



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – DEM**  
**CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**  
**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL, ANALÍTICA**  
**E COMPUTACIONAL DE MATERIAL COMPÓSITO**  
**DE MATRIZ POLIMÉRICA E FIBRA DE VIDRO**

**CAETANO BUTTER BEZ**

**JOINVILLE, SC**  
**2019**



**CAETANO BUTTER BEZ**

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL, ANALÍTICA E COMPUTACIONAL DE  
MATERIAL COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA E FIBRA DE VIDRO**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Medeiros

**JOINVILLE, SC**

**2019**



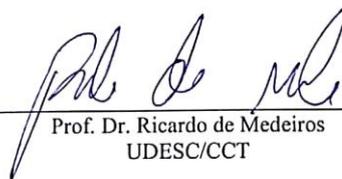
CAETANO BUTTER BEZ

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL, ANALÍTICA E COMPUTACIONAL DE  
MATERIAL COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA E FIBRA DE VIDRO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCC0001) do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Banca Examinadora:**

Orientador:



---

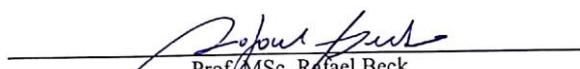
Prof. Dr. Ricardo de Medeiros  
UDESC/CCT

Membros:



---

Prof. Dr. Eduardo Lenz Cardoso  
UDESC/CCT



---

Prof/MSc. Rafael Beck  
UDESC/CCT

Joinville, 04 de julho de 2019



## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer primeiramente aos meus pais, Pedro Luiz e Tânia Regina, por me darem apoio durante a graduação e proporcionarem todo o suporte que precisava.

Agradeço em especial ao Professor Dr. Ricardo de Medeiros pelo total envolvimento com o projeto, desde o fornecimento de literaturas, materiais e laboratórios para ensaios. Agradeço também pela oportunidade de ser meu orientador na Iniciação Científica e apresentar os conceitos de Materiais Compósitos. Agradecimento especial também à Altair por disponibilizar licença para o uso do programa HyperWorks.

Queria também deixar meu obrigado à minha namorada Débora e à amiga Luísa pelas ajudas durante todo o processo.

Aos laboratórios de Tratamento Térmico e Vibrações (UDESC-CCT) e de Caracterização Mecânica (SENAI), pela disposição e auxílio para realizar os ensaios experimentais necessários neste trabalho. Ao suporte financeiro da Fundação de Apoio a Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC (2017TR1747 e 2017TR784).



## RESUMO

O trabalho teve por objetivo a caracterização de materiais compósitos de matriz polimérica de poliéster e reforçados por fibras de vidro. A caracterização consistiu na determinação das propriedades elásticas, sendo o Módulo de Elasticidade Longitudinal, o Módulo de Elasticidade Transversal e o Módulo de Cisalhamento Transversal. Tais propriedades foram determinadas experimentalmente através de ensaio de tração e analiticamente pelos métodos de Regra das Misturas, de Halpin-Tsai, de Spencer e análise pelo Método dos Elementos Finitos. Por fim, fez-se uma análise pelo Método dos Elementos Finitos para comparar os resultados de cada método analítico com os obtidos experimentalmente. Percebeu-se que não ocorreu unanimidade de convergência de resultados em nenhum dos métodos analisados quando comparados aos experimentais, com destaque para a Regra das Misturas na direção longitudinal, Halpin-Tsai na transversal e Spencer no cisalhamento. Quanto às divergências nos demais resultados, pode-se dizer que foram esperadas devido à diversos fatores, como simplificações adotadas e métodos construtivos.

*Palavras-Chave:* Materiais Compósitos, Propriedades Elásticas, Regra das Misturas, Halpin-Tsai, Método dos Elementos Finitos.



## **ABSTRACT**

The objective of the work was to characterize composite materials of polyester matrix and reinforced by glass fibers. The characterization consisted of determining the elastic properties, such as the Modulus of Longitudinal Elasticity, the Modulus of Transverse Elasticity and the Modulus of Transverse Shear. Such properties were determined experimentally by tensile test and analytically by the Halpin-Tsai, Spencer Mixture Rule methods and Finite Element Method analysis. Finally, a Finite Element Method analysis was performed to compare the results of each analytical method with those obtained experimentally. No agreement was found on convergence of results in any of the analyzed methods when compared to the experimental ones, with emphasis on the Rule of the Mixtures in the longitudinal direction, Halpin-Tsai in the transversal and Spencer in the shear. As for the divergences in the other results, it can be said that they were expected due to several factors, such as simplifications adopted and constructive methods.

*Keywords:* Composite Materials, Elastic Properties, Rule of Mixtures, Halpin-Tsai, Finite Elements Method.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1.1</b> – Composição estrutural do Boeing 787.....	20
<b>Figura 2.1</b> – Escala hierárquica de materiais compósitos.....	23
<b>Figura 2.2</b> – Classificação de materiais compósitos.....	24
<b>Figura 2.3</b> – Relação Resistência vs. Densidade. ....	25
<b>Figura 2.4</b> – Representação do elemento infinitesimal carregado externamente. ....	26
<b>Figura 2.5</b> – Estado plano de tensões. ....	29
<b>Figura 2.6</b> – Representação dos planos de simetria.....	31
<b>Figura 2.7</b> – Representação de um laminado carregado longitudinalmente.....	32
<b>Figura 2.8</b> – Representação de molas em série.....	32
<b>Figura 2.9</b> – Representação de um laminado carregado transversalmente.....	33
<b>Figura 2.10</b> – Representação de molas em paralelo. ....	33
<b>Figura 2.11</b> – Representação de um laminado carregado por tensões cisalhantes. ....	34
<b>Figura 2.12</b> – Esquematização da análise desenvolvida.....	35
<b>Figura 2.13</b> – Distribuição das fibras. (a) triangular, (b) quadrática e (c) hexagonal. ....	36
<b>Figura 2.16</b> – Tração longitudinal. ....	37
<b>Figura 2.17</b> – Representação tração transversal. ....	38
<b>Figura 2.18</b> – Representação deformação angular. ....	38
<b>Figura 2.19</b> – Nós e elementos. ....	39
<b>Figura 2.20</b> – Exemplo de elementos triangulares. ....	40
<b>Figura 3.1</b> – Fluxograma representando a metodologia. ....	45
<b>Figura 3.2</b> – Componentes utilizados no processo: (a) Plástico de vedação, (b) <i>Flow Mesh</i> , (c) <i>Peel Ply</i> , (d) Mangueiras, (e) Válvula, (f) Fita de vedação, (g) Gerador de vácuo e (h) Bomba. ....	46
<b>Figura 3.3</b> – Processo de laminação. ....	47
<b>Figura 3.4</b> – Acoplamento do gerador de vácuo e bomba com o aparato. ....	47
<b>Figura 3.5</b> – Representação do processo. ....	48
<b>Figura 3.6</b> – Máquina de corte CLIPPER.....	49
<b>Figura 3.7</b> – Representação dos corpos de prova. ....	49
<b>Figura 3.8</b> – Máquina de ensaios INSTRON. ....	50
<b>Figura 3.9</b> – Calibração da máquina.....	51

<b>Figura 3.10</b> – Forno JUNG. ....	52
<b>Figura 3.11</b> – Disposição dos CDPs. ....	52
<b>Figura 3.12</b> – Balança de ultra-precisão. ....	53
<b>Figura 3.13</b> – Exemplo da malha utilizada. ....	55
<b>Figura 3.14</b> – Aplicação das condições de contorno.....	56
<b>Figura 4.1</b> – Tensão (MPa) vs. Deformação (%) ensaio corpos-de-prova à 0°. ....	57
<b>Figura 4.2</b> – Tensão (MPa) vs. Deformação (%) ensaio corpos-de-prova à ±45°. ....	58
<b>Figura 4.3</b> – Tensão (MPa) vs. Deformação (%) ensaio corpos-de-prova à 90°. ....	58
<b>Figura 7.1</b> – Definição do material. ....	77

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b> – Dimensões médias baseadas na norma ASTM D3039.....	48
<b>Tabela 3.2</b> – Dimensões médias baseadas na norma ASTM D3518.....	48
<b>Tabela 4.1</b> – Propriedades obtidas experimentalmente. ....	59
<b>Tabela 4.2</b> – Dados coletados de massa e determinação de volume dos compósitos.....	61
<b>Tabela 4.3</b> – Valores médios obtidos de massa e volume. ....	61
<b>Tabela 4.4</b> – Valores médios de volume e fração volumétrica de fibras.....	62
<b>Tabela 4.5</b> – Valores médios de volume e fração volumétrica de matriz.....	62
<b>Tabela 4.6</b> – Valores médios de fração volumétrica de vazios.....	62
<b>Tabela 4.7</b> – Propriedades obtidas aplicando a Regra das Misturas.....	63
<b>Tabela 4.8</b> – Comparação com os dados experimentais. ....	63
<b>Tabela 4.9</b> – Propriedades obtidas pela aplicação de Halpin-Tsai. ....	65
<b>Tabela 4.10</b> – Comparação com os dados experimentais. ....	65
<b>Tabela 4.11</b> – Propriedades obtidas pela aplicação de Spencer.....	67
<b>Tabela 4.12</b> – Comparação com os dados experimentais. ....	68
<b>Tabela 4.13</b> – Comparação entre os métodos. ....	68



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1	MOTIVAÇÃO .....	20
1.2	OBJETIVOS .....	21
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>23</b>
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS .....	23
2.1.1	MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA.....	24
2.1.2	RELAÇÕES CONSTITUTIVAS EM COMPÓSITOS.....	26
2.2	ANÁLISE MICROMECAÂNICA .....	30
2.2.1	REGRA DAS MISTURAS.....	30
2.2.2	HALPIN-TSAI .....	34
2.2.3	SPENCER.....	35
2.3	ENSAIO MECÂNICO.....	37
2.4	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	39
2.5	FRAÇÕES MÁSSICAS E VOLUMÉTRICAS .....	43
2.6	TESTE DE QUEIMA .....	43
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA CIENTÍFICA.....</b>	<b>45</b>
3.1	FABRICAÇÃO.....	45
3.2	ENSAIO MECÂNICO.....	50
3.3	TESTE DE QUEIMA .....	51
3.4	FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS .....	53
3.5	MÉTODO NUMÉRICO .....	54
3.5.1	METODOLOGIA.....	55
<b>4</b>	<b>APLICAÇÕES E POTENCIALIDADES DA METODOLOGIA .....</b>	<b>57</b>
4.1	ENSAIO MECÂNICO.....	57
4.2	TESTE DE QUEIMA .....	60
4.3	FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS .....	61
4.4	MÉTODOS ANALÍTICOS .....	63
4.4.1	REGRA DAS MISTURAS.....	63

4.4.2	HALPIN-TSAI.....	65
4.4.3	SPENCER .....	67
4.5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....	68
4.5.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	69
5	CONCLUSÕES .....	73
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75
7	ANEXOS .....	77
7.1	Análise Computacional Hyperworks.....	77

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por materiais que apresentem características específicas para determinadas aplicações é algo recorrente em diversos setores industriais. O desenvolvimento de certos produtos requer do material, baixa ou alta, densidade, rigidez, resistência mecânica e entre outras propriedades, além da redução de custos, o que é alvo de incessante busca em todas as empresas.

Uma das grandes descobertas de novos materiais foram os plásticos. Sua baixa densidade fez com que se tornassem altamente aplicáveis na fabricação de embalagens, o que reduziu significativamente os custos com o transporte. Outro grande avanço foi o desenvolvimento da borracha, presente atualmente em diversos produtos como na porta de refrigeradores, tubos e mangueiras, absorvedores de choques e de correias de transmissão de movimento. Apesar da alta aplicabilidade de plásticos e borrachas, sozinhos não apresentam certas propriedades mecânicas exigidas em aplicações mais complexas, como em aeronaves e automóveis. Assim, fez-se necessário o desenvolvimento de materiais que pudessem combinar características diferentes, projetados para que apresentassem propriedades específicas, sendo o passo inicial da descoberta dos materiais compósitos (LERGADERE, 2017).

Os compósitos são materiais compostos de dois ou mais materiais diferentes que combinados apresentam a melhoria de certas propriedades nas mais diversas aplicações. Um dos exemplos mais famosos do uso de materiais compósitos é o do Kevlar, que é um composto de fibras de aramida utilizado na fabricação de coletes à prova de balas devido à alta resistência a impactos. Os setores aeronáutico e automotivo sofreram uma mudança positiva com o desenvolvimento dos compósitos, em que se cita o Boeing 787, que apresenta 50% de sua composição em materiais compósitos, e o carro elétrico da BMW, que é o primeiro automóvel produzido inteiramente por materiais compósitos.

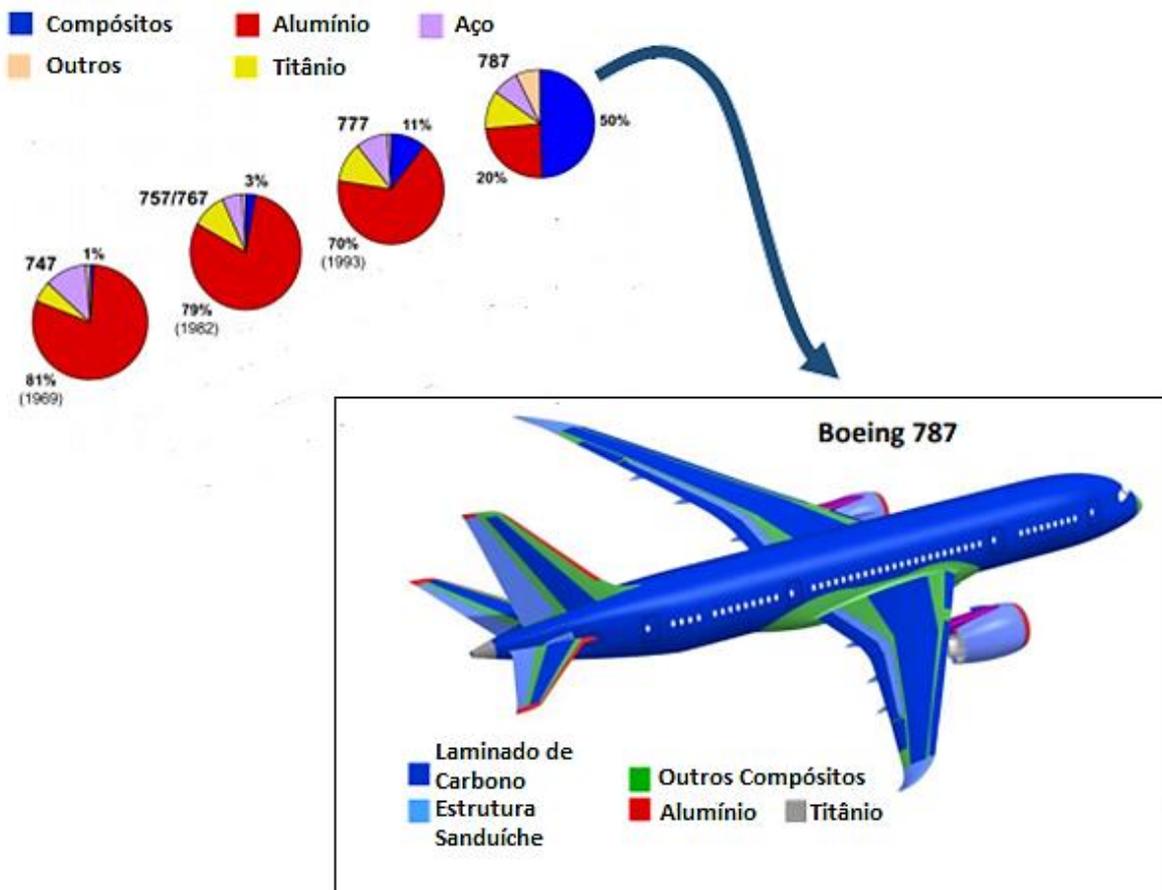
Assim, visto a ampla aplicação de compósitos, constantemente são analisadas novas composições de materiais em busca de propriedades específicas e redução de custos. A preocupação com impactos ambientais também se tornou uma das principais causas no desenvolvimento de materiais compósitos, sendo frequentemente avaliadas combinações de matrizes e fibras naturais.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A aplicação de materiais compósitos é muito abrangente, sendo utilizado em diversos setores da indústria, desde o segmento esportivo como na fabricação de raquetes de tênis com o aerogel, às indústrias aeronáutica e aeroespacial.

Segundo Rezende (2000), a crescente utilização de materiais compósitos no setor aeronáutico é proveniente da obtenção de elevados valores de resistência mecânica e de rigidez, sendo comparados a materiais metálicos, e a obtenção da redução de 20% a 30% do peso total da estrutura e de 25% do preço final. Segundo Tita (2006), ao longo do tempo, diversos projetos do setor aeronáutico foram desenvolvidos com base nas propriedades desses materiais, em que é possível citar as aeronaves do segmento militar, F-111, Vought A-7, F-18 e F-22; e no segmento civil, Lockheed L-1011, Rutan Voyager, Boeing 777, Airbus 380 e Boeing 787 (c.f. Figura 1.1).

**Figura 1.1** – Composição estrutural do Boeing 787.



Devido a essa gama de aplicação de materiais compósitos, o estudo e a busca de novas composições é muito importante para o desenvolvimento tecnológico e econômico dos diversos setores da indústria. Assim, a realização do presente trabalho visa a obtenção das propriedades de tais materiais vem de encontro com as demandas mais atuais de diferentes ramos da indústria.

De acordo com Almeida e Cândido (2000), para um desenvolvimento ser bem-sucedido, é necessário que o elevado padrão da qualidade do produto esteja em equilíbrio com a eficácia e a redução de custo do método de fabricação. Dessa maneira, o estudo em materiais compósitos está cada vez mais avançado para atender essa diversidade de áreas de aplicações, tanto na busca por novos constituintes quanto o aperfeiçoamento e a inovação em processos de fabricação.

## 1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo a comparação das propriedades efetivas de materiais compósitos poliméricos via determinação analítica e experimental, bem como a verificação do comportamento mecânico elástico linear, através de simulações computacionais. Sendo estes materiais constituídos por fibra de vidro e resina poliéster. Pode-se acrescentar, como objetivos específicos:

- Determinar das propriedades efetivas através dos Métodos Analíticos da Regra das Misturas, Halpin-Tsai e Spencer;
- Determinar das propriedades efetivas através de ensaios experimentais, seguindo as normas ASTM D2584, ASTM D3039 e ASTM D3518;
- Comparar as propriedades efetivas obtidas através dos métodos analíticos com os resultados experimentais;
- Avaliar as propriedades efetivas determinadas via Métodos Analíticos de Halpin-Tsai, Spencer e Regra das Misturas.
- Avaliar o gráfico tensão versus deformação via modelo computacional com os resultados experimentais.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho é planejada de tal forma que o leitor possa ser habituado aos conceitos matemáticos necessários para o entendimento da metodologia proposta. Assim, o trabalho é estruturado da seguinte forma:

- ☑ **Primeiro Capítulo** – consiste em apresentar ao leitor o que será abordado durante o trabalho e a sua finalidade.
- ☑ **Segundo Capítulo** – apresenta a abordagem teórica em que o presente trabalho foi desenvolvido, contendo o conceito de materiais compósitos, aplicações, compósitos de matriz polimérica, análise micromecânica e avaliação das frações mássicas e volumétricas de cada constituinte.
- ☑ **Terceiro Capítulo** – apresenta a metodologia utilizada nos ensaios e as equações para obter os resultados. A fabricação dos corpos-de-prova (CDPs), ensaio mecânico, teste de queima e obtenção das frações volumétricas.
- ☑ **Quarto Capítulo** – aborda sobre os resultados obtidos pela aplicação de cada método, além da discussão e comparação dos valores das propriedades determinadas para cada um.
- ☑ **Quinto Capítulo** – apresenta a conclusão de todo o trabalho e aborda sobre trabalhos futuros.

