

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**RICARDO JANSSEN HARGER DA SILVA**

**CORRELAÇÃO ENTRE MODELOS DE MICROMECAÂNICA E ENSAIOS  
EXPERIMENTAIS PARA UM COMPÓSITO DE FIBRAS DE SISAL PRODUZIDO  
POR INFUSÃO A VÁCUO**

**CURITIBA  
2025**

**RICARDO JANSSEN HARGER DA SILVA**

**CORRELAÇÃO ENTRE MODELOS DE MICROMECAÂNICA E ENSAIOS  
EXPERIMENTAIS PARA UM COMPÓSITO DE FIBRAS DE SISAL PRODUZIDO  
POR INFUSÃO A VÁCUO**

**Correlation between micromechanical models and experimental tests for a  
sisal fiber composite manufactured by vacuum infusion**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia” – Área de concentração: Engenharia de Manufatura.  
Orientador(a): Lucas Freitas Berti  
Coorientador(a): Marco Antônio Luersen

**CURITIBA**

**2025**



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

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Curitiba**



RICARDO JANSSEN HARGER DA SILVA

**CORRELAÇÃO ENTRE MODELOS DE MICROMECAÂNICA E ENSAIOS EXPERIMENTAIS PARA UM  
COMPÓSITO DE FIBRAS DE SISAL PRODUZIDO POR INFUSÃO A VÁCUO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Área de concentração: Engenharia De Manufatura.

Data de aprovação: 30 de Maio de 2025

Dr. Lucas Freitas Berti, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Ana Paula Carvalho Da Silva Ferreira, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Joao Gustavo Pereira Da Silva, Doutorado - Universidade Federal de São Carlos (Ufscar)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 30/05/2025.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais por todo o apoio e incentivo à minha formação acadêmica, profissional e pessoal. Agradeço também por todos os demais familiares e amigos que estiveram presentes e me incentivaram nessa jornada.

Agradeço ao Prof. Dr. Lucas Freitas Berti, meu orientador, que além de ter me guiado, sempre depositou sua confiança na minha pessoa, a qual foi primordial para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Marco Antônio Luersen, meu coorientador, que além de todo o auxílio, foi essencial para o desenvolvimento do interesse e escolha do tema da pesquisa.

Estendo o agradecimento para todos os demais professores que fizeram parte da minha formação acadêmica.

Agradeço ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais – CMCM da UTFPR-CT, pela realização das micrografias.

Por fim, a todos aqueles que de alguma maneira contribuíram neste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

## RESUMO

Materiais compósitos reforçados com fibras apresentam propriedades mecânicas extremamente vantajosas para uma ampla gama de aplicações na engenharia. Contudo, devido ao emprego de componentes sintéticos, como resinas e fibras, esses materiais geram impactos ambientais significativos durante sua fabricação e, especialmente, ao final do ciclo de vida dos produtos que os utilizam. Nesse contexto, o uso de fibras naturais, como fibras vegetais, surge como uma alternativa sustentável que diminui os danos ambientais sem comprometer as propriedades benéficas dos compósitos. Entre as fibras naturais, o sisal tem despertado interesse em estudos recentes devido às suas boas propriedades mecânicas; porém, sua aplicação ainda é pouco explorada. Para contribuir com a redução dessa lacuna, este trabalho visa analisar ferramentas de projeto, como modelos de micromecânica e análise por elementos finitos, aplicadas a compósitos reforçados com fibras de sisal. Também, foram adotados materiais e métodos que buscam a inserção desse material compósito em aplicações de engenharia. Foram utilizados os seguintes modelos: (i) Regra das Misturas, (ii) Halpin-Tsai e (iii) simulação numérica de um elemento volumétrico representativo (RVE) para estimar as propriedades do material, que foram utilizadas em simulações de elementos finitos de ensaios de tração e flexão. Além disso, o compósito com fibras de sisal, fabricado por infusão a vácuo com resina poliéster como matriz, teve suas propriedades de tração e flexão avaliadas por meio de ensaios padronizados. As propriedades mecânicas e as curvas de tensão-deformação obtidas experimentalmente foram comparadas com os resultados dos modelos de micromecânica e simulações. Os modelos da micromecânica e a simulação com RVE apresentaram variações no módulo de elasticidade entre 3% e 5,5% em relação aos resultados experimentais. Entretanto, a comparação entre as curvas de tensão-deformação simuladas e experimentais para os ensaios de tração e flexão mostraram uma divergência notável. Essa discrepância pode ser atribuída a fatores como anisotropia das fibras, ondulação, a presença de defeitos e falhas de adesão que não são considerados nos modelos de micromecânica. No entanto, a correlação pode servir como uma referência útil para estudos futuros envolvendo micromecânica, simulações por elementos finitos e aplicações em engenharia de compósitos reforçados com fibras de sisal.

Palavras-chave: compósito natural; fibra de sisal; micromecânica.

## ABSTRACT

Fiber-reinforced composite materials exhibit highly advantageous mechanical properties for a wide range of engineering applications. However, due to the use of synthetic components, such as resins and fibers, these materials generate significant environmental impacts during their manufacturing process and especially at the end of the life cycle of the products in which they are used. In this context, the use of natural fibers, such as plant-based fibers, emerges as a sustainable alternative that reduces environmental harm without compromising the beneficial properties of composites. Among natural fibers, sisal has attracted interest in recent studies due to its good mechanical properties; however, its application remains underexplored. To help bridge this gap, this work aims to analyze design tools such as micromechanical models and finite element analysis applied to sisal fiber-reinforced composites. Materials and methods were also adopted with the goal of integrating this composite material into engineering applications. The following models were used: (i) Rule of Mixtures, (ii) Halpin-Tsai, and (iii) numerical simulation of a representative volume element (RVE) to estimate material properties, which were used in finite element simulations of tensile and bending tests. In addition, the sisal fiber composite, manufactured via vacuum infusion using polyester resin as the matrix, had its tensile and flexural properties evaluated through standardized tests. The mechanical properties and stress-strain curves obtained experimentally were compared with the results from micromechanical models and simulations. The micromechanical models and RVE simulation showed variations in the elastic modulus between 3% and 5.5% compared to the experimental results. However, the comparison between the simulated and experimental stress-strain curves for the tensile and bending tests showed a notable divergence. This discrepancy can be attributed to factors such as fiber anisotropy, waviness, the presence of defects, and adhesion failures, which are not considered in micromechanical models. Nevertheless, the correlation can serve as a useful reference for future studies involving micromechanics, finite element simulations, and engineering applications of sisal fiber-reinforced composites.

Keywords: natural composite; sisal fiber; micromechanics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação de fibras naturais em componentes automotivos.....	14
Figura 2 - <i>Agava sisalana</i> .....	14
Figura 3 - Esquemático da classificação dos materiais compósitos.....	18
Figura 4 - Construção de um laminado. ....	20
Figura 5 - Principais tipos de lâmina.....	20
Figura 6 - Teor de fibra em função do método de moldagem.....	25
Figura 7 - Técnica de Hand Lay-Up aplicada na indústria. ....	26
Figura 8 - Método de prensagem.....	27
Figura 9 - Método de infusão à vácuo na manufatura de uma embarcação. ....	29
Figura 10 - Elemento volumétrico representativo para lâmina unidirecional. ..	31
Figura 11 - Elemento volumétrico representativo de uma lâmina bidirecional. ....	31
Figura 12 - Elemento volumétrico representativo para obtenção de $E_1$ .....	32
Figura 13 - Elemento volumétrico representativo para obtenção de $E_2$ .....	34
Figura 14 - Elemento volumétrico representativo para obtenção de $\nu_{12}$ . ....	35
Figura 15 - Elemento volumétrico representativo para obtenção de $G_{12}$ .....	36
Figura 16 - Curvas dos limites para o módulo de elasticidade.....	39
Figura 17 - Fluxograma das etapas da pesquisa. ....	44
Figura 18 - Tecido de sisal. ....	45
Figura 19 - Desenho esquemático do sistema de infusão a vácuo.....	45
Figura 20 - Sistema de infusão a vácuo.....	46
Figura 21 - Geometria do corpo de prova para o ensaio de tração.....	48
Figura 22 - Orientação dos corpos de prova para o ensaio de tração.....	49
Figura 23 - Geometria do corpo de prova para o ensaio de flexão.....	49
Figura 24 - Orientação dos corpos de prova para o ensaio de flexão. ....	50
Figura 25 - Lâmina e o elemento volumétrico representativo.....	52
Figura 26 - Elemento volumétrico representativo (dimensões em mm). ....	52
Figura 27 - Malha para o elemento volumétrico representativo.....	53
Figura 28 - Condições de contorno da simulação do RVE. ....	55
Figura 29 - Fluxograma etapas simulação pelo método dos elementos finitos.....	56
Figura 30 - Geometrias das simulações dos ensaios de tração (a) e flexão (b).....	58
Figura 31 - Fluxograma para criação do modelo da simulação pelo MEF. ....	58
Figura 32 - Malha para a simulação do ensaio de tração.....	59
Figura 33 - Malha para a simulação do ensaio de flexão.....	59
Figura 34 - Fluxograma das etapas de utilização do módulo ACP do Ansys. ..	59
Figura 35 - Orientação das fibras no Ansys ACP. ....	61
Figura 36 - Condições de contorno da simulação do ensaio de tração.....	62
Figura 37 - Condições de contorno da simulação do ensaio de flexão.....	63
Figura 38 - Placa de compósito com fibras de sisal.....	64
Figura 39 - Corpos de prova dos ensaios de tração (a) e de flexão (b). ....	64
Figura 40 - Micrografia do compósito com ênfase na adesão das fases.....	68
Figura 41 - Micrografia do compósito com ênfase nas microbolhas.....	69
Figura 42 - Micrografia do compósito com ênfase no fio de sisal.....	70
Figura 43 - Deslocamentos das simulações do RVE. ....	71
Figura 44 - Deslocamento característico das simulações em tração. ....	73
Figura 45 - Deslocamento característico das simulações em flexão.....	73
Figura 46 - Curvas tensão-deformação para ensaio de tração em $0^\circ$ . ....	74

<b>Figura 47 - Curvas tensão-deformação para ensaio de tração em 45° . . . . .</b>	<b>74</b>
<b>Figura 48 - Curvas tensão-deformação para ensaio de tração em 90° . . . . .</b>	<b>75</b>
<b>Figura 49 - Curvas tensão-deformação para ensaio de flexão em 0° . . . . .</b>	<b>75</b>
<b>Figura 50 - Curvas tensão-deformação para ensaio de flexão em 45° . . . . .</b>	<b>76</b>
<b>Figura 51 - Curvas tensão-deformação para ensaio de flexão em 90° . . . . .</b>	<b>76</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físico-mecânicas de fibras naturais.....	21
Tabela 2 - Densidade e teor das fases do compósito.....	47
Tabela 3 - Propriedades dos materiais micromecânica.....	50
Tabela 4 - Condições de carregamento uniaxiais para simulação RVE.....	54
Tabela 5 - Definição das simulações dos ensaios de tração e flexão.....	57
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de tração.....	65
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de flexão. ....	65
Tabela 8 - Resultados dos modelos de micromecânica. ....	71
Tabela 9 - Deformação em 15 MPa para ensaios experimentais e simulados. .	78

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i>
RVE	Elemento Volumétrico Representativo (do inglês, <i>Representative Volumetric Element</i> )

## LISTA DE SÍMBOLOS

$E_1$	Módulo de elasticidade na direção principal 1
$\varepsilon_1$	Deformação normal na direção principal 1
$\Delta_L$	Variação do comprimento da RVE
$L$	Comprimento do RVE
$\sigma_f$	Tensão aplicada à fibra
$E_f$	Módulo de elasticidade da fibra
$\sigma_m$	Tensão aplicada à matriz
$E_m$	Módulo de elasticidade da matriz
$\sigma_1$	Tensão principal na direção 1
$A_f$	Área da fibra no RVE
$A_m$	Área da matriz no RVE
$A$	Área total do RVE
$V_f$	Fração volumétrica da fase fibra
$V_m$	Fração volumétrica da fase matriz
$\sigma_2$	Tensão principal na direção 2
$\Delta W$	Variação na largura do RVE
$W$	Largura do RVE
$\varepsilon_2$	Deformação normal na direção principal 2
$\nu_{12}$	Coefficiente de Poisson 12
$\Delta_m W$	Variação na largura da fase matriz
$\nu_m$	Coefficiente de Poisson da matriz
$\Delta_f W$	Variação na largura da fase fibra
$\nu_f$	Coefficiente de Poisson da fibra
$\gamma_m$	Deformação cisalhante da matriz
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$G_m$	Módulo de cisalhamento da matriz
$\gamma_f$	Deformação cisalhante da fibra
$G_f$	Módulo de cisalhamento da fibra
$\Delta$	Variação da deformação total por cisalhamento
$\gamma$	Deformação cisalhante
$G_{12}$	Módulo de cisalhamento 12
$\xi$	Coefficiente de ajuste geométrico método Halpin-Tsai
$\eta$	Coefficiente de ajuste método Halpin-Tsai
$\rho_c$	Densidade do compósito
$\rho_f$	Densidade da fibra
$\rho_m$	Densidade da matriz
$\sigma_i$	Tensão normal na direção $i$
$\tau_i$	Tensão cisalhante de posição $i$ no vetor de tensões
$S_{ij}$	Constante elástica de posição $ij$ na matriz de rigidez
$\varepsilon_i$	Deformação normal de posição $i$ no vetor de deformações
$\gamma_i$	Deformação cisalhante de posição $i$ no vetor de deformações
$\nu_{23}$	Coefficiente de Poisson 23
$G$	Módulo de cisalhamento
$\nu$	Coefficiente de Poisson

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Contexto</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos e Justificativa</b> .....	<b>15</b>
<b>1.3</b>	<b>Organização do Trabalho</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Compósitos Poliméricos Reforçados por Fibras</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Naturais</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>Manufatura de Compósitos com Fibras Naturais</b> .....	<b>24</b>
2.3.1	Laminação à Mão.....	25
2.3.2	Prensagem .....	26
2.3.3	Moldagem por Transferência de Resina.....	28
2.3.4	Laminação a Vácuo .....	28
2.3.5	Infusão a Vácuo .....	28
<b>2.4</b>	<b>Comportamento Mecânico em Compósitos com Fibras Naturais</b> ..	<b>30</b>
2.4.1	Micromecânica de um Compósito.....	30
2.4.2	Simulação por Elementos Finitos.....	40
2.4.3	Correlação entre Modelos de Comportamento Mecânico .....	41
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>44</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b> .....	<b>44</b>
3.1.1	Fibra de Sisal .....	44
3.1.2	Resina Poliéster .....	45
3.1.3	Manufatura do Compósito.....	45
<b>3.2</b>	<b>Procedimento Experimental</b> .....	<b>47</b>
3.2.1	Densidade Volumétrica e Proporção das Fases .....	47
3.2.2	MEV .....	47
3.2.3	Resistência à Tração.....	48
3.2.4	Resistência à Flexão .....	49
<b>3.3</b>	<b>Análise da Micromecânica</b> .....	<b>50</b>
3.3.1	Regra da Misturas .....	51
3.3.2	Método Halpin-Tsai.....	51
3.3.3	Simulação do Elemento Volumétrico Representativo .....	52
<b>3.4</b>	<b>Simulação por Elementos Finitos</b> .....	<b>56</b>
3.4.1	Simulação de Ensaio de Tração .....	61

3.4.2	Simulação de Ensaio de Flexão.....	62
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>64</b>
<b>4.1</b>	<b>Resultados Experimentais.....</b>	<b>64</b>
4.1.1	Ensaio de Tração .....	64
4.1.2	Ensaio de Flexão .....	65
4.1.3	Discussão dos Resultados Experimentais .....	65
<b>4.2</b>	<b>Microscopia Eletrônica de Varredura .....</b>	<b>67</b>
<b>4.3</b>	<b>Análise da Micromecânica .....</b>	<b>70</b>
<b>4.4</b>	<b>Simulações por Elementos Finitos.....</b>	<b>73</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>80</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>82</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>83</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto

A utilização de materiais compósitos se tornou um dos principais pontos de estudo da engenharia moderna. Intuitivamente, essa classe de materiais já era utilizada desde os princípios da humanidade. Entretanto, a partir da década de 1950 que um forte desenvolvimento da área passou a ocorrer, onde, na forma de compósitos reforçados com fibras, esses materiais passaram a ser aplicados na indústria aeronáutica, militar e aeroespacial (SERIFI et al., 2018; VASSILOPOULOS, 2020).

Compósitos muitas vezes são vistos apenas como materiais alternativos para a utilização de outros materiais estruturais. Porém, projetistas cada vez mais compreendem suas propriedades e como explorá-las, permitindo o desenvolvimento de estruturas que jamais seriam possíveis de serem feitas se fossem utilizados metais, por exemplo. A grande vantagem dos compósitos vem do fato de possuírem propriedades específicas superiores quando comparadas com materiais estruturais convencionais. Isto é, por unidade de massa, compósitos são mais resistentes e rígidos (SCHULTE; FIEDLER, 2010).

Entretanto, apesar das excelentes propriedades mecânicas, entre os materiais compósitos reforçados com fibras sintéticas, como os que utilizam fibra de vidro e carbono em matrizes poliméricas, não há um material que seja reciclável, reutilizável ou biodegradável. Sendo assim, após o cumprimento de sua vida útil, componentes que empregam esse tipo de material, como pás de turbinas eólicas, são descartados e se tornam resíduos, dando origem a um problema ambiental.

Nesse contexto, pesquisadores vêm estudando o desenvolvimento de biocompósitos, que são aqueles que utilizam fibras de origem natural, matrizes de origem natural ou ambos.

Além de reduzirem a pegada de carbono durante sua manufatura, esses compósitos possuem a característica de serem biodegradáveis, reduzindo o impacto ambiental de sua utilização. A Figura 1 ilustra um exemplo de aplicação de fibras naturais no desenvolvimento de componentes para um veículo, como o para-choque e capô.

**Figura 1 - Aplicação de fibras naturais em componentes automotivos.**



**Fonte: Retirado do site BComp<sup>1</sup>.**

Entre as opções de fibras naturais, a fibra de sisal apresenta um dos maiores potenciais de aplicação. Além de ter propriedades mecânicas elevadas quando comparada com outras fibras naturais, apresenta elevado potencial socioeconômico. Na Figura 2 é exibido a planta de sisal que dá origem as fibras.

**Figura 2 - *Agave sisalana*.**



**Fonte: Retirado do site Embrapa<sup>2</sup>.**

<sup>1</sup> Disponível em: < <https://www.bcomp.com/news/porsche-uses-sustainable-alternative-to-carbon-fibres-for-nurburgring-24h-race/> >. Acesso em 15 de maio de 2024.

<sup>2</sup> Disponível em: < <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/sisal> >. Acesso em 15 de maio de 2024.

O sisal é a principal fibra dura produzida no mundo, representando 70% da produção comercial de todas as fibras desse tipo. No levantamento feito pela EMBRAPA, em 2010 a produção mundial ultrapassou 350 mil toneladas, sendo o Brasil o maior produtor mundial e responsável pela produção de 67,3% desse montante (EMBRAPA, 2022).

Concentrada na região Nordeste do Brasil, a exploração do sisal é feita majoritariamente em propriedades de pequeno porte em condições de clima e solo pouco favoráveis e com predomínio do trabalho familiar. Com isso, o sisal além de ser fonte de renda é um importante agente de fixação do homem à região semiárida nordestina, haja vista ser, em algumas regiões, a única alternativa de cultivo com resultados satisfatórios na região.

Entretanto, apesar do já constatado potencial de utilização de fibras naturais, em especial a de sisal, na produção de compósitos reforçados com fibras, existem lacunas nos métodos de manufatura estudados e de como empregar ferramentas de projeto, como simulações pelo método de elementos finitos e caracterização por análises de micromecânica, para esse tipo de material

## **1.2 Objetivos e Justificativa**

O objetivo da dissertação consiste no desenvolvimento de um compósito utilizando a fibra natural, de origem vegetal, e oriunda da planta do sisal, envolvida numa matriz polimérica de resina poliéster. Visando uma melhor aplicabilidade, a fibra de sisal utilizada no estudo é na forma de um tecido com fios de sisal. Os fios de sisal são feitos através da industrialização das fibras, que são uniformizadas, paralelizadas e então torcidas para formar o fio (EMBRAPA, 2022). A vantagem do material nessa forma, além de possuir um manuseio mais fácil para a manufatura do compósito, é de apresentar uma uniformidade maior do que as fibras em estado *in natura* como são comumente utilizadas na maior parte dos estudos.

Ainda na produção do compósito, a pesquisa tem como objetivo utilizar o método de infusão a vácuo para a manufatura dos corpos de prova. A infusão a vácuo é um dos métodos mais empregados pela indústria e apresenta benefícios como alta produtividade e aprimoramento das propriedades mecânicas dos materiais. Nota-se uma falta de estudos utilizando esse método de fabricação, onde a maior parte dos pesquisadores foca na utilização do método laminação manual e de prensagem, como nos estudos realizados por Gurmu, Lemu (2023) e Fonseca et al. (2004).

Entretanto, os dois métodos de fabricação citados, apesar de serem capazes de produzir compósitos com boas propriedades mecânicas, possuem características que os tornam menos produtivos e práticos para a aplicação na indústria.

Sendo assim, a escolha do material na forma de tecido e do método de infusão a vácuo pode trazer uma perspectiva que ajude a reforçar a possibilidade de aplicação do material em soluções de engenharia.

Além disso, o projeto aqui proposto tem por objetivo realizar a caracterização experimental dos materiais fabricados em ensaios de tração e flexão seguindo normas ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Os resultados obtidos serão comparados com propriedades obtidas através de modelos de micromecânica, como a Regra das Misturas, modelo de Halpin-Tsai e simulação de um elemento volumétrico representativo (RVE, do inglês *representative volumetric element*). A correlação entre as técnicas, será feita através de simulações utilizando o método dos elementos finitos (MEF), que reproduzirão os ensaios experimentais em meio computacional, porém utilizando as propriedades do material obtidas pela micromecânica.

A micromecânica é uma ferramenta para prever as propriedades mecânicas do material, entretanto os modelos mais comuns foram feitos e avaliados considerando compósitos que utilizam fibras sintéticas. O comportamento de compósitos com fibras naturais é distinto, principalmente no que tange a adesão entre as fases, sendo assim, estudos que correlacionam os resultados experimentais com os modelos numéricos podem trazer à tona a validade ou não desses métodos.

Em relação ao método dos elementos finitos, como constatado na revisão bibliográfica realizada por Abidin et al. (2019), esse ainda é um tema pouco explorado para materiais compósitos utilizando fibras naturais, onde a maior parte dos estudos focam em compósitos que utilizam fibras sintéticas. Realizar uma comparação dos ensaios experimentais, com a micromecânica e com as simulações computacionais, além de contribuir na correlação e validade dos modelos, pode servir como referência para que em trabalhos futuros seja avaliada a utilização do sisal em aplicações reais de engenharia.

