

As principais vantagens do uso de fibras naturais são biodegradabilidade, abundância, baixo custo de obtenção e baixa densidade. Este último, implica na obtenção de estruturas leves, as quais são cobiçadas em aplicações aeronáuticas e automotiva. Desta forma, este estudo tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico de compósitos poliméricos reforçados com fibras longas (não tratadas) de bambu (CPRFB) de forma experimental e computacional. O estudo experimental baseou-se na caracterização da fibra, obtenção e caracterização do CPRFB. Para determinar as propriedades mecânicas do CPRFB, o procedimento do ensaio de tração foi baseado nas normas ASTM D3039 e D3518. O CPRFB apresentou módulo de elasticidade longitudinal (E1) 8,98 GPa, módulo de elasticidade transversal (E2) 2,74 GPa, módulo de cisalhamento no plano (G12) 4,0 GPa e coeficiente de Poisson (ν_{12}) 0,309, sendo estes valores comparáveis aos valores da literatura. Finalmente, visando a aplicação estrutural dos segmentos aeronáuticos e automotivos, foi avaliado computacionalmente o comportamento mecânico do material proposto para ser utilizado no compartimento de manuais e mapas de avião e no capô de *buggy*. Através do Método dos Elementos Finitos (MEF) extraiu-se os carregamentos críticos da estrutura, as quais foram consideradas na Teoria Clássica dos Laminados (TCL), determinando as margens de segurança do projeto por meio dos critérios de falha de Tsai-Hill e Tsai-Wu. Ainda, utilizando um método de otimização baseado em derivadas determinou-se a melhor espessura e sequência de empilhamento das estruturas sob os respectivos carregamentos críticos. Desta forma, pode-se verificar as potencialidades e limitações de CPRFB em aplicações estruturais.

Orientador: Dr. Ricardo de Medeiros

Joinville, 2020

ANO
2020

KELVIN M. K. IWASAKI | ANÁLISE EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE BAMBU (*Guadua angustifolia*) VISANDO A APLICAÇÃO ESTRUTURAL



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA – PPGEM

DISSERTAÇÃO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E
COMPUTACIONAL DE
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
REFORÇADOS COM FIBRAS DE
BAMBU (*Guadua angustifolia*)
VISANDO A APLICAÇÃO
ESTRUTURAL**

KELVIN MASAKAZU KUROKI IWASAKI

JOINVILLE, 2020

KELVIN MASAKAZU KUROKI IWASAKI

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL DE COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE BAMBU (*GUADUA
ANGUSTIFOLIA*) VISANDO A APLICAÇÃO ESTRUTURAL**

Dissertação submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Dr. Ricardo de Medeiros

JOINVILLE - SC

2020

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Kuroki Iwasaki, Kelvin Masakazu
Análise experimental e computacional de compósitos
polméricos reforçados com fibras de bambu Guadua
angustifolia visando a aplicação estrutural / Kelvin Masakazu
Kuroki Iwasaki. -- 2020.
180 p.

Orientador: Ricardo De Medeiros
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Joinville, 2020.

1. Fibras de bambu. 2. Epóxi. 3. Compósitos de fibras de
bambu. 4. Teoria clássica dos laminados. 5. Abordagem
numérica. I. De Medeiros, Ricardo . II. Universidade do
Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

**Análise Experimental e Computacional de Compósitos Poliméricos Reforçados
com Fibras de Bambu (*Guadua Augustifolia*) Visando a Aplicação Estrutural**

por

Kelvin Masakazu Kuroki Iwasaki

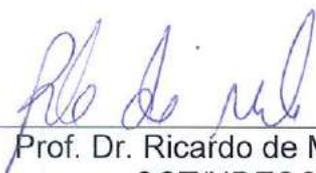
Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Área de concentração em "Modelagem e Simulação Numérica"
e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Ricardo de Medeiros
CCT/UEDESC
(Orientador/Presidente)

video conferência

Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante
da Costa
UTFPR



Profa. Dra. Daniela Becker
CCT/UEDESC

Joinville, SC, 17 de fevereiro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar este trabalho gostaria de expressar meus agradecimentos:

Ao meu pai, Masaki (*in memoriam*) e minha mãe, Yayoi, por terem me dado todo o amor e carinho e, principalmente, educação e orientações, os quais foram fundamentais no meu desenvolvimento pessoal e profissional.

A minha irmã, Kelly, e ao meu cunhado, Luiz, que são muito importantes na minha vida, por todo apoio, conselhos e incentivo.

Aos meus familiares pelo carinho e compreensão da minha ausência em diversas confraternizações em função das atividades relacionadas ao mestrado.