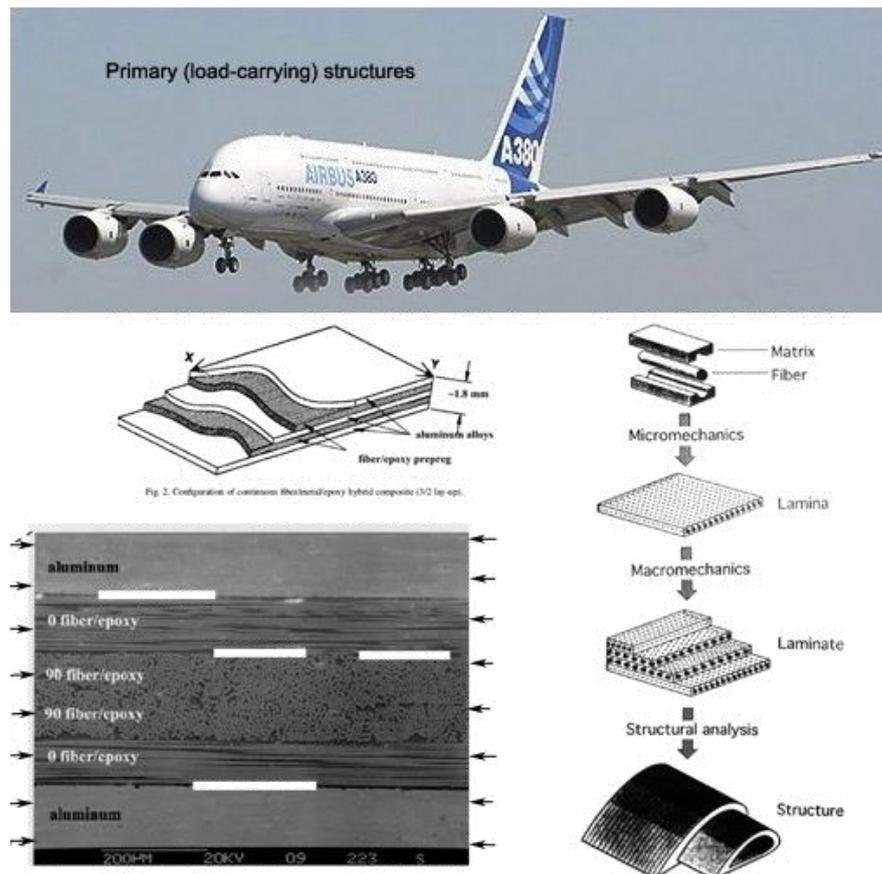
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Segundo Callister e Rethwisch (2012), um compósito é um material multifásico, composto por duas ou mais fases, que apresenta uma combinação de propriedades que possibilitam melhor desempenho do material comparado a utilização de cada fase individualmente.

Os materiais constituintes do compósito são classificados como aglomerante, fase contínua ou matriz, como reforço ou fase dispersa, e ainda alguns autores consideram uma terceira classificação como sendo a interface matriz/reforço (TITA, 2006). Ao se aplicar uma carga sobre o compósito o carregamento é transmitido do aglomerante para o reforço, que deve suportá-lo. A Figura 2.1 ilustra cada uma das fases de um material compósito.

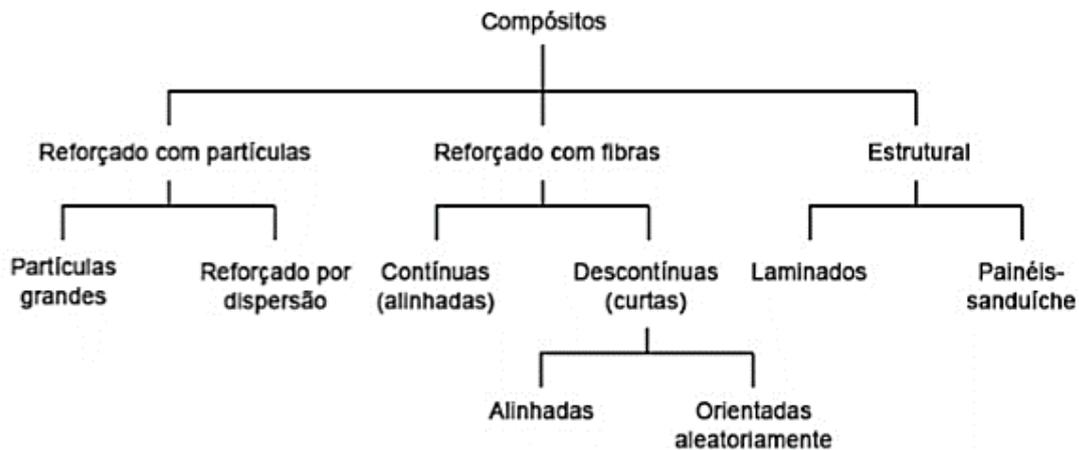
**Figura 2.1** – Escala hierárquica de materiais compósitos.



Fonte: Winiarski (2007).

Segundo Callister e Rethwisch (2012), os reforços podem ser encontrados na forma de fibras ou partículas (Figura 2.2). Quando em forma de partículas, os reforços podem ser orientados aleatoriamente ou preferencialmente. Quanto aos reforços por fibras, estes podem ser dispostos em camada única ou em multicamadas. Ao se utilizar de camada única, as fibras podem se apresentar de forma contínua ou dispersa, sendo a forma contínua encontrada geralmente em forma de fio produzindo um reforço unidirecional, e a forma descontínua em forma de tecidos ortogonais, reforço bidirecional. Ao optar por multicamadas, as camadas podem ser empilhadas com as fibras orientadas aleatoriamente, constituindo um laminado, e pode se utilizar de diferentes materiais, laminados híbridos.

**Figura 2.2** – Classificação de materiais compósitos.



Fonte: Callister e Rethwisch (2012).

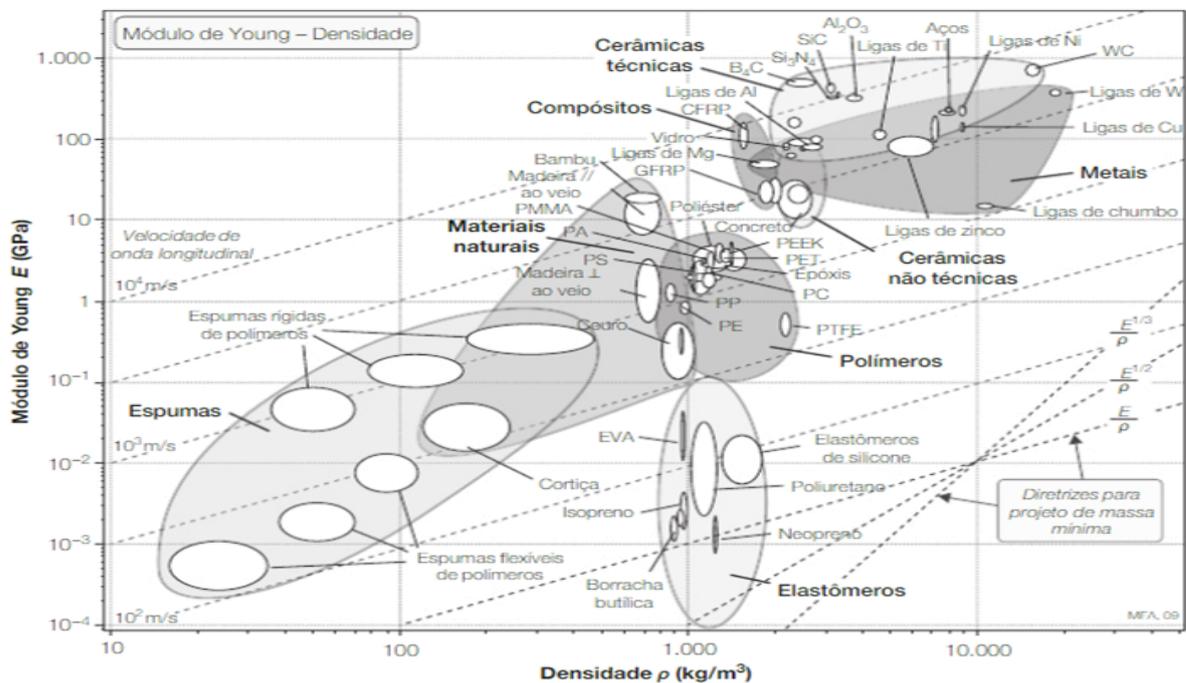
Os constituintes dos materiais compósitos podem ser de origem metálica, cerâmica e polimérica, sendo no presente trabalho apresentar-se-á um enfoque em reforços, de fibra de vidro, e matriz polimérica em resina poliéster.

### 2.1.1 MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

Os compósitos poliméricos reforçados, também conhecidos como CPR, são compostos por um reforço, como fibras de vidro e carbono, e matriz polimérica, como resinas epóxi e poliéster. Essa composição é aceita a partir da hipótese de que não ocorreram erros na fabricação, caso contrário deve ser considerado a presença de vazios.

O estudo e o desenvolvimento nesse tipo de compósito vêm crescendo ao longo do tempo devido a relação Resistência vs. Densidade, em que o desempenho nessa relação é maior quando comparado a materiais metálicos. Um compósito constituído de 70% em volume de resina epóxi e em 30% de fibra de carbono apresenta rigidez muito próxima ao do alumínio, ou quando se compara um CPR com 60% em volume de fibra de carbono e 40% em resina epóxi com aço (TITA, 2006). A Figura 2.3 representa a relação de Resistência vs. Densidade.

**Figura 2.3** – Relação Resistência vs. Densidade.



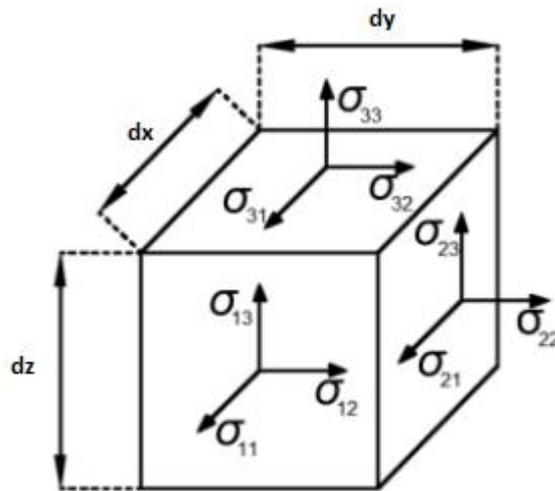
Fonte: Ashby (2012).

A Figura 2.3 permite avaliar que a resistência de compósitos e metais é muito próxima, sendo os metais mais densos, o que faz a utilização do CPR viável em aplicações de alta resistência e baixo peso. Os CPRs apresentam também excelente desempenho quando solicitado por cargas dinâmicas. Segundo Tita *et al.* (2001), o bom desempenho pode ser obtido através do empilhamento das lâminas numa sequência adequada a fim de obter um laminado com frequências naturais distantes da frequência de excitação oriunda das cargas, o que evita problemas estruturais causados por vibrações indesejáveis causadas por ressonância.

### 2.1.2 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS EM COMPÓSITOS

Segundo Jones (1999), a análise das relações constitutivas está embasada na Teoria Clássica de Laminados, que tem por base a Teoria da Elasticidade. Assim, supondo um elemento infinitesimal sólido sendo carregado externamente, este elemento irá produzir tensões internas para que fique em equilíbrio com as externas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

**Figura 2.4** – Representação do elemento infinitesimal carregado externamente.



Fonte: Adaptado de Mascia (2006).

Sendo os valores 1, 2 e 3 representando as direções x, y e z, respectivamente.

Como resultado, surgem tensões e deformações representados pelos tensores de 9 componentes,

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yx}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{zx}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \varepsilon_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

sendo  $\sigma$  a tensão normal,  $\tau$  a tensão cisalhante,  $\varepsilon$  a deformação linear e  $\gamma$  a deformação angular. Devido as equações de equilíbrio para o tensor tensão e à simetria para o tensor deformação, os tensores resumem-se à 6 componentes.

Segundo Tita (2006), as relações constitutivas relacionam tensão e deformação, sendo em materiais anisótropos aplicado a Lei de Hooke na forma indicial,

$$[\sigma_i] = [D_{ij}] \cdot [\varepsilon_j], \quad (3)$$

sendo i e j numerados de 1 a 9.

A relação da Eq. (3), junto as simplificações dos tensores de tensão e deformação que reduzem de 9 para 6 componentes, pode ser representada na forma matricial,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

A matriz D, de 36 componentes, devido à simetria dos planos, resume-se à 21 componentes. Segundo Jones (1999), ao aplicar carregamento externo em compósitos não ocorre o acoplamento entre tensão normal e deformação angular, tensão cisalhante e deformação linear, o que faz com que a matriz D seja reduzida à

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & 0 & 0 & 0 \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

A inversa da matriz D, matriz C, representa a flexibilidade de compósitos,

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Sendo,

$$C_{ii} = \frac{1}{E_{ci}}, \quad (7)$$

$$C_{ij} = -\frac{\nu_{ij}}{E_{ii}}, \quad (8)$$

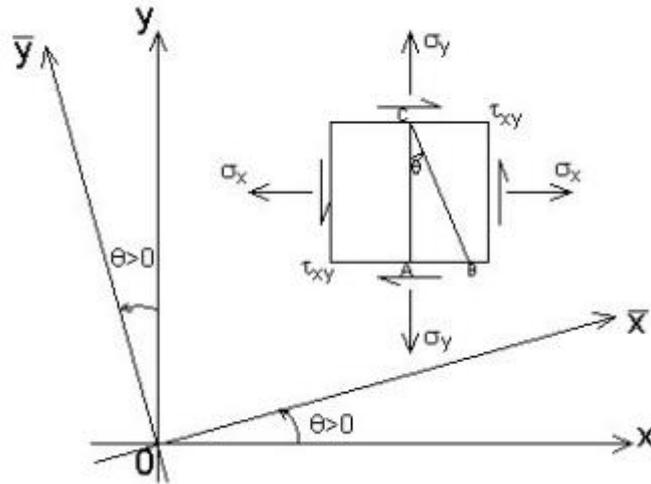
onde  $E_c$  é a propriedade do compósito e  $\nu$  o Coeficiente de Poisson.

Outra maneira de se representar a matriz D é através da matriz Q, utilizada para representar a rigidez de materiais compósitos,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Se o laminado em análise for considerado fino, as tensões e deformações na direção Z são desprezadas, assim as análises de tensão e deformação podem ser avaliadas através do estado plano de tensões presente na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

**Figura 2.5** – Estado plano de tensões.



Fonte: Silva, Telles e Santiago (2018).

Como resultado da consideração de laminados finos, obtém-se a matriz de rigidez reduzida no sistema local,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Sendo os componentes da matriz de rigidez global representados por,

$$Q_{11} = \frac{E_{11}^2}{E_{11} - \nu_{12}^2 \cdot E_{22}}, \quad (11)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12} \cdot E_{11} \cdot E_{22}}{E_{11} - \nu_{12}^2 \cdot E_{22}}, \quad (12)$$

$$Q_{12} = Q_{21}, \quad (13)$$

$$Q_{22} = \frac{E_{11} \cdot E_{22}}{E_{11} - \nu_{12}^2 \cdot E_{22}}, \quad (14)$$

$$Q_{66} = G_{12}, \quad (15)$$

onde  $E_{11}$  o Módulo de Elasticidade Longitudinal,  $E_{22}$  o Módulo de Elasticidade Transversal,  $G_{12}$  o Módulo de Cisalhamento Transversal e  $\nu_{12}$  o Coeficiente de Poisson.

Ao considerar o laminado fino e de orientação angular variável, **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, é aplicada a matriz de transformação de coordenadas T,

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2.m.n \\ n^2 & m^2 & -2.m.n \\ -m.n & m.n & (m^2 - n^2) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$m = \cos(\theta), \quad (17)$$

$$n = \sin(\theta). \quad (18)$$

E, por fim, é obtida a matriz de rigidez reduzida no sistema global através de,

$$[\bar{Q}] = [T^{-1}] \cdot \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot [T]. \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Determinada a matriz de rigidez no sistema global de coordenadas e seus componentes, faz-se possível avaliar quais as propriedades elásticas a serem determinadas,  $E_{11}$ ,  $E_{22}$ ,  $G_{12}$  e  $\nu_{12}$ .

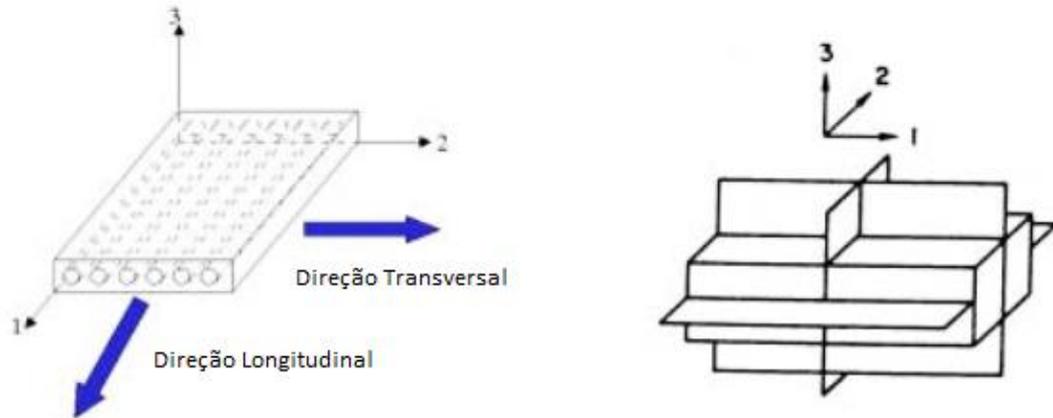
## 2.2 ANÁLISE MICROMECAÂNICA

A análise micromecânica está relacionada à determinação das propriedades elásticas do laminado, que podem ser obtidas através de ensaios mecânicos, como o ensaio de tração, e por métodos analíticos, como por exemplo: Regra das Misturas, Halpin-Tsai e Spencer.

### 2.2.1 REGRA DAS MISTURAS

Segundo Tita (2006), os CPRs apresentam propriedades elásticas e de resistência mecânica dependentes dos seus constituintes e das condições de fabricação. Os CPR são constituídos por várias camadas, orientadas preferencialmente na mesma direção, chamada de direção longitudinal, e apresentam três planos de simetria ortotrópicos entre si. A Figura 2.6 apresenta os três planos de simetria em compósitos.

**Figura 2.6** – Representação dos planos de simetria.



Fonte: Adaptado de Tita (2006).