### **1.3 Organização do Trabalho**

O projeto aqui exposto está dividido em seis capítulos que compõem a estrutura da dissertação de mestrado. O primeiro capítulo faz uma introdução ao tema abordado durante o projeto, além de trazer os objetivos e justificativas para a

execução da pesquisa. Já no capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica dos principais temas abordados ao longo do projeto, são eles: compósitos poliméricos reforçados com fibras, compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais, fibra de sisal, manufatura de compósitos que utilizam fibras naturais e comportamento mecânico em compósitos com fibra naturais. No terceiro capítulo, são descritos os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do projeto. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos na pesquisa. No capítulo 5 são exibidas as conclusões do projeto. Por fim, no capítulo 6 são feitas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLLIOGRÁFICA

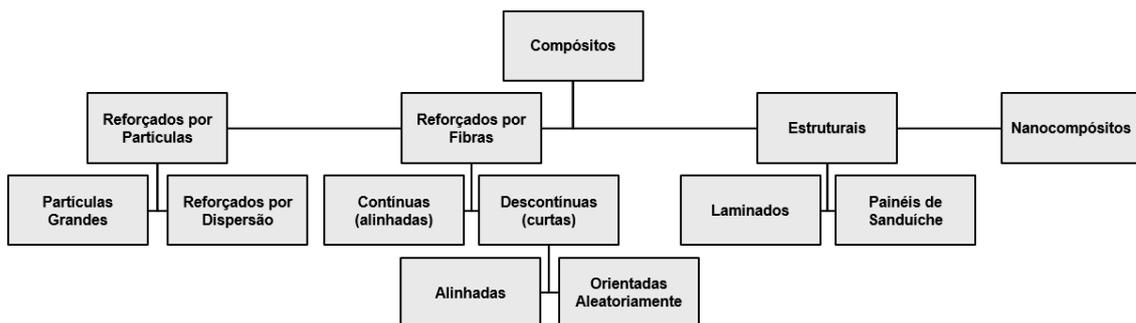
### 2.1 Compósitos Poliméricos Reforçados por Fibras

O termo compósito, no universo dos materiais, simboliza a junção de dois ou mais materiais que combinados macroscopicamente resultam em um novo terceiro tipo de material. O novo material, comparado aos materiais constituintes isoladamente, costuma apresentar propriedades melhoradas como resistência mecânica, rigidez, resistência à corrosão e baixa densidade (JONES, 1999).

Existem quatro tipos de materiais compósitos usualmente aceitos, que são listados abaixo e esquematizados na Figura 3:

- (1) Reforçados por partículas, onde a fase dispersa é formada por partículas equiaxiais e de tamanho semelhante.
- (2) Reforçados por fibras, onde a fase dispersa tem a geometria de uma fibra.
- (3) Estruturais, que são formados por várias camadas que combinam diferentes materiais, geometrias e orientações.
- (4) Nanocompósitos, onde a fase dispersa tem dimensões na escala nanométrica.

**Figura 3 - Esquemático da classificação dos materiais compósitos.**



Fonte: Adaptado de (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Do ponto de vista tecnológico, os compósitos de maior interesse são aqueles reforçados com fibras, cujo principal ponto de interesse está na alta resistência e rigidez em relação ao baixo peso. Esses materiais são usados em diversas aplicações e estão entre os tipos mais populares de material compósito, onde além das propriedades mecânicas possuem uma facilidade de fabricação e baixo custo (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Nesses compósitos, a fase matriz tem o propósito de envolver as fibras, protegê-las e transferir o carregamento. Tipicamente a matriz tem menor densidade, rigidez e resistência mecânica do que as fibras. Tratando-se de matrizes poliméricas, usualmente são empregados polímeros termofixos que possuem ligações moleculares mais fortes, mas que não podem ser revertidas (JONES, 1999).

Já a utilização de fibras se deve ao fato de que são inerentemente muito mais rígidas e resistentes à tração do que o mesmo material em estado volumétrico. Isso se deve a organização e a pequena quantidade de defeitos de sua estrutura cristalina (JONES, 1999).

As propriedades mecânicas de um compósito reforçado com fibras não dependem apenas das propriedades dos constituintes, mas também pelo grau qual uma carga aplicada é transmitida entre as fases (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

A magnitude da ligação interfacial entre as fases fibra e matriz é essencial para a transferência de carga. Nesse sentido, sob a aplicação de uma carga, a ligação entre fases cessa nas extremidades da fibra, não havendo transferência de carga entre elas (CALLISTER; RETHWISCH, 2018). Portanto, para compósitos particulados e com fibras descontínuas curtas há uma maior quantidade de extremidades. Dessa forma para que se desenvolva uma melhora significativa na resistência do compósito deve-se priorizar o uso de fibras contínuas.

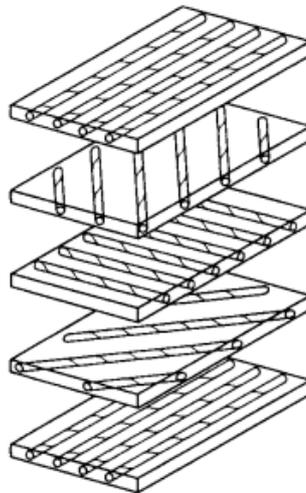
Outro aspecto importante nas propriedades resultantes desse tipo de material compósito é a orientação e concentração das fibras. Em relação à orientação, as fibras podem estar todas alinhadas paralelamente em uma única direção, tomando seus eixos longitudinais como referência, ou podem ter um alinhamento totalmente aleatório. Usualmente as fibras contínuas são alinhadas enquanto as descontínuas podem estar alinhadas ou orientadas aleatoriamente. Em geral, melhores propriedades dos compósitos são obtidas quando a distribuição das fibras é alinhada e uniforme (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Os compósitos com fibras alinhadas são inerentemente anisotrópicos, assim a resistência máxima ocorrerá ao longo da direção de alinhamento das fibras. Na direção transversal, o reforço da fibra é praticamente inexistente, onde a resistência mecânica passa a ser uma propriedade dominada pela fase matriz. Já para compósitos com fibras dispersas aleatoriamente, as características mecânicas podem ser consideradas isotrópicas (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Materiais compósitos laminados são aqueles que combinam camadas, denominadas de lâminas, de pelo menos dois materiais diferentes. O principal intuito da laminação é tirar um melhor proveito da orientação das fibras e assim otimizar a rigidez e resistência mecânica.

Nos laminados cada uma das camadas pode ser orientada conforme o necessário, melhor atendendo um cenário com tensões multiaxiais, por exemplo (JONES, 1999). Na Figura 4 é ilustrado um compósito laminado composto por lâminas de compósitos reforçados com fibras, onde cada camada possui uma orientação distinta.

**Figura 4 - Construção de um laminado.**

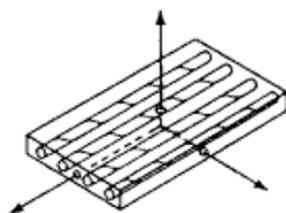


Fonte: (JONES, 1999).

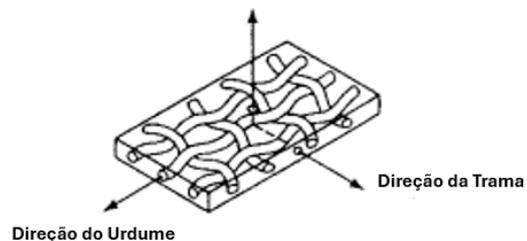
Já a lâmina é o constituinte básico de um laminado onde para compósitos reforçados com fibras alinhadas, usualmente podem ser lâminas unidirecionais ou bidirecionais, como ilustrado na Figura 5 (JONES, 1999).

**Figura 5 - Principais tipos de lâmina.**

**Laminado Unidirecional**



**Laminado Bidirecional**



Fonte: Adaptado de (JONES, 1999).

## 2.2 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Naturais

No ramo da engenharia de materiais, compósitos utilizando fibras naturais estão se tornando cada vez mais utilizados. As fibras naturais são consideradas materiais renováveis e biodegradáveis, sendo uma alternativa mais sustentável que as fibras sintéticas convencionais. As fibras naturais resultam em compósitos com menor densidade e propriedades mecânicas específicas elevadas (ABIDIN et al., 2019).

As fibras naturais são geralmente classificadas como de origem vegetal ou animal. As fibras vegetais são constituídas, principalmente, por celulose enquanto as de origem animal por proteínas. As fibras vegetais são as mais utilizadas em compósitos e sua estrutura celular é relativamente complexa, onde cada fibra possui uma microestrutura composta por microfibras rígidas de celulosas envolvidas em uma matriz de lignina e hemicelulose (DICKER et al., 2014).

As propriedades mecânicas de fibras naturais podem ser influenciadas por diversos fatores, como comprimento e diâmetro das fibras, quantidade de celulose, ângulo de espiral e nível de absorção de umidade. A natureza hidrofílica das fibras naturais é um dos principais problemas para seu uso como reforço em polímeros, afetando na adesão entre as fases e nas propriedades mecânicas em geral (FARUK et al., 2012). Na Tabela 1 são exibidas as principais propriedades físico-mecânicas para alguns tipos de fibras naturais.

**Tabela 1 - Propriedades físico-mecânicas de fibras naturais.**

<b>Fibra</b>	<b>Resistência à Tração [MPa]</b>	<b>Módulo de Young [GPa]</b>	<b>Alongamento na Ruptura [%]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>
Abacá	400	12	3-10	1,5
Bagaço	290	17	-	1,25
Bambu	140-230	11-17	-	0,6-1,1
Linho	345-1035	27,6	2,7-3,2	1,5
Cânhamo	690	70	1,6	1,48
Juta	393-773	26,5	1,5-1,8	1,3
Quenafe	930	53	1,6	-
Sisal	511-635	9,4-22	2,0-2,5	1,5
Rami	560	24,5	2,5	1,5
Palmeira	248	3,2	25	0,7-1,55
Abacaxi	400-627	1,44	14,5	0,8-1,6
Coco	175	4-6	30	1,2
Curauá	500-1150	11,8	3,7-4,3	1,4

**Fonte: (FARUK et al., 2012).**

Além da natureza hidrofílica das fibras naturais, existem alguns outros pontos negativos de se utilizar esse tipo de fibra como reforços de compósitos. Um desses aspectos é a variação das propriedades das fibras, que são dependentes das condições de cultivo, como qualidade do solo, incidência solar e de chuva (ABIDIN et al., 2019).

Na revisão feita por Ismail, Akpan, Dhakal (2022), os autores ainda apontam como dificuldades na aplicação de compósitos com fibras naturais a características de apresentarem sensibilidade às condições climáticas, baixa estabilidade térmica e baixa resistência microbiana o que ocasiona uma redução na durabilidade de componentes que empregam fibras naturais. Porém, os autores destacam que já existem diversas técnicas, entre elas tratamentos superficiais das fibras, que permitem amenizar esses aspectos negativos.

Apesar das dificuldades, muitos autores vêm estudando a utilização de fibras naturais em compósitos e obtendo resultados promissores à diversas aplicações.

Compósitos desenvolvidos para aplicações de baixa solicitação de carga foram feitos utilizando fibras naturais oriundas da cana de açúcar. No estudo, utilizando a fibra como reforço da matriz de poliéster, o compósito apresentou uma resistência à tração 2,13 vezes maior e resistência à flexão 1,94 vezes maior que a matriz em estado puro. Os autores ainda destacaram a redução de custos e da densidade do material ao se utilizar as fibras naturais oriundas da cana de açúcar (ATLURI; RAO; GUPTA, 2013).

No estudo de Archana et al. (2022) foram comparadas as propriedades de compósitos utilizando diferentes tipos de fibras naturais e uma resina epóxi como matriz. Os compósitos utilizando fibra de sisal apresentaram os maiores valores de resistência à tração do estudo, atingindo o valor de 57,24 MPa, enquanto juta, rami e a fibra da banana apresentaram resistências a tração de respectivamente 37,72 MPa, 35,19 MPa e 21,83 MPa. Quanto a resistência a flexão, novamente os compósitos utilizando fibra de sisal foram superiores com uma resistência a flexão de 50,59 MPa, enquanto utilizando juta, rami e fibra da banana apresentaram 40,27 MPa, 41,77 MPa e 21,35 MPa, respectivamente. Com isso, o estudo concluiu que compósitos utilizando fibras naturais podem ser utilizados numa vasta gama de aplicações e inclusive como reforços estruturais. Além disso, reforça que apesar de suas resistências mecânicas serem menores do que compósitos utilizando fibra de vidro, por exemplo, apresentam

uma menor densidade e menor custo de produção o que potencializa o uso desses materiais.

Udaya Kiran et al. (2007) analisaram as propriedades de compósitos com diferentes fibras naturais, entre elas a fibra do cânhamo. Esse estudo, utilizou fibras curtas dispersas aleatoriamente e laminação manual, variando a concentração de fibra até obter propriedades ótimas. Para fibras de cânhamo com comprimento de 30 mm, determinou-se o teor ótimo de 54% em peso de fibra, obtendo-se as melhores propriedades de tração, com resistência à tração de 60,04 MPa.

A utilização de resinas de origem vegetal também é uma forma de tornar compósitos reforçados com fibras naturais ainda melhores em relação à proteção do meio ambiente. Bosquetti et al. (2021) desenvolveram compósitos utilizando fibra de sisal e resina poliuretana derivada do óleo da mamona, ou seja, uma resina de origem vegetal e biodegradável. Os autores avaliaram as propriedades mecânicas para compósitos utilizando as fibras de sisal e um tecido composto por fios de sisal. Foram obtidos resultados até 100% superiores aos de outros estudos encontrados na literatura que utilizaram resinas sintéticas, demonstrando excelente adesão entre as fibras e a resina empregada. Os compósitos com fibras unidirecionais de sisal atingiram valores de 146,34 MPa para as tensões de ruptura em tração.

O uso de fibras naturais em compósitos híbridos, aqueles que utilizam mais de um tipo de fibra, com fibras sintéticas também é um assunto explorado e onde fibras naturais vem demonstrando resultados promissores.

Bensadoun et al. (2016) demonstrou em seu estudo que um compósito híbrido utilizando fibras de linho e fibra de carbono obteve melhores características em fadiga que um compósito contendo apenas fibra de carbono. Já em relação à resistência ao impacto na revisão realizada por Ahmad Nadzrl et al. (2020) foi constatado que compósitos híbridos com fibra de vidro e linho, numa matriz de resina epóxi, além de serem mais leves resultaram em melhores propriedades de resistência ao impacto que o compósito utilizando apenas fibra de vidro.

Entre as fibras vegetais mais empregadas para materiais compósitos, o Brasil lidera a produção mundial de sisal, de cuja fibra é extraída para diversas aplicações como produção de cordas, barbantes e tecidos. A planta possui uma expectativa de vida entre 8 e 10 anos e produz cerca de 30 folhas, de cerca de um metro de comprimento, a cada ciclo de corte. O sisal representa uma forte fonte de renda em

regiões do nordeste semiárido brasileiro, sendo um dos principais elementos da economia local (EMBRAPA, 2022).

Além das aplicações convencionais, na revisão realizada por Choudhary et al. (2023) os autores confirmam que a fibra de sisal é excelente para o uso em compósitos e que devido às suas propriedades mecânicas e aspecto sustentável pode ser utilizado na construção civil, indústria automotiva, ferroviária, naval e de energias renováveis.

### **2.3 Manufatura de Compósitos com Fibras Naturais**

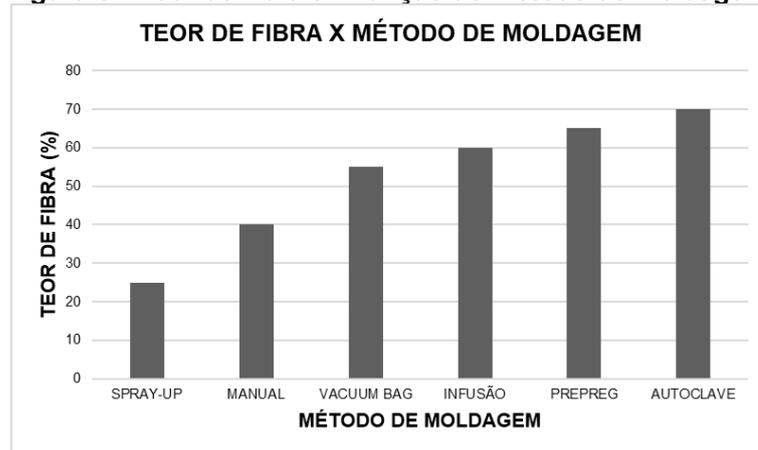
Diferentemente da maior parte dos materiais convencionais, para materiais compósitos existe uma relação muito próxima entre sua manufatura e aplicação final. A manufatura do material é usualmente parte do processo de fabricação do elemento estrutural ou até mesmo da estrutura completa (JONES, 1999).

Para os materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras, os monômeros da resina termofixa inicialmente se encontram no estado líquido, com a mudança para o estado sólido sendo o resultado de uma reação química. Durante a reação química, as moléculas dos monômeros se unem para formar as cadeias de polímeros. Esse processo, irreversível, é conhecido como polimerização e acontece na presença de catalisadores, selecionados para que a cura da resina ocorra no tempo e temperatura desejados para o processo (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2015).

Os processos de fabricação podem ser divididos entre os que utilizam a resina ainda no estado líquido, como laminação manual, laminação a vácuo, infusão à vácuo, moldagem por transferência de resina e pultrusão, e os métodos que utilizam tecidos pré-impregnados, *prepregs*, que são lâminas de fibra com a resina já parcialmente curada (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2015).

Muitos dos métodos de laminação aplicam uma pressão sobre o laminado. A vantagem de se aplicar pressão é a de reduzir a proporção de espaços vazios dentro do laminado e aumentar a proporção de fibras em relação à resina, o que leva a uma maior resistência e menor peso (NASSEH, 2007). Na Figura 6 são exibidos os teores de fibra que diferentes processos de laminação podem atingir.

**Figura 6 - Teor de fibra em função do método de moldagem.**



**Fonte: Adaptado de (NASSEH, 2007).**

A otimização do teor de fibras é essencial na manufatura de compósitos poliméricos reforçados com fibras, porém para compósitos com fibras naturais existe a limitação de não se utilizar temperaturas de processamento elevadas devido à falta de resistência térmica das fibras (ISMAIL; AKPAN; DHAKAL, 2022).

A seguir são apresentados os principais métodos de manufatura para materiais compósitos reforçados com fibras naturais.

### 2.3.1 Laminação à Mão

A técnica de laminação à mão é a forma mais tradicional, simples e comum de laminação, tanto para produtos pequenos quanto para grandes estruturas. Nela, em um molde que pode ser negativo ou positivo, as camadas de fibra e resina são colocadas manualmente e a espessura é controlada pelo número de camadas. A reação química é iniciada por um catalisador que causa o endurecimento da resina até a formação da peça final (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2015). Na Figura 7 é exibida a aplicação da técnica na indústria.

Figura 7 - Técnica de Hand Lay-Up aplicada na indústria.



Fonte: Retirada do site Fassmer<sup>3</sup>

Udaya Kiran et al. (2007) pesquisaram o efeito da concentração e comprimento de fibras naturais curtas em compósitos laminados pelo método de laminação à mão e utilizando resina poliéster. Após curarem por 24 horas os compósitos tiveram suas propriedades em tração avaliadas. Para os compósitos utilizando fibra de sisal, o teor de 54% de peso em fibra e comprimento de fibra de 30 mm resultou em valores máximos para resistência à tração, chegando em 50,50 MPa.

Com o intuito de analisar os efeitos do envelhecimento hidrotermal de compósitos, Alajmi et al. (2022) utilizaram a técnica de laminação à mão para produzir compósitos com fibras curtas de sisal dispersas aleatoriamente em uma matriz de resina epóxi. O volume de fibra seguiu a proporção de 30% do total do material. Para a condição sem envelhecimento, o compósito obteve uma resistência à flexão de 107 MPa.

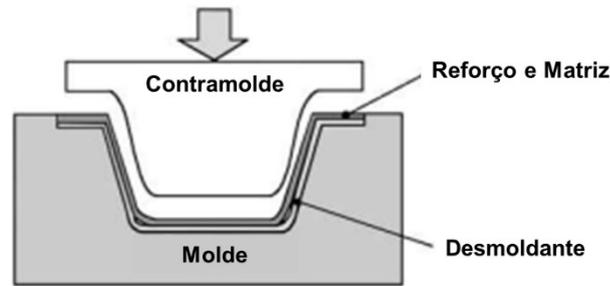
### 2.3.2 Prensagem

No processo de prensagem, o contramolde fecha o molde após o posicionamento dos tecidos de fibra impregnados no molde. Todo o conjunto é posicionado em uma prensa, onde aplica-se pressão enquanto ocorre o processo de cura, conforme exibido na Figura 8 (GAY, 2014).

---

<sup>3</sup> Disponível em: <<https://www.fassmer.de/en/composite-technology/production/hand-lay-up-method>>. Acesso em 15 de maio de 2024.

**Figura 8 - Método de prensagem.**



**Fonte: Adaptado de (GAY, 2014).**

Abera Betelie et al. (2019) produziram compósitos à base de fibras de sisal e resina epóxi através do método de prensagem. As fibras foram dispostas em diferentes concentrações e orientadas longitudinalmente à direção de ensaio. A laminação de cada camada foi feita manualmente e uma pressão de 5 MPa foi aplicada ao laminado que foi deixado para curar em temperatura ambiente por 24 horas. O teor de fibra, em peso, que apresentou o maior valor de tensão de escoamento em tração foi de 30%, atingindo uma tensão de escoamento de 56,6 MPa e módulo de Young de 2,53 GPa. Nos ensaios de flexão, o teor de 30% de fibra, em peso, também apresentou os maiores valores para tensão máxima, atingindo 84,79 MPa.

Olhan et al. (2023) utilizaram a técnica de prensagem para produzir compósitos com fibras curtas de sisal, de 10 mm, dispersas aleatoriamente em resina epóxi. O teor de fibra obtido, em volume, foi de 35,2%. Na produção, o molde e o contramolde foram aquecidos em 80°C durante o processo de cura. O estudo resultou em um compósito com resistência à tração de 46,62 MPa, módulo de Young de 3,76 GPa, resistência à flexão de 49,83 MPa e módulo de flexão de 3,67 GPa.

Também utilizando a técnica de prensagem, Rajan et al. (2015) utilizaram fibras curtas de sisal dispersas aleatoriamente em uma matriz de resina poliéster. Os teores de fibra, em volume, foram variados em 10%, 20% e 30%. Após a laminação, uma carga de 2 toneladas foi aplicada ao material por 4 horas, enquanto ocorria a cura da resina. O compósito utilizando 30% do teor em fibra obteve os maiores valores para resistência à tração e flexão, sendo de 32,6 MPa e 57,3 MPa, respectivamente. Os módulos de Young e de flexão foram de 0,80 GPa e 5,83 GPa, respectivamente.

### 2.3.3 Moldagem por Transferência de Resina

A moldagem por transferência de resina (RTM, do inglês *resin transfer molding*), é um processo em que as fibras secas são posicionadas dentro de um molde fechado e são impregnadas com a resina através do auxílio de uma bomba de vácuo. Após a impregnação completa, as entradas e saídas do sistema são seladas para a realização da cura, que pode ser auxiliada através do aquecimento do molde. O processo de RTM é altamente produtivo e resulta em peças com um bom controle da orientação das fibras e conseqüentemente em melhores propriedades do material (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2015).

### 2.3.4 Laminação a Vácuo

O sistema de laminação a vácuo se baseia no uso da pressão atmosférica para compactar o laminado durante seu processo de cura. Nele o laminado é revestido com uma bolsa plástica, que é conectada a uma bomba de vácuo para remover todo o ar existente dentro da cavidade do molde. Com a remoção do ar dentro do sistema, acaba-se induzindo uma pressão igual ou menor que a pressão atmosférica pelo lado externo. Devido a esse motivo, o processo é limitado ao uso de 1 atm de pressão. Em relação ao método de laminação à mão resulta em laminados mais leves e mais resistentes devido ao maior teor de fibra em relação ao de resina (NASSEH, 2007).