A minha namorada, Eliana, e a sua família, pelo companheirismo, amor, carinho e acolhimento.

Ao meu orientador, Professor Ricardo de Medeiros, pela paciência, pelo conhecimento compartilhado e por ter me ajudado a superar os momentos adversos encontrados neste presente trabalho desde o princípio até o fim.

Ao Saulo, Douglas, Carlos e Clayton e ao SENAI de Joinville por ter nos concedido o uso da máquina de tração e me auxiliado nos ensaios.

Aos professores do Departamento de Pós-Graduação de Ciência e Engenharia de Materiais, Daniela Becker, Marilena V. Folgueras e César E. da Costa pela disponibilidade e atenção em me auxiliar nos ensaios de termogravimetria, microscopia de varredura e picnometria de gás.

Aos meus amigos do mestrado, Felipe, Luísa, L. Gabriel, L. Souza, Luan, Vanessa, Gustavo, Pedro, Escobar, Gabriel e José pelo companheirismo, conversas e discussões.

Ao Caetano e Gustavo pelo auxílio nos ensaios mecânicos e tratamento de dados.

Aos professores do curso de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica por terem contribuído na minha formação, em especial ao Professor Eduardo L. Cardoso e ao Pablo A. Muñoz-Rojas.

A Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC por fornecer ensino de alta qualidade.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES 001) pelo suporte financeiro (PROMOP) e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC - 2017TR1747, 2017TR784 e 2019TR779).

Por fim, agradeço aos professores, Daniela Becker e Romeu R. C. da Costa, por terem aceitado a fazer parte da banca examinadora do presente trabalho.

RESUMO

KUROKI IWASAKI, Kelvin Masakazu, Análise Experimental e Computacional de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Bambu (*Guadua angustifolia*) Visando a Aplicação Estrutural. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Área: Modelagem e Simulação Numérica) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Joinville 2020.

Atualmente, a crescente preocupação de resguardar o meio ambiente e o interesse de utilizar recursos renováveis, tem instigado os pesquisadores e a indústria a adaptar seus projetos para uma abordagem eco sustentável. As principais vantagens do uso de fibras naturais são biodegradabilidade, abundância, baixo custo de obtenção e baixa densidade. Este último, implica na obtenção de estruturas leves, as quais são cobijadas em aplicações aeronáuticas e automotivas. Desta forma, este estudo tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico de compósitos poliméricos reforçados com fibras longas (não tratadas) de bambu (CPRFB) experimental e computacionalmente. O estudo experimental baseou-se na caracterização da fibra, obtenção e caracterização do CPRFB. Para determinar as propriedades elásticas do CPRFB, adotou-se as seguintes sequências de empilhamento ($[0^\circ]_3$, $[90^\circ]_3$, $[\pm 45^\circ]_{1S}$), as quais, foram baseadas nas normas ASTM D3039 e D3518. O CPRFB apresentou módulo de elasticidade longitudinal (E_1) 8,98 GPa, módulo de elasticidade transversal (E_2) 2,74 GPa, módulo de cisalhamento no plano (G_{12}) 4,0 GPa, coeficiente de Poisson (ν_{12}) 0,309, sendo estes valores foram comparáveis aos valores da literatura. Finalmente, visando a aplicação estrutural dos segmentos aeronáuticos e automotivos, o comportamento mecânico do material proposto, foi avaliada computacionalmente, sendo aplicado em estruturas como compartimento de manual e mapas de avião e capô de *buggy*. Para isso, através do Método dos Elementos Finitos (MEF) extraiu-se os carregamentos críticos da estrutura, os quais foram considerados na Teoria Clássica dos Laminados (TCL), e conseqüentemente determinadas as margens de segurança do projeto utilizando os critérios de falha de Tsai-Hill e Tsai-Wu. Ainda, através de um método de otimização baseado em derivadas determinou-se a melhor espessura e sequência de empilhamento das estruturas sob os respectivos carregamentos críticos. Desta forma, verificou-se as potencialidades e limitações de CPRFB em aplicações estruturais.

Palavras-chave: Fibras de bambu, Epóxi, Compósitos de fibras de bambu, Teoria Clássica dos Laminados, Abordagem numérica

ABSTRACT

KUROKI IWASAKI, Kelvin Masakazu, Experimental and Computational Analysis of Bamboo Fiber Reinforced Polymeric Composites (*Guadua angustifolia*) for Structural Application. 2020. Master Thesis (Master in Mechanical Engineering - Area: Numerical Modeling and Simulation) – Santa Catarina State University. Mechanical Engineering Graduate Program Joinville 2020.

