>e</sup>
Sisal	1,45 <sup>d</sup>	15,00 <sup>d</sup>	500,00 <sup>d</sup>	0,50 <sup>e</sup>
Quenafe	1,51 <sup>a</sup>	32,00 <sup>a</sup>	15,50 <sup>a</sup>	1,49 <sup>e</sup>
Abacá	1,50 <sup>a</sup>	41,00 <sup>a</sup>	24,81 <sup>a</sup>	2,80 <sup>e</sup>
Henequén	1,53 <sup>a</sup>	13,00 <sup>a</sup>	16,00 <sup>a</sup>	4,10 <sup>e</sup>
Coco	1,30 <sup>b</sup>	5,00 <sup>b</sup>	175,50 <sup>b</sup>	0,23 <sup>e</sup>
Algodão	1,52 <sup>d</sup>	14,70 <sup>d</sup>	543,00 <sup>d</sup>	0,99 <sup>e</sup>
Bambu	1,40 <sup>c</sup>	46,00 <sup>c</sup>	860,00 <sup>c</sup>	1,60 <sup>e</sup>

Fonte: <sup>a</sup>Dhakal (2021); <sup>b</sup>Mohanty (2005); <sup>c</sup>Targa (2011); <sup>d</sup>Duro (2013); <sup>e</sup><https://dnfi.org/> (2023). Adaptado.

Para facilitar a compreensão do estudo, a partir daqui os nomes das fibras de reforço candidatas atenderão pela sua abreviação correspondente, assim como os índices de seleção, como também é ilustrado na Tabela 3.

Realizando o procedimento de normalização conforme a Equação (7), obtivemos uma matriz normalizada, conforme ilustrado na Tabela 4. Este processo é crucial para garantir uma análise equitativa e objetiva, permitindo a comparação precisa das propriedades dos materiais considerando os critérios específicos.

**Tabela 4 - Matriz Normalizada.**

Fibra	C1 (-)	C2 (+)	C3 (+)	C4 (-)
Juta	0,303	0,186	0,529	0,056
Cânhamo	0,318	0,652	0,437	0,817
Linho	0,325	0,257	0,007	0,296
Sisal	0,314	0,140	0,317	0,044
Quenafe	0,327	0,298	0,010	0,132
Abacá	0,325	0,382	0,016	0,249
Henequén	0,331	0,121	0,010	0,364
Coco	0,282	0,047	0,111	0,020
Algodão	0,329	0,137	0,344	0,088
Bambu	0,303	0,429	0,545	0,142

Fonte: Autoria própria.

Com os pesos calculados anteriormente foi possível avançar ao próximo passo, onde foram aplicados os valores dos pesos na matriz normalizada por meio da Equação (9). A matriz resultante é representada na Tabela 5.

**Tabela 5 - Matriz Peso versus Normalização.**

Fibra	C1 (-)	C2 (+)	C3 (+)	C4 (-)
Juta	0,072	0,051	0,144	0,012
Cânhamo	0,075	0,178	0,119	0,178
Linho	0,077	0,070	0,002	0,065
Sisal	0,074	0,038	0,086	0,010
Quenafe	0,077	0,081	0,003	0,029
Abacá	0,077	0,104	0,004	0,054
Henequén	0,078	0,033	0,003	0,079
Coco	0,067	0,013	0,030	0,004
Algodão	0,078	0,037	0,094	0,019
Bambu	0,072	0,117	0,149	0,031

Fonte: Autoria própria.

Identificadas as soluções positivas e negativas ideais, foi avançado ao próximo passo onde foram calculadas as distâncias entre as alternativas e as soluções positivas ideais  $A^+$ , com a utilização das Equações (10) e (12). O vetor resultante  $A^+$  é ilustrado na Tabela 6.