### 2.3.5 Infusão a Vácuo

O processo de laminação por infusão a vácuo é um processo semelhante ao da laminação a vácuo com a diferença que neste caso todo o material é colocado seco dentro da bolsa de vácuo, depois a resina é transferida para dentro das camadas de fibra pela ação do diferencial de pressão interna e externa. Na Figura 9 é exibida a utilização do método de infusão à vácuo para manufatura do casco de uma embarcação.

**Figura 9 - Método de infusão à vácuo na manufatura de uma embarcação.**



**Fonte: Retirada do site Manual de Construção de Barcos<sup>4</sup>**

Como no processo de laminação a vácuo, a pressão máxima obtida dentro da bolsa de vácuo é de 1 atm. Após a saturação completa das fibras, o vácuo deve ser mantido até a cura total da peça e somente depois desse ponto é que a bolsa de vácuo pode ser removida. O processo produz peças extremamente leves e resistentes devido aos teores de fibra elevados que podem chegar até 65% (NASSEH, 2007).

Olhan et al. (2023) produziram compósitos utilizando fibra de sisal e diferentes tipos de resina através do método de infusão à vácuo. Os autores trabalharam com as fibras na forma de tecidos bidirecionais utilizando fios de sisal, que resultaram em um compósito com espessura de 4,9 mm. Os valores obtidos para resistência à tração foram de 33,26 MPa, 39,88 MPa e 37,77 MPa para compósitos utilizando as resinas epóxi, vinil-éster e poliéster, respectivamente. Os módulos de Young obtidos, também respectivamente, foram de 2,41 GPa, 3,82 GPa e 3,54 GPa. Já os valores obtidos para a resistência à flexão foram de 37,9 MPa, 43,44 MPa e 34,63 MPa para compósitos utilizando as resinas epóxi, vinil-éster e poliéster, respectivamente. Os

---

<sup>4</sup> Disponível em: <<https://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/infusao-a-vacuocom-bolsa-dupla/>>. Acesso em 15 de maio de 2024.

módulos de flexão obtidos, também respectivamente, foram de 2,68 GPa, 3,67 GPa e 2,66 GPa.

## **2.4 Comportamento Mecânico em Compósitos com Fibras Naturais**

### **2.4.1 Micromecânica de um Compósito**

Micromecânica é o estudo do comportamento de materiais compósitos onde a interação entre os materiais constituintes é analisada numa escala microscópica para determinar seus efeitos nas propriedades do material compósito (JONES, 1999).

Assim as propriedades de uma lâmina podem ser experimentalmente determinadas após manufatura ou previstas através de estimativas matemáticas, usando a micromecânica, que leva em conta a concentração dos materiais constituintes. A possibilidade de prever as propriedades de um material compósito, conjuntamente com as análises macromecânicas, representam uma grande ferramenta de projeto. Entretanto, é necessário reconhecer que a micromecânica possui limitações devido a algumas considerações que utiliza em seus modelos, são elas:

As fibras são:

- homogêneas.
- linearmente elásticas;
- isotrópicas;
- regularmente espaçadas;
- perfeitamente alinhada;
- perfeitamente unidas à matriz.

A matriz é:

- homogênea;
- linearmente elástica;
- isotrópica;
- livre de vazios.

A lâmina é:

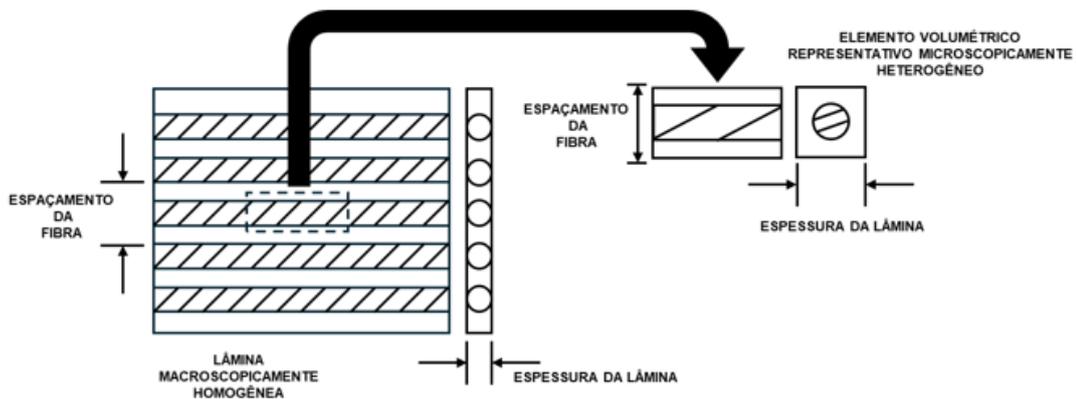
- inicialmente livre de tensão;
- linearmente elástica;
- macroscopicamente homogênea;
- macroscopicamente ortotrópica.

### 2.4.1.10 Elemento Representativo

O elemento volumétrico representativo (RVE, do inglês *representative volumetric element*) é a menor região possível do material capaz de representar as tensões e deformações do material macroscopicamente e de maneira uniforme. As proporções, em volume, de fibra e matriz devem ser conforme a apresentada pelo material compósito (JONES, 1999).

Um elemento volumétrico representativo para um laminado com fibras unidirecionais é exibido na Figura 10.

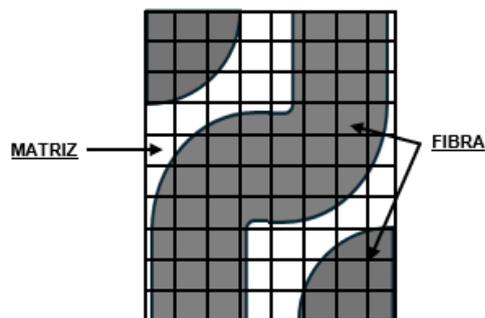
**Figura 10 - Elemento volumétrico representativo para lâmina unidirecional.**



Fonte: Adaptado de (JONES, 1999).

Para lâminas que utilizam tecidos bidirecionais de fibras o elemento volumétrico representativo se torna mais complexo. Se o entrelaçamento das fibras for considerado uma representação através de elementos finitos, é desejável (JONES, 1999). Na Figura 11 é exibido um elemento volumétrico representativo para um laminado utilizando fibras na forma de um tecido bidirecional.

**Figura 11 - Elemento volumétrico representativo de uma lâmina bidirecional.**



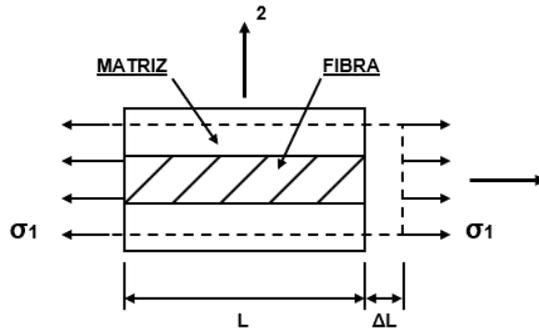
Fonte: Adaptado de (JONES, 1999).

### 2.4.1.2 Regra das Misturas

A determinação do módulo de elasticidade na direção principal 1,  $E_1$ , ocorre a partir do pressuposto exibido na Figura 12, onde a deformação é a mesma para as fibras e matriz, e dada por

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L}. \quad (1)$$

Figura 12 - Elemento volumétrico representativo para obtenção de  $E_1$ .



Fonte: Adaptado de (JONES, 1999).

Considerando que os materiais se comportam elasticamente, as tensões em cada um dos materiais constituintes são dadas por

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1, \quad (2)$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_1 \quad (3)$$

onde  $\sigma_f$  e  $\sigma_m$  representam as tensões na fibra e na matriz, respectivamente, e  $E_f$  e  $E_m$  os módulos de Young da fibra e da matriz, respectivamente.

A tensão média atuando na seção transversal do elemento representativo de volume,  $\sigma_1$ , é dada pela soma da tensão atuando sobre a área de seção transversal das fibras com a tensão atuando sobre a área de seção transversal da matriz. Sendo assim, a força resultante,  $P$ , atuando no elemento representativo de volume é dada por

$$P = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m, \quad (4)$$

onde  $A_f$  e  $A_m$  representam as áreas de seção transversal para a fase fibra e fase matriz.

Substituindo a Equação 4 e levando em conta a macromecânica, que descreve a tensão na direção principal 1, dada por

$$\sigma_1 = PA = E_1 \varepsilon_1, \quad (5)$$

onde  $A$  é a área de seção transversal total do elemento volumétrico representativo, e relacionando os módulos de elasticidade, tem-se

$$E_1 = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A}. \quad (6)$$

Sabendo que os volumes em fração de cada material constituinte,  $V_f$  e  $V_m$ , (respectivamente para a fibra e matriz) podem ser escritos como uma razão entre a área de seção transversal do material constituinte com a área de seção transversal total, isto é,

$$V_f = \frac{A_f}{A}, \quad (7)$$

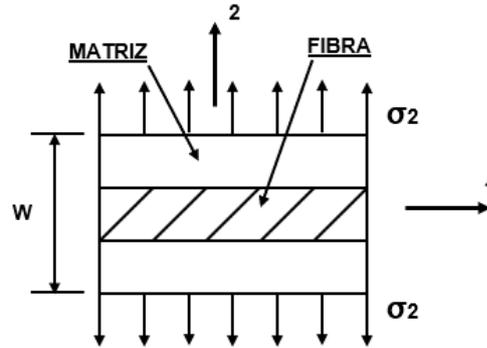
$$V_m = \frac{A_m}{A} \quad (8)$$

e realizando as devidas substituições, obtém-se a seguinte expressão para o módulo de elasticidade na direção 1:

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m. \quad (9)$$

Para o módulo de elasticidade na direção 2,  $E_2$ , temos a situação ilustrada na Figura 13. Nesse caso, é considerado que a mesma tensão,  $\sigma_2$ , é aplicada tanto na fibra quanto na matriz.

Figura 13 - Elemento volumétrico representativo para obtenção de  $E_2$ .



Fonte: Adaptado de (JONES, 1999).

Dessa forma, as deformações na fibra,  $\varepsilon_f$ , e matriz,  $\varepsilon_m$ , são expressas por:

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f}, \quad (10)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m}. \quad (11)$$

As deformações, tanto da fibra quanto da matriz, ocorrem ao longo do comprimento transversal,  $W$ , do elemento volumétrico representativo. Sendo assim, a deformação transversal,  $\Delta W$ , é descrita na forma de:

$$\Delta W = \varepsilon_2 W = V_f W \varepsilon_f + V_m W \varepsilon_m. \quad (12)$$

A Equação 12 em nova forma, com a deformação na direção principal 2 em evidência passa a ser escrita como

$$\varepsilon_2 = V_f \varepsilon_f + V_m \varepsilon_m. \quad (13)$$

Substituindo as deformações das Equações 10 e 11 na equação 13 chega-se em:

$$\varepsilon_2 = V_f \frac{\sigma_2}{E_f} + V_m \frac{\sigma_2}{E_m}. \quad (14)$$

Da relação tensão por deformação,

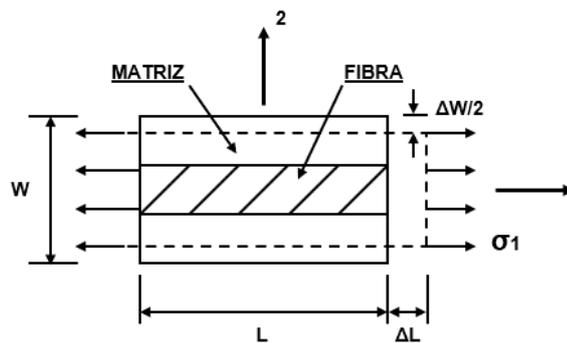
$$\sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 \quad (15)$$

obtém-se a relação para o módulo de elasticidade na direção principal 2,

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{V_m E_f + V_f E_m}. \quad (16)$$

Já o módulo de Poisson,  $\nu_{12}$ , é obtido através de uma abordagem semelhante ao módulo  $E_1$ , conforme a Figura 14.

**Figura 14 - Elemento volumétrico representativo para obtenção de  $\nu_{12}$ .**



Fonte: Adaptado de (JONES, 1999).

Portanto, considerando a definição do módulo de Poisson,

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}, \quad (17)$$

e a hipótese de que a deformação da fibra e matriz são idênticas se obtém a deformação transversal no elemento volumétrico representativo, descrita pela seguinte expressão:

$$\Delta W = -W \varepsilon_2 = W \nu_{12} \varepsilon_1. \quad (18)$$

Semelhantemente à análise do módulo de elasticidade,  $E_2$ , as deformações transversais para a fibra,  $\Delta_{fW}$ , e a matriz,  $\Delta_{mW}$ , são expressas por:

$$\Delta_{mW} = W V_m \nu_m \varepsilon_1, \quad (19)$$

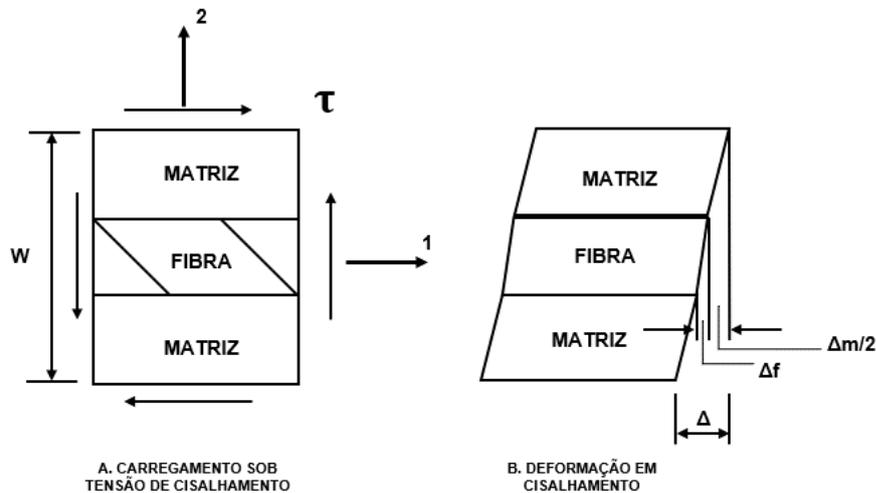
$$\Delta_{fW} = WV_f v_f \varepsilon_1. \quad (20)$$

Combinando as Equações 19 e 20 e dividindo pela deformação na direção principal 1 e o comprimento transversal, se obtêm a expressão que descreve o módulo de Poisson,  $\nu_{12}$ , dada por:

$$\nu_{12} = \nu_m V_m + \nu_f V_f. \quad (21)$$

O módulo de cisalhamento no plano,  $G_{12}$ , é obtido através da premissa que as tensões de cisalhamento atuando na fibra e na matriz são idênticas, conforme a Figura 15. Além disso, considera-se um comportamento linear para a relação tensão-deformação do material.

**Figura 15 - Elemento volumétrico representativo para obtenção de  $G_{12}$ .**



Fonte: Adaptado de (JONES, 1999).

As deformações em cisalhamento da fibra,  $\gamma_f$ , e matriz,  $\gamma_m$ , são descritas, respectivamente, por:

$$\gamma_m = \frac{\tau}{G_m}, \quad (22)$$

$$\gamma_f = \frac{\tau}{G_f}. \quad (23)$$

onde,  $\tau$  é a tensão cisalhante,  $G_f$  e  $G_m$  os módulos de cisalhamento e  $\gamma_f$  e  $\gamma_m$  as deformações cisalhantes, onde os subíndices  $f$  e  $m$  representam as fases fibra e matriz, respectivamente.

A deformação em cisalhamento total do material é descrita por:

$$\Delta = \gamma W = \Delta_m + \Delta_f. \quad (24)$$

Considerando as deformações micromecânicas, para a matriz e fibra, expressas respectivamente pelas seguintes equações:

$$\Delta_m = V_m W \gamma_m, \quad (25)$$

$$\Delta_f = V_f W \gamma_f. \quad (26)$$

E dividindo a deformação total, da Equação 24, pelo comprimento transversal do elemento volumétrico representativo,  $W$ , chega-se na expressão:

$$\gamma = V_m \gamma_m + V_f \gamma_f. \quad (27)$$

Utilizando a definição de deformação por cisalhamento,

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{12}} \quad (28)$$

a Equação 27 pode ser reescrita na forma de:

$$\frac{\tau}{G_{12}} = V_m \frac{\tau}{G_m} + V_f \frac{\tau}{G_f}. \quad (29)$$

Por fim, colocando o módulo de cisalhamento,  $G_{12}$ , em evidência, se obtém a expressão:

$$G_{12} = \frac{G_m G_f}{V_m G_f + V_f G_m} \quad (30)$$

### 2.4.1.3 Método Halpin-Tsai

Halpin e Tsai desenvolveram um método de interpolação que simplificou e foi capaz de aproximar melhor de resultados experimentais do que outras técnicas de micromecânica (HALPIN et al., 1976). O modelo pode ser descrito pelas fórmulas:

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (31)$$

$$\nu_{12} = \nu_m V_m + \nu_f V_f \quad (32)$$

$$\frac{M}{M_m} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (33)$$

$$\eta = \frac{(M_f/M_m) - 1}{(M_f/M_m) + \xi} \quad (34)$$

Onde,  $M$  representa os módulos  $E_2$ ,  $G_{12}$  ou  $\nu_{12}$  do material compósito,  $M_f$  representa os módulos  $E_f$ ,  $G_f$  ou  $\nu_f$  da fibra e  $M_m$  representa os módulos  $E_m$ ,  $G_m$  ou  $\nu_m$  da matriz.

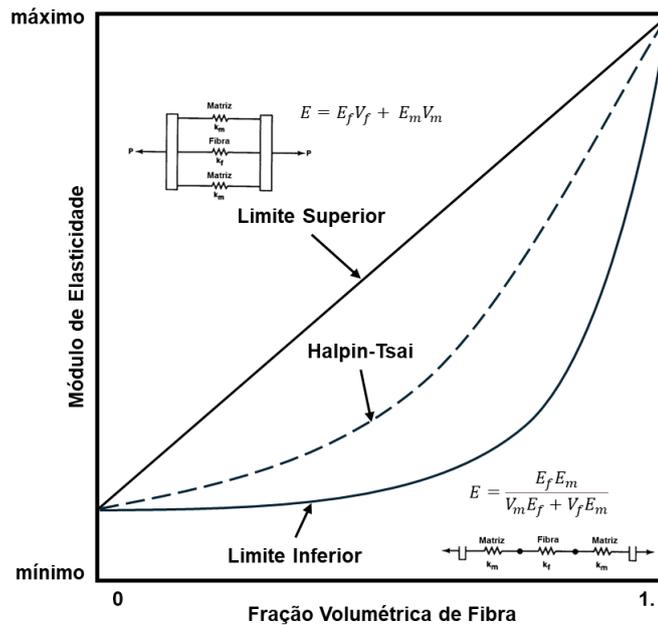
E onde  $\xi$  é uma medida vinculada ao reforço em fibra que depende da geometria da fibra, geometria de empacotamento e das condições de carga. A definição de  $\xi$  é uma das maiores dificuldades em se aplicar o modelo de Halpin-Tsai, onde observações empíricas são necessárias para obtê-lo.

No livro produzido por Jones (1999), o modelo de Halpin-Tsai é apresentado, explicando o funcionamento da interpolação entre os limites superiores e inferiores para o módulo elástico do material compósito. Ambos, são obtidos a partir de análises da elasticidade do material.

O limite inferior é definido a partir do princípio da energia complementar mínima e resulta numa equação idêntica à Equação 16 para o módulo de elasticidade transversal,  $E_2$ , que também é comparada a um sistema de molas ligadas em série.

Já para o limite superior, é utilizada a energia potencial mínima para se obter uma equação idêntica à Equação 9, comparada a um sistema de molas ligadas em paralelo. Na Figura 16 são ilustradas as representações das curvas obtidas pela análise dos limites, assim como do modelo de Halpin-Tsai.

Figura 16 - Curvas dos limites para o módulo de elasticidade.



Fonte: Adaptado de (JONES, 1999).

As equações de Halpin-Tsai resultam em valores de módulo de elasticidade que transitam entre esses dois limites. A interpolação entre os limites vem justamente do valor de  $\xi$ .

Jones (1999) realizou observações sobre os valores de  $\xi$ . Primeiramente, o valor de  $\xi$  pode variar entre 0 e o infinito. Quando o valor de  $\xi$  é igual a 0, a Equação 33, base do modelo de Halpin-Tsai, é reduzida para a forma de:

$$\frac{1}{M} = \frac{V_f}{M_f} + \frac{V_m}{M_m} \quad (35)$$

que é associado com o limite inferior do módulo de elasticidade do compósito. Já quando  $\xi$  tende ao infinito, a Equação 33 é reduzida para a forma de:

$$M = M_f V_f + M_m V_m \quad (36)$$

que é idêntica a equação que determina o limite superior do módulo de elasticidade do material compósito. Portanto, o valor de  $\xi$  funciona como uma medida do nível de reforço das fibras, aonde quanto maior for, maior a eficiência das fibras em aumentar a rigidez do compósito em relação à matriz.

#### 2.4.2 Simulação por Elementos Finitos

Extremamente difundido na engenharia, o método numérico de elementos finitos possui o objetivo básico de transformar equações na forma contínua em um sistema de equações com incógnitas que possuem valores pontuais, assim aproximando um meio contínuo por um modelo discreto (FISH; BELYTCHKO, 2008).

O MEF possui algumas etapas para ser aplicado. Na primeira delas deve-se dividir o domínio de interesse em elementos, que passam a se conectar através de nós. O conjunto de nós e elementos é chamado de malha. Após a discretização, as equações que governam cada elemento são calculadas e é feita a superposição delas, gerando um sistema de equação que descreve o comportamento do objeto em estudo (FISH; BELYTCHKO, 2008).

Atualmente são diversas as opções de *softwares* para análises pelo método dos elementos finitos. Com os avanços computacionais, em relação à aumentos nas capacidades de armazenamento e processamento de dados, as simulações se tornaram mais rápidas e confiáveis, o que torna o método extremamente aplicável dentro da engenharia, reduzindo o tempo e recursos físicos necessários para o desenvolvimento de projetos em geral.

Windyandari et al. (2022) utilizaram o método dos elementos finitos para avaliar um compósito híbrido utilizando fibra de vidro e coco como material alternativo para a produção de pequenos barcos de pesca. No estudo, obtiveram experimentalmente as propriedades mecânicas que foram utilizadas na simulação que indicaram a possibilidade de se utilizar o material na aplicação em questão.

Dentro do universo de geração de energia eólica, Appadurai et al. (2023) analisaram a possibilidade de se utilizar um compósito híbrido com fibra de vidro e diferentes tipos de fibras naturais (juta, sisal e borracha natural), impregnadas em uma matriz de epóxi, para a produção de pás de turbinas eólicas *offshore*. Com as propriedades dos materiais obtidas na literatura, realizaram simulações pelo MEF e concluíram que o compósito híbrido que utilizou fibras de juta foi o mais apropriado para o projeto analisado.

Também no segmento de energia eólica um estudo numérico utilizando o método dos elementos finitos foi conduzido para avaliar a utilização de um compósito com fibras de sisal para a produção de turbinas eólicas urbanas de pequeno porte. O estudo avaliou o mesmo projeto utilizando aço como material e concluiu através das

simulações que, devido à baixa densidade, utilizar sisal seria a melhor escolha (APPADURAI; FANTIN IRUDAYA RAJ; LURTHUPUSHPARAJ, 2022).