The main advantages of natural fibers are biodegradability abundance, low cost obtaining, and low density. The latter allows obtaining lighter structures, which are desired in aeronautics and automotive applications. In this way, this study aims to evaluate the mechanical behavior of long bamboo fiber reinforced polymer composites (BFRPC) experimentally and computationally. The experimental study was based on fiber characterization, and manufacture and characterization of the BFRPC. So to determine the mechanical properties of the BFRPC, the stacking sequences adopted, according to D3039 and D3518 ASTM standards, was $([0^\circ]_3, [90^\circ]_3, [\pm 45^\circ]_{1S})$. The BFRPC presented longitudinal elastic modulus (E_1) 8.98 GPa, transversal elastic modulus (E_2) 2.74 GPa, shear modulus (G_{12}) 4.0 GPa, and Poisson ratio (ν_{12}) 0.309, which are comparable to values reported in the literature. Finally, aiming at the structural application in aeronautics and automotive segments, the mechanical behavior of the proposed material was applied in structures, such as manual and maps compartment, and buggy bonnet evaluated computationally. For that, through the Finite Element Method, it was extracted the critical membrane forces of structure, which were applied in Classical Laminated Theory (CLT), and consequently determined the safety margin of design, evaluated by the Tsai-Wu and Tsai-Hill failure criteria. Furthermore, using an optimization method based on derivatives, it was determined the better thickness and stacking sequence of the structure under respective forces and moments. In this way, it was possible to highlight the potentialities and the limitation of BFRPC in structural applications.

Key-words: Bamboo fiber, Epoxy, Bamboo fiber composite, Classical Laminated Theory, Numerical approach

Sumário

Lista de Figuras	17
Lista de Tabelas	21
1 Introdução	25
1.1 Justificativas e Motivação	28
1.2 Objetivos	29
1.3 Estrutura do Trabalho	30
2 Revisão bibliográfica	33
2.1 Materiais Compósitos	33
2.1.1 Classificação dos Materiais Compósitos	34
2.1.1.1 Compósitos Reforçados por Partículas	36
2.1.1.2 Compósitos Reforçados por Fibras	36
2.1.1.3 Compósitos Estruturais	37
2.1.2 Fibras Sintéticas	38
2.1.3 Fibras Naturais	38
2.1.3.1 Vantagens e Desvantagens	40
2.1.3.2 Microestrutura das Fibras Vegetais	41
2.1.3.3 Degradação Térmica das Fibras Vegetais	42
2.1.4 Bambu	42
2.1.4.1 Bambu <i>Guadua angustifolia</i>	43
2.1.4.2 Morfologia do Bambu	43
2.1.4.3 Diâmetros, Espessura de Parede e Comprimento Inter-nodal do Colmo	43
2.1.4.4 Microestrutura do Bambu	45
2.1.4.5 Extração de Fibras de Bambu	45
2.1.5 Compósitos Epoxídicos Reforçados com Fibras de Bambu	46
2.2 Análise Micromecânica de Materiais Compósitos	51
2.2.1 Regra das Misturas	51
2.2.2 Halphin-Tsai	52

2.3	Análise Macromecânica de Materiais Compósitos	54
2.3.1	Relação Tensão-Deformação	54
2.3.2	Teoria Clássica dos Laminados	57
2.4	Mecanismos de Falha em Materiais Compósitos	61
2.4.1	Descolamento das Fibras - (<i>Fiber Debonding</i>)	62
2.4.2	Falha da Fibra - (<i>Fiber Failure</i>)	63
2.4.3	Falha da Matriz - (<i>Matrix Cracking</i>)	63
2.4.4	Falhas Interlaminares - (<i>Delamination</i>)	63
2.5	Critérios de Falha de Materiais Compósitos	64
2.5.1	Critério de Falha da máxima tensão	64
2.5.2	Critério de Falha de Tsai-Hill	65
2.5.3	Critério de Falha de Tsai-Wu	66
2.6	Otimização Estrutural	68
3	Materiais e Métodos	71
3.1	Fibras de Bambu Extraídas por <i>Veneer Rotary Peeling</i>	72
3.2	Ensaio Experimentais da Fibra de Bambu	73
3.2.1	Ensaio da Densidade por Picnometria de Gás	73
3.2.2	Ensaio de Tração da Fibra de Bambu	74
3.2.3	Ensaio de Termogravimetria da Fibra de Bambu	76
3.2.4	Ensaio de Microscopia da fibra	76
3.3	Manufatura dos Corpos de Prova - CPRFB	77
3.3.1	Dimensões dos Corpos de Prova - CPRFB	81
3.4	Ensaio Experimentais do CPRFB	85
3.4.1	Ensaio de Tração do CPRFB	85
3.4.2	Ensaio de Termogravimetria do CPRFB	85
3.4.2.1	Ensaio de Termogravimetria do Epóxi	87
3.4.3	Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura do CPRFB	87
3.4.4	Determinação da Fração Volumétrica via Estéreo microscópio	88
3.5	Abordagem Numérica	88
3.5.1	Estudo de Caso I - Exemplo de uma Aplicação Aeronáutica	91
3.5.2	Estudo de Caso II - Exemplo de uma Aplicação Automotiva	95
4	Resultados e Discussões	99
4.1	Análise das Propriedades da Fibra de Bambu	99
4.1.1	Análise do Ensaio de Picnometria de Gás	99
4.1.2	Avaliação do Ensaio à Tração da Fibra de Bambu	100
4.1.3	Análise de Termogravimetria da Fibra de Bambu	104
4.1.4	Análise de Microscopia da Fibra de Bambu	106
4.2	Análise do Ensaio de Tração do CPRFB	106