Definidos os planos e as frações mássicas e volumétricas de reforço e matriz, calcula-se as propriedades pela Regra das Misturas. A principal função da Regra das Misturas está na obtenção das propriedades mecânicas dos CPR, com ênfase em laminados, e para isso são assumidas algumas hipóteses:

- A lâmina é linear elástica e não possui tensões internas e térmicas;
- As fibras são uniformes, homogêneas, de mesmo diâmetro, contínuas, paralelas e regularmente espaçadas;
- A matriz é homogênea, isótropa e apresenta comportamento linear elástico;
- Há uma perfeita ligação entre fibras e matriz bem como ausência de vazios;
- A interface é infinitamente fina, podendo ser desconsiderada nos cálculos.

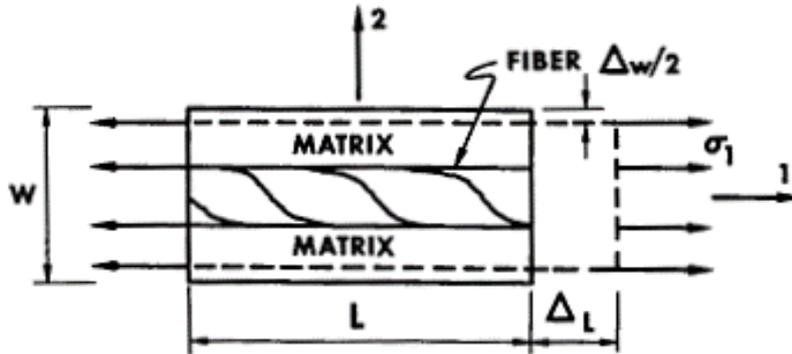
Devido às hipóteses adotadas, os valores de algumas propriedades podem apresentar uma elevada diferença relativa comparadas aos ensaios mecânicos. Conhecidos os planos de simetria, é possível determinar os Módulos de Elasticidade Longitudinal, Elasticidade Transversal, de Cisalhamento, além do Coeficiente de Poisson nas direções 1-2, 1-3 e 2-3. Porém, as lâminas unidirecionais também são consideradas transversalmente isótropas, assim  $E_{22} = E_{33}$ ,  $G_{12} = G_{13}$  e  $\nu_{12} = \nu_{13}$ , e por se tratar de laminados finos, são desprezadas as propriedades na direção 3.

Segundo Jones (1999), o Módulo de Elasticidade Longitudinal é obtido relacionando-se os Módulos de matriz e fibras, e suas respectivas frações volumétricas, podendo ser relacionado à molas em série, Figura 2.7 e Figura 2.8, assim as propriedades são determinadas por

$$E_c = E_m \cdot v_m + E_f \cdot v_f, \quad (17)$$

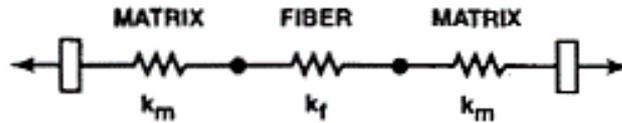
sendo  $E_c$  o Módulo de Elasticidade Longitudinal do compósito,  $E_m$  e  $E_f$  os de matriz e fibras e  $v_m$  e  $v_f$  as frações volumétricas de matriz e fibras.

**Figura 2.7** – Representação de um laminado carregado longitudinalmente.



Fonte: Jones (1999).

**Figura 2.8** – Representação de molas em série.



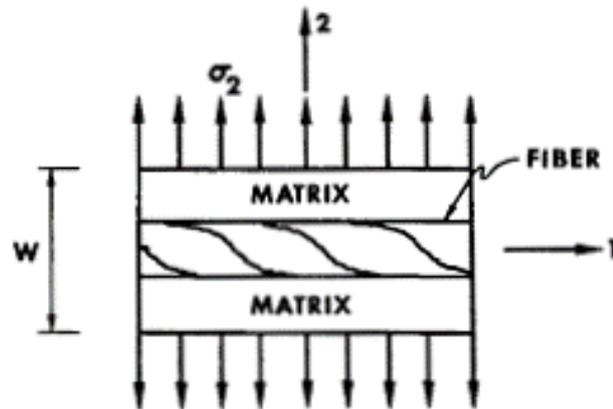
Fonte: Jones (1999).

O Módulo de Elasticidade Transversal é obtido ao relacionar o Módulo de Cisalhamento de matriz e fibras, com suas respectivas frações volumétricas e relacionado à molas em paralelo, Figura 2.9 e Figura 2.10, e determinados por

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_m} \cdot v_m + \frac{1}{E_f} \cdot v_f, \quad (18)$$

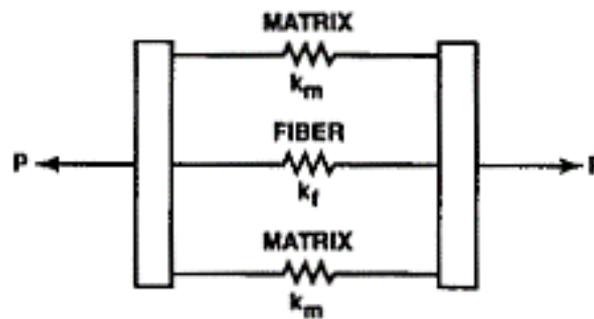
sendo  $E_c$  o Módulo de Elasticidade Transversal do compósito, neste caso.

**Figura 2.9** – Representação de um laminado carregado transversalmente.



Fonte: Jones (1999).

**Figura 2.10** – Representação de molas em paralelo.



Fonte: Jones (1999).

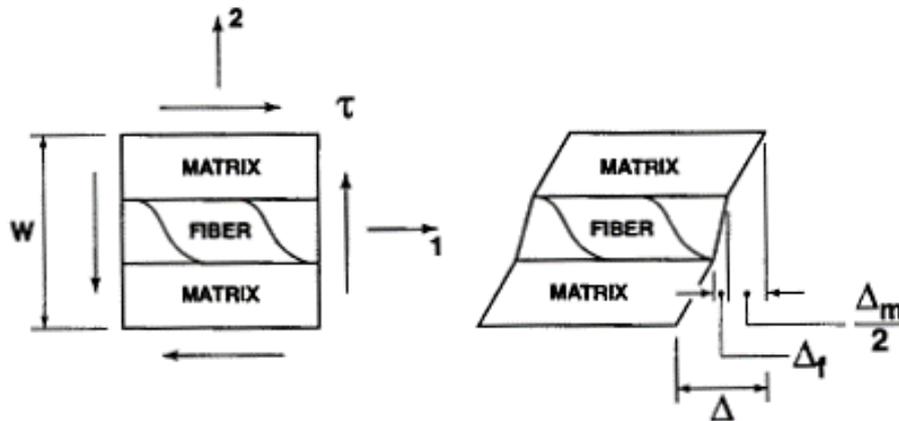
O Cisalhamento na direção 1-2 e o Coeficiente de Poisson são determinados pelas Eqs. (19) e (20), Figura 2.11.

$$\frac{1}{G_{12}} = \nu_m \cdot \frac{1}{G_m} + \nu_f \cdot \frac{1}{G_f}, \quad (19)$$

$$\nu_{12} = \nu_m \cdot \nu_m + \nu_f \cdot \nu_f, \quad (20)$$

sendo  $G_{12}$  o Módulo de Cisalhamento Transversal,  $G_m$  e  $G_f$  os Módulos de matriz e fibras,  $\nu_{12}$  o Coeficiente de Poisson e  $\nu_m$  e  $\nu_f$  os Coeficientes de matriz e fibras.

**Figura 2.11** – Representação de um laminado carregado por tensões cisalhantes.



Fonte: Jones (1999).

### 2.2.2 HALPIN-TSAI

O método de Halpin-Tsai (1969) é semi-empírico, baseado em resultados experimentais e nos estudos de Hermans (1967), amplamente utilizado devido à sua simplicidade e resultados concisos. O método é comumente aplicado para a determinação do Módulo de Elasticidade Transversal e do Cisalhamento, por apresentar resultados mais precisos quando comparados à Regra das Misturas. Estas propriedades são obtidas através,

$$\frac{\alpha_c}{\alpha_m} = \frac{1 + \zeta \cdot \eta \cdot v_f}{1 - \eta \cdot v_f}, \quad (21)$$

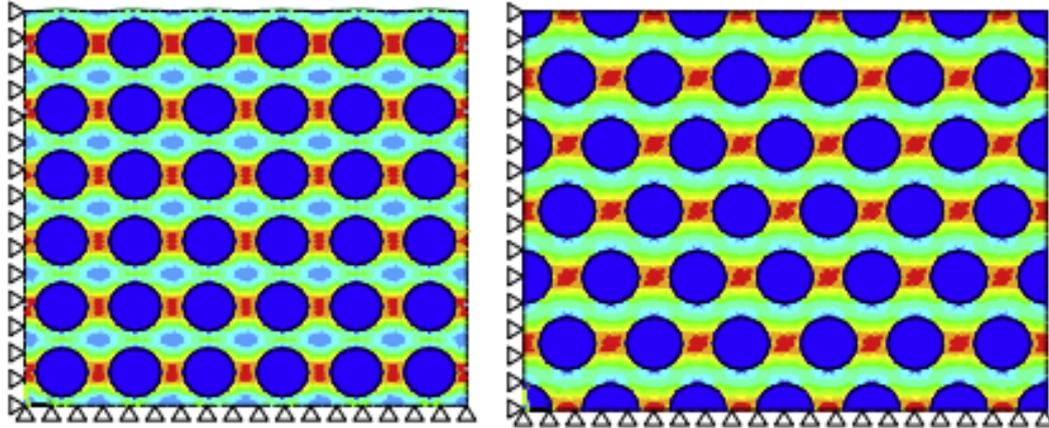
$$\eta = \frac{\frac{\alpha_f}{\alpha_m} - 1}{\frac{\alpha_f}{\alpha_m} + \zeta}, \quad (22)$$

sendo  $\alpha_c$  a propriedade a ser analisada do compósito,  $\alpha_m$  e  $\alpha_f$  referentes à matriz e fibras e  $v_f$  a fração volumétrica de fibras.

O parâmetro  $\zeta$  é definido através da geometria da seção transversal dos fios que compõem os reforços, que para seção circular são comumente utilizados  $\zeta=2$  para determinar o  $E_{22}$  e  $\zeta=1$  para o  $G_{12}$ . Porém, em um estudo desenvolvido por Giner (2015), foi proposto um novo método para a obtenção do parâmetro  $\zeta$ , através de uma análise por elementos finitos, (Figura 2.12), com a aplicação de

$$\zeta(v_f) = \begin{cases} 4,924 - 35,888 \cdot v_f + 125,118 \cdot v_f^2 - 145,121 \cdot v_f^3 & \text{Se } v_f < 0,3 \\ 1,5 + 5500 \cdot v_f^{18} & \text{Se } v_f \geq 0,3 \end{cases} \quad (23)$$

**Figura 2.12** – Esquemática da análise desenvolvida.



Fonte: Giner (2015).

Nota-se que o parâmetro  $\zeta$  depende da fração volumétrica de fibras. Outra análise realizada utilizando o estudo de Halpin-Tsai foi o desenvolvido Mori-Tanaka e estudada por Shokrieh (2016). O estudo de Mori-Tanaka propõe um método baseado no método de Halpin-Tsai definido por

$$E_c = a \cdot E_{11} + (1 - a) \cdot E_{22}, \quad (24)$$

$$a = 0,339 - 0,035 \cdot v_f - 0,642 \cdot \left(\frac{E_m}{E_f}\right), \quad (25)$$

$$a = 0,13 + 0,0815 \cdot v_f - 1,669 \cdot \left(\frac{E_m}{E_f}\right), \quad (26)$$

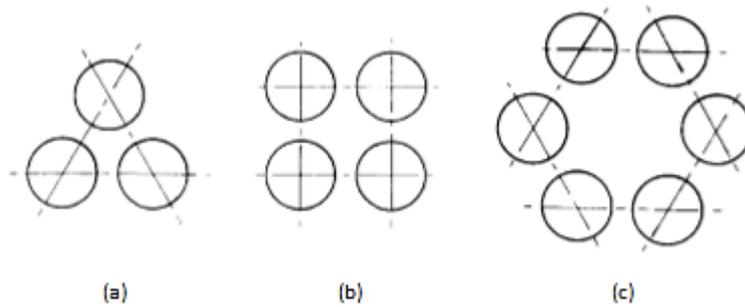
em que a Eq. (25) se refere à disposição em duas dimensões das fibras, já a Eq. (26) refere-se à disposição em três dimensões.

### 2.2.3 SPENCER

Método desenvolvido por Spencer (1986) baseia-se na disposição e geometria das fibras e a influência dessas na distribuição de tensão. A partir desse estudo, foi desenvolvida uma análise

sobre alguns arranjos de fibras e a influência da fração volumétrica em cada arranjo. A Figura 2.13 apresenta os três tipos de distribuições avaliados.

**Figura 2.13** – Distribuição das fibras. (a) triangular, (b) quadrática e (c) hexagonal.



Fonte: Adaptado de Spencer (1986).

A Eq.27 apresenta o fator de distribuição,  $\gamma$ , para o caso triangular,

$$\gamma^2 = \frac{1}{1,103.v_f}. \quad (27)$$

Para o caso quadrático tem-se,

$$\gamma^2 = \frac{1}{1,272.v_f}. \quad (28)$$

O fator de distribuição no caso hexagonal é dado por,

$$\gamma^2 = \frac{1}{1,654.v_f}. \quad (29)$$

Spencer desenvolveu sua análise para a determinação mais precisa dos valores dos Módulos de Elasticidade Transversal e do Cisalhamento, e para isso, utilizando das Eqs. (27)-(30), obtém-se a Eq. (31).

$$k = 1 - \frac{M_m}{M_f} \quad (30)$$

$$\alpha = \frac{\gamma - 1}{\gamma} + \frac{1}{k} \cdot \left( -\frac{\pi}{2} + \frac{2 \cdot \gamma}{\sqrt{\gamma^2 - k^2}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{\gamma + k}{\gamma - k}} \right) \quad (31)$$

Sendo  $\alpha$  a propriedade a ser determinada,  $M_m$  referente à propriedade da matriz e  $M_f$  à propriedade das fibras.

### 2.3 ENSAIO MECÂNICO

Segundo Tita (2006), cada compósito é um material exclusivo, o que faz com que a obtenção das propriedades elásticas seja complexa. Além disso, os valores de propriedades e resistência mecânica são dependentes do processo de fabricação ou dos parâmetros de fabricação, como tempo, temperatura e pressão de ensaio. Assim, se faz necessário a realização de ensaios mecânicos para a obtenção de resultados mais precisos.

Para a realização dos ensaios são consideradas as orientações angulares de cada corpo de prova, que no caso são de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $\pm 45^\circ$ . Neste trabalho realizou-se os ensaios de tração longitudinal, tração transversal e cisalhamento no plano XY, respectivamente.

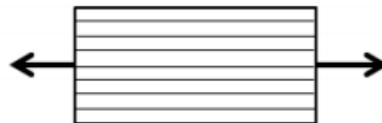
A partir do ensaio de tração longitudinal, Figura 2.14, obtém-se o Módulo de Elasticidade Longitudinal e o Coeficiente de Poisson,

$$E_x = \frac{\Delta \sigma_x}{\Delta \varepsilon_x}, \quad (32)$$

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}, \quad (33)$$

onde  $E_x$  o Módulo de Elasticidade na direção x,  $\sigma_x$  a tensão normal na direção x,  $\varepsilon_x$  a deformação linear na direção x e  $\nu_{xy}$  o Coeficiente de Poisson.

**Figura 2.14** – Tração longitudinal.



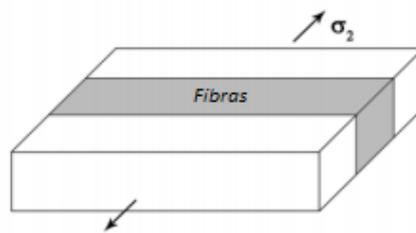
Fonte: Silva Santos (2015).

Com o ensaio de tração transversal, Figura 2.15, é obtido o Módulo de Elasticidade Transversal,

$$E_y = \frac{\Delta\sigma_y}{\Delta\varepsilon_y}, \quad (34)$$

onde  $E_y$  o Módulo de Elasticidade na direção  $y$ ,  $\sigma_y$  a tensão normal na direção  $y$  e  $\varepsilon_y$  a deformação linear na direção  $y$ .

**Figura 2.15** – Representação tração transversal.



Fonte: Azevedo (2015).

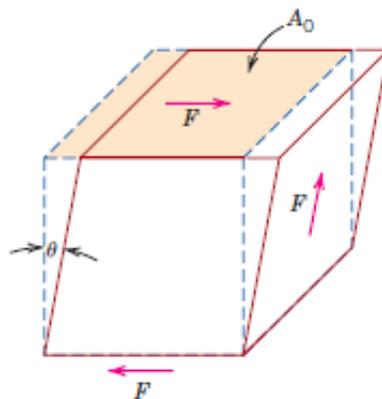
O Módulo de Cisalhamento é obtido pela aplicação da norma ASTM D3518, através de

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_x}{\theta}, \quad (35)$$

$$\theta = \varepsilon_x - \varepsilon_y, \quad (36)$$

onde  $\tau_{xy}$  o Módulo de Cisalhamento na direção  $xy$  e  $\theta$  a deformação angular.

**Figura 2.16** – Representação deformação angular.



Fonte: Hayden (1965).

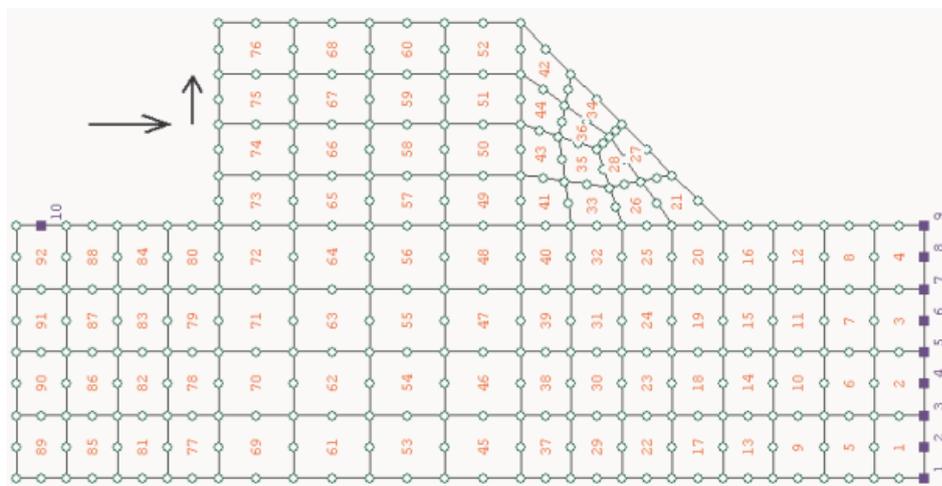
## 2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Segundo Azevedo (2003), o Método dos Elementos Finitos surge devido à alta complexidade na análise de estruturas de geometrias complexas. As análises de estruturas antes do MEF eram realizadas pela aplicação direta das derivadas parciais que regem a abordagem de Tensão e Deformação de sólidos, sendo muito comum utilizar-se de Séries de Fourier para facilitar a resolução dos problemas. Porém, tais problemas eram limitados à geometrias simples, fazendo-se necessária a busca por outras alternativas que ultrapassassem essas limitações.