A utilização de compósitos reforçados com fibras de sisal em matriz epóxi, também foi avaliada, através de simulações pelo MEF, na aplicação em feixes de mola para suspensões automotivas. Porém, nesse caso os autores concluíram que apenas com alterações na geometria, como reforços estruturais, seria possível a substituição dos materiais convencionais pelo compósito proposto (KHAN; NAYAK, 2023).

Entretanto, na revisão bibliográfica feita por Abidin et al. (2019) chegou-se à conclusão de que o estudo da aplicação de fibras naturais em compósitos, sejam eles híbridos ou não, através do método dos elementos finitos ainda é escassa onde a maior parte dos estudos semelhantes focam apenas na aplicação de fibras sintéticas.

#### 2.4.3 Correlação entre Modelos de Comportamento Mecânico

A comparação de resultados experimentais com de simulações de elementos finitos e análises de micromecânica é um tópico analisado em alguns estudos.

Alasubramanian, Rajeswari e Vaidheeswaran (2020) produziram compósitos híbridos utilizando fibra de sisal, linho e babosa, envolvidas por uma matriz de resina epóxi. A caracterização das propriedades em tração e flexão foi feita seguindo as normas ASTM e comparadas com as obtidas nas simulações de elementos finitos. Os autores concluíram que as simulações e resultados experimentais possuíam uma boa correlação, com um desvio dos resultados que ficou em torno de 2% a 6%.

Rafiqzaman et al. (2016) produziram um compósito híbrido utilizando fibra de vidro e juta, em uma matriz de resina epóxi, variando os teores de fibra. Fizeram uma simulação de elementos finitos utilizando 30% de fibra de vidro e 10% de fibra de juta para comparar com os resultados obtidos para o ensaio de tração feito para o compósito que utilizou essa mesma proporção. Chegaram a resultados 16% maiores para as tensões obtidas nas simulações. Apontaram que a falta de homogeneidade do material real poderia justificar o fato de os resultados computacionais chegarem em valores mais altos que os experimentais.

Em seu estudo, que buscou analisar os efeitos da exposição de compósitos reforçados com fibra de sisal à ambientes com elevadas temperatura e umidade, Alajmi et al. (2022) compararam os resultados de ensaios experimentais de flexão com simulações numéricas. No estudo, foi constatado uma tendência de a simulação numérica apresentar valores bem mais altos de resistência à flexão para as amostras

que foram expostas por mais tempo à temperatura e umidade, mesmo realizando as devidas correções no modelo numérico.

Gupta et al. (2021) utilizaram modelos de micromecânica para estimar as propriedades de um compósito híbrido com fibras de sisal e banana em uma matriz de resina poliéster, sem a realização de ensaios experimentais. O teor total de fibras no compósito foi variado, assim como a proporção entre as fibras de sisal e banana. As propriedades obtidas foram utilizadas em simulações pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) e comparadas com resultados disponíveis na literatura. Os autores identificaram que o teor ideal de fibras, entre 40% e 50% do volume do compósito, proporciona o melhor desempenho mecânico. Além disso, os resultados das simulações apresentaram boa concordância com os dados da literatura.

Diversos modelos de micromecânica de compósitos foram usados por Rao, Jayaraman e Bhattacharyya (2012) para caracterizar as propriedades em flexão de uma estrutura sanduíche utilizando sisal nas faces. Os modelos de micromecânica utilizados tiveram uma boa predição das propriedades mecânicas para baixos teores de fibra, tendo uma tendência a resultarem em valores mais baixos que os experimentais para o módulo de elasticidade do material. Os autores também concluíram, através dos modelos de micromecânica, que a baixa adesão interfacial entre a matriz, de polipropileno, e as fibras resulta em uma falta de aproveitamento da resistência mecânica das fibras.

Buscando um comparativo entre simulações de elementos finitos e regras da micromecânica para materiais compósitos, Sathishkumar et al. (2022) produziram compósitos utilizando resina epóxi, fibra de sisal e diferentes teores de cinzas de carvão, que atua como um material de preenchimento. As curvas de tensão e deformação dos resultados experimentais, da Regra das Misturas, do método Halpin-Tsai e da simulação de elementos finitos foram estudadas e indicaram uma melhor aproximação da realidade através da Regra das Misturas. Além disso, concluíram que aumentar o teor de cinzas de carvão aumenta a ductilidade do material, onde o compósito utilizando 10% do seu peso em cinzas, obteve os maiores valores de resistência à tração e compressão.

No estudo de Jagath narayana e Burela (2019), os autores combinaram o método dos elementos finitos com a utilização de um elemento volumétrico representativo (RVE), simulando-o para obter as propriedades mecânicas do material compósito, que utilizou fibra de sisal e uma matriz polimérica. Através de uma

comparação com análises micromecânicas, feitas utilizando a Regra das Misturas, os autores concluíram que as propriedades do compósito estavam em acordo com os valores esperados.

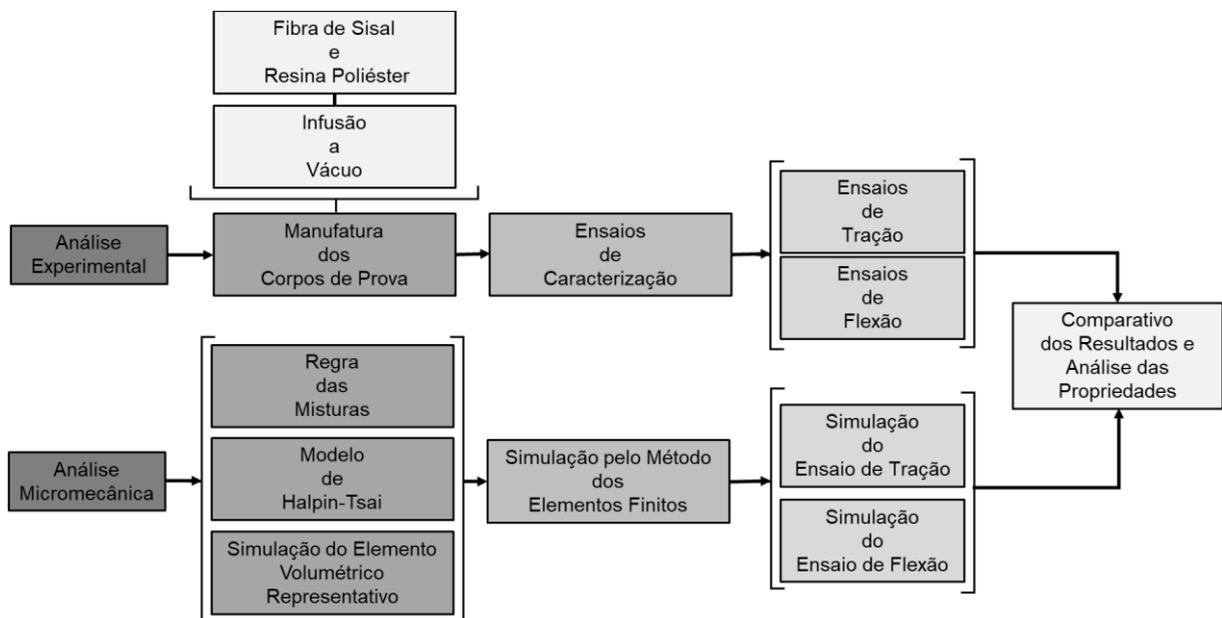
No estudo realizado por Sinitsky, Trabelsi e Priel (2022) uma comparação foi feita entre ensaios experimentais, simulações de elementos finitos para um elemento representativo volumétrico e regras de micromecânica. Entretanto, os autores variaram a hipótese de considerar a fibra como um material isotrópico, fazendo análises também para o cenário que é um material anisotrópico. Os autores apontaram que fibras sintéticas, desenvolvidas pelo homem, podem ser consideradas como isotrópicas nesse tipo de estudo, porém que fibras naturais possuem um alto grau de anisotropia e que, portanto, considerações devem ser feitas. Com as propriedades mecânicas obtidas, através da simulação do RVE e regras de micromecânica, uma simulação de elementos finitos para um ensaio de tração foi feita e comparada com ensaios experimentais. Nessa comparação, para carregamentos axiais, as simulações que consideraram as fibras como materiais isotrópicos e anisotrópicos apresentaram resultados idênticos e correspondendo ao resultado experimental. Porém, para os carregamentos não-axiais,  $45^\circ$  em relação ao eixo longitudinal da fibra, o modelo isotrópico não foi fiel, onde a diferença dos resultados se acentuou nos cenários de maior teor de fibra no compósito. Enquanto isso, o modelo que considerou a anisotropia da fibra gerou resultados próximos aos experimentais mesmo com o carregamento não-axial.

Adeniyi et al. (2021) também realizaram um comparativo entre resultados experimentais, micromecânica e simulações pelo método dos elementos finitos de elementos representativos volumétricos (RVE). Os modelos de micromecânica utilizados foram a Regra das Misturas e Halpin-Tsai. Já para o RVE uma variação na geometria foi analisada, variando entre faces quadrangulares ou hexagonais. Os autores concluíram que para o módulo de elasticidade na primeira direção principal, em teores de fibra baixos todos os métodos obtiveram resultados próximos com os experimentais. Porém, para teores altos de fibra, a simulação dos elementos volumétricos representativos chegou em resultados mais altos para os módulos de elasticidade. Porém, para o módulo de elasticidade na segunda direção principal, transversal ao eixo longitudinal das fibras, o comportamento contrário foi constatado. Já para obtenção dos módulos de Poisson, o RVE que utilizou a geometria hexagonal não foi representativo com os resultados experimentais.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos empregados nesta pesquisa. Um fluxograma das etapas propostas é exibido na Figura 17.

Figura 17 - Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Autoria própria.

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Fibra de Sisal

A fibra de reforço utilizada para a manufatura dos corpos de prova foi a fibra de sisal adquirida na forma de um tecido (Tela/Tecido Natural de Sisal – Metro, Casa das Cordas, Código de Referência 2792). O tecido é comumente vendido no varejo e utiliza fios de sisal que são formados pela fibra de sisal já beneficiada e cortada em tamanhos uniformes.

O tecido é formado pelo entrelaçamento de diversos fios de sisal de maneira ortogonal, gerando uma trama do tipo simples onde os fios da trama entrelaçam os fios do urdume por cima e por baixo de maneira alternada. Formado por fios de sisal com aproximadamente 1,5 mm de diâmetro e gramatura aproximada de 630 g/m<sup>2</sup>, o tecido de sisal utilizado é exibido na Figura 18.

**Figura 18 - Tecido de sisal.**



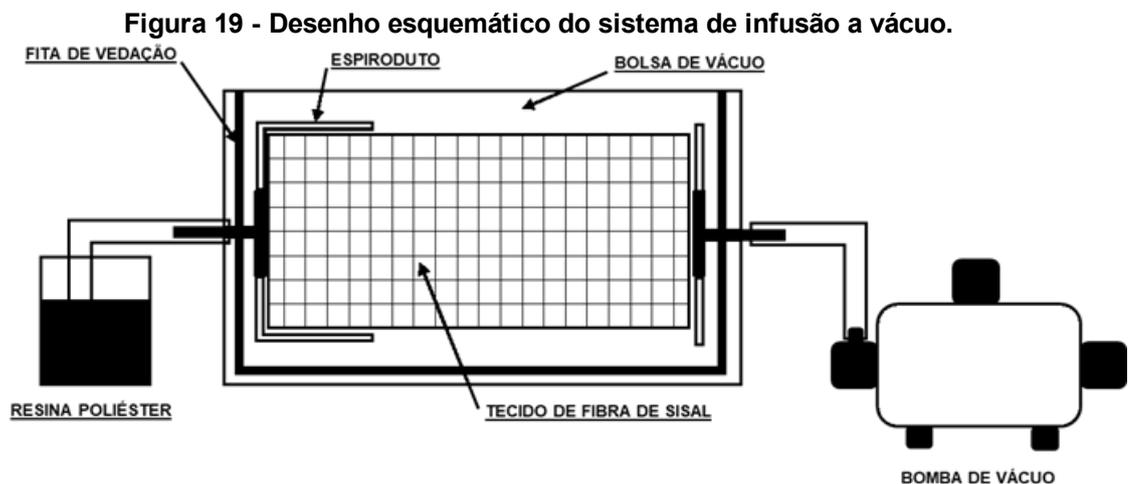
Fonte: Autoria própria.

### 3.1.2 Resina Poliéster

A resina utilizada como matriz polimérica para a manufatura do material compósito foi a do tipo poliéster ortoftálica (RESINA POLIESTER ESCURA - 05KG (BOMBA), CWB RESINAS E SILICONES LTDA, Código de Referência RPE05KG). Para a catalização da resina foi utilizado o agente MEK (*metil etil cetona*) (MEK 500gr - Catalisador p/ Resina, Gel Coat e Massa Plástica, CWB RESINAS E SILICONES LTDA, Código de Referência MEK500GR) na quantidade de 1% em relação à massa total de resina.

### 3.1.3 Manufatura do Compósito

As placas do material compósito foram feitas utilizando o método de infusão a vácuo, conforme o esquemático da Figura 19.



Fonte: Autoria própria.

Para a confecção das placas, foram utilizadas três camadas de tecido de fibra de sisal, todas alinhadas na mesma direção e com 250 mm de comprimento e 150 mm de largura. As camadas do tecido foram envolvidas por uma bolsa de plástico específica para a aplicação em sistemas de infusão a vácuo.

Com o uso de mangueiras e conexões o sistema foi conectado à bomba de vácuo (modelo RV3, fabricante Edwards, código de referência A652-01-906) em uma das extremidades e ao recipiente com a resina na outra. Antes de iniciar a infusão, foi aplicado o catalisador à resina poliéster e misturado manualmente em um regime de baixa rotação para minimizar a entrada de bolhas de ar.

A infusão da resina ao sistema foi feita de maneira controlada, regulando a abertura de vácuo para que a resina fluísse de maneira progressiva e uniforme, minimizando a formação de bolhas.

Após a infusão total do laminado, foram fechadas as linhas e conexões, mantendo apenas o vácuo gerado pela vedação do sistema, até a cura total do laminado.

Na Figura 20 é exibida o sistema de infusão a vácuo montado no LabMeP, Laboratório de Polímeros da UTFPR, para a confecção do material compósito desenvolvido neste trabalho.

**Figura 20 - Sistema de infusão a vácuo.**



**Fonte: Autoria própria.**

## 3.2 Procedimento Experimental

### 3.2.1 Densidade Volumétrica e Proporção das Fases

A obtenção da densidade do compósito e das fases constituintes foi feita seguindo os procedimentos descritos pela norma *ASTM D792 - Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement* (ASTM, 2020) que utiliza o princípio do deslocamento em meio aquoso para o cálculo da densidade.

Já proporção de cada uma das fases, em volume, é calculada a partir das densidades de cada material constituinte e a densidade do compósito é dada por

$$\rho_c = V_f \rho_f + V_m \rho_m \quad (37)$$

onde  $V_f$  e  $V_m$  representam a concentração percentual, em volume, da fibra e matriz, respectivamente.

Sabendo que a soma dos teores é igual 1, a Equação 37 pode ser reescrita como:

$$V_f = \frac{\rho_c - \rho_m}{\rho_f - \rho_m} \quad (38)$$

As propriedades consideradas no ensaio e os resultados obtidos são exibidos na Tabela 2.

**Tabela 2 - Densidade e teor das fases do compósito.**

<b>Material</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Teor em Volume [%]</b>
Resina Poliéster	1,189	63,6
Fio de Fibra de Sisal	1,200	36,4
Compósito	1,193	-

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.2.2 MEV

Com o intuito de realizar uma análise qualitativa da interação entre a fibra de sisal e a resina poliéster, além da avaliação da presença de bolhas e vazios, foi

utilizado a técnica de microscopia eletrônica de varredura, MEV, nas amostras do material.

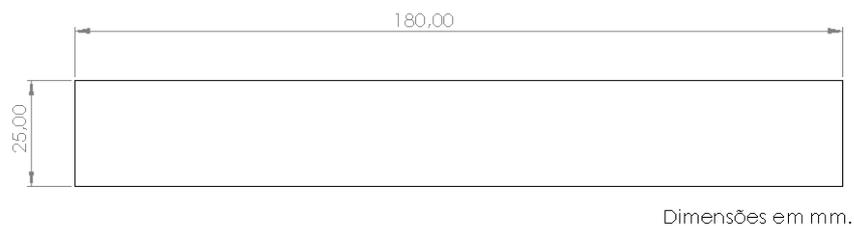
A interação das fases e presença de defeitos no compósito é uma das principais dificuldades em correlacionar modelos de micromecânica com ensaios experimentais. Portanto, a análise das imagens permitiu uma maior compressão do material, colaborando para as discussões feitas sobre a validade dos modelos estudados.

Utilizou-se o equipamento da marca Zeiss, modelo EVO MA15, do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais – CMCM da UTFPR, Campus Curitiba.

### 3.2.3 Resistência à Tração

Os ensaios de resistência à tração foram feitos conforme a norma *ASTM 3039 - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials* (ASTM INTERNATIONAL, 2014). Os corpos de prova foram extraídos das placas do material produzido seguindo a geometria apresentada na Figura 21 e com espessura de 8 mm.

**Figura 21 - Geometria do corpo de prova para o ensaio de tração.**

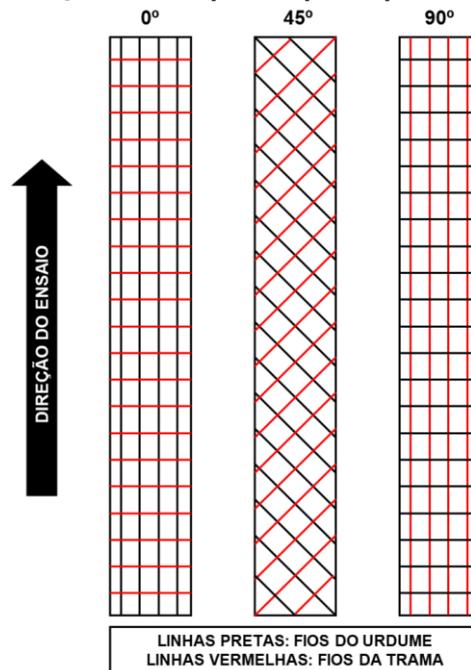


**Fonte: Autoria própria.**

Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios universais (DL10000, Instron Brasil Equipamentos Científicos Ltda EMIC, Brasil) com uma célula de carga de 100 kN (aproximadamente 10.000 kgf) e um deslocamento de 2 mm/min. Um extensômetro foi utilizado para medir o deslocamento. Nas extremidades dos corpos de prova foram fixadas lixas de gramatura #120 para melhorar a aderência nos pontos de fixação do ensaio.

Foram utilizados corpos de prova com fibras em diferentes orientações em relação ao carregamento, variando em 0°, 45° e 90° conforme ilustrado na Figura 22. Os ensaios para cada orientação foram reproduzidos em triplicata.

Figura 22 - Orientação dos corpos de prova para o ensaio de tração.

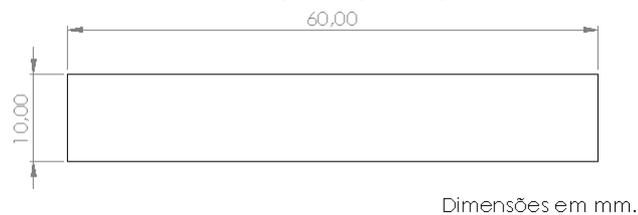


Fonte: Autoria própria.

### 3.2.4 Resistência à Flexão

Os ensaios de resistência à flexão foram feitos conforme a norma *ASTM D790 - Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials* (ASTM, 2017). Os corpos de prova foram extraídos das placas do material produzindo seguindo a geometria apresentada na Figura 23 e com espessura de 8 mm.

Figura 23 - Geometria do corpo de prova para o ensaio de flexão.



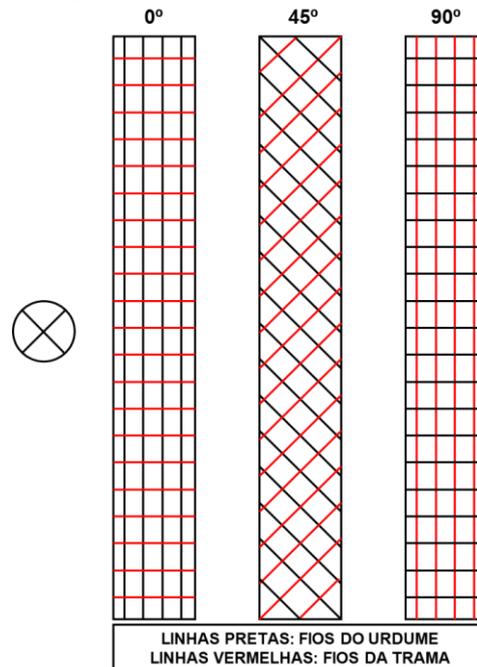
Fonte: Autoria própria.

Os ensaios foram realizados na mesma máquina de ensaios universais utilizada para os ensaios de resistência à tração, porém com uma célula de carga de 5 kN (aproximadamente 500 kgf) e uma velocidade de deslocamento de 4 mm/min, com distância entre apoios de 50 mm. Foi definido como parâmetro para encerrar o

ensaio o momento em que a tensão sofresse uma redução de 60% em relação à tensão máxima suportada pelo corpo de prova.

Foram utilizados corpos de prova com fibras em diferentes orientações em relação ao carregamento, variando em  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  conforme ilustrado na Figura 24. Os ensaios para cada orientação foram reproduzidos em triplicata.

**Figura 24 - Orientação dos corpos de prova para o ensaio de flexão.**



Fonte: Autoria própria

### 3.3 Análise da Micromecânica

As propriedades dos materiais constituintes do material compósito, fio de sisal e resina poliéster, foram extraídas da literatura e da biblioteca de materiais do *software* Ansys, as propriedades são exibidas na Tabela 3.

**Tabela 3 - Propriedades dos materiais micromecânica.**

Material	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson	Módulo de Cisalhamento [GPa]	Referência
Fio de Fibra de Sisal	3,90	0,17	1,67	(SILVA et al., 2010)
Resina Polyester	3,00	0,32	1,14	Biblioteca Ansys

Fonte: (SILVA et al., 2010), Biblioteca Ansys.

Para o módulo de cisalhamento, foram consideradas propriedades isotrópicas para a fibra e resina, utilizando a seguinte equação que relaciona as propriedades elásticas:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (39)$$

Esse é um procedimento adotado em estudos que correlacionaram a micromecânica com ensaios experimentais para compósitos utilizando fibras naturais (RAO; JAYARAMAN; BHATTACHARYYA, 2012a) (SINITSKY; TRABELSI; PRIEL, 2022).

Os teores de fibra e resina, em volume, considerados foram de 36,4% de teor de fibra e 63,6% de teor de resina. Os valores adotados respeitam a proporção resultante dos materiais produzidos no trabalho e foram obtidos através da análise da massa e densidade do material desenvolvido, assim como das densidades das fases constituintes conforme descrito na Seção 3.2.1.

### 3.3.1 Regra da Misturas

Para a análise da micromecânica através da Regra das Misturas, foram calculados os módulos de elasticidade nas direções principais primária e secundária, coeficientes de Poisson e módulo de cisalhamento conforme as equações apresentadas na Seção 2.4.1.2.