4.2.1	Análise do Ensaio à Tração do CPRFB $[0^\circ]_3$	106
4.2.2	Análise do Ensaio de Tração do CPRFB $[90^\circ]_3$	110
4.2.3	Análise do Ensaio de Tração do CPRFB $[\pm 45^\circ]_{1S}$	114
4.3	Análise de Termogravimetria do Epóxi e CPRFB	120
4.4	Análise da Superfície de Falha dos CPRFB	122
4.4.0.1	Análise da Fração Volumétrica via Estereomicroscópio	124
4.4.1	Abordagem Computacional	124
4.4.1.1	Estudo de Caso I: Aplicação em um Estrutura Aeronáutica	124
4.4.1.2	Estudo de Caso II: Aplicação em uma Estrutura Automotiva	136
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	155
5.1	Conclusões	155
5.2	Trabalhos Futuros	158
	Referências Bibliográficas	161
	Appendix	169
A	Cálculo Analítico das Propriedades Mecânicas	169
A.1	Método das Resistência Máximas	169
A.1.1	Resistência à Compressão Transversal do CPRFB	169
A.1.2	Resistência à Tração Longitudinal do CPRFB	170
A.2	Regra das Misturas	171
A.2.1	Densidade do CPRFB	171
A.2.2	Módulo de Elasticidade Longitudinal do CPRFB	171
A.2.3	Módulo de Elasticidade Transversal do CPRFB	171
A.2.4	Módulo de Cisalhamento do CPRFB	172
A.2.5	Coeficiente de Poisson do CPRFB	172
A.2.6	Resistência à Tração Máxima do CPRFB	172
A.3	Halpin-Tsai	173
A.3.1	Módulo de Elasticidade Transversal do CPRFB	173
A.3.2	Módulo de Cisalhamento do CPRFB	173
A.4	Módulo de Cisalhamento do CPRFB no Plano 2-3	174
B	Propriedades Físicas e Mecânicas das Fibras de Bambu	175
B.1	Propriedades Físicas e Mecânicas das Fibras de Bambu	175
B.2	Gráficos Tensão x Deformação das fibras de bambu	177
C	Cálculo da Quantidade de Resina	179

Lista de Figuras

1.1	Número de publicações referente a materiais compósitos reforçados de fibras naturais ao longo dos últimos anos.	26
1.2	Componentes do Mercedes-Benz E-Class fabricados com compósitos reforçados de fibras vegetais.	27
2.1	Classificação dos compósitos de acordo com a matriz.	35
2.2	Classificação dos compósitos de acordo com o reforço.	36
2.3	Principais tipos de tecido.	37
2.4	Classificação das fibras naturais de acordo com a sua origem.	40
2.5	Estrutura de uma fibra vegetal.	41
2.6	Morfologia do bambu.	44
2.7	(a) Variação do comprimento internodal ao longo do comprimento do colmo, (b) variação do diâmetro ao longo do comprimento do colmo (c) variação da espessura de parede ao longo do comprimento do colmo.	44
2.8	(a) Área da seção transversal da parede do colmo <i>Guadua angustifolia</i> , (b) Composição do feixe vascular (1) metaxilema, (2) floema, (3) protoxilema, (4) fibras, e (5) tecido parenquimatoso, (c) composição das fibras elementares.	46
2.9	Material ortotrópico com seus respectivos planos.	55
2.10	Coordenadas globais e locais de um laminado.	57
2.11	(a) Forças resultantes no laminado, (b) Momento resultante no laminado.	60
2.12	Mecanismo de falha em materiais compósitos poliméricos.	62
2.13	Comparação entre os três envelopes de falha: Máxima tensão, Tsai-Wu e Tsai-Hill.	67
2.14	Procedimento geral de um algoritmo de otimização numérica.	70
3.1	Procedimento da metodologia geral do trabalho.	72
3.2	(a) Extração mecânica via <i>veneer rotary peeling</i> , (b) comprimento das fibras de bambu.	73
3.3	Fibras de bambu extraídas conforme a região do colmo - (a) topo, (b) meio, (c) base.	73