Uma das alternativas foi o desenvolvimento do Método das Diferenças Finitas, que consistia na aplicação de derivadas aproximadas, calculadas com base em “grelhas” de pontos. Tal método permitia a resolução de problemas mais complexos, porém, antes dos computadores aparecerem, as soluções requeriam o desenvolvimento de grandes sistemas de equações lineares, o que tornava a sua aplicação inviável à certas geometrias. Assim, segundo Timoshenko (1988), fez-se necessário o desenvolvimento de diversos métodos baseados na sucessiva diminuição de resíduos, que deu início ao Método dos Elementos Finitos.

O MEF consiste em reduzir um sistema em pequenas parcelas, elementos, e que em cada parcela sejam aplicadas as equações diferenciais características da determinação de Tensões, Deformações e Deslocamentos pontuais em estruturas. Os elementos são delimitados por nós, Figura 2.17, sendo que nestes nós são aplicadas as condições de contorno do problema em análise, como restrição de deslocamentos ou deslocamentos prescritos, e os carregamentos externos.

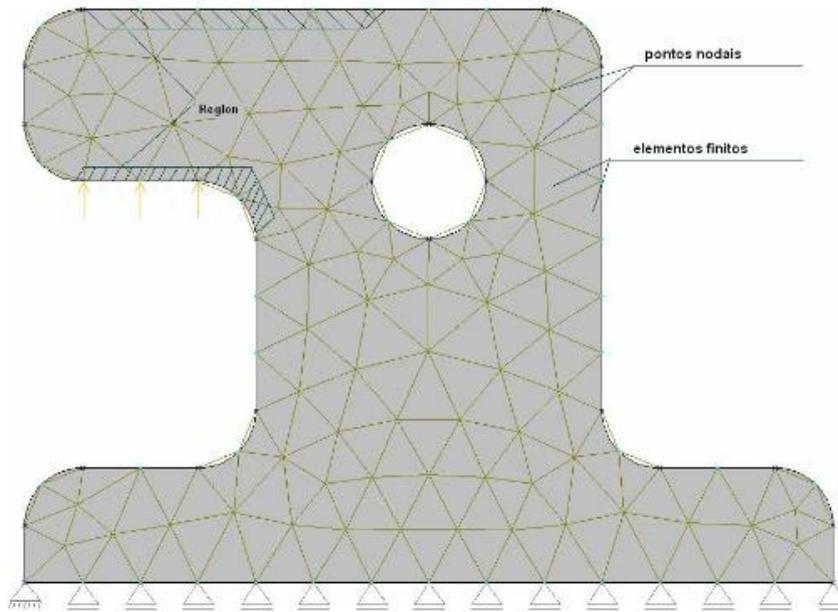
**Figura 2.17** – Nós e elementos.



Fonte: Azevedo (2003).

O conjunto de nós e elementos são também chamados de malha, Figura 2.1720, em que os elementos podem ser formados por diversas geometrias, triangulares, tetraédricas, circulares e etc. sendo aplicadas conforme a estrutura em análise.

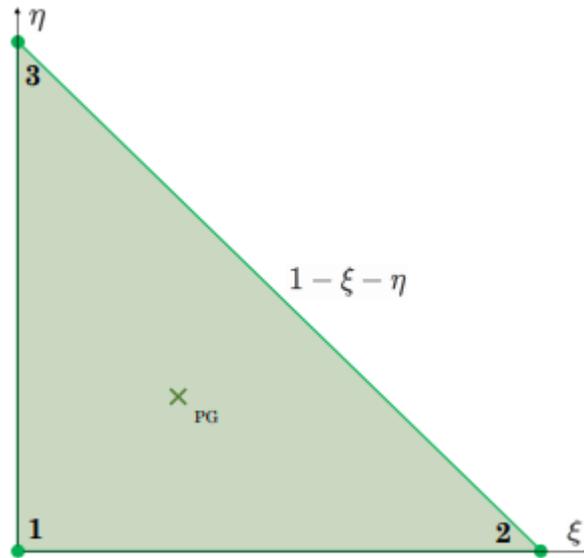
**Figura 2.18** – Exemplo de elementos triangulares.



Fonte: Araujo (2007).

Os elementos podem ser definidos por interpolação linear. No caso da geometria triangular, Figura 2.21, é chamada na literatura de triângulo de deformação constante ou CST (*Constant Strain Triangle*) por apresentar deformação constante no seu domínio. As funções de forma são apresentadas em coordenadas naturais  $\zeta$  e  $\eta$ .

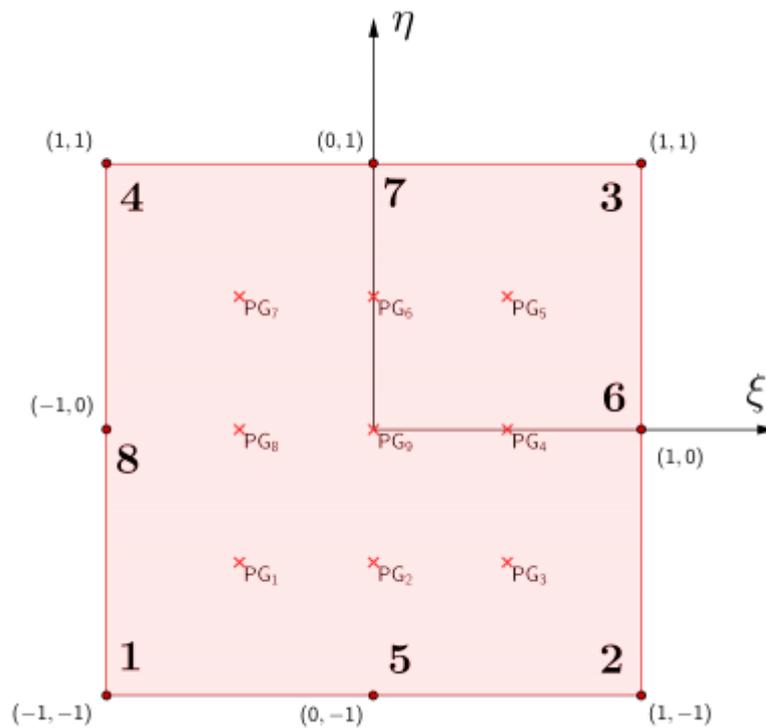
**Figura 2.21** – Geometria Triangular.



Fonte: Vêras (2018).

Para o elemento quadrilateral, são considerados 8 nós e 2 graus de liberdade por nó, Figura 2.22. Como apresenta 3 nós em cada direção, é utilizada a interpolação de segunda ordem.

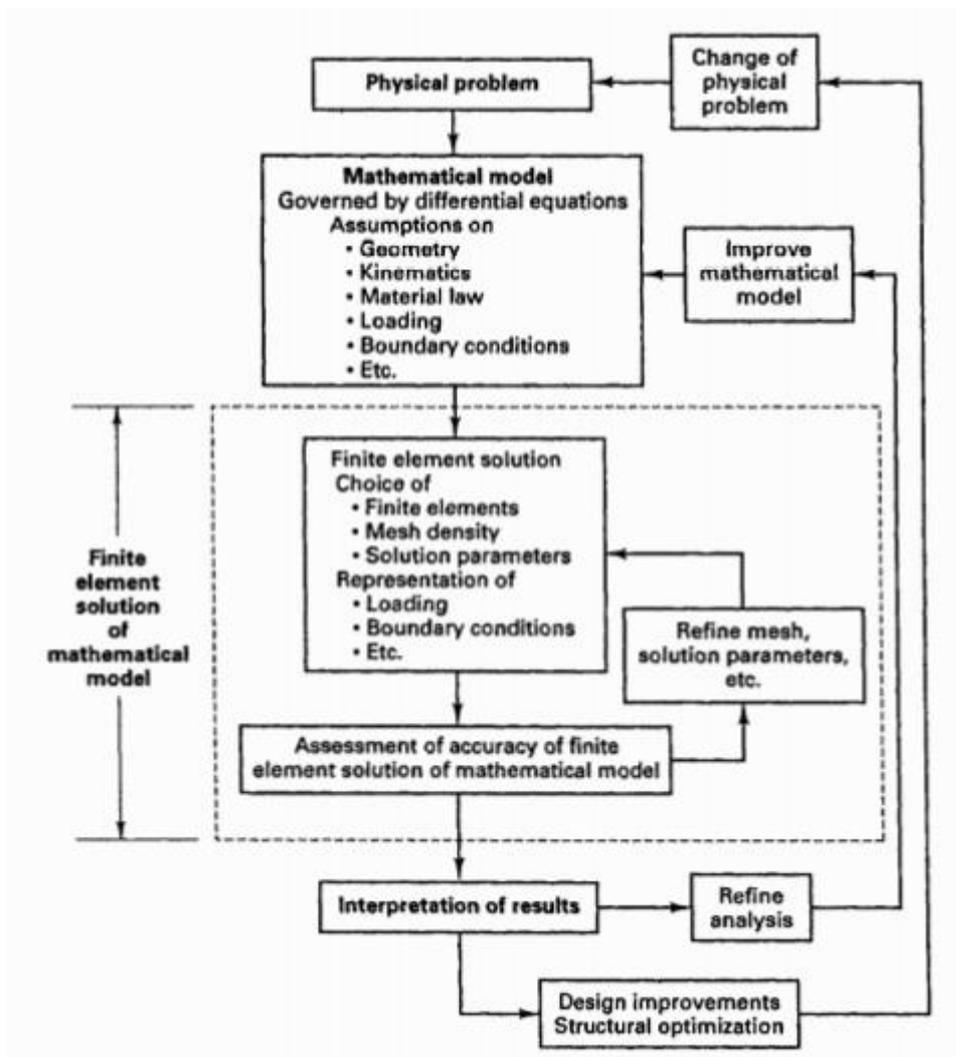
**Figura 2.22** – Geometria quadrilateral.



Fonte: Vêras (2018).

A aplicação do MEF é abrangente, sendo utilizado para análise dinâmica, em que são consideradas forças de inércia associadas às acelerações, ou estáticas ao considerar a aplicação de carregamentos de maneira lenta. Além disso, podem ser realizadas análises lineares, em que são consideradas as hipóteses de pequenos deslocamentos e de geometria inicial indeformada, e não lineares. Segundo Bathe (1996), a análise de estruturas por elementos finitos pode ser representada pela Figura 2.23.

**Figura 2.23** – Representação da análise pelo método dos elementos finitos.



Fonte: Bathe (1996).

## 2.5 FRAÇÕES MÁSSICAS E VOLUMÉTRICAS

A determinação das proporções em massa e volume de reforço e matriz que constituem os materiais compósitos é fundamental para a obtenção de suas propriedades, quando aplicados os métodos analíticos, por exemplo: Halpin-Tsai, Spencer ou Regra das Misturas.

As relações mássica e volumétrica são determinadas por

$$M_c = M_m + M_f, \quad (37)$$

$$V_c = V_m + V_f + V_v. \quad (38)$$

Sendo  $M_c$ ,  $M_m$  e  $M_f$  as massas do compósito, matriz e fibras, respectivamente, e  $V_c$ ,  $V_m$ ,  $V_f$  e  $V_v$  os volumes do compósito, matriz, fibras e vazios.

A densidade dos compósitos,  $\rho_c$ , pode ser obtida através da relação massa e densidade de matriz e reforços,

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{M_m}{\rho_m} + \frac{M_f}{\rho_f}}. \quad (39)$$

Sendo  $\rho_m$  e  $\rho_f$  as densidades de matriz e fibras, respectivamente.

Outro método para obtenção das frações de massa e volume é através de ensaios normalizados, que para a realização do presente trabalho foi avaliado o teste de queima.

## 2.6 TESTE DE QUEIMA

O teste de queima é normalizado pela ASTM 2584, e consiste em um ensaio para a determinação da fração volumétrica dos reforços em compósitos. Segundo a norma, o teste deve ser realizado em ambiente externo controlado de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , com umidade relativa de  $50 \pm 10\%$ . Os corpos de prova devem ser alocados em uma vasilha de platina ou de porcelana com volume de pelo menos 30mL, com pelo menos três corpos de prova de mesma orientação. O teste é realizado em uma Mufla à temperatura de  $600^\circ\text{C}$ , com a capacidade de ir à  $0^\circ\text{C}$  à  $600^\circ\text{C}$ , em um intervalo de 10min, e manter na temperatura máxima por 1h.

Finalizado o teste, é calculada a perda percentual de massa do compósito através de

$$\text{Ignition loss}_{\%} = \left( \frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \cdot 100, \quad (40)$$

sendo  $W_1$  a massa do compósito e  $W_2$  a massa de fibras.

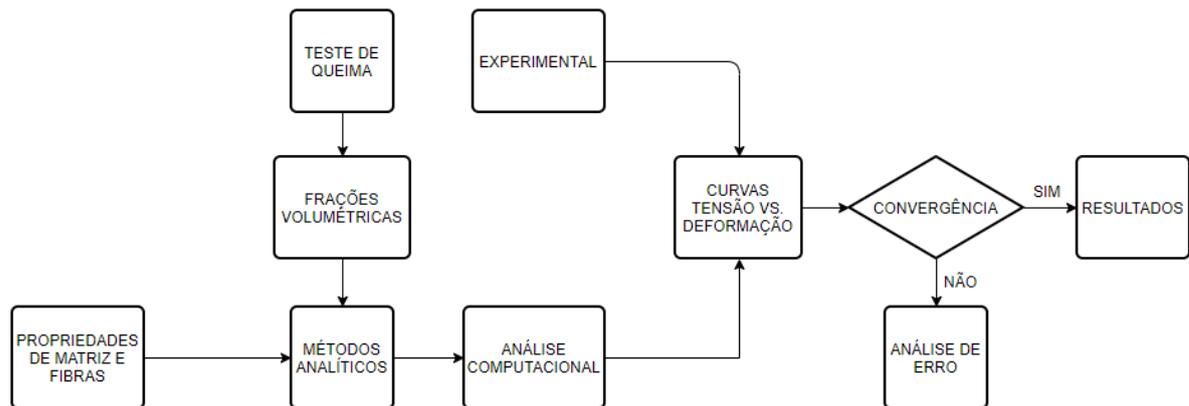
Determinada a perda de massa percentual, é então avaliado o desvio padrão por,

$$d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - X_i)^2}{n-1}}. \quad (41)$$

### 3 METODOLOGIA CIENTÍFICA

A metodologia utilizada no presente trabalho ocorreu conforme esquematizado na Figura 3.1.

**Figura 3.1** – Fluxograma representando a metodologia.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

O processo iniciou a partir dos valores de massa de fibras, resultados do Teste de Queima, que se fez possível determinar as frações volumétricas de matriz e fibras. Assim, em posse das frações volumétricas e das propriedades elásticas informadas pelos fornecedores, foram aplicados os métodos analíticos e determinadas as propriedades do compósito. As propriedades obtidas foram utilizadas para uma análise computacional, afim de reproduzir as condições do ensaio experimental e obter as curvas Tensão vs. Deformação e compará-las com as curvas experimentais. Por fim, foi analisada a convergência do procedimento e discutidos os resultados.

#### 3.1 FABRICAÇÃO

O processo de fabricação dos corpos de prova foi através de laminação a vácuo. Para o seu desenvolvimento foram utilizados uma base de vidro, fita de vedação, cera de carnaúba para evitar a aderência entre resina e a base de vidro, mangueiras plásticas para a remoção do excesso de resina e retirada de ar, uma bomba de vácuo e válvulas de controle. Cada um dos componentes está ilustrado na Figura 3.2.

**Figura 3.2** – Componentes utilizados no processo: (a) Plástico de vedação, (b) *Flow Mesh*, (c) *Peel Ply*, (d) Mangueiras, (e) Válvula, (f) Fita de vedação, (g) Gerador de vácuo e (h) Bomba.

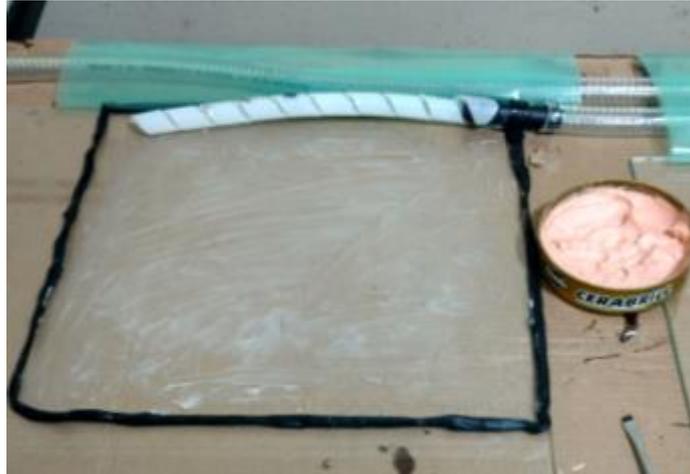


Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

As placas laminadas foram dimensionadas conforme a norma ASTM D3039, para orientações de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , e a norma ASTM D3518 para  $\pm 45^\circ$ . Para a laminação também foram utilizadas *Peel Ply*, Figura 3.2 (a), para a desmoldagem e *Flow Mesh*, Figura 3.2 (b), para facilitar o fluxo de resina por toda a placa.

O processo de laminação foi realizado, inicialmente, com a colocação da massa plástica de vedação sobre a base de vidro, seguido da deposição da cera de carnaúba (Figura 3.3). Em seguida, fez-se a conexão entre a estrutura de massa plástica e a bomba através das mangueiras plásticas, esquematizada na Figura 3.4. Na metade das mangueiras foram acopladas válvulas de controle para a regulagem de ar e promover o vácuo.

**Figura 3.3** – Processo de laminação.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

**Figura 3.4** – Acoplamento do gerador de vácuo e bomba com o aparato.



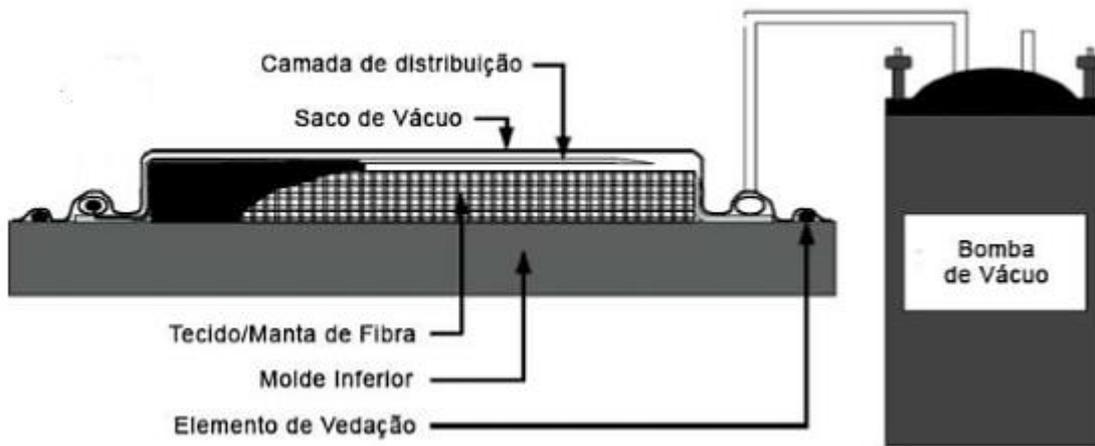
Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Montada a estrutura, foi iniciado o processo de montagem das placas. A primeira etapa consistiu em preparar a resina poliéster AZ 14.0, a qual fez-se necessário adicionar 1% em volume do catalisador Butanox M50, utilizado devido as características exotérmicas da resina, conforme recomendação do fornecedor. Ao total para a fabricação das 3 placas foram estimados 130 mL de resina por placa, para que se pudesse preencher todas as camadas, com a adição de 48 gotas do catalisador cada.