### 3.3.2 Método Halpin-Tsai

A análise da micromecânica pelo modelo de Halpin-Tsai seguiu as equações apresentadas na Seção 2.4.1.3 e foi utilizada para o cálculo dos módulos de elasticidade nas direções principais primária e secundária, coeficientes de Poisson e módulo de cisalhamento.

O valor de  $\xi$  considerado foi de 2, conforme utilizado por Adeniyi et al. (2021) que relatou uma boa correlação entre o modelo de Halpin-Tsai e ensaios experimentais.

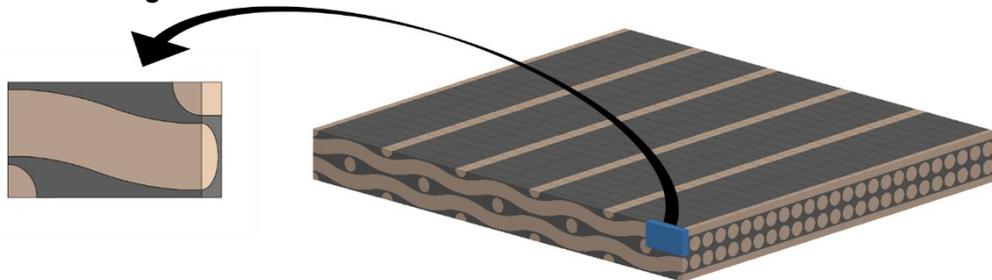
### 3.3.3 Simulação do Elemento Volumétrico Representativo

A modelagem e simulação do RVE foi realizada através do método dos elementos finitos, no software *Ansys Mechanical*, passando pelas etapas de desenvolvimento da geometria, criação do modelo e análise dos resultados.

Considerando o material compósito desenvolvido na etapa experimental desta pesquisa, formado por um tecido bidirecional de sisal envolto em uma matriz de resina poliéster, o elemento volumétrico representativo utilizado foi feito conforme a descrição de Jones (1999) exibida na Seção 2.4.1.1.

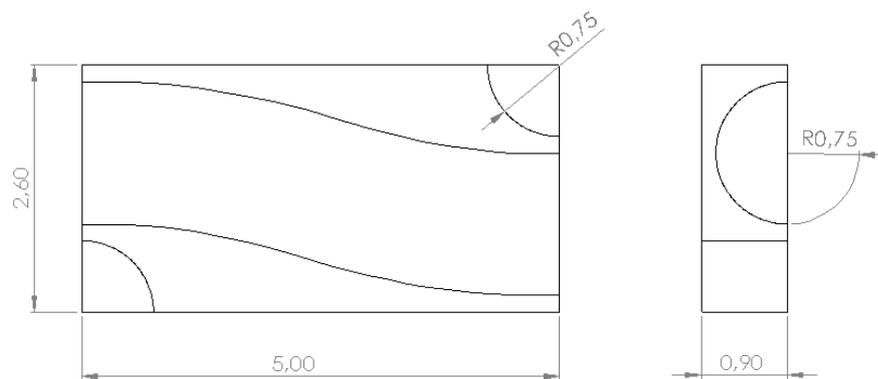
A modelagem da geometria foi feita através do software *Solidworks* e respeitou as proporções e características geométricas de cada material constituinte conforme as propriedades exibidas na Tabela 2. A geometria desenvolvida é exibida na Figura 25 e Figura 26.

Figura 25 - Lâmina e o elemento volumétrico representativo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 26 - Elemento volumétrico representativo (dimensões em mm).



Fonte: Autoria própria.

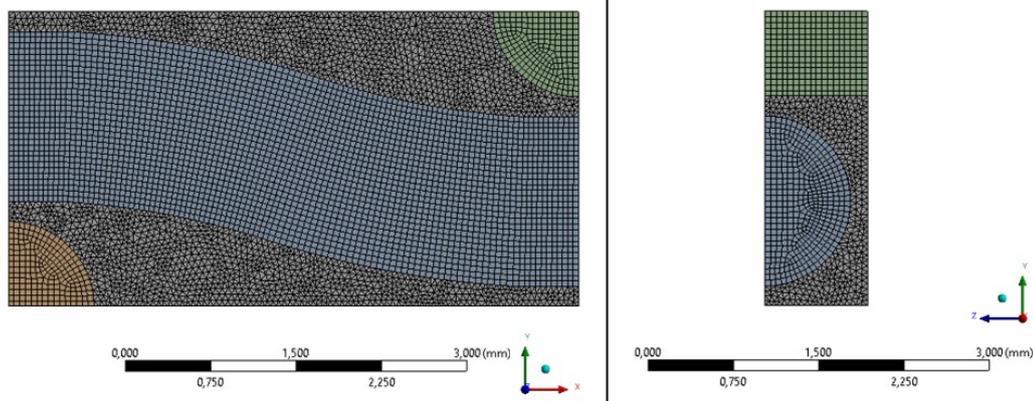
Para a criação do modelo, primeiramente foram definidas as propriedades dos materiais dentro da biblioteca de materiais do *Ansys*, presente na aba *Engineering*

*Data.* Foram criados materiais para o fio do tecido de sisal e a resina poliéster utilizando as propriedades da Tabela 3.

A forma de contato entre a fibra e a matriz foi definida como *Bonded* no modelo, isto é, foi considerada uma adesão perfeita entre as fases sem nenhuma espécie de deslizamento ou descolamento nas interfaces.

A malha adotada é exibida na Figura 27 e passou por um teste de convergência, com critério de parada definido como uma variação menor que 1% no valor da deformação total em relação a dois refinamentos consecutivos. Dessa maneira, chegou-se em uma malha com tamanho de elemento de 0,05 mm totalizando 500.226 elementos.

**Figura 27 - Malha para o elemento volumétrico representativo.**



**Fonte: Autoria própria.**

A aplicação das condições de contorno foi baseada na Lei de Hooke, que para um material genérico anisotrópico pode ser descrita na forma de uma matriz, denominada matriz de flexibilidade, que é descrita por

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56} \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{Bmatrix}, \quad (40)$$

onde  $\sigma_i$  e  $\tau_i$  são as tensões normais e de cisalhamento, respectivamente, enquanto  $\varepsilon_i$  e  $\gamma_i$  são as deformações normais e de cisalhamento, respectivamente.  $S_{ij}$  compõem a matriz de flexibilidade com 21 constantes elásticas independentes.

Para a análise dos resultados da simulação do RVE, foi considerada a simplificação do modelo, assumindo propriedades ortotrópicas para o compósito reforçado com fibras de sisal. Um material ortotrópico é aquele que possui três planos de simetria mutuamente perpendiculares entre si. Para esse tipo de material, a lei de Hooke é reduzida para a forma de:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{Bmatrix}. \quad (41)$$

Para se determinar as constantes elásticas independentes, deve-se criar condições de carregamento uniaxiais que permitam trabalhar com cada situação de maneira isolada, simplificando a matriz de rigidez e permitindo a correlação das constantes elásticas independentes com as propriedades do material.

Na simulação, as condições de contorno reproduziram esses carregamentos, definindo-se as tensões. Já as deformações foram calculadas através da média das deformações de cada elemento de malha do volume do elemento volumétrico representativo. As condições de carregamento são exibidas na Tabela 4.

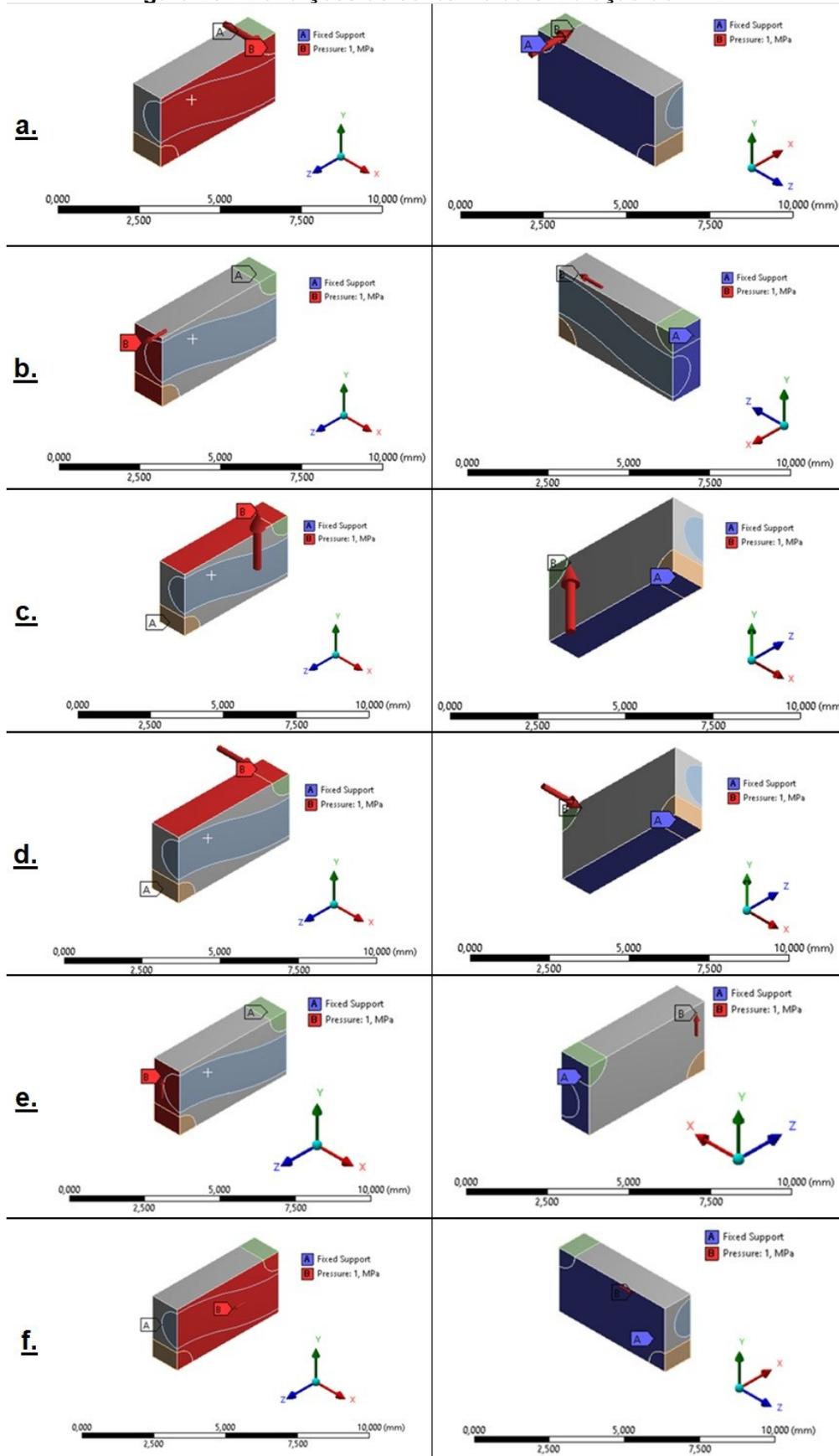
**Tabela 4 - Condições de carregamento uniaxiais para simulação RVE.**

ID	Carregamento
a	Extensão Longitudinal ( $\sigma_1 \neq 0$ )
b	Extensão Transversal no plano ( $\sigma_2 \neq 0$ )
c	Extensão fora do plano ( $\sigma_3 \neq 0$ )
d	Cisalhamento fora do plano ( $\tau_4 \neq 0$ )
e	Cisalhamento fora do plano ( $\tau_5 \neq 0$ )
f	Cisalhamento no plano ( $\tau_6 \neq 0$ )

**Fonte: Autoria própria.**

As condições de contorno aplicadas dentro do programa *Ansys Mechanical* são exibidas na Figura 28, onde é possível visualizar regiões que foram aplicados os carregamentos e as regiões de suporte.

Figura 28 - Condições de contorno da simulação do RVE.



Fonte: Autoria própria.

Através da simplificação da matriz de flexibilidade, para cada condição de carregamento, obteve-se suas respectivas equações. Dessa forma, com os valores de tensão e deformação, as propriedades do material são avaliadas obtendo-se os valores de  $S_{ij}$  e seguindo as seguintes equações:

$$S_{11} = \frac{1}{E_1} \quad (42)$$

$$S_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_2} \quad (43)$$

$$S_{31} = -\frac{\nu_{13}}{E_3} \quad (44)$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_2} \quad (45)$$

$$S_{32} = -\frac{\nu_{23}}{E_2} \quad (46)$$

$$S_{33} = \frac{1}{E_3} \quad (47)$$

$$S_{44} = \frac{1}{G_{23}} \quad (48)$$

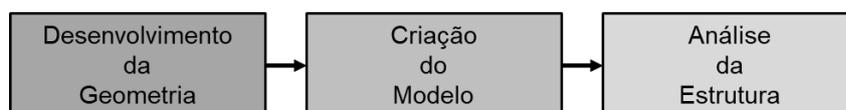
$$S_{55} = \frac{1}{G_{13}} \quad (49)$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \quad (50)$$

### 3.4 Simulação por Elementos Finitos

Foram realizadas simulações por elementos finitos dos ensaios de tração e de flexão seguindo os passos exibidos no fluxograma da Figura 29.

**Figura 29 - Fluxograma etapas simulação pelo método dos elementos finitos.**



**Fonte: Autoria própria.**

As simulações realizadas, dentro do regime linear do material, foram estipuladas tomando como base cada um dos modelos de micromecânica abordados, onde as propriedades do material obtidas foram utilizadas como *inputs* nas simulações

dos ensaios que reproduziram, inclusive considerando as orientações das fibras, os ensaios experimentais de tração e flexão. As simulações realizadas são identificadas na Tabela 5.

**Tabela 5 - Definição das simulações dos ensaios de tração e flexão.**

Simulação #	Tipo	Orientação	Modelo de Micromecânica
1	Tração	0°	Regra das Misturas
2			Halpin-Tsai
3			Simulação do RVE
4		45°	Regra das Misturas
5			Halpin-Tsai
6			Simulação do RVE
7		90°	Regra das Misturas
8			Halpin-Tsai
9			Simulação do RVE
10	Flexão	0°	Regra das Misturas
11			Halpin-Tsai
12			Simulação do RVE
13		45°	Regra das Misturas
14			Halpin-Tsai
15			Simulação do RVE
16		90°	Regra das Misturas
17			Halpin-Tsai
18			Simulação do RVE

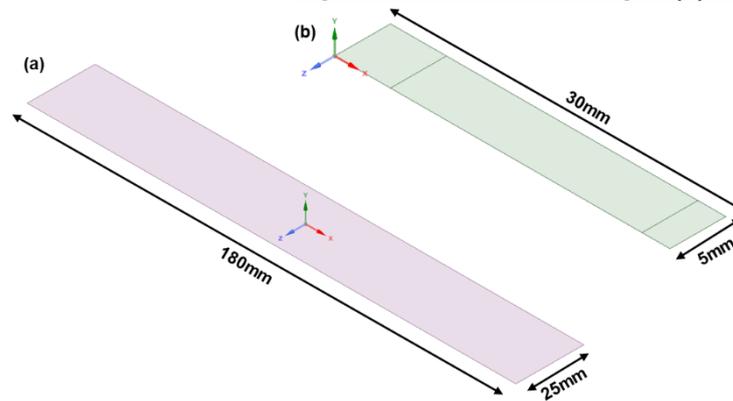
Fonte: Autoria própria.

O *software* utilizado para a simulação foi o *Ansys Workbench* com desenvolvimento semelhante para ambos os ensaios realizados. As distinções entre as condições de contorno são especificadas nas seções seguintes.

Para o desenvolvimento da geometria dos corpos de prova foi utilizado a interface *Space Claim*, seguindo as dimensões exatas dos corpos de prova reais. Devido a características da simulação de flexão, explicadas na Seção 3.4.2, a geometria foi reduzida para um modelo de  $\frac{1}{4}$  do corpo de prova.

As geometrias foram geradas na forma de superfícies com a espessura definida posteriormente na criação do modelo e que foram exportados para a simulação. As geometrias dos corpos de prova simulados são exibidas na Figura 30.

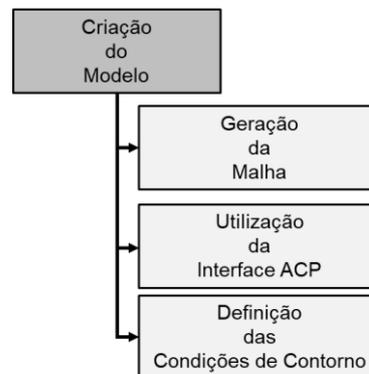
**Figura 30 - Geometrias das simulações dos ensaios de tração (a) e flexão (b).**



**Fonte: Autoria própria.**

Com a definição das geometrias, a criação do modelo da simulação foi executada seguindo as etapas exibidas no fluxograma da Figura 31.

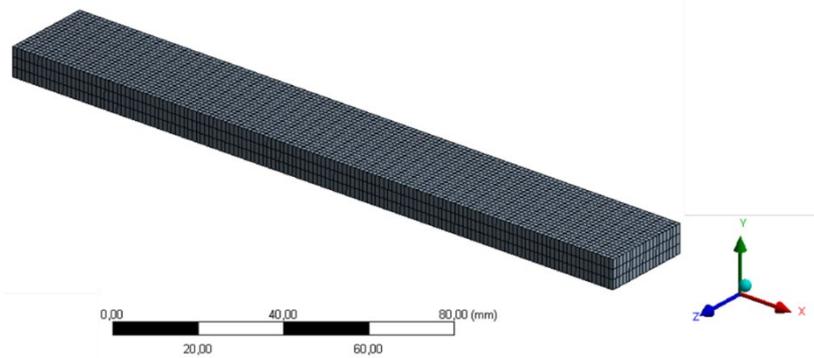
**Figura 31 - Fluxograma para criação do modelo da simulação pelo MEF.**



**Fonte: Autoria própria.**

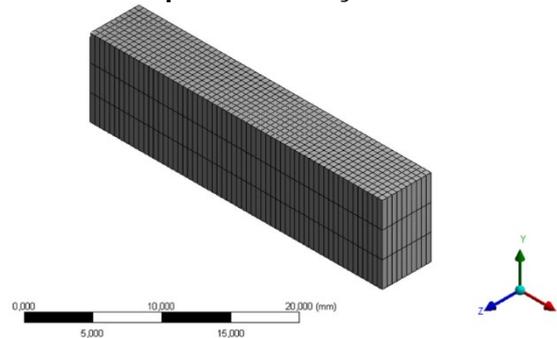
A geração de malha foi realizada dentro da interface do *Ansys Mechanical* e utilizou elementos hexaédricos em ambas as simulações. A qualidade da malha foi aferida através de testes de convergência, tendo como parâmetro o erro relativo entre uma malha inicial (com tamanho de elemento de 6,25 mm) e reduções sucessivas para os tamanhos de elemento de 5 mm, 2,5 mm, 1,25 mm e 0,5 mm. O critério de parada foi definido como erro relativo menor que 1% nos resultados para deformação total. Dessa maneira, chegou-se na definição de um tamanho de elemento de 1,25 mm para a simulação do ensaio de tração e 0,5 mm para a simulação do ensaio de flexão. As malhas resultantes para as simulações são exibidas nas Figura 32 e Figura 33.

**Figura 32 - Malha para a simulação do ensaio de tração.**



Fonte: Autoria própria.

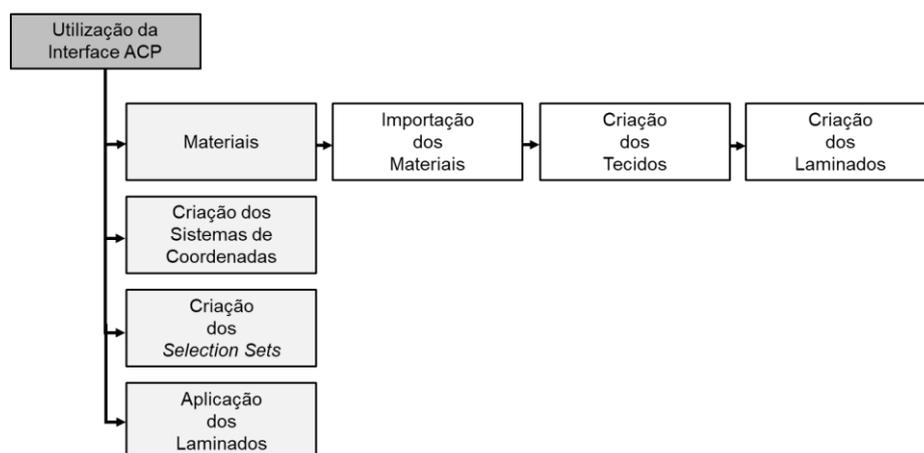
**Figura 33 - Malha para a simulação do ensaio de flexão.**



Fonte: Autoria própria.

Após a criação da malha, a etapa seguinte utilizou a interface *Ansys ACP*, que permite especificar e explorar com mais detalhes a utilização de materiais compósitos em simulações por elementos finitos. A sequência operacional do módulo *ACP* é apresentada no fluxograma da Figura 34.

**Figura 34 - Fluxograma das etapas de utilização do módulo *ACP* do Ansys.**



Fonte: Autoria própria.

Primeiramente, na seção de materiais, a importação das propriedades do material compósito é feita extraído as informações especificadas no *Engineering Data*, uma biblioteca de materiais fornecida pelo *Ansys* e que permite a criação de novos materiais. As propriedades necessárias para a simulação e que foram importadas ao programa são os módulos de elasticidade, módulos de cisalhamento e coeficientes de Poisson do compósito.

Para as simulações, foram criados três materiais representativos do compósito utilizando a fibra de sisal em matriz de resina poliéster, cada um deles usando as propriedades obtidas através das análises de micromecânica: Regra das Misturas, Halpin-Tsai e simulação do elemento volumétrico representativo.

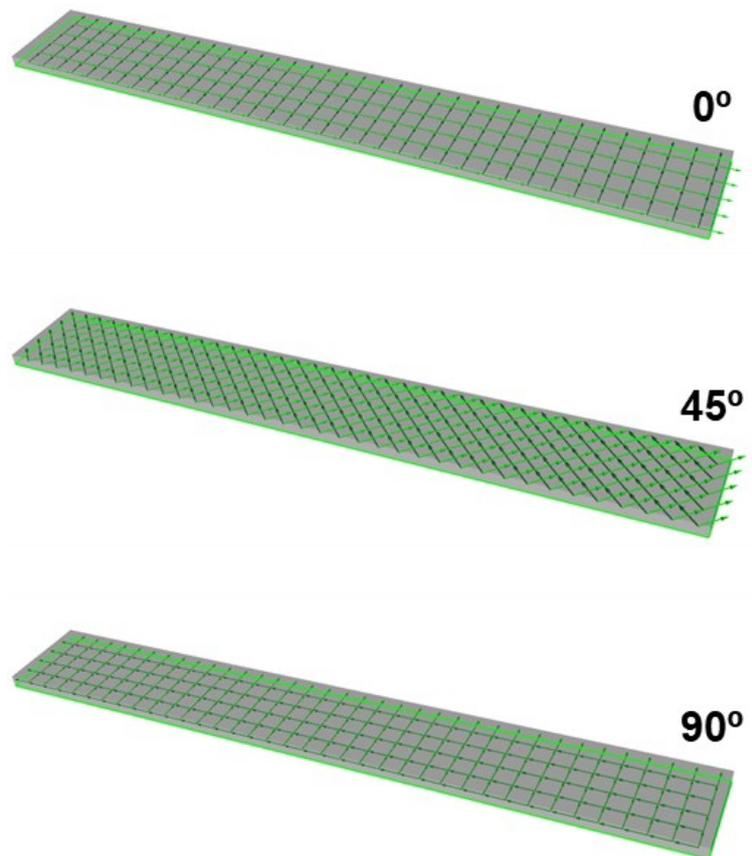
Após a importação dos materiais ao modelo, foram definidas as especificações de cada lâmina através da escolha do material e espessura da camada. As lâminas criadas tiveram a espessura definida no valor de 2,66 mm.