**Tabela 6 - Distância a Solução Positiva Ideal.**

Fibra	C1 (-)	C2 (+)	C3 (+)	C4 (-)	$A^+$
Juta	0,005	-0,127	-0,004	0,008	0,127
Cânhamo	0,009	0,000	-0,029	0,174	0,176
Linho	0,010	-0,108	-0,147	0,060	0,192
Sisal	0,008	-0,140	-0,062	0,005	0,153
Quenafe	0,011	-0,097	-0,146	0,024	0,177
Abacá	0,010	-0,074	-0,144	0,050	0,170
Henequén	0,012	-0,145	-0,146	0,075	0,219
Coco	0,000	-0,165	-0,118	0,000	0,203
Algodão	0,011	-0,141	-0,055	0,015	0,152
Bambu	0,005	-0,061	0,000	0,027	0,067

Fonte: Autoria própria.

O procedimento é semelhante para obtenção das distâncias entre as alternativas e as soluções negativas ideais  $A^-$ , porém foi feito o uso das Equações (11) e (13). Com isso, foi calculado o vetor  $A^-$  representado na Tabela 7.

**Tabela 7 - Distância a Solução Negativa Ideal.**

<b>Fibra</b>	<b>C1 (-)</b>	<b>C2 (+)</b>	<b>C3 (+)</b>	<b>C4 (-)</b>	<b>A-</b>
<b>Juta</b>	-0,007	0,038	0,143	-0,166	0,222
<b>Cânhamo</b>	-0,003	0,165	0,117	0,000	0,203
<b>Linho</b>	-0,002	0,057	0,000	-0,113	0,127
<b>Sisal</b>	-0,004	0,025	0,085	-0,169	0,190
<b>Quenafe</b>	-0,001	0,069	0,001	-0,149	0,164
<b>Abacá</b>	-0,002	0,091	0,002	-0,124	0,154
<b>Henequén</b>	0,000	0,020	0,001	-0,099	0,101
<b>Coco</b>	-0,012	0,000	0,029	-0,174	0,176
<b>Algodão</b>	-0,001	0,025	0,092	-0,159	0,185
<b>Bambu</b>	-0,007	0,104	0,147	-0,147	0,233

**Fonte: Autoria própria.**

Concluindo, o vetor  $S$  de semelhança com a solução ideal normalizado foi obtido, empregando as Equações (12) e (13) como é demonstrado na Tabela 8. Este passo final no O processo TOPSIS fornece uma hierarquização dos materiais com base na sua proximidade com a solução ideal, considerando os critérios estabelecidos. A ordenação dos materiais fornece uma visão clara e seleção das opções, o melhor desempenho da fibra de bambu na classificação final é notório.

**Tabela 8 - Coeficiente de similaridade com a solução ideal.**

<b>Fibra</b>	<b>S</b>	<b>Ordenação</b>
<b>Juta</b>	0,635	2
<b>Cânhamo</b>	0,535	5
<b>Linho</b>	0,398	9
<b>Sisal</b>	0,554	3
<b>Quenafe</b>	0,481	6
<b>Abacá</b>	0,476	7
<b>Henequén</b>	0,315	10
<b>Coco</b>	0,465	8
<b>Algodão</b>	0,550	4
<b>Bambu</b>	0,777	1

**Fonte: Autoria própria.**

### **4.3 Classificação por comparação à fibra original**

Este procedimento possuiu um enfoque maior na comparação dos materiais alternativos da Tabela 3 com o material atual, cujos critérios de seleção são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Critérios de seleção para a fibra de vidro-E.

Alternativas	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo elástico (Gpa)	Resistência à tração (Mpa)	Preço (US\$/kg)
Fibra	M1 (-)	M2 (+)	M3 (+)	M4 (-)
Juta	1,40 <sup>a</sup>	20,00 <sup>a</sup>	835,00 <sup>a</sup>	0,63 <sup>e</sup>
Cânhamo	1,47 <sup>b</sup>	70,00 <sup>b</sup>	690,00 <sup>b</sup>	9,20 <sup>e</sup>
Linho	1,50 <sup>a</sup>	27,60 <sup>a</sup>	10,45 <sup>a</sup>	3,34 <sup>e</sup>
Sisal	1,45 <sup>d</sup>	15,00 <sup>d</sup>	500,00 <sup>d</sup>	0,50 <sup>e</sup>
Quenafe	1,51 <sup>a</sup>	32,00 <sup>a</sup>	15,50 <sup>a</sup>	1,49 <sup>e</sup>
Abacá	1,50 <sup>a</sup>	41,00 <sup>a</sup>	24,81 <sup>a</sup>	2,80 <sup>e</sup>
Henequén	1,53 <sup>a</sup>	13,00 <sup>a</sup>	16,00 <sup>a</sup>	4,10 <sup>e</sup>
Coco	1,30 <sup>b</sup>	5,00 <sup>b</sup>	175,50 <sup>b</sup>	0,23 <sup>e</sup>
Algodão	1,52 <sup>d</sup>	14,70 <sup>d</sup>	543,00 <sup>d</sup>	0,99 <sup>e</sup>
Bambu	1,40 <sup>c</sup>	46,00 <sup>c</sup>	860,00 <sup>c</sup>	1,60 <sup>e</sup>
Vidro - E	2,50 <sup>d</sup>	73,00 <sup>d</sup>	3400,00 <sup>d</sup>	1,50 <sup>a</sup>