Preparada a resina, seguiu-se para o empilhamento das camadas, as quais foram baseadas segundo as espessuras presentes na Tabela 3.1 e Tabela 3.2. Assim, para as placas de

orientação  $0^\circ$  foram empilhadas 6 camadas, já as de  $90^\circ$  foram empilhadas 10 camadas de fibra, sendo orientadas conforme  $[0^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$  e  $[90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ]_s$ . No caso da placa de  $\pm 45^\circ$  foram empilhadas 8 camadas orientadas como  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ , para que fosse possível obter os ângulos positivo e negativo e que ocorresse o entrelaçamento entre as fibras para evitar escorregamento. Definidos os parâmetros de resina e fibras foi possível realizar a laminação conforme ilustrado na Figura 3.5.

**Figura 3.5** – Representação do processo.



Fonte: Adaptado de Silva (2016).

Após cerca de 5h de cura, desligou-se a bomba, e esperou-se 19h para que se pudesse iniciar o processo de desmoldagem. Com as placas laminadas, seguiu-se para o corte dos corpos-de-prova, sendo as dimensões de cada orientação angular expressas na Tabela 3.1 e Tabela 3.2. O corte foi realizado pela máquina de corte da CLIPPER, Figura 3.6.

**Tabela 3.1** – Dimensões médias baseadas na norma ASTM D3039.

Orientação ( $^\circ$ )	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Desvio Padrão	Espessura (mm)	Desvio Padrão
0	250	25,05	0,27	1,13	0,02
90	250	24,93	0,08	1,81	0,02

Fonte: O Autor (2019).

**Tabela 3.2** – Dimensões médias baseadas na norma ASTM D3518.

Orientação ( $^\circ$ )	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Desvio Padrão	Espessura (mm)	Desvio Padrão
$\pm 45$	250	25	0,26	1,53	0,05

Fonte: O Autor (2019).

**Figura 3.6** – Máquina de corte CLIPPER.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Os corpos de prova ensaiados estão representados na Figura 3.67.

**Figura 3.7** – Representação dos corpos de prova.



Fonte: O Autor (2018).

### 3.2 ENSAIO MECÂNICO

O ensaio de tração foi realizado na Máquina da INSTRON, (Figura 3.8). O processo iniciou com o ensaio de um corpo de prova para a calibração da máquina, (Figura 3.9). Foram ensaiados três corpos-de-prova de cada orientação angular,  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  e  $90^\circ$ , para que se pudesse avaliar a repetibilidade do processo.

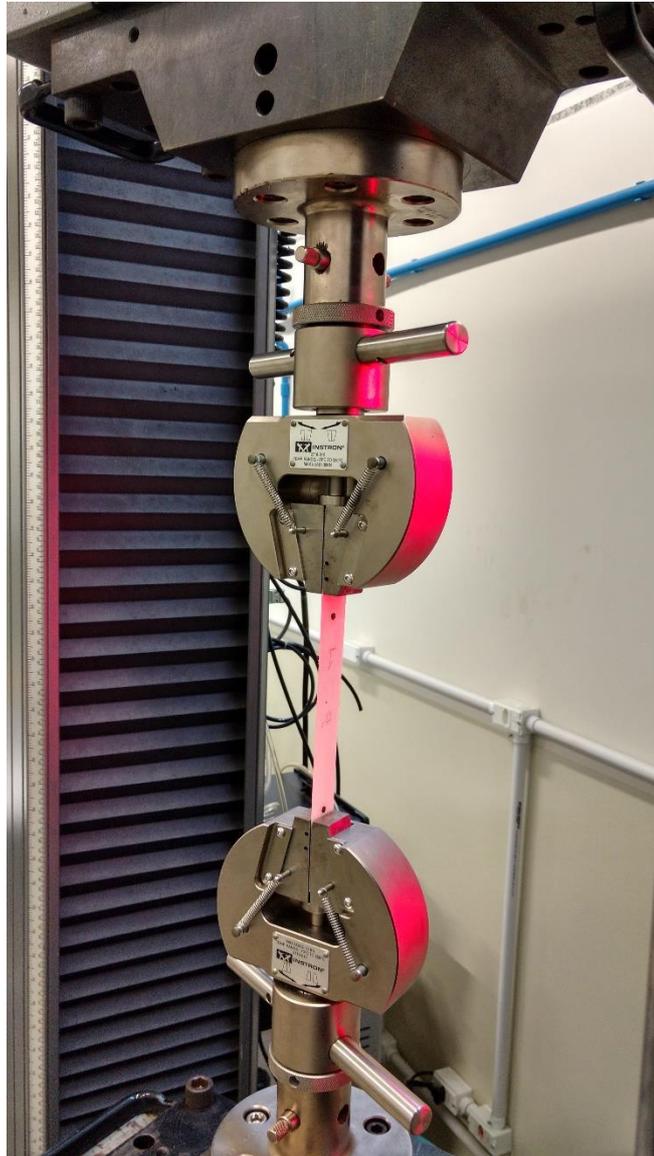
**Figura 3.8** – Máquina de ensaios INSTRON.



Fonte: O Autor (2018).

Em cada corpo de prova ensaiado foram marcados dois pontos com aproximadamente 100mm de distância entre eles (Figura 3.9), com o objetivo de avaliar o deslocamento sofrido pela aplicação do carregamento externo.

**Figura 3.9** – Calibração da máquina.



Fonte: O Autor (2018).

### 3.3 TESTE DE QUEIMA

O teste de queima foi realizado no forno da JUNG, (Figura 3.10). Foram utilizados três corpos-de-prova de cada orientação angular, que foram pesados com uma balança de ultra precisão, colocados em um recipiente e dispostos conforme a Figura 3.11. Colocado o recipiente dentro

do forno, este foi programado para elevar a temperatura de trabalho em 20°C/min até que atingisse 600°C. Ao atingir a temperatura final, os corpos-de-prova foram mantidos no forno por 1h.

**Figura 3.10** – Forno JUNG.



Fonte: O Autor (2018).

**Figura 3.11** – Disposição dos CDPs.



Fonte: O Autor (2018).

Retirados os corpos-de-prova do forno foram pesados novamente com a balança de ultra precisão, Figura 3.12, para a análise da perda por ignição.

**Figura 3.12** – Balança de ultra-precisão.



Fonte: O Autor (2018).

### 3.4 FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS

Realizado o teste de queima, pode-se avaliar os percentuais volumétricos de fibra, resina e eventuais vazios de cada corpo-de-prova. A determinação de cada parcela foi baseada na massa de cada amostra e no volume inicial, pré-teste, através de

$$V_s = d1. d2. e, \quad (42)$$

sendo  $V_s$  o volume do corpo de prova,  $d1$  e  $d2$  as dimensões laterais e  $e$  a espessura.

Após o teste de queima, a resina presente nas amostras evaporou, restando apenas a fibra, por ser resistente à temperatura de ensaio utilizada, 600°C. As fibras foram pesadas na balança de três casas decimais de precisão, e utilizando da densidade de valor, fornecida pela empresa, foi possível determinar as frações volumétricas de fibra através de

$$V_f = \frac{M_f}{\rho_f}, \quad (43)$$

$$v_f = \frac{V_f}{V_s} 100\%, \quad (44)$$

sendo  $V_f$ ,  $M_f$ ,  $\rho_f$  e  $v_f$  o volume, a massa, a densidade e a fração volumétrica das fibras, respectivamente.

Em posse das massas de fibra de cada amostra, foram determinadas as massas de resina através de

$$M_m = M_s - M_f, \quad (45)$$

onde  $M_m$ ,  $M_s$  e  $M_f$  as massas de matriz, corpo de prova e fibras, respectivamente.

A densidade da resina poliéster AZ 14.0 fornecida pela fabricante foi de 1.38 g/cm<sup>3</sup>, o que possibilitou a determinação da fração volumétrica de resina através de

$$V_m = \frac{M_m}{\rho_m}, \quad (46)$$

$$v_m = \frac{V_m}{V_s} 100\%, \quad (47)$$

sendo  $V_m$ ,  $M_m$ ,  $\rho_m$  e  $v_m$  o volume, a massa, a densidade e a fração volumétrica da matriz, respectivamente.

O percentual de vazios foi determinado por

$$v_v = \frac{(V_s - V_m - V_f)}{V_s} 100\%, \quad (48)$$

sendo  $v_v$  a fração volumétrica de vazios.

### 3.5 MÉTODO NUMÉRICO

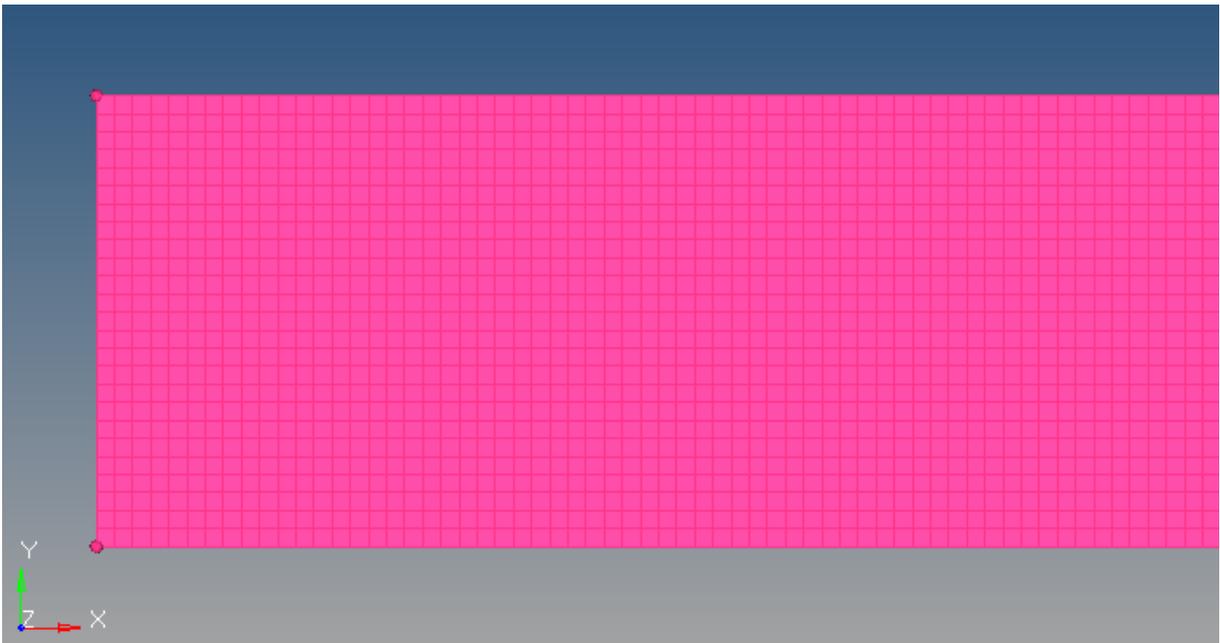
A aplicação do Método dos Elementos Finitos foi desenvolvida através da utilização do programa HyperWorks. A escolha pelo HyperWorks deu-se devido:

- Apresentar versão estudantil;
- Praticidade de utilização;
- Elevada gama de funções;
- Permitir que a geometria em análise seja desenvolvida na própria interface do programa;
- Existir um módulo para a análise de compósitos.

### 3.5.1 METODOLOGIA

A análise por elementos finitos foi desenvolvida começando pela definição da geometria dos elementos. Como os corpos de prova, Figura 3.7, apresentam geometria retangular, tornou-se conveniente de se utilizar elementos quadrados, Figura 3.13.

**Figura 3.13** – Exemplo da malha utilizada.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

As dimensões da geometria estão de acordo com os valores presentes na Tabela 3.1 e Tabela 3.2.

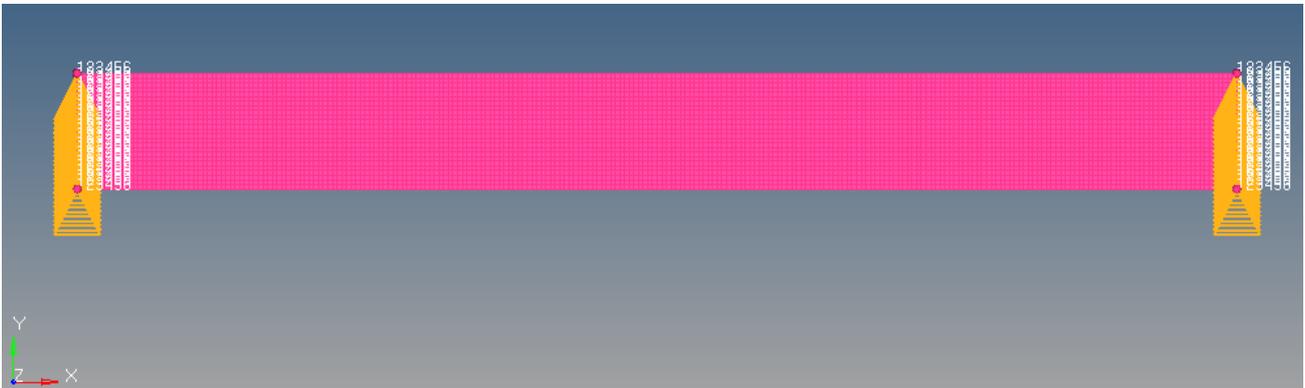
O objetivo da aplicação do MEF é o de avaliar as curvas Tensão vs. Deformação obtidas a partir das propriedades calculadas pelos métodos analíticos, e comparar com as curvas obtidas experimentalmente, afim de se avaliar quais dos métodos melhor se aproxima do real. Para aplicar tal metodologia, fez-se

- Utilização das propriedades obtidas pela Regra das Misturas e Halpin-Tsai;
- Análise nas três orientações angulares;
- Aplicação das condições de contorno semelhantes ao experimental.

As condições de contorno foram aplicadas conforme Figura 3.14, em que em uma das extremidades foram restringidos todos os graus de liberdade, enquanto que na outra foram aplicados deslocamentos na direção longitudinal à geometria, com os outros graus de liberdade restritos.

O desenvolvimento utilizado no HyperWorks se encontra no anexo 7.1.

**Figura 3.14** – Aplicação das condições de contorno.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

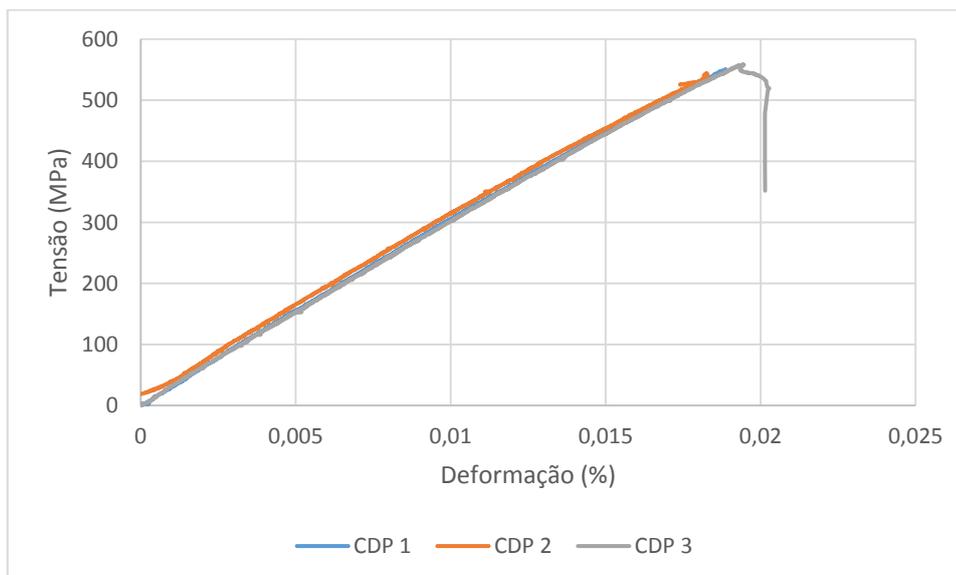
## 4 APLICAÇÕES E POTENCIALIDADES DA METODOLOGIA

Definidos os procedimentos experimentais, foi possível realizar a obtenção e a análise dos valores dos Módulos de Elasticidade e do Coeficiente de Poisson do compósito. Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos a partir do teste de queima, ensaios mecânicos, aplicação dos métodos analíticos e dos métodos numéricos. Por fim serão apresentadas análises comparativas entre os métodos utilizados.

### 4.1 ENSAIO MECÂNICO

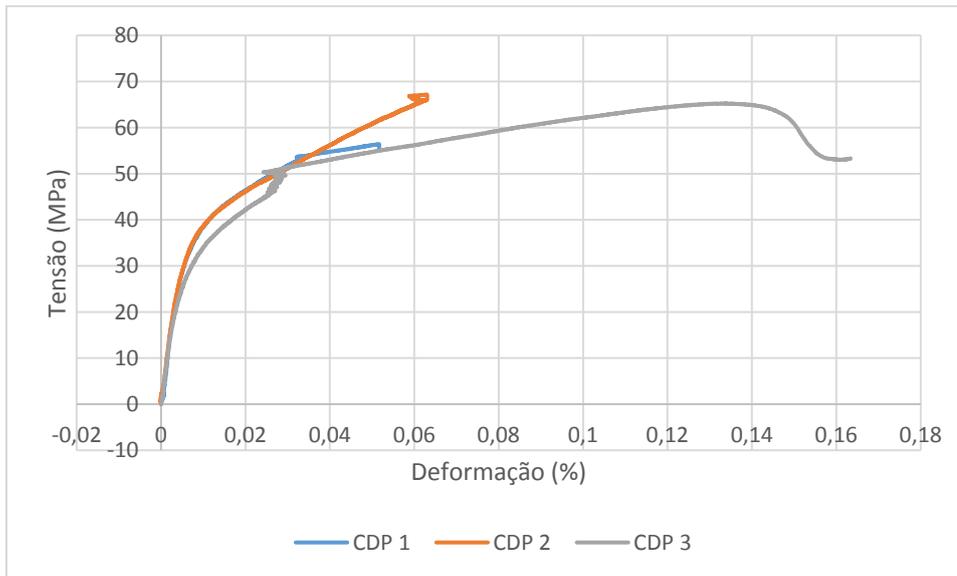
Como resultado dos ensaios realizados para cada corpo-de-prova, o software utilizado na coleta de dados junto à máquina da INSTRON (Fig. 3.8), obteve-se os gráficos relacionando Força vs. Deslocamento para cada orientação angular. Assim, relacionando a força aplicada pela área da seção transversal da amostra para avaliar a tensão, e o deslocamento entre os pontos marcados através de captura de imagem, para a deformação, obtiveram-se as curvas Tensão (MPa) vs. Deformação (%) para cada orientação, Figs. (4.1-4.2-4.3).