Os laminados são criados pela combinação das lâminas, podendo-se variar a orientação entre as camadas assim como a quantidade. Seguindo as mesmas especificações utilizadas nos ensaios experimentais, utilizou-se três lâminas do compósito de fibra de sisal com resina poliéster, sem distinção no alinhamento entre as camadas.

Com os laminados definidos são criados os sistemas de coordenadas para o posicionamento dos laminados. No módulo *ACP*, os sistemas de coordenadas são denominados como Rosetas, indicados por uma tríade de referência, que é posicionada junto às faces da geometria, podendo ter sua orientação alterada pelo usuário.

Em relação à direção principal das Rosetas criadas, foram especificados laminados com a orientação de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , seguindo os mesmos padrões utilizados nos ensaios experimentais. Por fim, agrupando as informações através dos *Selection Sets* e *Modeling Groups*, obteve-se os modelos para os corpos de prova. Na Figura 35 são exibidos os diferentes corpos de prova, onde é possível visualizar a orientação das fibras através de setas na cor verde.

Figura 35 - Orientação das fibras no Ansys ACP.



Fonte: Autoria própria.

Com o fim da utilização da interface do *Ansys ACP*, os modelos para os corpos de prova em material compósito foram concluídos, sendo importados ao programa *Ansys Mechanical*, utilizando o tipo de transferência *Import Solid Data*.

No *Ansys Mechanical* foram definidas as condições de contorno assim como a obtenção dos resultados de cada uma das simulações. Os resultados analisados e utilizados para as comparações com os valores experimentais foram os de deformação. Em conjunto com o valor das tensões aplicadas, foram definidas as curvas de tensão por deformação para cada uma das simulações, as quais foram comparadas com aquelas obtidas experimentalmente.

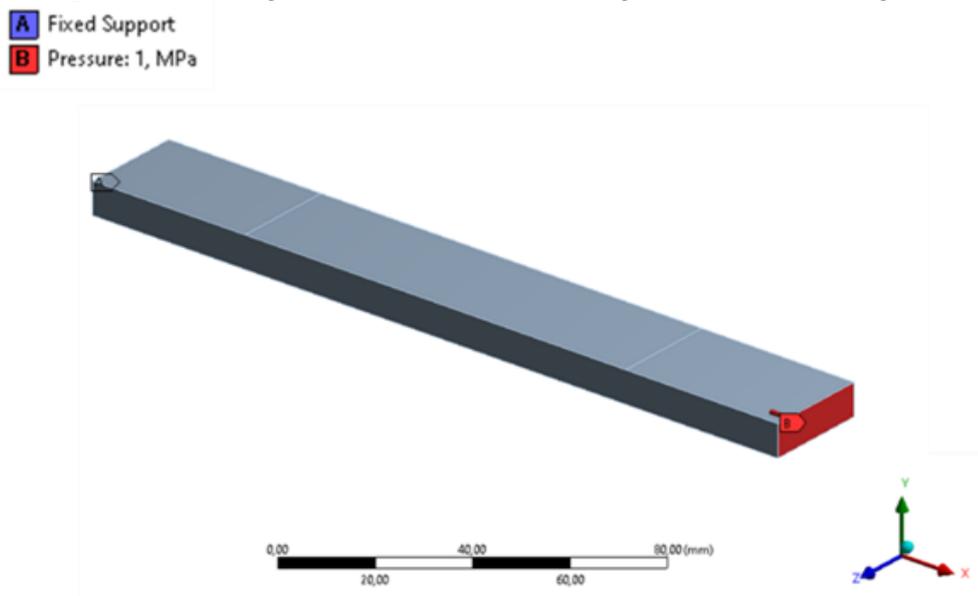
Nas seções a seguir são apresentadas as condições de contorno utilizadas para as simulações dos ensaios de tração e dos ensaios de flexão.

#### 3.4.1 Simulação de Ensaio de Tração

As condições de contorno utilizadas na simulação do ensaio de tração buscaram reproduzir as condições de um ensaio real, aplicando o suporte e

carregamento nas extremidades de ambos os lados do corpo de prova. Nesse caso, foi utilizado um suporte fixo em uma das extremidades do corpo de prova e atribuída uma tensão trativa de 15 MPa, equivalente a uma força de 2400 N, na face da outra extremidade, aplicada em 15 *load steps*, com o carregamento alinhado ao eixo longitudinal do corpo de prova. As condições de contorno utilizadas são exibidas na Figura 36.

**Figura 36 - Condições de contorno da simulação do ensaio de tração.**



Fonte: Autoria própria.

### 3.4.2 Simulação de Ensaio de Flexão

A simulação do ensaio de flexão reproduziu as condições de contorno do ensaio real, adotando um modelo que utiliza apenas um quadrante do corpo de prova. O uso do modelo de  $\frac{1}{4}$  permite a utilização de condições de contorno do tipo *Displacement* que limitam o movimento da face selecionada, mas que mantém um dos graus de liberdade livre. Essa condição é necessária para reproduzir as condições reais de um ensaio de flexão.

A pressão adotada foi de 2,55 MPa, aplicada em 15 *load steps* com incrementos de 0,17 MPa por passo. Em termos de força, o carregamento máximo foi de 31,84 N, aplicado em 15 *load steps* com incrementos de 2,12 N por passo. Ressalta-se que por ser um modelo de  $\frac{1}{4}$  do corpo de prova, esse valor de força é quatro vezes menor que o equivalente aplicado no corpo de prova inteiro.

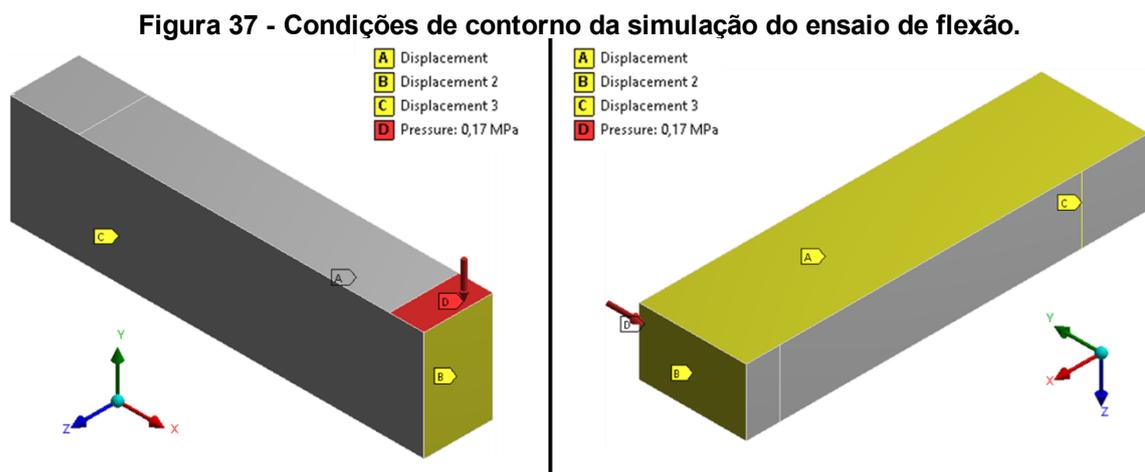
Os valores do carregamento foram adotados conforme a definição de tensão de flexão apresentada na norma utilizada para a realização do ensaio,

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}, \quad (51)$$

onde,  $\sigma_f$  é o índice que representa a tensão de flexão,  $L$ ,  $b$  e  $d$  representam o a distância entre os suportes no ensaio, a largura do corpo de prova e a espessura do corpo de prova, respectivamente. Já  $P$  é o valor da força aplicada no corpo de prova. Dessa forma, as cargas atribuídas resultam em valores equivalente a uma curva de 0 a 15 MPa. O carregamento foi distribuído em uma região no centro do corpo de prova, na direção vertical e com sentido para baixo.

Já as condições de contorno do tipo *Displacement*, foram utilizadas nas regiões indicadas pelos índices A, B e C. Nas região A e B, foi definido um único grau de liberdade, permitindo o deslocamento ao longo do eixo Y. Para a região C, foi definido um único grau de liberdade permitindo a rotação em torno do eixo Z.

As condições de contorno são exibidas na Figura 37.



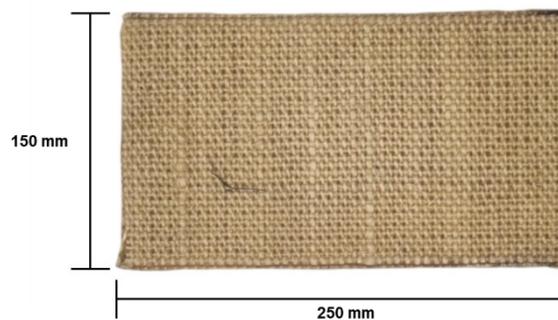
Fonte: Autoria própria.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resultados Experimentais

A primeira etapa desta pesquisa, a manufatura dos materiais, resultou em placas do material compósito, conforme exibidas na Figura 38. A partir dessas placas foram extraídos os corpos de prova para os ensaios de flexão e tração, mostrados na Figura 39. Os resultados dos ensaios são apresentados na sequência.

Figura 38 - Placa de compósito com fibras de sisal.



Fonte: Autoria própria.

Figura 39 - Corpos de prova dos ensaios de tração (a) e de flexão (b).



Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.1 Ensaios de Tração

Os ensaios de tração, conduzidos conforme descritos no Capítulo 3, resultaram nos valores exibidos na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de tração.

Orientação	Tensão de Escoamento [MPa]	Tensão Máxima [MPa]	Deformação na Ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
0°	15,95 ± 1,35	30,99 ± 1,06	3,93 ± 0,22	2,95 ± 0,17
45°	14,54 ± 0,97	17,08 ± 1,31	4,38 ± 0,84	2,41 ± 0,64
90°	18,27 ± 0,71	25,51 ± 2,29	5,23 ± 1,84	3,44 ± 0,13

Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.2 Ensaio de Flexão

Os ensaios de flexão, conduzidos conforme descrito no Capítulo 3, resultaram nos valores exibidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de flexão.

Orientação	Tensão Máxima [MPa]	Deformação na Ruptura [%]	Módulo de Elasticidade em Flexão [GPa]
0°	49,12 ± 5,88	9,12 ± 1,06	1,22 ± 0,32
45°	20,45 ± 4,47	14,53 ± 2,19	1,05 ± 0,22
90°	55,88 ± 15,33	10,17 ± 0,60	1,64 ± 0,16

Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.3 Discussão dos Resultados Experimentais

Em relação a orientação das fibras nos corpos de prova, como esperado, para os ensaios em 45°, tanto para tração quanto flexão, os resultados para tensão máxima e módulo de elasticidade foram inferiores, pois nessa orientação as fibras exercem um papel menor de reforço. Já os corpos de prova em 0° apresentaram resultados superiores na tensão máxima à tração, porém com módulo de elasticidade inferior que os de 90°.

Isso pode ser explicado pela forma que o tecido é feito, onde os fios de urdume (fios alinhados em 0°) estão mais próximos da linearidade e assim conseguem suportar melhor as cargas de tração, enquanto que os fios da trama (fios alinhados em 90°) possuem ondulações que prejudicam a resistência máxima à tração. Porém o entrelaçamento dos fios proporciona uma rigidez que justifica o módulo de elasticidade mais alto nessa direção.

Entretanto, nota-se que os valores das tensões de escoamento foram próximos entre si, independentemente da orientação. Nesse caso, os resultados dos ensaios de tração sugerem que a fase dominante no compósito seja a matriz em resina poliéster.

Para os resultados dos ensaios em flexão, os corpos de prova com orientação de 90° foram superiores o que pode ser suposto pelo fato de que nestes corpos de prova os fios de urdume deixam de estar alinhados com a linha neutra do ensaio e podem exercer melhor seu papel de reforço.

Os estudos em materiais compósitos são bastante diversos e costumam apresentar variações entre si que dificultam uma comparação direta dos resultados. Diferenças nas fases constituintes e métodos de fabricação alteram significativamente as propriedades dos materiais. Entretanto, alguns autores utilizaram materiais e métodos com semelhanças aos adotados neste trabalho.

Bosquetti et al. (2021) estudaram compósitos utilizando sisal, também na forma de um tecido ortogonal, em uma matriz de poliuretano derivado do óleo da mamona e manufaturados por infusão à vácuo. O autor obteve compósitos com tensão máxima em tração de 15,87 MPa e em flexão de 23,23 MPa na direção principal dos corpos de prova. Em relação aos resultados obtidos neste trabalho, nota-se resultados semelhantes para os ensaios de tração, porém uma significativa diferença nos ensaios de flexão. Em tração, a fibra é a principal responsável pela resistência do compósito, enquanto em flexão, a matriz exerce um papel crucial na resistência. Dessa forma, os resultados sugerem um melhor desempenho da resina poliéster do que a poliuretana.

Entretanto, no mesmo estudo conduzido por Bosquetti, ao se utilizar fibras unidirecionais de sisal, em sua forma *in natura* e não na forma de um fio, os autores obtiveram compósitos que suportaram uma tensão máxima de 146 MPa em tração, um valor muito superior ao encontrado neste trabalho e que indicam um maior potencial das fibras de sisal nessa condição (BOSQUETTI et al., 2021).

Olhan et al. (2023) produziram compósitos de maneira semelhante à adotada neste trabalho. Utilizaram fibras de sisal, na forma de um tecido ortogonal, em uma matriz polimérica de resina poliéster e produzidos por infusão à vácuo. Nos ensaios experimentais obtiveram uma tensão máxima em tração de 37,77 MPa com módulo de elasticidade de 3,54 GPa. Já para os ensaios de flexão, obtiveram uma tensão máxima de 34,63 MPa e módulo de elasticidade de 2,66 MPa.

Compósitos utilizando fibras de sisal, na forma de um tecido, em matriz poliuretana derivado do óleo de mamona, foram produzidos por Silva (2003) através do método de prensagem que obteve uma resistência à tração de aproximadamente 40 MPa com módulo de elasticidade de 3 GPa. Para flexão, obteve uma resistência

de cerca de 45 MPa com módulo de elasticidade de 2 GPa. Em relação às propriedades em tração, a autora ainda destacou que na utilização de tecidos os fios orientados transversalmente à direção de carregamento reduzem a resistência do compósito, pois dificultam a transferência de carga entre a fibra e matriz assim como a molhabilidade das fibras nesta região.

Esse efeito da utilização do tecido se torna presente nos resultados obtidos neste trabalho e é um dos fatores responsáveis pelos resultados inferiores em tração quando comparado com compósitos utilizando fibras unidirecionais de sisal, por exemplo. Uma maneira de se reduzir este problema seria a utilização de fios de sisal com menor diâmetro o que aumentaria a área de contato com a matriz, melhorando a adesão entre as fases. Entretanto, a utilização do tecido de sisal ainda trás uma maior praticidade e facilidade de processamento do compósito, o que deve ser levado em conta na escolha do material.

De maneira geral, os resultados obtidos estão de acordo com os valores encontrados na literatura e dão uma visão de qual patamar os materiais produzidos neste trabalho se encontram.

#### **4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura**

Conforme descrito na Seção 3.2.2, foram realizadas as análises de microscopia, pela técnica de MEV, dos compósitos produzidos. As superfícies de fratura dos corpos de prova ensaiados foram analisadas com o intuito de verificar as interações fibra-matriz, além da presença de vazios. Sendo ambos fatores importantes para as propriedades resultantes do compósito e validação dos modelos de micromecânica, que consideram uma adesão perfeita entre as fases e uma matriz livre de vazios.

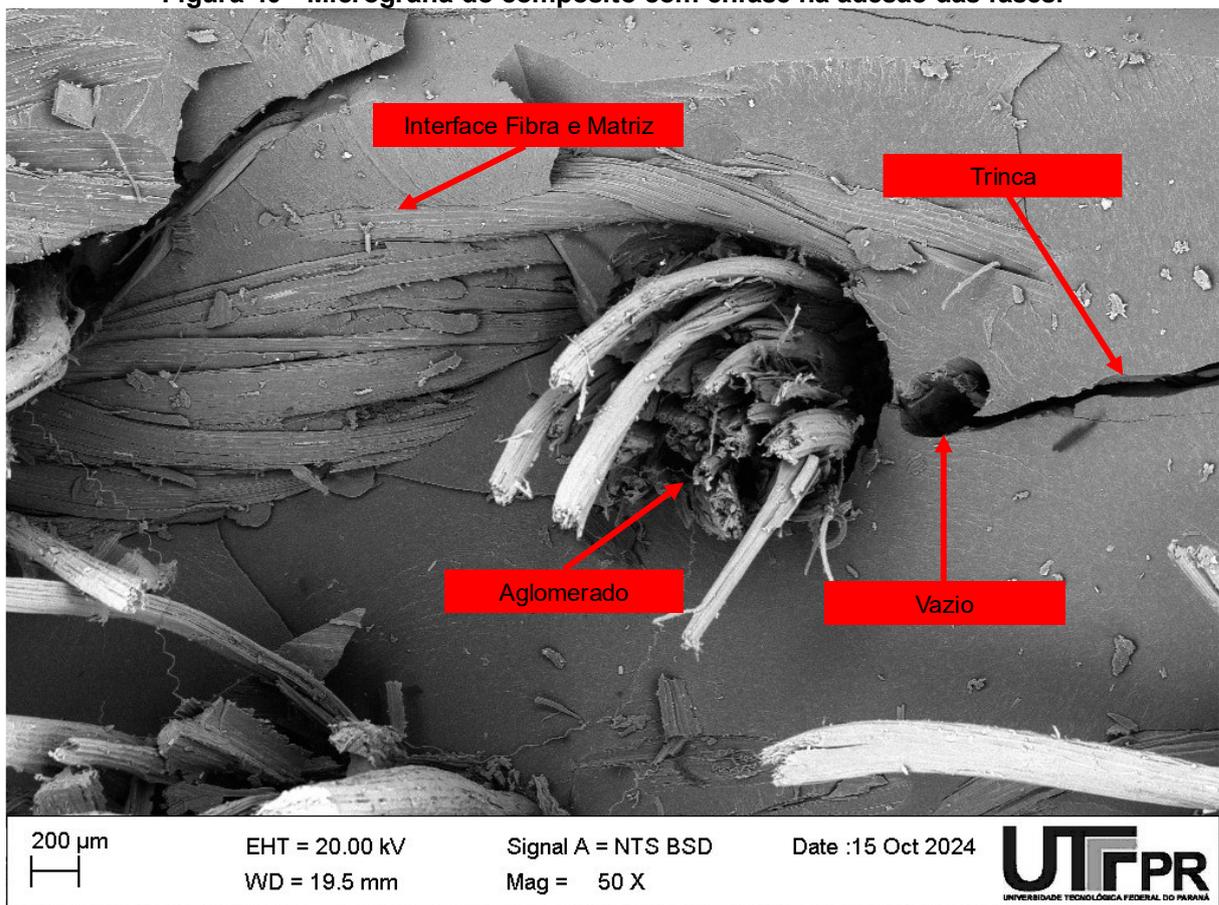
Na Figura 40, é exibida uma região de fratura de um dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração, onde na interface das fases nota-se a ausência de vazios e fendas entre a fibra e matriz, o que denota uma boa adesão. Porém, observa-se uma região de baixa deformação da fibra, que como relatado por Fonseca et al. (2004) é um indício de má adesão entre as fases.

Ainda na Figura 40, em um dos fios alinhados ao carregamento, nota-se um aglomerado de fibras. Para um compósito com tecido bidirecional de sisal em matriz de resina poliéster, Olhan et al. (2023) obtiveram resultados semelhantes e

ressaltaram que essa aglomeração das fibras também é um sinal de baixa adesão entre as fases.

Também é possível ver na Figura 40 uma região de vazio próximo a fibra, de onde se iniciou uma trinca na matriz. O vazio denota uma falha de preenchimento da resina, onde mesmo utilizando o método de infusão à vácuo não foi possível preencher o laminado por completo. Bosquetti et al. (2021) também utilizaram o método de infusão a vácuo para a manufatura de compósitos em fibra de sisal e relataram o mesmo problema.

**Figura 40 - Micrografia do compósito com ênfase na adesão das fases.**

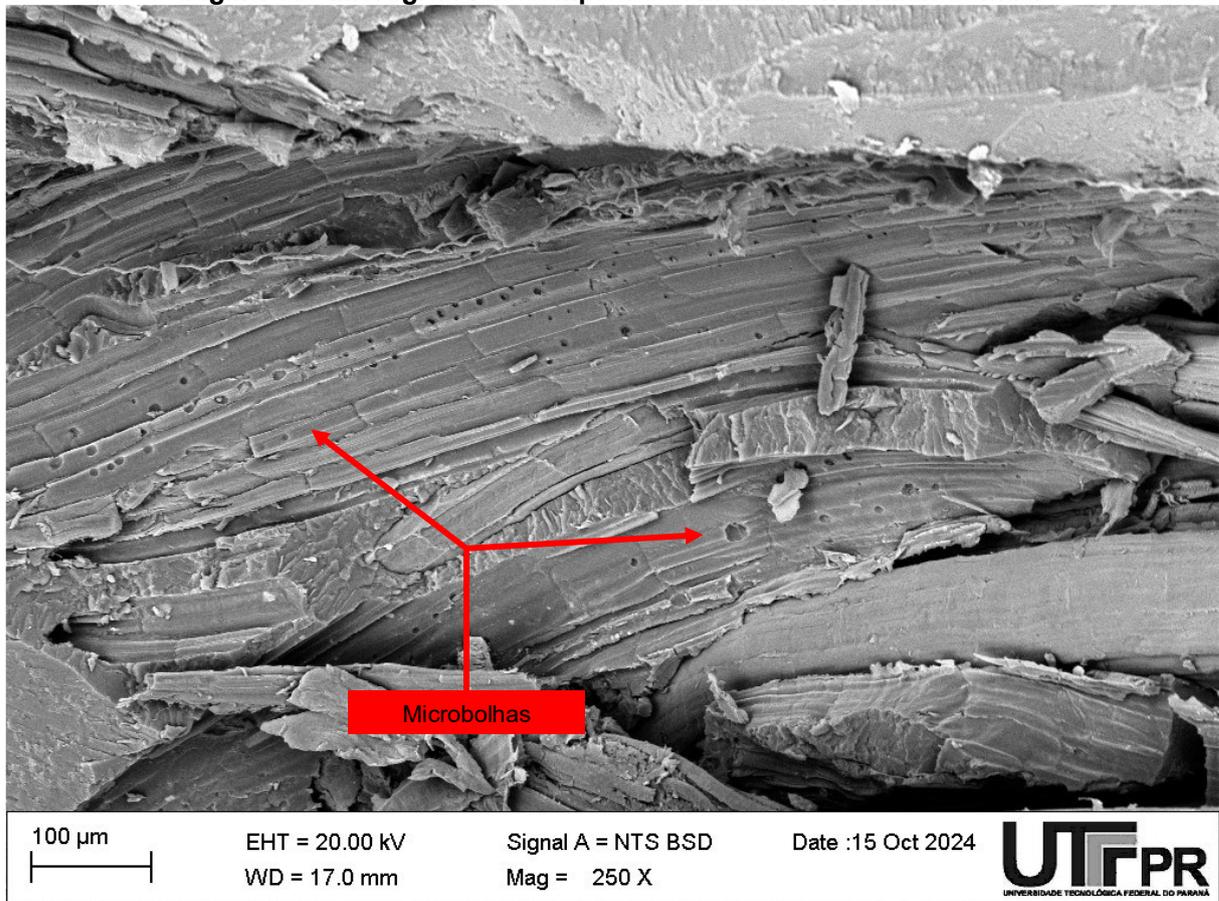


**Fonte: Autoria própria.**

Foi constatado um baixo nível de formação de bolhas e vazios, entretanto em alguns pontos, como indicado na micrografia da Figura 41 é possível visualizar a presença de microbolhas. Protzek et al. (2022) relataram a mesma presença de microbolhas no compósito desenvolvido com fibras da casca do pinhão e resina poliuretana justificando que a presença de umidade nas fibras pode ter causado a

formação de microbolhas. Neste trabalho, apesar das fibras terem passado pelo processo de secagem em estufa, por possuírem uma natureza hidrofílica e terem a tendência de absorver umidade, não se descarta a possibilidade de a umidade também ter causado as microbolhas.