Fonte: <sup>a</sup>Dhakal (2021); <sup>b</sup>Mohanty (2005); <sup>c</sup>Targa (2011); <sup>d</sup>Duro (2013); <sup>e</sup><https://dnfi.org/> (2023). Adaptado.

Foram aplicadas as Equações (15) e (16) para a definição da matriz de comparação à fibra original, a fibra de vidro-E que são expostos na Tabela 10.

Tabela 10 - Matriz de índices relativos ao material original.

Fibra	M1 (-)	M2 (+)	M3 (+)	M4 (-)
Juta	1,79	0,27	0,25	2,37
Cânhamo	1,70	0,96	0,20	0,16
Linho	1,67	0,38	0,00	0,45
Sisal	1,72	0,21	0,15	3,01
Quenafe	1,66	0,44	0,00	1,01
Abacá	1,67	0,56	0,01	0,54
Henequén	1,63	0,18	0,00	0,37
Coco	1,92	0,07	0,05	6,57
Algodão	1,64	0,20	0,16	1,52
Bambu	1,79	0,63	0,25	0,94

Fonte: Autoria própria.

Finalizando, foi feito o uso das Equação (17) para o cálculo do vetor  $R$  de classificação por comparação à fibra original e da Equação (18) para a obtenção do vetor de índice de comparação  $R'$  ilustrado na Tabela 11.

**Tabela 11 - Coeficiente de similaridade com fibra original.**

<b>Fibra</b>	<b>R'</b>	<b>Ordenação</b>
<b>Juta</b>	0,318	1
<b>Cânhamo</b>	0,060	5
<b>Linho</b>	0,001	9
<b>Sisal</b>	0,175	3
<b>Quenafe</b>	0,004	8
<b>Abacá</b>	0,004	7
<b>Henequén</b>	0,001	10
<b>Coco</b>	0,050	6
<b>Algodão</b>	0,089	4
<b>Bambu</b>	0,298	2

**Fonte: Autoria própria.**

Levando em conta o método de classificação por comparação à fibra original, foi percebido que a fibra de Juta alcançou um alto desempenho em relação às demais alternativas avaliadas.

#### **4.4 Estudos relacionados às fibras de bambu e juta em cenários análogos**

##### **4.4.1 Propriedades e aplicações de bambu e compósitos de fibra de bambu**

Este estudo destacou a fibra de bambu como uma fibra de celulose obtida pela hidrólise alcalina do bambu. Caracterizada por sua estrutura porosa, a fibra apresenta alta absorção de umidade, tornando-a eficaz na geração de eletricidade estática e antiestática devido à ausência de elétrons livres. O bambu cresce naturalmente, sem necessidade de pesticidas, graças à presença da bactéria bambu kun. As propriedades antibacterianas, leveza e resistência à tração específica superior às fibras sintéticas destacam seu potencial. Foi abordado a importância da redução de lignina para melhorar a resistência. A fibra de bambu encontra aplicações em diversos setores, como têxtil, papel, construção, automotivo e esportivo, ressaltando seu papel nas pesquisas sobre fibras naturais (Kumar; Ganguly; Purohit, 2023).