**Figura 4.1** – Tensão (MPa) vs. Deformação (%) ensaio corpos-de-prova à 0°.



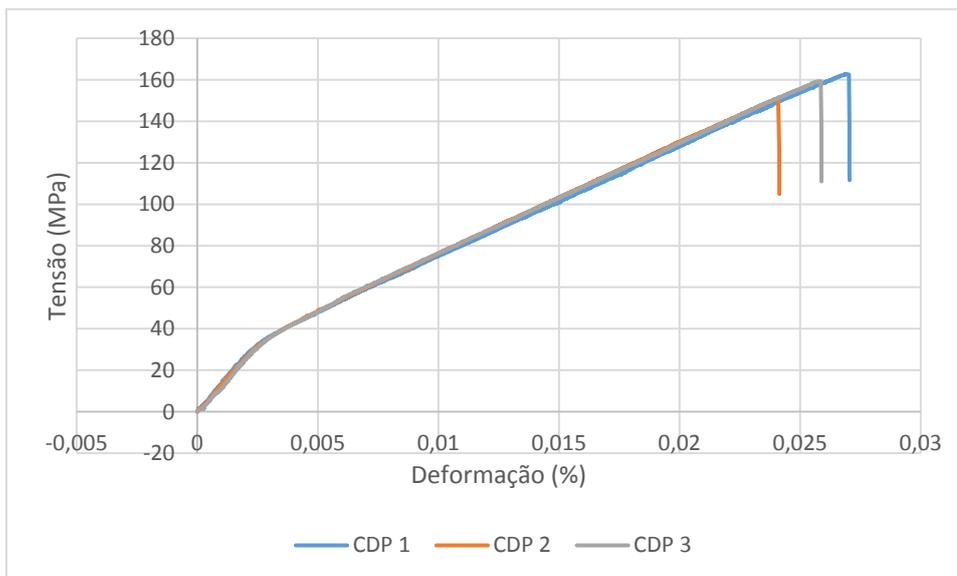
Fonte: O Autor (2019).

**Figura 4.2** – Tensão (MPa) vs. Deformação (%) ensaio corpos-de-prova à  $\pm 45^\circ$ .



Fonte: O Autor (2019).

**Figura 4.3** – Tensão (MPa) vs. Deformação (%) ensaio corpos-de-prova à  $90^\circ$ .



Fonte: O Autor (2019).

Ao todo foram obtidos nove gráficos, três para cada corpo-de-prova, sendo possível obter os valores do Módulo de Elasticidade Longitudinal  $E_{11}$ , do Módulo de Elasticidade Transversal  $E_{22}$ , do Módulo de Cisalhamento Transversal  $G_{12}$  e do Coeficiente de Poisson  $\nu_{12}$ , presentes na tabela 4.1. Os valores obtidos são uma média aritmética de três corpos-de-prova ensaiados para cada orientação, utilizando

$$\alpha_c = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{n}, \quad (49)$$

sendo  $\alpha$  o objeto de análise e  $n$  o número de amostras.

**Tabela 4.1** – Propriedades obtidas experimentalmente.

<b>Propriedades Elásticas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<i>Módulo de elasticidade paralelo à fibra (<math>E_{11}</math>)</i>	<i>GPa</i>	<i>31,8383</i>	<i>0,8211</i>
<i>Módulo de elasticidade perpendicular à fibra (<math>E_{22}</math>)</i>	<i>GPa</i>	<i>7,3813</i>	<i>0,4625</i>
<i>Módulo de Cisalhamento para o plano 1-2 (<math>G_{12}</math>)</i>	<i>GPa</i>	<i>2,1514</i>	<i>0,6355</i>
<i>Coefficientes de Poisson <math>\nu_{12}</math></i>	-	-	-

Fonte: O autor (2019).

Os resultados encontrados foram coerentes ao considerar que 75% das fibras estão na direção do urdume e a baixa resistência da matriz quando comparada a fibras. O módulo de Elasticidade Longitudinal da fibra de vidro utilizada varia de 72-85 GPa, já a resina poliéster tem o valor de 2,5 GPa, assim o valor encontrado é aproximadamente a média entre as duas fases.

O valor de 31,8383 GPa quando comparado aos aços mais comuns utilizados, como o 1020 e 1045, fica muito abaixo, sendo 205 GPa para o 1020 e 210 GPa para o 1045. Porém, ao comparar as densidades, a do compósito ficou abaixo da dos aços aproximadamente na mesma ordem de diferença entre os Módulos de Elasticidade. A densidade do compósito foi calculada sendo uma média das 3 amostras, de cada orientação angular, e utilizando-se da Eq. (39), obtendo o valor de aproximadamente 1,204 g/cm<sup>3</sup>, enquanto a densidade dos aços é de 7,87 g/cm<sup>3</sup>, o que faz com que se para determinado projeto se a rigidez requerida não for muito elevada, em vez de utilizar aço, pode-se utilizar do compósito aqui analisado, sendo que deixaria a estrutura muito mais leve.

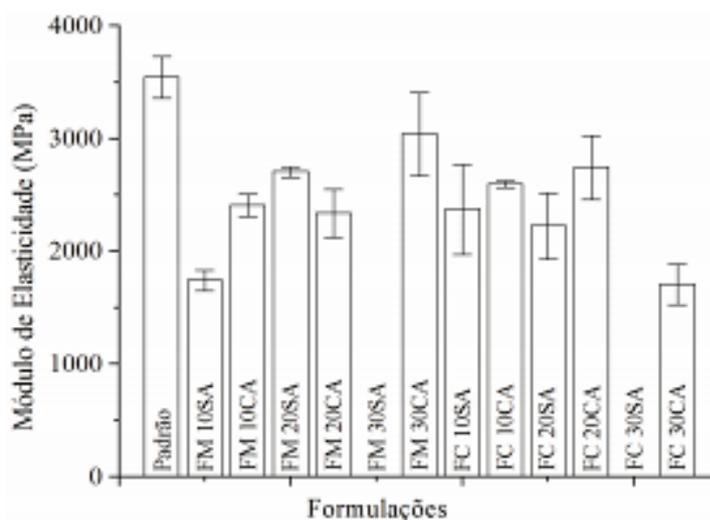
O resultado do Módulo Longitudinal também foi comparado com o resultado de outros compostos envolvendo Ácido Lático e fibras naturais. Em uma pesquisa desenvolvida por Lemos e Martins (2014), foram analisadas diversas composições com fibras de madeira e de côco em matriz polimérica, Figura 4.4, obtendo o resultado presente na Figura 4.5.

**Figura 4.4** – Composições utilizadas.

<b>Tabela 1.</b> Formulações avaliadas com fibras de madeira (FM_...) ou de coco (FC_...).							
Formulações (%)	Padrão	10SA	10CA	20SA	20CA	30SA	30CA
PLA	70,0	63,0	60,5	56,0	53,5	49,0	46,5
TPU	30,0	27,0	24,5	24,0	21,5	21,0	18,5
Fibra Madeira (FM)	-	10,0	10,0	20,0	20,0	30,0	30,0
Fibra Coco (FC)	-	10,0	10,0	20,0	20,0	30,0	30,0
Anidrido Maleico	-	-	5,0	-	5,0	-	5,0

Fonte: Lemos e Martins (2014).

**Figura 4.5** – Resultados obtidos de resistência para os compostos de Ácido Lático e fibras naturais.



Fonte: Lemos e Martins (2014).

Os valores presentes na Fig. ficaram muito abaixo quando comparados aos obtidos no presente trabalho, obtendo valor máximo de aproximadamente 3,5 GPa.

Quanto ao valor encontrado para o  $E_{22}$  é possível afirmar que ficou dentro do esperado ao considerar que 25 % das fibras estavam orientadas na direção transversal, o que faz com que 75% da resistência esteja vinculada à matriz, que acaba reduzindo o valor.

## 4.2 TESTE DE QUEIMA

Os dados iniciais pré-teste estão presentes na tabela 4.2.

**Tabela 4.2** – Dados coletados de massa e determinação de volume dos compósitos.

<b>Dados</b>	<b>0° (1)</b>	<b>0° (2)</b>	<b>0° (3)</b>	<b>±45° (1)</b>	<b>±45° (2)</b>	<b>±45° (3)</b>	<b>90° (1)</b>	<b>90° (2)</b>	<b>90° (3)</b>
$M_c$ (g)	1,400	1,343	1,383	1,787	1,775	1,770	2,350	2,313	2,370
$d_1$ (mm)	27,70	26,65	27,85	27,15	26,95	27,20	27,05	27,05	27,20
$d_2$ (mm)	27,30	27,45	26,85	27,25	27,05	27,15	28,90	28,20	28,75
$e$ (mm)	1,20	1,10	1,15	1,50	1,45	1,50	1,85	1,85	1,80
$V_c$ (mm <sup>3</sup> )	907,4	804,69	859,93	1109,75	1057,04	1107,72	1446,2	1411,19	1407,6

\* Os números em parênteses representam os corpos de prova.

Fonte: O autor (2019).

Realizado o ensaio, foi possível avaliar as massas médias correspondentes de cada parcela, utilizando-se também da Eq. (49), como apresentado na tabela 4.3.

**Tabela 4.3** – Valores médios obtidos de massa e volume.

<b>Orientação (°)</b>	<b><math>M_f</math> (g)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b><math>M_m</math> (g)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b><math>V_c</math> (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
0	1,033	0,0187	0,35	0,0120	857,3624	51,42604
±45	1,343	0,1653	0,427	0,1706	1091,508	29,86161
90	1,778	0,0230	0,572	0,0072	1421,676	21,33922

Fonte: O autor (2019).

Sendo  $M_m$  a massa da matriz polimérica,  $M_f$  a massa de fibras e  $V_c$  o volume do compósito. Em posse dos valores de massas de matriz e fibras e do volume do compósito, foi possível determinar as frações volumétricas de cada parcela.

#### 4.3 FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS

Em posse das parcelas mássicas de fibras obtidas no teste de queima, foi realizado a análise das frações volumétricas de matriz, fibras e vazios. Utilizando do valor de densidade das fibras obtida através da fornecedora TEXY GLASS,  $\rho_f=2,55$  g/cm<sup>3</sup>, foram calculados o volume e a fração volumétrica de fibras, Tabela 4.4.

**Tabela 4.4** – Valores médios de volume e fração volumétrica de fibras.

<b>Orientação (°)</b>	<b><math>V_f</math> (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b><math>v_f</math> (%)</b>
<i>0</i>	<i>403,006</i>	<i>6,908</i>	<i>47,005</i>
<i>±45</i>	<i>524,052</i>	<i>65,745</i>	<i>48,011</i>
<i>90</i>	<i>694,509</i>	<i>8,760</i>	<i>48,851</i>

Fonte: O autor (2019).

Através da Eq. (45) foi calculada a massa de resina de cada corpo-de-prova e com o valor de densidade fornecida pelo fabricante,  $\rho_m=1,38$  g/cm<sup>3</sup>, foram calculados também, o volume e a fração volumétrica de matriz, tabela 4.5.

**Tabela 4.5** – Valores médios de volume e fração volumétrica de matriz.

<b>Orientação (°)</b>	<b><math>V_m</math> (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b><math>v_m</math> (%)</b>
<i>0</i>	<i>251,932</i>	<i>8,461</i>	<i>29,384</i>
<i>±45</i>	<i>318,840</i>	<i>123,096</i>	<i>29,211</i>
<i>90</i>	<i>415,458</i>	<i>5,141</i>	<i>29,223</i>

Fonte: O autor (2019).

As frações volumétricas de vazios foram obtidas utilizando a Eq. (48), tabela 4.6.

**Tabela 4.6** – Valores médios de fração volumétrica de vazios.

<b>Orientação (°)</b>	<b><math>v_v</math> (%)</b>
<i>0</i>	<i>23,610</i>
<i>±45</i>	<i>22,777</i>
<i>90</i>	<i>21,925</i>

Fonte: O autor (2019).

Definidas as frações volumétricas de matriz, fibras e vazios, pôde-se avaliar as propriedades elásticas pelos métodos analíticos.

#### 4.4 MÉTODOS ANALÍTICOS

A fibra de vidro utilizada apresenta 75% das fibras alinhadas na mesma direção longitudinal e 25% na direção transversal, assim, os dados obtidos pelos métodos analíticos representam 75% do valor calculado.

##### 4.4.1 REGRA DAS MISTURAS

Ao aplicar as Eqs. (32-36) foram obtidos os valores médios das propriedades elásticas para cada orientação,  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  e  $90^\circ$ , presentes na tabela 4.7.

**Tabela 4.7** – Propriedades obtidas aplicando a Regra das Misturas.

$E_{11}$ (GPa)	$E_{22}$ (GPa)	$G_{12}$ (GPa)	$\nu_{12}$
29,7213	8,8053	2,9209	0,2050

Fonte: O autor (2019).

Sendo os valores dos Coeficientes de Poisson de matriz e de fibras iguais à 0,33 e 0,23, respectivamente. A Tabela 4.8 apresenta a comparação com os dados experimentais.

**Tabela 4.8** – Comparação com os dados experimentais.

Propriedade	Experimental (GPa)	Regra das Misturas (GPa)	Diferença Relativa (%)
$E_{11}$	31,8383	29,7213	6,6494
$E_{22}$	7,3813	8,8053	19,2913
$G_{12}$	2,1514	2,9209	35,7655
$\nu_{12}$	-	0,2050	-

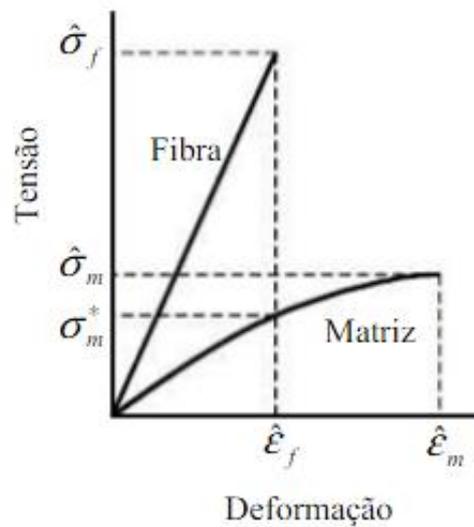
Fonte: O autor (2019).

As diferenças relativas encontradas apresentam valores dentro do esperado, uma vez que as hipóteses utilizadas na aplicação do método não coincidem com o ensaio experimental. A hipótese de perfeita ligação entre matriz e fibras junto a ausência de vazios não foi aplicada vistos os valores de frações volumétricas de vazios presentes na tabela. Além de não poder afirmar que se obteve a hipótese de fibras de mesmo diâmetro, paralelas e regularmente espaçadas.

É possível avaliar também, que como apresentado na Figura 4.6, matriz e fibras apresentam valores de resistência diferentes, o que dificulta o desenvolvimento de métodos analíticos mais precisos.

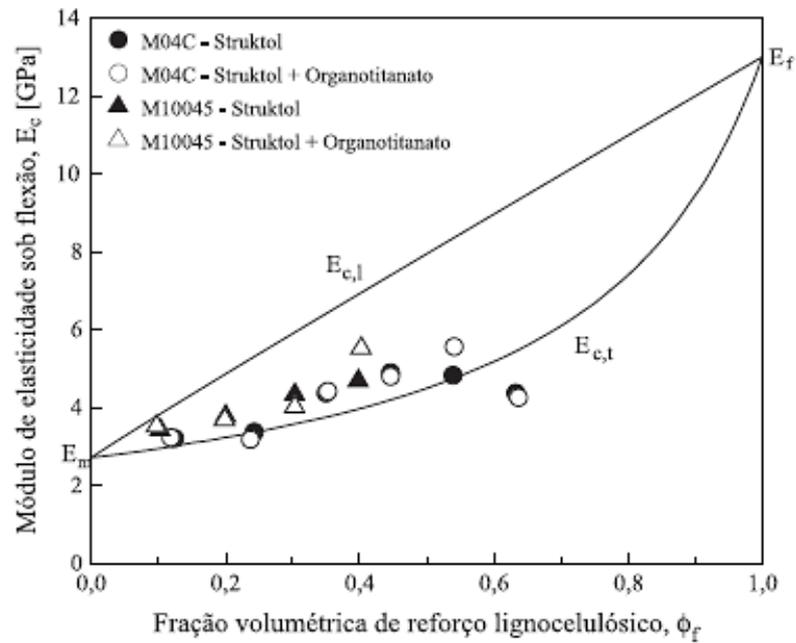
Em um estudo desenvolvido por Antônio Rodolfo Jr. (2006), ao analisar um composto de PVC/Farinha de madeira aplicando a Regra das Misturas, ele obteve o resultado presente na Figura 4.7. Sendo  $l$  e  $t$  correspondentes à longitudinal e transversal, respectivamente, e  $E_c$  relativo à Regra das Misturas. O resultado demonstra que a dispersão de valores é algo esperado.

**Figura 4.6** – Comparação Tensão vs. Deformação entre matriz e fibras.



Fonte: Tita (2006).

Figura 4.7 – Comparação entre dados experimentais e Regra das Misturas.



Fonte: Rodolfo Jr. (2006).

#### 4.4.2 HALPIN-TSAI

A tabela 4.9 apresenta os valores encontrados pela aplicação do método.

Tabela 4.9 – Propriedades obtidas pela aplicação de Halpin-Tsai.

Propriedade (GPa)	$\zeta=2;$ $\zeta=1$	Giner	Mori-Tanaka
$E_{22}$	8,9779	8,1605	2,4926
$G_{12}$	2,3072	2,4783	-

\* Os valores de  $\zeta$  na segunda coluna são aplicados na determinação do  $E_{22}$  e do  $G_{12}$ , respectivamente.

Fonte: O autor (2019).

A comparação dos dados analíticos e experimentais estão apresentados na Tab. 4.10.

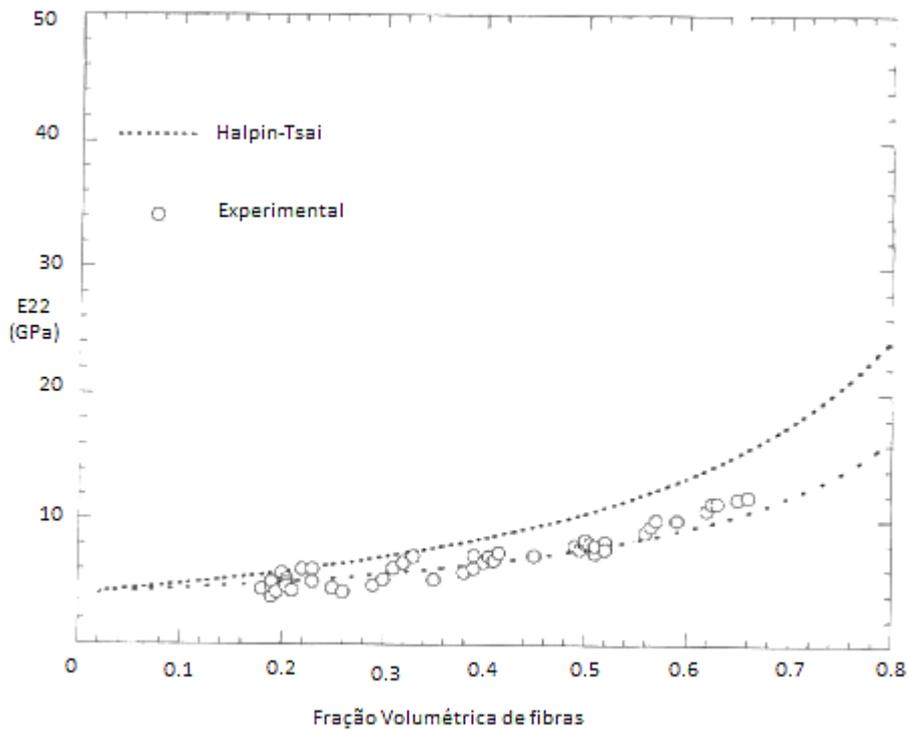
Tabela 4.10 – Comparação com os dados experimentais.