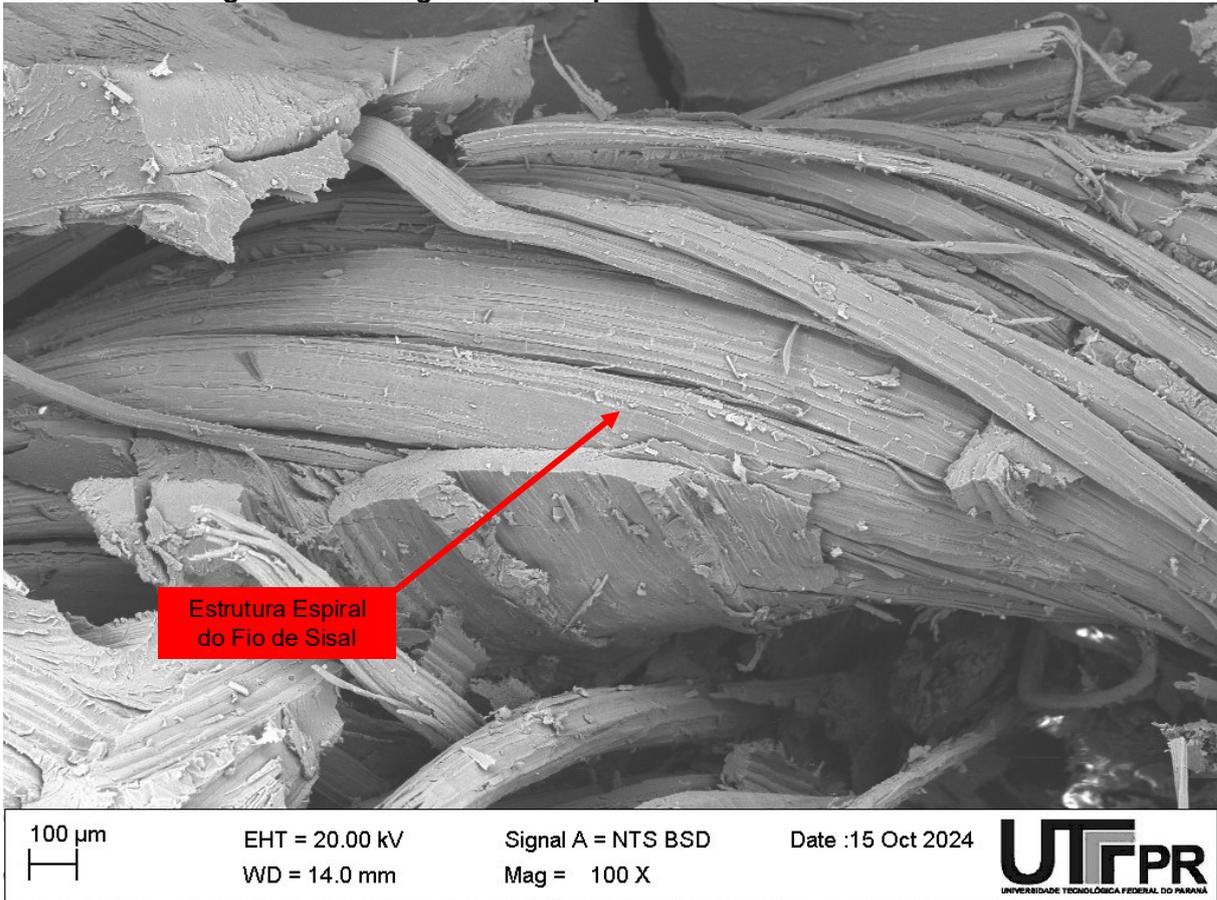
**Figura 41 - Micrografia do compósito com ênfase nas microbolhas.**



**Fonte: Autoria própria.**

Quanto às fibras, na Figura 42 é possível visualizar a formação do fio, composto por diversas fibras de sisal em espiral. Essa característica é apontada na Seção 4.1.3 como um possível fator para os resultados inferiores para resistência máxima em tração dos compósitos quando comparados com aqueles que utilizam fibras unidirecionais.

**Figura 42 - Micrografia do compósito com ênfase no fio de sisal.**



**Fonte: Autoria própria.**

Em geral, as imagens analisadas no MEV confirmam pontos, como falta de adesão das fases e presença de bolhas, que dificultam a correlação dos modelos de micromecânica com o material real.

### **4.3 Análise da Micromecânica**

Considerando os teores de fases obtidos e os devidos materiais constituintes do compósito em estudo, as análises de micromecânica da Regra das Misturas, modelo de Halpin-Tsai resultaram nos valores apresentados na Tabela 8. Para as simulações do RVE, as deformações dos modelos foram obtidas e utilizadas para a resolução das equações apresentadas na Seção 3.3.3. Os resultados também são apresentados na Tabela 8.

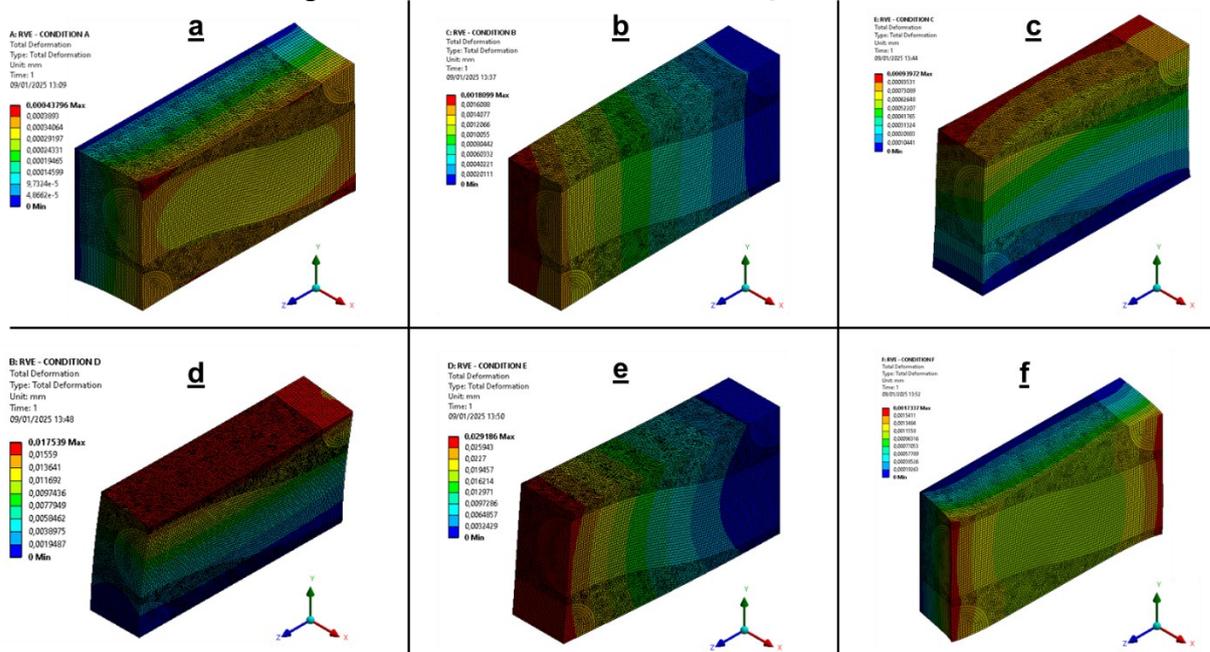
Tabela 8 - Resultados dos modelos de micromecânica.

Propriedades do Material	Regra das Misturas	Halpin-Tsai	Simulação do RVE
$E1$ [GPa]	3,33	3,32	3,58
$E2$ [GPa]	3,33	3,32	3,26
$E3$ [GPa]	3,28	3,31	3,32
$G12$ [GPa]	1,29	1,26	1,22
$G23$ [GPa]	1,29	1,24	1,34
$G13$ [GPa]	1,29	1,26	1,24
$\nu12$	0,27	0,27	0,29
$\nu23$	0,27	0,26	0,27
$\nu13$	0,27	0,27	0,25

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 43 são apresentadas as representações gráficas para os resultados de deslocamento para cada uma das condições de simulação do RVE.

Figura 43 - Deslocamentos das simulações do RVE.



Fonte: Autoria própria.

Considerando os modelos da Regra das Misturas e Halpin-Tsai, nota-se uma boa correlação com os resultados obtidos para o módulo de elasticidade nos ensaios de tração dos corpos de prova orientados em  $90^\circ$ , onde os modelos de micromecânica obtiveram um módulo 3,20% menor.

A simulação do RVE, diferente dos outros modelos de micromecânica utilizados, não considera o elemento volumétrico representativo como transversalmente isotrópico e permite a estimativa dos módulos de elasticidade nas três direções principais. Para o módulo de elasticidade na direção principal 1, equivalente ao módulo de elasticidade obtido nos ensaios de tração dos corpos de prova orientados à  $0^\circ$ , o resultado foi 4,07% maior. Já para o módulo de elasticidade na direção principal 2, que equivale ao módulo de elasticidade obtido nos ensaios de tração dos corpos de prova orientados em  $90^\circ$  o resultado seguiu a mesma tendência dos demais modelos de micromecânica analisados, sendo 5,23% menor.

Em geral, os resultados obtidos pela análise da micromecânica sugerem uma compatibilidade entre os modelos e experimentos. O estudo conduzido por Jagath Narayana e Burela (2019) chegou em uma correlação semelhante, onde um compósito de fibras de sisal em matriz de poliestireno teve suas propriedades analisadas experimentalmente e através de modelos de micromecânica. Os resultados indicaram uma boa correlação para os compósitos com teor volumétrico de fibra variando entre 10% e 30%, uma faixa em que o compósito produzido neste trabalho está próximo.

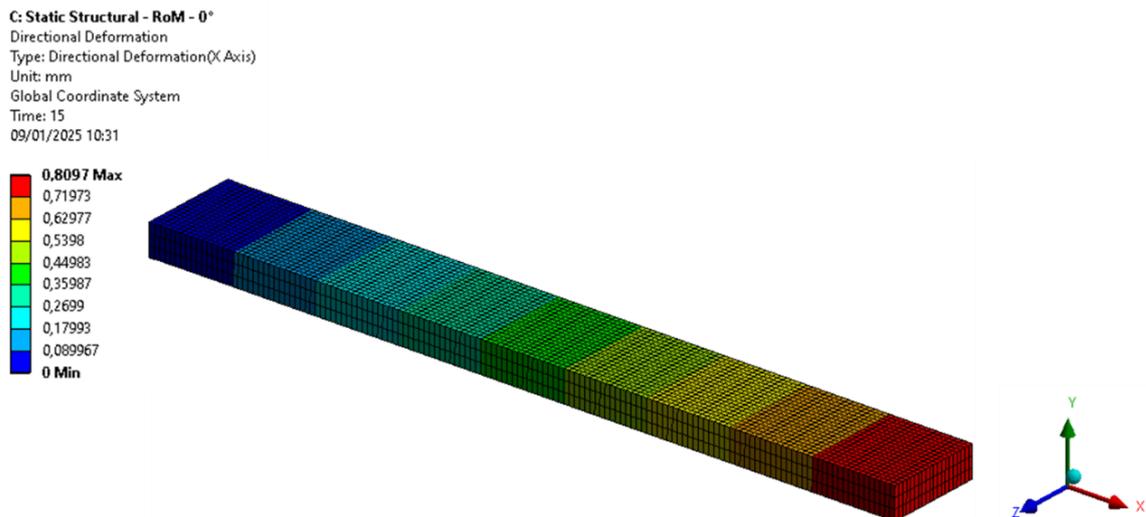
Porém, os resultados experimentais do módulo de elasticidade na direção longitudinal,  $E_1$ , foram inferiores aos valores obtidos pelos modelos avaliados. Rao, Jayaraman e Bhattacharyya (2012) observaram as mesmas características nos resultados obtidos em seu estudo, tendo em média valores 2,7% menores que indicam baixa adesão entre as fases e que, portanto, a capacidade máxima da fibra não está sendo explorada.

Por considerar uma adesão perfeita das fases, é natural que as propriedades obtidas sejam maiores, porém, essa diferença entre os resultados, inclusive, se for quantificada pode ser utilizada como uma medida para avaliar a interação e compatibilidade entre diferentes tipos de fibras e resinas.

#### 4.4 Simulações por Elementos Finitos

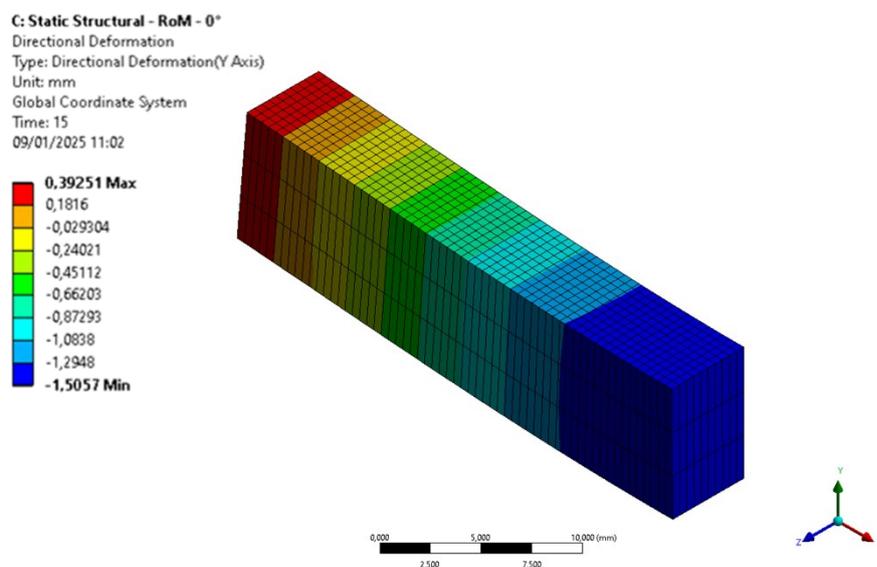
Com o carregamento já estipulado nas condições de contorno, e visando a criação das curvas tensão-deformação, os resultados extraídos das simulações foram as deformações dos corpos de prova. Na Figura 44 e Figura 45 são exibidas as imagens resultantes de simulações realizadas, ilustrando o comportamento padrão do deslocamento dos corpos de prova para os ensaios de tração e flexão.

**Figura 44 - Deslocamento característico das simulações em tração.**



Fonte: Autoria própria.

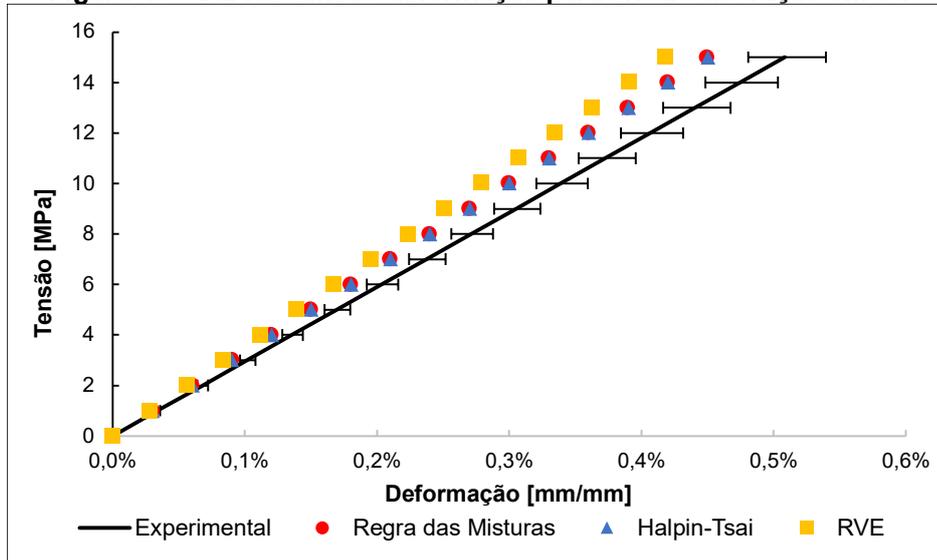
**Figura 45 - Deslocamento característico das simulações em flexão.**



Fonte: Autoria própria.

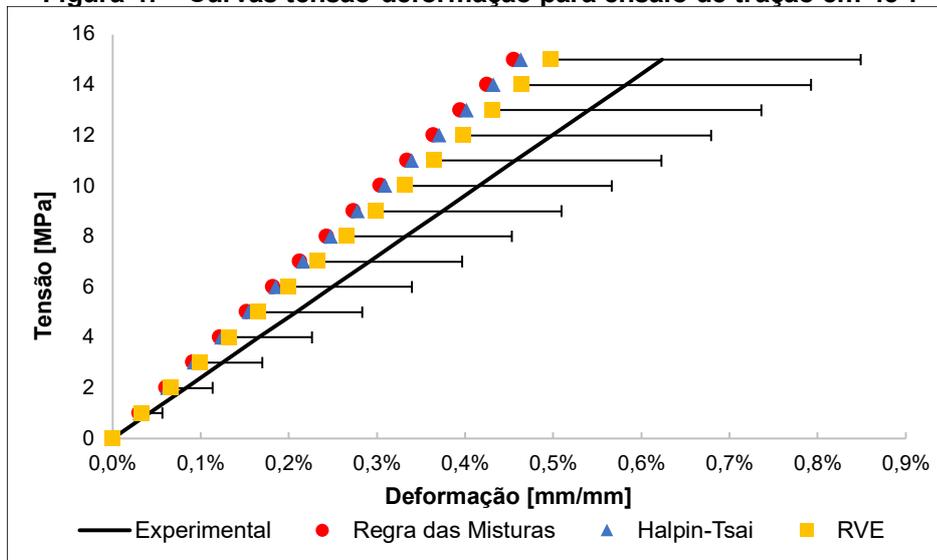
Na Figura 46, Figura 47 e Figura 48 são exibidas as curvas de tensão por deformação, para cada uma das orientações analisadas, para os ensaios de tração realizados através da simulação por elementos finitos descrita na Seção 3.4.1. Os resultados são comparados com a curva obtida experimentalmente nos ensaios de tração para as respectivas orientações.

**Figura 46 - Curvas tensão-deformação para ensaio de tração em 0°.**



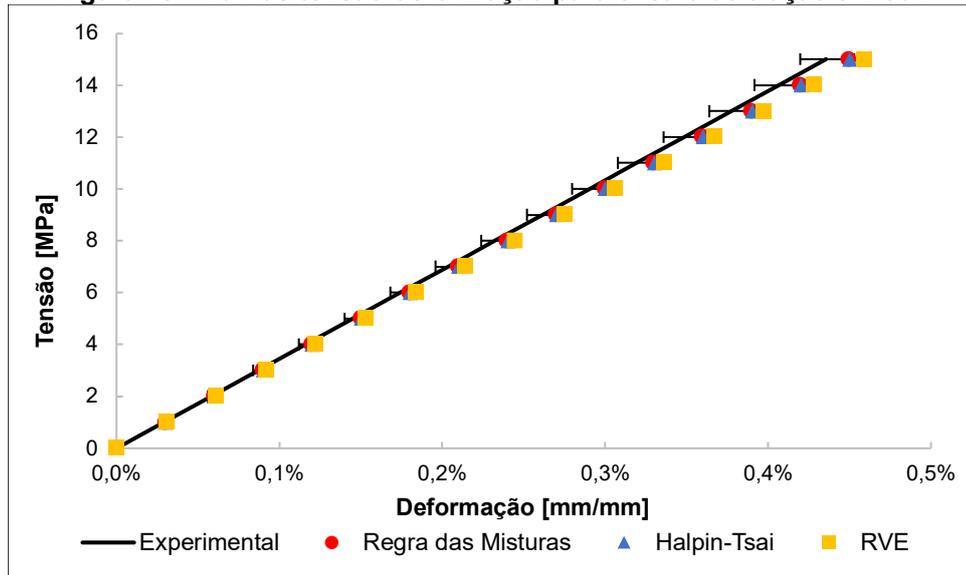
Fonte: Autoria própria.

**Figura 47 - Curvas tensão-deformação para ensaio de tração em 45°.**



Fonte: Autoria própria.

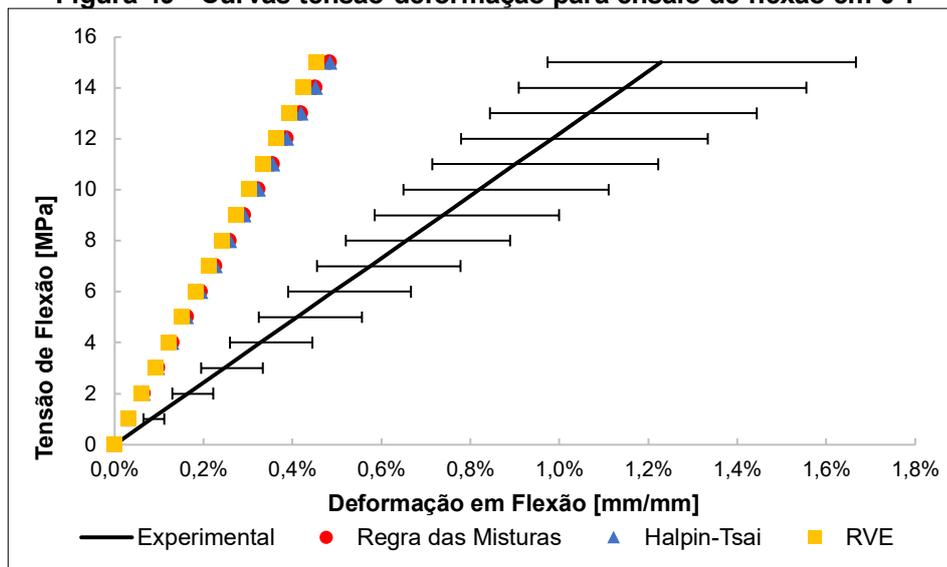
**Figura 48 - Curvas tensão-deformação para ensaio de tração em 90°.**



Fonte: Autoria própria.