##### **4.4.2 Investigação experimental de propriedades mecânicas de compósitos de matriz polimérica híbrida reforçada com bambu/fibra de carbono**

O estudo investigou compósitos de fibras naturais e sintéticas, especificamente bambu e fibra de carbono, alterações em propriedades mecânicas. Os compósitos híbridos revelaram melhorias significativas em relação aos compósitos com apenas fibra de bambu, apresentando aumento de 74,53% na resistência à tração, 41,47% na resistência à flexão e 182,24% na resistência ao impacto. Destaca-

se a sinergia entre as fibras naturais, com propriedades de amortecimento e biodegradabilidade, e as sintéticas, com bom módulo de elasticidade. O estudo conclui que a combinação dessas fibras resulta em materiais compósitos com desempenho mecânico aceitável, destacando seu potencial em diversas aplicações (Kudva et al, 2023).

#### 4.4.3 Preparação e caracterização de compósito estratificado de tecido de juta utilizando polímeros reforçados com fibra de bambu como matriz de resina

Neste estudo, foi elaborado um novo compósito híbrido que combina tecido de juta e termoplástico reforçado com fibra curta de bambu (BPC). O BPC, produzido com polipropileno (PP) ou polietileno de alta densidade (HDPE), desempenhou o papel de matriz para o compósito de tecido de juta híbrido (JFC), utilizando o método de estratificação. A pesquisa avaliou os impactos do tipo de polímero, do agente de acoplamento (CA) e do teor de fibra de bambu (10%, 30% e 50%) nas propriedades físicas, mecânicas, de absorção de água e térmicas do JFC. Observou-se que o aumento do teor de fibras de bambu no BPC, especialmente até 30%, promoveu melhorias notáveis nas propriedades mecânicas e na resistência à absorção de água do JFC. A inclusão de CA também contribuiu positivamente para as propriedades do compósito. Os resultados experimentais destacaram aumentos significativos na resistência à flexão e no módulo de flexão do JFC híbrido ligado ao BPC em comparação com compósitos similares constituídos apenas por polímeros puros. A análise por microscopia eletrônica de varredura revelou uma ligação física entre a matriz BPC e o tecido de juta, caracterizada por um intertravamento mecânico. Em síntese, o JFC híbrido ligado ao BPC exibiu propriedades superiores em comparação com compósitos semelhantes compostos exclusivamente por polímeros puros, ressaltando o potencial promissor dessa abordagem híbrida para o desenvolvimento de materiais compósitos com características mecânicas avançadas (Arya; Kumar; Chauhan, 2023).

#### 4.4.4 Investigação experimental do comportamento mecânico do compósito juta/fibra de vidro infundido com MWCNT

Neste estudo, explorou-se o comportamento mecânico de compósitos híbridos de juta e vidro reforçados com nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT). Avaliaram-se resistências à tração e flexão em compósitos com diferentes

frações de reforço (0,5%, 0,75%, 1% e 2%) e investigaram a influência da hibridização entre fibras de juta e vidro, com diversas sequências de empilhamento de fibras, orientações (0°, 30°, 45°, 60°, 90°) e percentagens de nanocargas. Resultados apontam melhorias nas propriedades mecânicas até 1% de reforço em peso, seguido de uma redução devido à aglomeração de nanopartículas (Bhargav et al, 2023).

#### 4.5 Discussões

A busca por materiais sustentáveis na fabricação de compósitos, como carenagens, tem levado à consideração das fibras de bambu e juta como alternativas ecologicamente viáveis. Ambas as fibras apresentam características únicas que são melhoradas para o desenvolvimento de materiais compósitos sustentáveis, mas é crucial avaliar seus pontos positivos e desafios associados.

Compósitos reforçados com fibra de bambu possuem uma aplicação significativa na indústria mundial, dentre estas, podemos citar o uso massivo em embalagens rígidas, por consequência da baixa densidade da fibra de bambu que favorece na diminuição de custos relacionados à transporte, por exemplo (Jawaid; Rangappa; Siengchin, 2021). Estes compósitos estão presentes também na indústria de utensílios domésticos, devido à leveza e a estética que estes materiais proporcionam, como é exibido na Figura 12.