Propriedade (GPa)	Experimental	$\zeta=2;$ $\zeta=1$	Diferença Relativa (%)	Giner	Diferença Relativa (%)	M-T	Diferença Relativa (%)
$E_{22}$	7,3813	8,9779	21,6302	8,1605	10,5566	2,4926	-
$G_{12}$	2,1514	2,3072	7,2412	2,4783	15,1930	-	-

Fonte: O autor (2019).

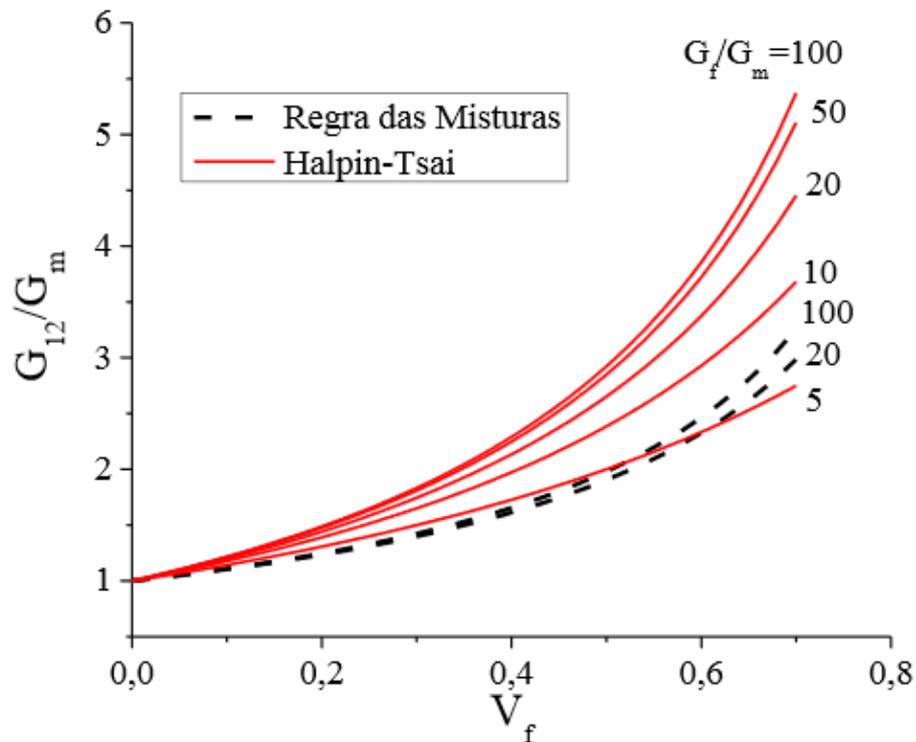
A dispersão dos resultados com os dados experimentais apresentou coerência com a faixa de fração volumétrica de fibras utilizada,  $0,4 < v_f < 0,5$ , quando comparado as análises de Jamali (2014) e Mendonça (2005) para um compósito de Fibra de Vidro/Epoxy, Figura 4.8 e Figura 4.9, respectivamente.

**Figura 4.8** – Comparação entre dados experimentais e Halpin-Tsai.



Fonte: Adaptado de Jamali (2014).

Figura 4.9 – Comparação entre Regra das Misturas e Halpin-Tsai.



Fonte: Mendonça (2005).

Como é possível perceber, o estudo realizado por a respeito do parâmetro  $\zeta$  apresentou o valor  $E_{22}$  mais próximo ao experimental comparado ao valor de  $\zeta=2$  recomendado pela literatura. Esse valor mais preciso pode ser justificado por ter baseado suas equações através de métodos numéricos ao passo do outro valor ser uma aproximação e desconsiderar alguns parâmetros. Quanto ao  $G_{12}$ , a estimativa de  $\zeta=1$  se mostrou eficiente, não necessitando de uma análise mais aprofundada sobre seu valor.

#### 4.4.3 SPENCER

Os resultados obtidos com a aplicação do método estão na tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Propriedades obtidas pela aplicação de Spencer.

Propriedade (GPa)	Spencer
$E_{22}$	-
$G_{12}$	2,1380

Fonte: O autor (2019).

Para as estimativas da tabela foi considerada a distribuição,  $\gamma$ , quadrática. A tabela 4.12 apresenta a comparação com os dados experimentais.

**Tabela 4.12** – Comparação com os dados experimentais.

Propriedade (GPa)	Experimental	Spencer	Diferença Relativa (%)
$E_{22}$	7,3813	-	-
$G_{12}$	2,1514	2,138	0,624

Fonte: O autor (2019).

Assim como os outros métodos analíticos, o método de Spencer também está sujeito às diferenças entre as resistências de matriz e fibras, Fig. 4.4, o que pode dificultar a obtenção de resultados mais precisos, como foi o caso da estimativa do  $E_{22}$ .

#### 4.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 4.13 Apresenta a comparação de todos os valores obtidos.

**Tabela 4.13** – Comparação entre os métodos.

Propriedade	Experimental	Regra das Misturas	Halpin-Tsai	Halpin-Tsai (Giner)	Spencer
$E_{11}$ (GPa)	31,8383	29,7213	-	-	-
$E_{22}$ (GPa)	7,3813	8,8053	8,9779	8,1605	-
$G_{12}$ (GPa)	2,1514	2,9209	2,3072	2,4783	2,138

Fonte: O autor (2019).

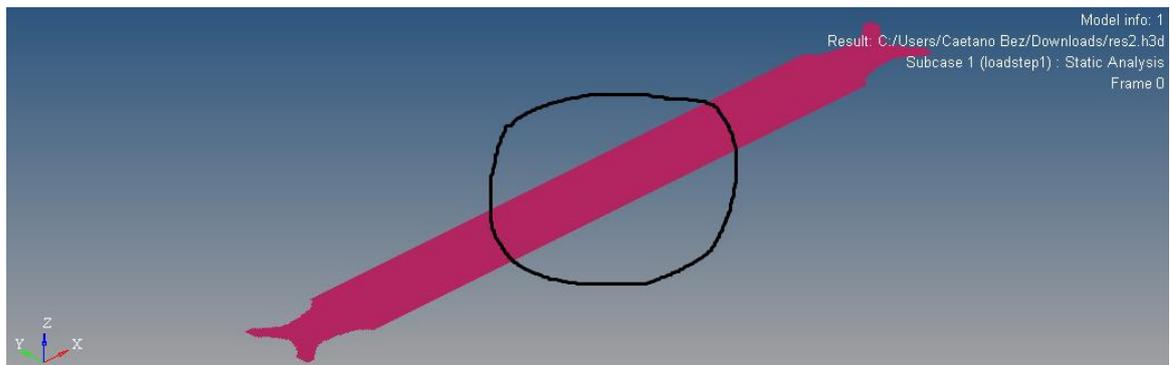
É perceptível que a aplicação da Regra das Misturas é coerente na determinação do  $E_{11}$ , sendo o seu valor muito próximo ao do experimental. Para o  $E_{22}$ , os estudos de Giner trouxeram um resultado que se aproxima mais do resultado experimental, assim como a aplicação do Método de Spencer para o  $G_{12}$ , recomendando-se a utilização destes.

#### 4.5.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A primeira etapa da análise consistiu na avaliação de convergência de malha. Para isto, utilizou-se de uma geometria idêntica aos corpos de prova, Fig.3.7, sendo analisados diversos tamanhos de elementos e aplicando condições de movimentos em todas as direções em uma das extremidades, com a outra extremidade livre para se deslocar na direção longitudinal em até 0,1% de deformação. Por conveniência, os elementos foram definidos com geometria quadrada e as propriedades foram as obtidas pela Regra das Misturas (Tabela 4.7).

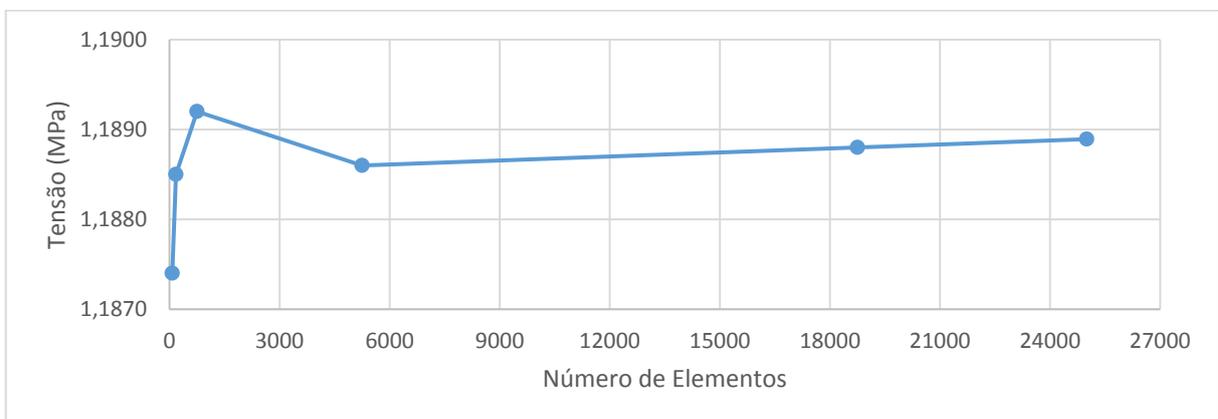
A convergência foi avaliada por uma relação Tensão vs. Quantidade de Elementos, em que para cada malha desenvolvida fossem determinadas as tensões máximas atuantes, Figura 4.10, até o ponto em que independentemente do tamanho da malha, a tensão não apresentasse mais variações significativas. A Figura 4.11 apresenta a curva obtida de Tensão vs. Quantidade de Elementos.

**Figura 4.10** – Indicação dos pontos avaliados.



Fonte: O autor (2019).

**Figura 4.11** – Análise de convergência de malha.

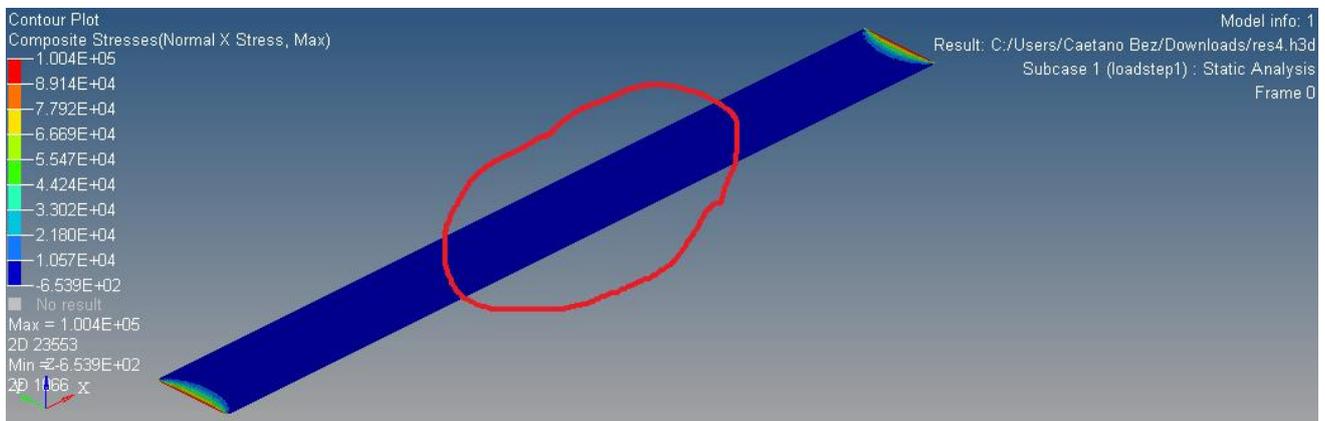


Fonte: O autor (2019).

Foi possível analisar que em todos os casos avaliados a variação de Tensão foi pequena, permitindo afirmar que a quantidade de elementos utilizados na malha não apresentava elevada influência sobre os resultados. A partir da Figura 4.11 percebeu-se que a variação nos valores de Tensão foi menor, assim para realizarem-se as análises optou-se por utilizar as malhas de 25000 elementos.

A Tabela 4.13 apresenta alguns resultados com elevada diferença relativa, assim, optaram-se por analisar as propriedades da Regra das Misturas, e para Halpin-Tsai o  $E_{11}$  igual ao da Regra das Misturas, o  $E_{22}$  com o parâmetro de Giner e o  $G_{12}$  com  $\zeta=1$ . A região de análise está presente na Figura 4.12.

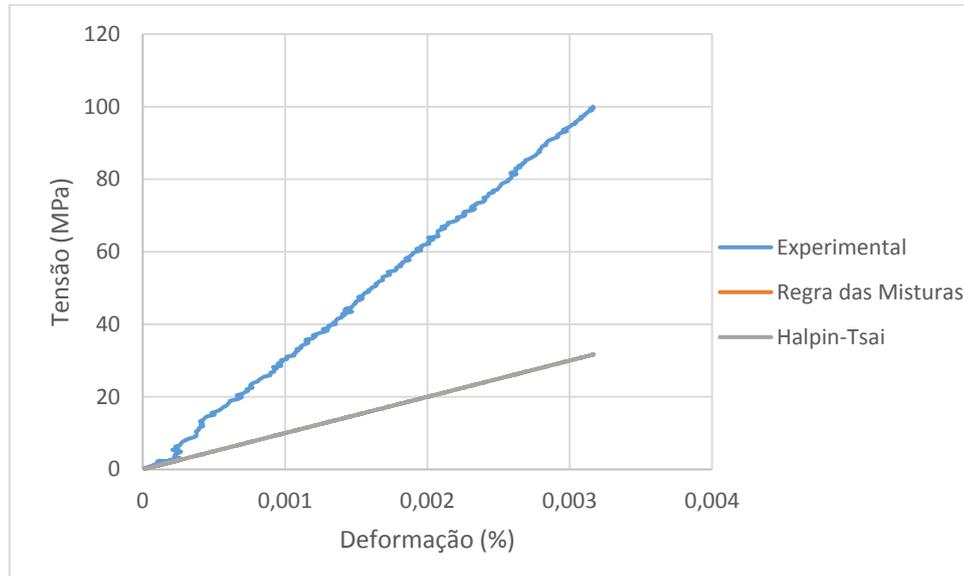
**Figura 4.12** – Região analisada.



Fonte: O autor (2019).

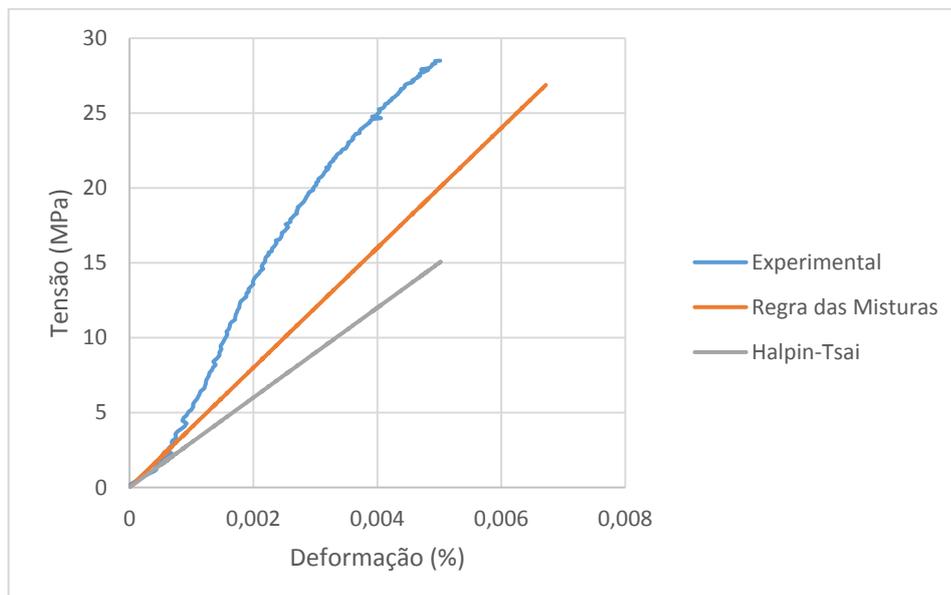
As Figuras 4.13-4.15 apresentam a comparação dos resultados experimentais com os obtidos computacionalmente para os corpos de prova de  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  e  $90^\circ$ , respectivamente.

**Figura 4.13** – Comparação da análise computacional com os resultados experimentais à 0°.

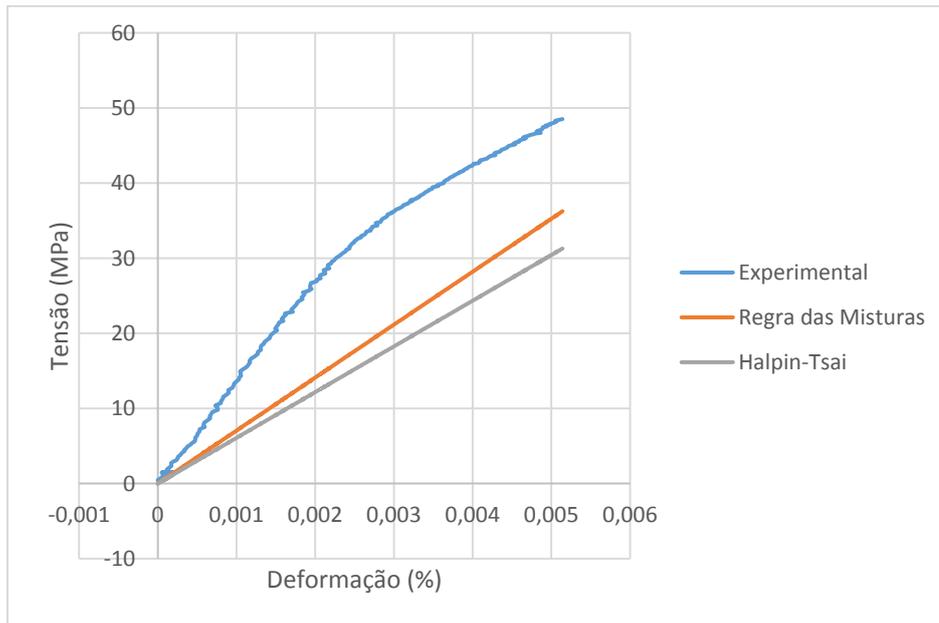


Fonte: O autor (2019).

**Figura 4.14** – Comparação à ±45°.



Fonte: O autor (2019).

**Figura 4.15** – Comparação à 90°.

Fonte: O autor (2019).

É perceptível que ocorre uma grande divergência entre o resultado experimental comparado aos métodos analíticos, o que faz com que a metodologia utilizada para a determinação das curvas Tensão vs. Deformação não seja válida.