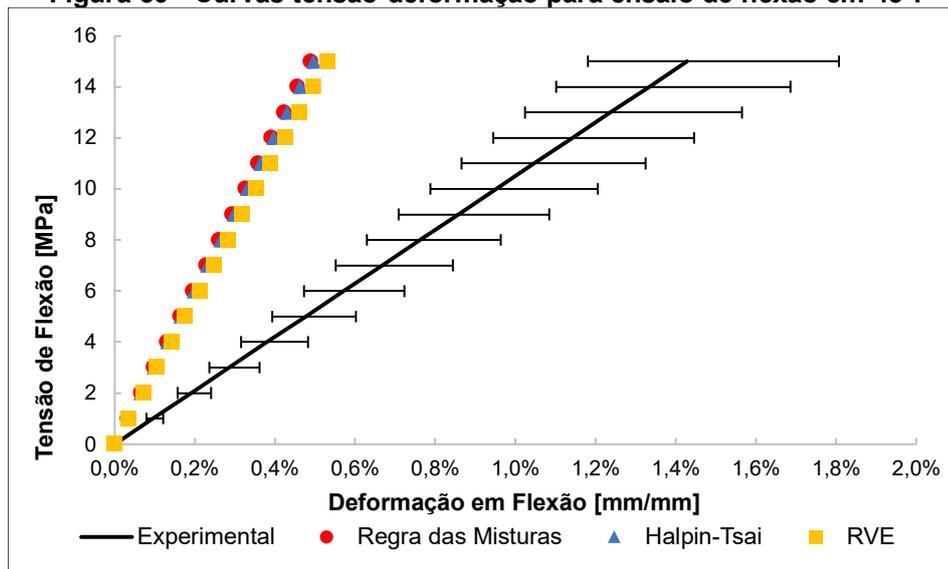
Para as simulações dos ensaios de flexão, as curvas de tensão *versus* deformação são exibidas nas Figura 49, Figura 50 e Figura 51. Para cada uma das orientações analisadas, os resultados são comparados com as respectivas curvas experimentais.

**Figura 49 - Curvas tensão-deformação para ensaio de flexão em 0°.**



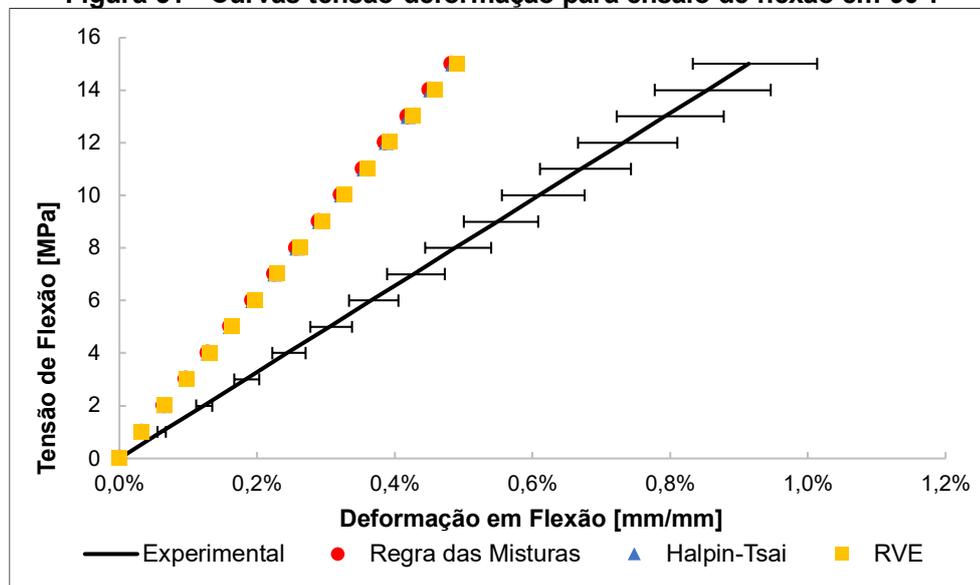
Fonte: Autoria própria.

**Figura 50 - Curvas tensão-deformação para ensaio de flexão em 45°.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 51 - Curvas tensão-deformação para ensaio de flexão em 90°.**



Fonte: Autoria própria.

A análise dos resultados revela uma tendência consistente, na qual os modelos de micromecânica produziram curvas de tensão-deformação mais inclinadas, indicando um material compósito mais rígido. Como observado anteriormente, essa tendência também é refletida nas propriedades do material derivadas obtidas através dos modelos de micromecânica, alinhando-se com os resultados de Jagath Narayana e Burela (2019b) e de Rao, Jayaraman e Bhattacharyya (2012b). Nesses estudos, os

autores sugerem que valores experimentais inferiores podem ser um indicativo de adesão inadequada entre as fases e a possível presença de defeitos.

Outro fator que pode contribuir para a divergência nas simulações utilizando modelos de micromecânica, tanto para os ensaios de tração quanto de flexão, é a falha em considerar irregularidades na superfície das fibras e o descolamento na interface da fase. Como demonstrado por Phani et al. (2021), esses fatores têm um impacto direto nas propriedades elásticas dos compósitos, particularmente no módulo transversal, o qual pode ser superestimado quando os modelos de micromecânica não consideram a perda de rigidez devido a descontinuidades na interface fibra e matriz. Além disso, as irregularidades nas fibras aumentam as tensões interfaciais, influenciando a transferência de carga e a distribuição de tensões no material. Consequentemente, a discrepância entre as previsões teóricas e os resultados experimentais pode ser decorrente da simplificação desses modelos, que desconsideram tais efeitos e resultam em estimativas imprecisas das propriedades do compósito.

Ademais, a variação nos resultados pode ser causada pela falta da consideração da anisotropia das fibras de sisal. Como demonstrado por Zuccarello, Militello e Bongiorno (2023) a anisotropia intrínseca dessas fibras tem um impacto decisivo nas propriedades mecânicas do compósito. Os autores realizaram uma caracterização experimental extensa e determinaram que o módulo de cisalhamento real da fibra, quando avaliado corretamente como anisotrópico, é de apenas 1,84 GPa, valor substancialmente inferior ao módulo de cisalhamento de 12,45 GPa estimado sob suposições isotrópicas. Essa diferença afeta diretamente a rigidez e o comportamento do material sob carregamento transversal. Consequentemente, a suposição isotrópica leva a uma superestimação desses parâmetros, resultando em previsões que não refletem com precisão o desempenho real do laminado, principalmente sob flexão.

Outro fator que pode contribuir para a divergência dos resultados tanto nos ensaios de tração quanto de flexão é que os modelos de micromecânica utilizados não consideram a ondulação das fibras de sisal. Conforme observado por (PRASANTHI et al., 2021), a presença de ondulação nas fibras impacta significativamente as propriedades elásticas do compósito, particularmente os módulos longitudinal e transversal. O estudo mostrou que fibras onduladas apresentam menor rigidez em comparação com fibras retas, sendo esse efeito mais

pronunciado à medida que a fração volumétrica de fibras aumenta. Isso ocorre porque as seções onduladas da fibra não contribuem efetivamente para resistir à carga aplicada, seja na direção longitudinal ou transversal. Portanto, a omissão desse fator nos modelos também pode levar a uma superestimação das propriedades do compósito, contribuindo para as discrepâncias observadas entre as previsões teóricas e os resultados experimentais nos ensaios de tração e flexão.

Os resultados para as deformações em 15 MPa, obtidas nas diferentes condições de simulação, são exibidas na Tabela 9.

**Tabela 9 - Deformação em 15 MPa para ensaios experimentais e simulados.**

Tipo de Ensaio	Orientação	Deformação em 15 MPa						
		Experimental [mm/mm]	Regra das Misturas [mm/mm]	Diferença	Halpin-Tsai [mm/mm]	Diferença	Simulação do RVE [mm/mm]	Diferença
Tração	0°	0,00508	0,00450	-11,4%	0,00450	-11,4%	0,00419	-17,5%
	45°	0,00623	0,00455	-27,0%	0,00463	-25,7%	0,00498	-20,1%
	90°	0,00436	0,00450	3,2%	0,00450	3,2%	0,00459	5,3%
Flexão	0°	0,01239	0,00483	-61,0%	0,00484	-60,9%	0,00454	-63,3%
	45°	0,01428	0,00488	-65,8%	0,00497	-65,2%	0,00531	-62,8%
	90°	0,00915	0,00483	-47,2%	0,00484	-47,1%	0,00492	-46,3%

**Fonte: Autoria própria.**

Para a análise de tração a 90°, foi observada uma ligeira diferença percentual entre os dados experimentais e os três modelos de simulação utilizados. Em média, as simulações previram uma deformação 3,9% maior na carga máxima analisada. Em contraste, para os experimentos de tração a 0° e 45°, as deformações simuladas na carga máxima foram 13,43% e 24,26%, em média, menores do que os valores experimentais, respectivamente.

Os resultados de flexão apresentaram diferenças significativamente maiores, indicando uma fraca correlação entre os modelos de simulação baseados na micromecânica e os dados experimentais. Para os testes a 0°, 45° e 90°, as deformações médias, simuladas na carga máxima, foram 61,7%, 64,6% e 46,9% menores do que os resultados experimentais, respectivamente.

Essas discrepâncias, particularmente nos ensaios de flexão, apoiam a hipótese de que fatores como anisotropia, ondulação das fibras, defeitos e

descolamento entre fibra e matriz desempenham um papel crítico no comportamento mecânico das fibras naturais. Esses fatores devem ser cuidadosamente considerados nos modelos de micromecânica ao estimar as propriedades do material para simulações por elementos finitos.

Após a análise dos resultados deste estudo, é importante mencionar algumas limitações conhecidas que podem ter contribuído para as discrepâncias observadas nos resultados das simulações.

Especialmente nos ensaios de flexão, onde apesar de as condições de contorno nas simulações terem sido definidas para reproduzir fielmente o arranjo experimental real, algumas diferenças ainda permanecem, influenciando nos resultados. Além disso, os modelos de micromecânica utilizados, embora bem estabelecidos, não são capazes de determinar com precisão as propriedades do material, levando a imprecisões nas simulações.

Outro ponto relevante é a possível falta de adesão entre fibra e matriz e a presença de vazios no compósito fabricado, o que pode reduzir o desempenho mecânico e acentuar as diferenças entre os resultados experimentais e os previstos. Esses defeitos são comuns em compósitos de fibras naturais e não são considerados em modelos de micromecânica idealizados.

## 5 CONCLUSÕES

Este estudo investigou o desempenho de um compósito de tecido de sisal produzido por infusão a vácuo, comparando os resultados experimentais de tração e flexão com simulações numéricas baseadas em modelos de micromecânica e análise por elementos finitos.

Os testes experimentais mostraram uma tensão máxima de tração de 30,99 MPa na orientação de 0° e uma tensão máxima de flexão de 55,88 MPa na orientação de 90°, com módulos elásticos variando de 2,41 GPa a 3,44 GPa, dependendo da direção da amostra. As propriedades mecânicas resultantes indicam que o material, juntamente com o método de fabricação por infusão a vácuo, é adequado para aplicações em engenharia, demonstrando bom desempenho mecânico e potencial para ser empregado em condições de baixa demanda mecânica.

Os valores de módulo elástico obtidos através dos modelos de micromecânica da Regra das Misturas, Halpin-Tsai e simulação do elemento volumétrico representativo (RVE) mostraram boa concordância com os dados experimentais, com diferenças de até 5,23%.

No entanto, a comparação entre as curvas de tensão-deformação experimentais e as simulações por elementos finitos, que utilizaram os modelos de micromecânica para definir as propriedades do material, revelaram discrepâncias significativas: para o carregamento de tração, as deformações simuladas foram até 27% menores do que os valores experimentais, e para o carregamento de flexão, as deformações simuladas foram até 65,8% menores. Essas diferenças são em grande parte devido às simplificações nos modelos, que não consideram fatores como a anisotropia das fibras de sisal, a presença de vazios e a adesão deficiente entre fibra e matriz.

Em resumo, os modelos de micromecânica previram propriedades do material próximas aos valores experimentais, mas não foram capazes de replicar com precisão o comportamento mecânico do compósito, particularmente sob condições de carregamento mais complexas, como nas simulações dos ensaios de flexão.

Embora esses modelos e simulações por elementos finitos tenham um grande potencial para o estudo de compósitos reforçados com fibras naturais, o uso de abordagens mais avançadas é necessário para avaliar seu comportamento mecânico de forma precisa. Um nível maior de precisão depende do refinamento dos modelos

para representar melhor características como irregularidades, descontinuidades e anisotropia das fibras. Dessa forma, essas ferramentas podem se tornar extremamente valiosas para o avanço do uso de compósitos naturais em aplicações sustentáveis de engenharia.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros:

- Conduzir um estudo semelhante com distintos tipos de fibras naturais e resinas para avaliar o uso da micromecânica e simulações por elementos finitos em diferente compósitos.
- Avaliar a utilização de sisal em compósitos híbridos, utilizando mais de um tipo de fibra, e como os modelos de micromecânica e simulações deveriam ser ajustados.
- Avaliar o uso da micromecânica como ferramenta para estimar o nível de adesão entre as fases. Correlacionando ensaios experimentais com os valores numéricos e estudando diferentes combinações de fibras naturais e resinas e a adesão entre elas.
- Aplicar aos modelos de micromecânica e simulações dos ensaios em elementos finitos condições de contorno que consideram diferentes níveis de adesão entre as fibras e a matriz, presença de defeitos e anisotropia da fibra.
- Através de simulações por elementos finitos, avaliar a utilização de compósitos utilizando fibras de sisal em distintas aplicações.
- Avaliar a utilização de critérios de falha para materiais compósitos com fibras naturais.
- Utilizar simulações por elementos finitos para estudar o comportamento de compósitos com fibras naturais fora do regime linear e sua falha.
- Caracterização experimental de demais propriedades mecânicas do compósito em fibra de sisal, como módulo de cisalhamento e coeficientes de Poisson.
- Estudo de propriedades em fadiga do compósito de fibras de sisal e implementação em simulações de elementos finitos.
- Aprimorar o uso do tecido do sisal, utilizando fios de menor diâmetro e com menor espaçamento entre as tramas.
- Avaliar o uso de tratamentos superficiais nas fibras de sisal para reduzir a absorção de umidade e melhorar a rugosidade da fibra.

## REFERÊNCIAS

- ABERA BETELIE, A. et al. Mechanical properties of sisal-epoxy composites as functions of fiber-to-epoxy ratio. **AIMS materials science**, v. 6, n. 6, p. 985–996, 2019.
- ABIDIN, N. M. Z. et al. A brief review of computational analysis and experimental models of composite materials for aerospace applications. **Journal of reinforced plastics and composites**, v. 38, n. 23–24, p. 1031–1039, 2019.
- ADENIYI, A. G. et al. Multi-scale finite element analysis of effective elastic property of sisal fiber-reinforced polystyrene composites. **Mechanics of advanced materials and structures**, v. 28, n. 12, p. 1245–1253, 2021.
- AGARWAL, B. D.; BROUTMAN, L. J.; CHANDRASHEKHARA, K. **Analysis and Performance of Fiber Composites**. Third Edit ed. [s.l.] John Wiley & Sons, 2015.
- AHMAD NADZRI, S. N. Z. et al. A review on the kenaf/glass hybrid composites with limitations on mechanical and low velocity impact properties. **Polymers**, v. 12, n. 6, p. 1–13, 2020.
- ALAJMI, A. et al. An Experimental and Numerical Investigation into the Durability of Fibre/Polymer Composites with Synthetic and Natural Fibres. **Polymers**, v. 14, n. 10, p. 2024, 2022.
- APPADURAI, M. et al. Finite element analysis and computational fluid dynamic study of hybrid composites-based offshore wind turbines. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, v. 54, n. 11, p. 1362–1377, 2023.
- APPADURAI, M.; FANTIN IRUDAYA RAJ, E.; LURTHUPUSHPARAJ, T. Sisal fiber-reinforced polymer composite-based small horizontal axis wind turbine suited for urban applications - a numerical study. **Emergent materials (Online)**, v. 5, n. 2, p. 565–578, 2022.
- ARCHANA, D. P. et al. Processing and Properties of Biodegradable Composites to Strengthen Structures. **Journal of the Institution of Engineers (India) Series C**, v. 103, n. 1, p. 39–52, 2022.
- ASTM. D790-17 - Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. **Annual Book of ASTM Standards**, p. 1–12, 2017.
- ASTM. D792-20 - Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. **Changes**, v. 14, p. 1–6, 2020.
- ASTM INTERNATIONAL. Astm D3039/D3039M. **Annual Book of ASTM Standards**, p. 1–13, 2014.
- ATLURI, R. P. V.; RAO, K. M.; GUPTA, A. V. S. S. K. S. Experimental Investigation of Mechanical Properties of Golden Cane Fiber-Reinforced Polyester Composites.

**International journal of polymer analysis & characterization**, v. 18, n. 1, p. 30–39, 2013.

BALASUBRAMANIAN, K.; RAJESWARI, N.; VAIDHEESWARAN, K. Analysis of mechanical properties of natural fiber composites by experimental with FEA. **Materials today: proceedings**, v. 28, p. 1149–1153, 2020.

BENSADOUN, F. et al. Fatigue behavior assessment of flax-epoxy composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 82, p. 253–266, 2016.

BOSQUETTI, M. et al. Analysis of the Mechanical Strength of Polymeric Composites Reinforced with Sisal Fibers. **Journal of natural fibers**, v. 18, n. 1, p. 105–110, 2021.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering - An Introduction**. [s.l.] Wiley, 2018.

CHOUDHARY, S. et al. Advantages and applications of sisal fiber reinforced hybrid polymer composites in automobiles: A literature review. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

DICKER, M. P. M. et al. **Green composites: A review of material attributes and complementary applications**. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing** Elsevier Ltd, 2014.

EMBRAPA. **Sisal**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/sisal>>. Acesso em: 22 abr. 2024.

FARUK, O. et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, 2012.

FISH, J.; BELYTCHKO, T. **A first course in finite elements**. New York: [s.n.]. v. 45

FONSECA, V. M. et al. Evaluation of the mechanical properties of sisal-polyester composites as a function of the polyester matrix formulation. **Journal of applied polymer science**, v. 94, n. 3, p. 1209–1217, 2004.

GAY, D. **Composite Materials: Design and Applications**. Fourth Ed. ed. [s.l.] CRC Press, 2014.

GUPTA, U. S. et al. **Investigation on effects of fiber loading of mechanical properties of banana/sisal hybrid composite**. Elsevier Ltd, 2021.

GURMU, D. N.; LEMU, H. G. Experimental Investigation on Effect of Weight Fraction of Sisal Fiber on Mechanical Properties of Sisal-E-Glass Hybrid Polymer Composites. **Advances in materials science and engineering**, v. 2023, p. 1–12, 2023.

HALPIN, J. C. et al. The Halpin-Tsai Equations: A Review. **Polymer Engineering and Science**, v. 16, n. 5, p. 344–352, 1976.

ISMAIL, S. O.; AKPAN, E.; DHAKAL, H. N. Review of natural plant fibres and their hybrid composites for structural applications: Recent trends and future perspectives. **Composites. Part C, Open access**, v. 9, p. 100322, 2022.

JAGATH NARAYANA, K.; BURELA, R. G. Multi-scale modeling and simulation of natural fiber reinforced composites (Bio-composites). **Journal of physics. Conference series**, v. 1240, n. 1, p. 12103, 2019a.

JAGATH NARAYANA, K.; BURELA, R. G. Multi-scale modeling and simulation of natural fiber reinforced composites (Bio-composites). **Journal of physics. Conference series**, v. 1240, n. 1, p. 12103, 2019b.

JONES, R. M. **Mechanics of Composite Materials**. Second Edi ed. [s.l.] Taylor & Francis, Inc, 1999.

KHAN, M. I.; NAYAK, C. Finite Element Analysis and Performance Comparison of Leaf Spring Based on Unidirectional Sisal Fiber-Reinforced Epoxy Composite Against Woven Fiber-Reinforced Composite. **Fibers and polymers**, v. 24, n. 9, p. 3333–3343, 2023.

NASSEH, J. **Barcos: Métodos Avançados de Construção em Composites**. First Edit ed. Rio de Janeiro: [s.n.].

OLHAN, S. et al. Mechanical, thermal, and viscoelastic behavior of sisal fibre-based structural composites for automotive applications: Experimental and FEM analysis. **Composite Structures**, v. 322, p. 117427, 2023.

PHANI, P. et al. Influence of irregular fibre surface and debonding on the elastic properties of jute/epoxy composites: Micromechanics and finite element approaches. **Composite Interfaces**, v. 31, n. 4, p. 417–439, 2021.

PRASANTHI, P. P. et al. Analysis of Sisal Fiber Waviness Effect on the Elastic Properties of Natural Composites Using Analytical and Experimental Methods. **Journal of natural fibers**, v. 18, n. 11, p. 1675–1688, 2021.

PROTZEK, G. R. et al. On Mechanical Behavior of Pine Nut Shell and Polyurethane Derived from Castor Oil Green Composite. **Journal of Natural Fibers**, v. 19, n. 14, p. 7454–7469, 2022.

RAFIQUZZAMAN, M. et al. Mechanical property evaluation of glass-jute fiber reinforced polymer composites. **Polymers for advanced technologies**, v. 27, n. 10, p. 1308–1316, 2016.

RAJAN, B. M. C. et al. Experimental Investigation and Analysis of Mechanical Properties of Palm fibre reinforced Epoxy composites and Sisal fibre reinforced Polyester composites. **Carbon science and technology**, v. 7, n. 4, p. 1–15, 2015.

RAO, S.; JAYARAMAN, K.; BHATTACHARYYA, D. Micro and macro analysis of sisal fibre composites hollow core sandwich panels. **Composites. Part B, Engineering**, v. 43, n. 7, p. 2738–2745, 2012a.

RAO, S.; JAYARAMAN, K.; BHATTACHARYYA, D. Micro and macro analysis of sisal fibre composites hollow core sandwich panels. **Composites. Part B, Engineering**, v. 43, n. 7, p. 2738–2745, 2012b.

SATHISHKUMAR, G. K. et al. Experimental and Finite Element Analysis of Lignite Fly Ash on the Mechanical Properties of Sisal-added Polymer Matrix Composite Using ANSYS Workbench. **Journal of natural fibers**, v. 19, n. 13, p. 7008–7032, 2022.

SCHULTE, K.; FIEDLER, B. **Structure and Properties of Composite Materials**. 2nd. ed. Hamburg: TuTech Innovation GmbH, 2010.

SERIFI, V. et al. Historical Development of Composite Materials. **Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering.**, v. Volume XXV, n. 3, 2018.

SILVA, R. V. DA. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. [s.l: s.n.].

SILVA, R. V. et al. Thermal, mechanical, and hygroscopic behavior of sisal fiber/polyurethane resin-based composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 29, n. 9, p. 1399–1417, 2010.

SINITSKY, O.; TRABELSI, N.; PRIEL, E. The Mechanical Response of Epoxy-Sisal Composites Considering Fiber Anisotropy: A Computational and Experimental Study. **Fibers**, v. 10, n. 5, p. 43, 2022.

UDAYA KIRAN, C. et al. Tensile Properties of Sun Hemp, Banana and Sisal Fiber Reinforced Polyester Composites. **Journal of reinforced plastics and composites**, v. 26, n. 10, p. 1043–1050, 2007.

VASSILOPOULOS, A. P. The history of fiber-reinforced polymer composite laminate fatigue. **International Journal of Fatigue**, v. 134, n. January, p. 105512, 2020.

WINDYANDARI, A. et al. Bow structure damage analysis for hybrid coir-glass fiber composite fishing boat hull subjected to front collision load. **Curved and layered structures**, v. 9, n. 1, p. 236–257, 2022.

ZUCCARELLO, B.; MILITELLO, C.; BONGIORNO, F. Environmental aging effects on high-performance biocomposites reinforced by sisal fibers. **Polymer Degradation and Stability**, v. 211, p. 110319, 2023.