**Figura 12 – A embalagem de alimentos feitas de compósito reforçado por fibra de bambu**



Fonte: <https://www.yanxiyan.com/bamboo-food-packaging/> (2023)

O mesmo se aplica à compósitos reforçados com fibra de juta onde, segundo o Conselho Nacional Indiano de Juta, investimentos estão sendo feitos para que até em 2030, a fabricação de fibra de juta ocupe uma fatia de 30% em relação a



todas as fibras naturais e sintéticas fabricadas no país, abrindo uma margem ainda maior para a difusão do uso da fibra de juta na indústria indiana e mundial. A Figura 13 ilustra uma aplicação em uso doméstico de compósitos reforçados por fibra de juta.

**Figura 13 – Bancos feitos de compósitos reforçados por fibra de juta.**



Fonte: <https://br.pinterest.com/pin/the-toul-stool-moulded-jute-fiber-furniture--75927943689780721/> (2023)

Por outro lado, a produção de compósitos reforçados por fibras naturais enfrenta desafios intrínsecos, como a variabilidade nas propriedades das fibras, aderência ineficaz matriz-fibra e otimização de processos para preservar as características sustentáveis (Al-Oqla et al, 2014). Essas dificuldades impactam diretamente na uniformidade e no desempenho final dos compósitos. Estratégias de pesquisa inovadoras são necessárias para superar esses obstáculos, buscando aprimorar a compatibilidade fibra-matriz e otimizar métodos de fabricação, visando alcançar materiais compósitos eficientes, sustentáveis e economicamente viáveis.

Apesar dos empecilhos, o fato deste estudo ser direcionado a uma aplicação leve, onde o material não está submetido a cargas mecânicas relevantes, a incorporação de fibras de bambu e juta como reforço em compósitos apresenta viabilidade notável que, em conjunto com matrizes poliméricas, promove características sinérgicas, melhorando a resistência e a sustentabilidade dos compósitos. Além disso, a disponibilidade abundante e a baixa emissão de carbono das fibras de bambu e juta destacam sua atratividade ambiental.

## 5 CONCLUSÕES

Com o objetivo de desenvolver a seleção de fibras naturais como reforço para compósitos da carenagem de um veículo de eficiência energética, por meio de dois métodos aplicados a seleção de materiais, o método de multicritério TOPSIS e o método de comparação com a fibra original, destacam-se as seguintes conclusões:

Por meio do método de classificação multicritério TOPSIS, as fibras naturais com os melhores desempenhos em relação ao coeficiente de similaridade com a solução ideal foram as fibras de bambu, juta e sisal, com os coeficientes de 0.777, 0.635 e 0.554 respectivamente. Levando em conta o método de comparação à fibra original, as fibras que atingiram as melhores performances foram as fibras de juta, bambu e sisal, com os coeficientes de similaridade com a fibra original de 0.318, 0.298 e 0.175 respectivamente. Isso demonstra que as fibras em questão apresentam potenciais características particulares que são importantes para a busca por materiais mais sustentáveis na indústria de compósitos, no entanto, é necessário avaliar cuidadosamente seus aspectos positivos e desafios associados.

Considerando as restrições intrínsecas ao projeto, juntamente aos critérios de seleção definidos, em que o material não está submetido a cargas mecânicas relevantes, a utilização de fibras de bambu e juta como reforço em compósitos revela notável viabilidade. Em sinergia com matrizes poliméricas, a abordagem promove características aprimoradas, aperfeiçoando a resistência e sustentabilidade dos compósitos.

Em suma, as fibras de bambu e juta destacam-se como alternativas ecologicamente avançadas, mas sua implementação bem-sucedida exige um equilíbrio cuidadoso entre propriedades, custos e processos de fabricação. Estratégias de pesquisa inovadoras são necessárias para superar esses obstáculos, buscando aprimorar a compatibilidade fibra-matriz e otimizar métodos de fabricação, visando alcançar materiais compósitos eficientes, sustentáveis e economicamente viáveis.

Como sugestão de trabalhos futuros Análises semelhantes poderiam ser aplicadas ao modelo proposto para outros contextos que envolvam seleção de fibras naturais.