## 5 CONCLUSÕES

A aplicação dos métodos analíticos se mostrou satisfatória. As diferenças relativas obtidas em relação aos valores experimentais ficaram dentro do esperado devido ao grande número de hipóteses consideradas.

Assim como abordado no Cap. o método da Regra das Misturas é altamente eficiente na determinação das propriedades elásticas, com destaque para o  $E_{11}$  com diferença inferior à 7% comparado ao experimental. Já para os valores do  $E_{22}$  e  $G_{12}$  os métodos de Halpin-Tsai e Spencer conseguiram se aproximar melhor do resultado esperado, em que para Halpin-Tsai com o auxílio dos estudos de Giner obteve-se uma diferença de aproximadamente 11% para o  $E_{22}$ , enquanto que para Spencer a diferença do  $G_{12}$  ficou abaixo de 1%.

A análise computacional trouxe resultados com elevada divergência quando comparadas as curvas de Tensão vs. Deformação obtidas experimentalmente com as obtidas pelos métodos analíticos. Tais divergências foram esperadas devido às simplificações adotadas em cada método e erros construtivos dos corpos de prova.

Por fim, pode-se afirmar que os métodos avaliados conferem uma boa estimativa das propriedades elásticas de materiais compósitos de matriz poliéster e fibras de vidro, o que reduz a necessidade de se realizarem ensaios experimentais para determinação das propriedades em trabalhos futuros.

O presente trabalho teve o enfoque na determinação das propriedades elásticas do material compósito de matriz poliéster e reforçado por fibras de vidro. Realizada a caracterização do compósito, as próximas etapas poderão ser concentradas no estudo de aplicações práticas do material, analisando o seu comportamento frente à diversas situações.



## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, Sérgio, F. M.; CÂNDIDO, Geraldo M. Processamento de laminados e compósitos poliméricos avançados com bordas moldadas. *Polímeros: ciência e tecnologia*, São Carlos, v. 10, n.1, 2000.
- AMIANO, D. *Análise e Otimização de Materiais Compósitos de Microestrutura Periódica*, 2015.
- ARAUJO, R. *Adaptatividade geométrica e numérica na geração de malhas de elementos finitos em 2D e 3D*, 2007.
- ASHBY, M. *Seleção de Materiais no Projeto Mecânico*, 2012.
- ASTM INTERNATIONAL. D2584-11: standard test method for ignition loss of cured reinforced resins. West Conshohocken: ASTM, 2011.
- \_\_\_\_\_. D3039/D3039M-17: standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. West Conshohocken: ASTM, 2017.
- \_\_\_\_\_. D3518/D3518M-13: standard test method for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by tensile test of a  $\pm 45^\circ$  laminate. West Conshohocken: ASTM, 2013.
- AZEVEDO, A. *Método dos Elementos Finitos*, abril, 2003.
- BATHE, K. J. *Finite Element Procedures*. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 1050p.
- CALLISTER, William D; RETHWISCH, David G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CARBON BY DESIGN. Vacuum Infusion (VARTM). Disponível em: <<http://www.carbonbydesign.com/infusion.htm>>. Acesso em: 07 jun. 2018.
- DANIEL, Isaac M.; ISHAI, Ori. *Engineering mechanics of composite materials*. 2.ed. New York: Oxford, 2006.
- GINER, E. Estimation of the reinforcement factor  $\zeta$  for calculating the transverse stiffness E2 with the Halpin-Tsai equations using the finite element method, 2015.
- HALPIN-TSAI, J. *The Halpin-Tsai Equations: A Review*, Maio, 1976.
- J. J. Hermans, *Koninkl. Nederl. Akademie Van Wetenschappen-Amsterdam, Proceedings, Series B*, 70, 1, 1967.
- JONES, R., *Mechanics of Composite Materials, Second Edition*, 1999.

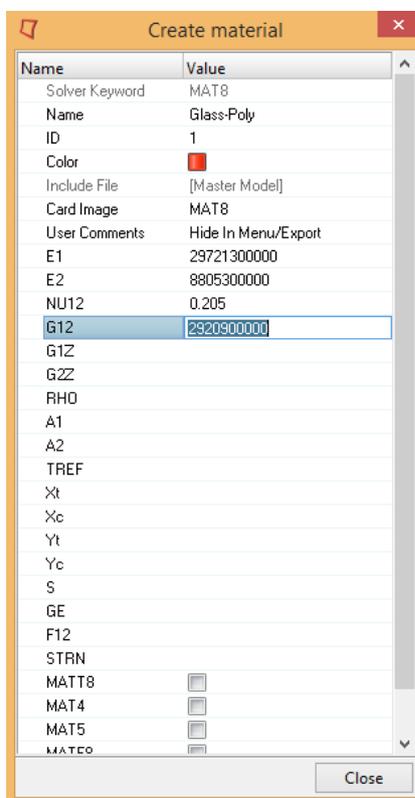
- LOPES, Inês A. F. Estudo do processo de infusão a vácuo em materiais compósitos. 2009. 63p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009. Disponível em: <<https://repositorioaberto.up.pt/bitstream/10216/58809/1/000136169.pdf>> Acesso em: 10 jun. 2018
- MENDONÇA, Paulo de Tarso R. Materiais compostos e estruturas-sanduíche: projeto e análise. 1.ed. Barueri: Manole, 2005.
- SHOKRIEH, M., MOSHREFZADEH-SANI, H. On the constant parameters of Halpin-Tsai equation, 2016.
- SPENCER, A., The Transverse Moduli of Fibre-Composite Materials, 1986.
- TITA, V., Projeto e Fabricação de Estruturas em Material Compósito Polimérico, Novembro de 2006.
- WINIARSKI, MultiScale Modelling of Compressive Behaviour of Materials with Pronounced Internal Microstructure, 2007.

## 7 ANEXOS

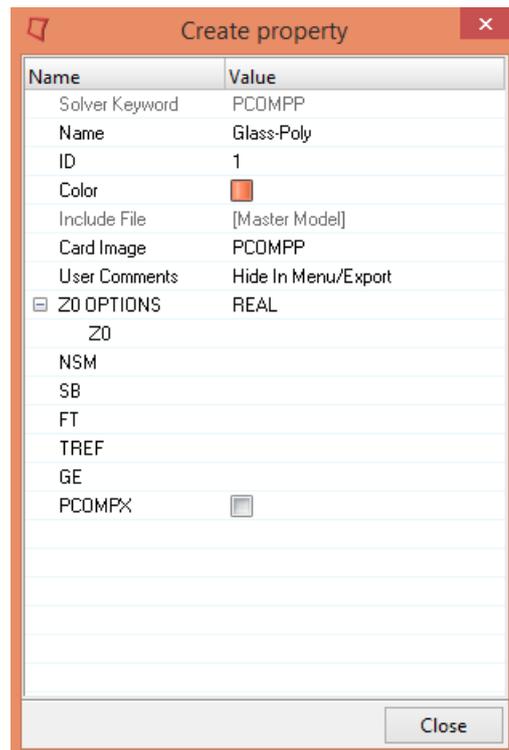
### 7.1 Análise Computacional Hyperworks

O HyperWorks apresenta alguns módulos para a avaliação dos resultados como. Para o presente trabalho foi utilizado o Opitstruct na análise de Tensão e Deformação. Em seguida, foram criados o material e a propriedade do laminado, Figura 7.1 e Figura 7.2, respectivamente.

**Figura 7.1** – Definição do material.



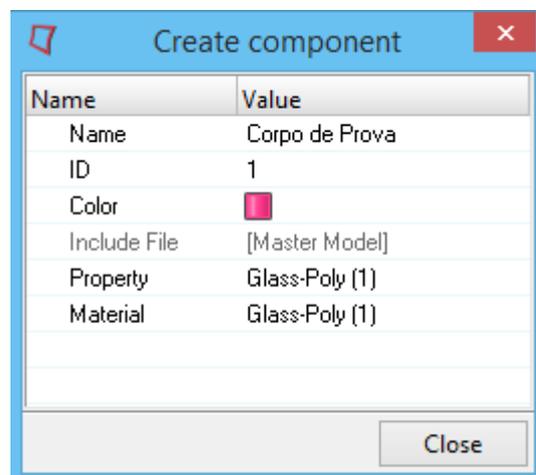
Fonte: O Autor (2019).

**Figura 7.2** – Definição da propriedade.

Fonte: O Autor (2019).

Para a análise em questão é necessário que a janela card image esteja em MAT8 no material e em PCOMPP na propriedade.

Criados material e propriedade, a etapa seguinte consiste na criação do componente. Para isto, basta clicar na aba *Collectors > Create > Components*, e aparecerá na interface a janela da Figura 7.3.

**Figura 7.3** – Definição do componente.

Fonte: O Autor (2019).

Nomeado e associado ao componente o material e a propriedade criados, cria-se então os nós e as linhas que formam as geometrias. Com base nas dimensões presentes nas Tabs., os nós criados apresentam as coordenadas apresentadas na Tab. Definidas as coordenadas das geometrias, prossegue-se com a determinação da superfície clicando na aba **Geometry > Create > Surfaces > Spline/Filler**, obtendo a superfície presente na Figura 7.4.

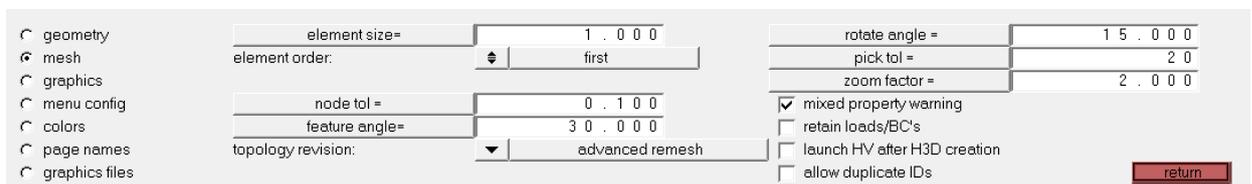
**Figura 7.4** – Representação da geometria.



Fonte: O Autor (2019).

Criadas as geometrias, a próxima etapa é a de criação da malha. Para isto são definidos primeiro os parâmetros da malha, no caso o tamanho do elemento, e outra informações adicionais, que são determinados ao selecionar as abas **Preferences > Meshing Options**, Figura 7.5.

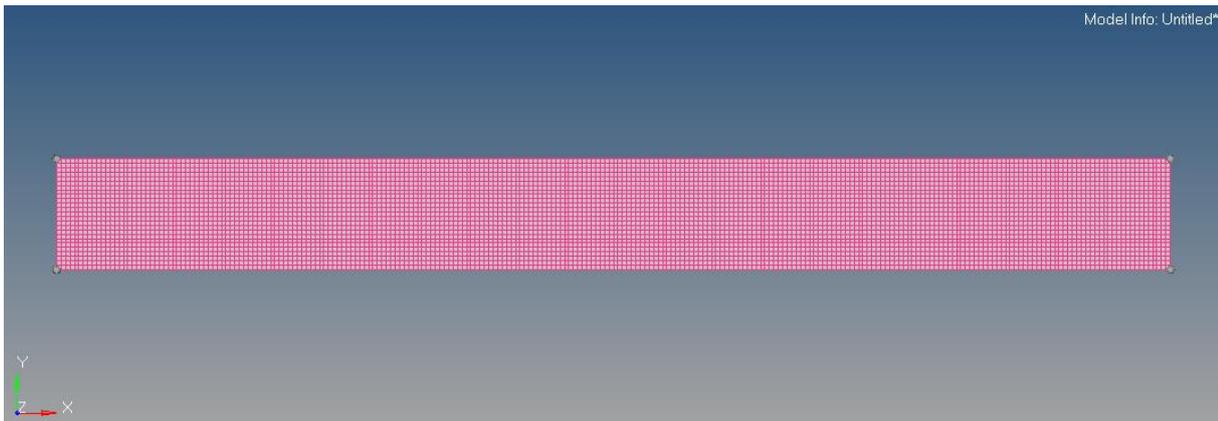
**Figura 7.5** – Definição de parâmetros da malha.



Fonte: O Autor (2019).

Definidos os parâmetros presentes na Figura 7.5, clicando nas abas **Mesh > Create > 2DAutoMesh**, definem-se as superfícies de criação da malha e a geometria da malha, que por conveniência optou-se pela geometria quadrangular, Figura 7.6.

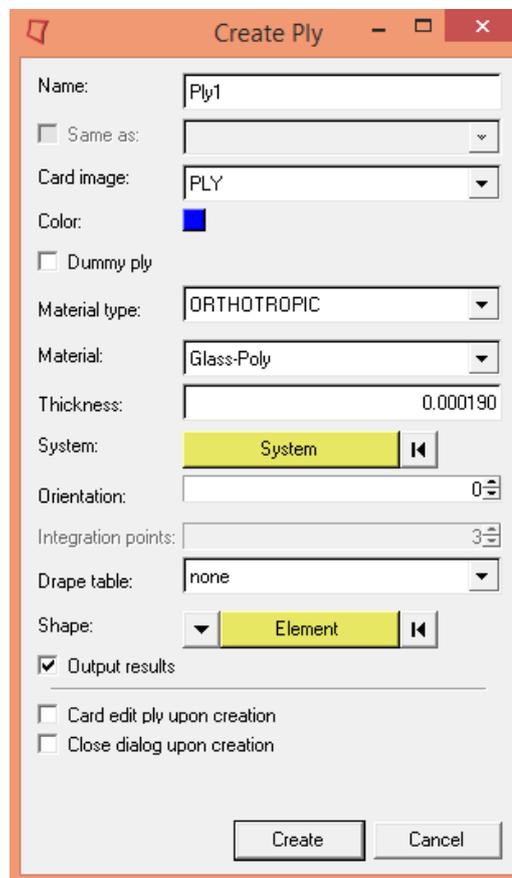
**Figura 7.6** – Geometria e malha definidas.



Fonte: O Autor (2019).

A determinação do compósito é obtida ao clicar na aba **Properties > Create > Plies**, para a criação das lâminas, em que se definem o material, orientação e espessura de cada lâmina. A Figura 7.7 apresenta os parâmetros que devem ser informados ao programa e a Tab. contém os dados utilizados.

**Figura 7.7** – Definição das lâminas utilizadas.



Fonte: O Autor (2019).

Com as lâminas criadas, a etapa seguinte consiste em criar o laminado e, para isto, basta selecionar as abas *Properties* > *Create* > *Laminate*. Abrirá uma janela conforme a Figura 7.8, sendo que nas linhas em branco devem ser selecionadas as lâminas utilizadas e em sequência, assim a primeira linha corresponde à primeira lâmina do laminado e assim sucessivamente.

**Figura 7.8** – Definição do laminado.

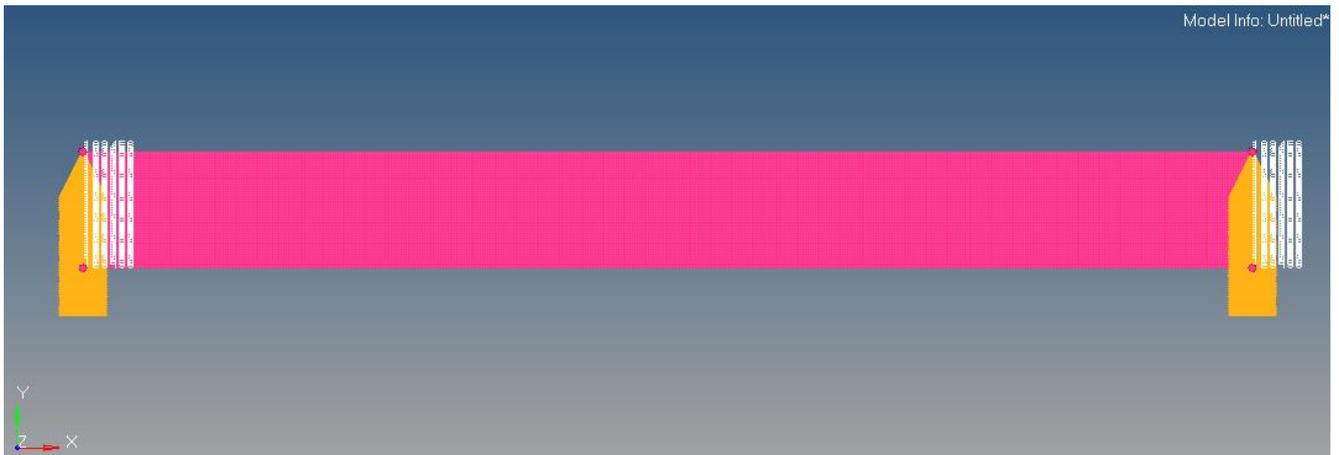
The 'Define laminate:' table contains the following data:

Name	Id	Color	Material	Thickness	Orientation	IP	Result
Ply1	1	■	Glass-Poly	0.00019	0.0	3	yes
Ply2	2	■	Glass-Poly	0.00019	0.0	3	yes
Ply3	3	■	Glass-Poly	0.00019	0.0	3	yes
Ply4	4	■	Glass-Poly	0.00019	0.0	3	yes
Ply5	5	■	Glass-Poly	0.00019	0.0	3	yes
Ply6	6	■	Glass-Poly	0.00019	0.0	3	yes

Fonte: O Autor (2019).

Finalizadas estas etapas, o compósito está definido, faltando apenas a aplicação das condições de contorno e dos carregamentos externos. Como o objetivo é o de representar o ensaio de tração realizado, basta restringir o movimento em todas as direções em uma das extremidades das geometrias, enquanto que na outra extremidade permita apenas deslocamento na direção longitudinal à amostra, Figura 7.9.

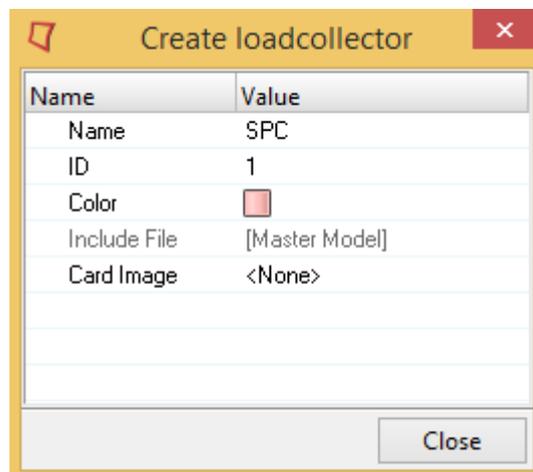
**Figura 7.9** – Imposição das condições de contorno.



Fonte: O Autor (2019).

Para se aplicar as condições de contorno e os carregamentos, primeiro deve-se criar um load collector, através de *Collectors > Create > Load Collector*, Figura 7.10. As restrições ao movimento são definidas ao clicar em *BC's > Create > Constraints*, o que fará abrir a janela presente na Figura 7.11.

**Figura 7.10** – Definição da *Load Collector*.



Fonte: O Autor (2019).

**Figura 7.11** – Definição das condições de contorno.



Fonte: O Autor (2019).

É perceptível que a janela apresenta 6 opções de dof, que representam as restrições em todos os graus de liberdade possíveis, de modo que ao zerar todas as opções, é obtida a restrição requerida em uma das extremidades. Para a outra extremidade basta desmarcar a opção **Dof1**, referente à direção longitudinal.