## REFERÊNCIAS

ABMACO. **Compósitos 1 Materiais, processos, aplicações, desempenhos e tendências**. São Paulo: ABMACO, 2009.

ABRAHAM, M. A. **Sustainability in Science and Engineering: Defining Principles**. Elsevier Science, 2006.

AGARWAL, B. D.; BROUTMAN, L. J. **Analysis and Performance of Fiber Composites**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1990.

AL-OQLA, F. M.; SALIT M. S. **Materials Selection for Natural Fiber Composites**. Elsevier Science,

AL-QURESHI, H. A. **Wetting analysis of natural sisal fibers with polymeric matrix**. Second International Conf. on Composite Science and Technology. Durban. 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Terminology for Composite Materials**<sup>1</sup>. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken. 2007.

AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. **ASM Handbook - Composites**. Materials Park, Ohio: American Society of Metals, v. 21, 2001.

ARYA, S.; KUMAR R.; CHAUHAN, S. **Preparation and characterization of woven jute fabric layered composite by using bamboo fiber reinforced polymers as resin matrix**. Construction and Building Materials, v 411, 2023.

ASHBY, M. **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico**. Elsevier Science, 2011.

ATTHIKUMARAN, N. et al. **Investigation of the thermal and mechanical behavior of recycled low-density polyethylene/Hemp fiber composites containing paraffin wax**. Materials Today: Proceedings, 2023.

AZZINI, A. **Estrutura anatômica, dimensões das fibras e densidade básica de colmos de bambusa vulgaris Schrad**, Campinas, v. 36, n. 43-50, 1987.

BHARGAV, M. et al. **Experimental investigation of the mechanical behaviour of jute/glass fiber composite infused with MWCNT**. Materials Today: Proceedings, 2023.

C. Romão. **Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais**. Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2003.

C. Romão. **Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais**. Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2003.

C. Romão. **Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais**. Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2003.

CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 9<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: GEN, 2016.

CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos polímeros**. 2. ed. São Paulo: Art Liber Editora, 2006.

CHOO, V. K. S. **Fundamentals of Composites Materials**. Novo México: Knowen, 1990.

DHAKAL, H. N.; ISMAIL, S. O. **Sustainable Composites for Lightweight Applications**. Elsevier Science, 2021.

DURO, A. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos reforçados com fibras de linho e sisal**. Universidade do Minho, 2013.

E. Trombetta. **Utilização de fibra natural de pinus (serragem) como reforço em componentes automotivos compósitos de polipropileno**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

Erbach, G. **Reducing CO<sub>2</sub> Emissions from New Cars**. European Parliamentary Research Service, 2014.

FUTURE FIBRES. **Food and agriculture organization of the United Nations**. <<https://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/jute/en/>>. Acesso em 1 Novembro 2023.

GACOINA, A.; LIB, A. **Optimal composition of a starch-hemp agro composite materials**. Elsevier Science, v. 400, 2023.

H. Silva. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de curauá e híbridos com fibras de vidro**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

HERRERA, F., MARTINEZ, L. **A 2-Tuple Fuzzy Linguistic Representation Model for Computing with Words**. IEEE Trans. Fuzzy Syst. 8, 746–752, 2000.

HERRERA, F., MARTÍNEZ, L. **A model based on linguistic 2-tuples for dealing with multigranular hierarchical linguistic contexts in multi-expert decision-making**. IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part B Cybern. 31, 227–234, 2001.  
HWANG, C. YOON, K. **Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1981.

J. Holbery e D. Houston. **Natural fiber reinforced polymer composites in automotive applications**. JOM. 2006.

JAWAID, M.; RANGAPPA, S. M.; SIENGCHIN, S. **Bamboo Fiber Composites: Processing, Properties and Applications**. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2021.

JEYAGURU, S. et al. **Effect of various weaving architectures on mechanical, vibration and acoustic behavior of Kevlar-Hemp intra-ply hybrid composites**. Elsevier Science. v. 176, 2024.

Kemp, Peter. **The Oxford Companion to Ships and the Sea**. Oxford University. 1976

KSHATRIYA, A. S. et al. **Jute and E-glass fiber-reinforced polypropylene composites: Comparative study**. Materials Today: Proceedings, 2023.

KUDVA, A et al. **Experimental investigation of mechanical properties of bamboo/carbon fiber reinforced hybrid polymer matrix composites**. Materials Today: Proceedings, 2023.

KUMAR, G. S. et al. **Mechanical and thermal characterization of coir/hemp/polyester hybrid composite for lightweight applications**. Elsevier Science, v. 26, 2023.

KUMAR, R; GANGULY, A; PUROHIT, R. **Properties and applications of bamboo and bamboo fibre composites**. Materials Today: Proceedings, 2023.

L. Carvalho. **Produção de fibras de bambu para a fabricação de compósito poliuretana de mamona**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC - RIO) – Departamento de Engenharia Civil, 2007.

L. H. Mattoso, N. Pereira, M. L. Souza e J. A. Agnelli. **Utilização de fibras vegetais para reforço de plásticos**. Embrapa. 1996.

LI, Y.; MAI, Y.-W.; YE, L. **Sisal fibre and its composites: a review of recent developments**. Centre for Advanced Materials CAMT. Sydney, p. 2037-2055. 2000.

M. F. Pinheiro. **Compósitos avançados reforçados com fibras naturais para construção**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.

M. F. Pinheiro. **Compósitos avançados reforçados com fibras naturais para construção**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.

M. J. John, R. Tlili, R. Anandjiwala, A. Boudenne e L. Ibos. **Effect of amphiphilic coupling agent on heat flow and dielectric properties of flax-polypropylene composites**. em Elsevier - Composites: Part B, 2012.

M. Leão. **Fibras de licuri: um reforço alternativo de compósitos poliméricos**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

M. Truong, W. Zhong, S. Boyko e M. Alcock. **A comparative study on natural fibre density measurement**. Journal of the textile institute, 2012.

M.-p. Ho, H. Wang, J.-H. Lee, C.-k. Ho, K.-t. Lau, J. Leng e D. Hui. **Critical factors on manufacturing process of natural fibre composites**. em Elsevier - Composites: Part B, 2012.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. **Natural Polymers, Biopolymers, and Biocomposites**. Boca Raton, FL: Taylor and Francis Group, 2005.

MOHANTY, A.; MISRA, M.; DRZAL, L. **Natural fibers, biopolymers, and biocomposites**. Taylor & Francis Group, 2005.

NATIONAL COMPOSITE NETWORK. National composite network. **National composite network**. Disponível em:  
<<http://www.ncnuk.co.uk/DesktopDefault.aspx?tabindex=139&tabid=431>>. Acesso em: 26 Agosto 2011.

NATIONAL JUTE BOARD. **National jute board**. Disponível em: <<https://www.jute.com/web/guest/knowledge-bank/research-findings>>. Acesso em 1 Novembro 2023.

NATURAL FIBRES. **Discover natural fibres initiative**, 2023. Disponível em: <<https://dnfi.org/>>. Acesso em 30 Agosto 2023.

OKUBO, K.; FUJII, T.; YAMAMOTO, Y. **Development of bamboo-based Polymer composites and their mechanical properties. Composites: Part A applied science and manufacturing**, Kyo-tanabe, Japão. 2004.

PLETSCH, G. B. et al. **A Multi-Criteria Model for the Techno-Economic Evaluation of Fat Removal Technologies From DairyWaste**. SAGE Open, v. 13, 2023.

SCHUH, T. G. **Renewable Materials for Automotive Applications**. Natural fibres performance forum. Copenhagen. 1999.

SETTI, D.; VERONA, M. N.; MEDEIROS, B. B.; RESTELLI, A. **Materials selection using a 2-tuple linguistic multi-criteria method**. Materials Research, v. 22 (suppl. 1), 2019.

TARGA, G. **Compósito reforçado por laminado de bambu com matriz de poliuretano e epóxi: desenvolvimento, produção e caracterização mecânica**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

ZAMBOULIS, A. et al. **Poly(ethylene succinate)/hemp fiber composites: Fully biobased materials with improved thermal and biodegradation properties**. Elsevier Science, v. 4, 2023.