3.4	(a) Dispositivo de picnometria de gás, (b) balança.	74
3.5	(a) Máquina universal de testes, (b) corpos de prova do ensaio à tração de fibra de bambu, (c) dimensões do corpo de prova (<i>mm</i>).	75
3.6	Micrômetro externo digital.	75
3.7	Analizador térmico simultâneo Netzsch STA 449 C.	76
3.8	Estereomicroscópio Leica MZ9.5.	77
3.9	Molde de aço carbono.	78
3.10	Aplicação do agente e tecido desmoldante.	79
3.11	Empilhamentos das fibras de bambu de acordo com suas respectivas sequências e orientações.	79
3.12	Aplicação do vácuo.	80
3.13	Placa de matriz epóxi reforçado com fibras de bambu impregnada. . . .	80
3.14	(a) Máquina de corte, (b) corpos de prova (<i>mm</i>).	81
3.15	(a) Máquina universal de testes Instron, (b) corpo de prova fixado na garra, (c) pontos de medições dos deslocamentos transversais e longitudinais.	86
3.16	Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM 7100F.	87
3.17	Fluxograma do procedimento da abordagem numérica proposta.	90
3.18	Seleção de uma estrutura aeronáutica - Compartimento de manuais e mapas.	92
3.19	Modelo da estrutura - Dimensões do compartimento de manuais e mapas (<i>mm</i>).	93
3.20	Condições de contorno e carregamento do modelo computacional do compartimento de CPRFB.	94
3.21	Elemento de casca S4R.	94
3.22	Malha do compartimento de manual e mapas de CPRFB via Abaqus sem refinamento.	95
3.23	<i>Buggy</i> com o capô em destaque.	96
3.24	Dimensões do capô do <i>buggy</i> (<i>mm</i>) adotado no modelo computacional.	96
3.25	Condições de contorno do modelo computacional do capô.	97
3.26	Malha do capô de <i>buggy</i> de CPRFB via Abaqus sem refinamento. . . .	97
4.1	Gráficos tensão vs. deformação do ensaio de tração da fibra de bambu (amostras do topo).	101
4.2	Gráficos tensão vs. deformação do ensaio de tração da fibra de bambu (amostras do meio).	102
4.3	Gráficos tensão vs. deformação do ensaio de tração da fibra de bambu (amostras da base).	103
4.4	Análise de termogravimetria da fibra de bambu.	105

4.5	Análise da superfície da fibra de bambu.	106
4.6	Resultados dos ensaios à tração CDPT- $[0^\circ]_3$ - Gráfico tensão vs. deformação.	108
4.7	Resultados dos ensaios à tração CDPM - $[0^\circ]_3$ - Gráfico tensão vs. deformação.	109
4.8	Resultados dos ensaios à tração CDPB - $[0^\circ]_3$ - Gráfico tensão vs. deformação.	110
4.9	Resultados dos ensaios à tração CDPB - $[90^\circ]_3$ - Gráfico tensão vs. deformação.	111
4.10	Resultados dos ensaios à tração CDPM - $[90^\circ]_3$ - Gráfico tensão vs. deformação.	112
4.11	Resultados dos ensaios à tração CDPB - $[90^\circ]_3$ - Gráfico tensão vs. deformação.	113
4.12	Resultados dos ensaios à tração CDPT - $[\pm 45^\circ]_{1S}$ - Gráfico tensão vs. deformação.	115
4.13	Resultados dos ensaios à tração CDPM - $[\pm 45^\circ]_{1S}$ - Gráfico tensão vs. deformação.	116
4.14	Resultados dos ensaios à tração CDPB - $[\pm 45^\circ]_{1S}$ - Gráfico tensão vs. deformação.	117
4.15	Termogravimetria do epóxi.	121
4.16	Termogravimetria do CPRFB.	121
4.17	Análise de fractografia dos CPRFB, fibras do topo, empilhados à $[\pm 45^\circ]_{1S}$	122
4.18	Análise de fractografia dos CPRFB, fibras do topo, empilhados à $[0^\circ]_3$	123
4.19	Análise de fractografia dos CPRFB, fibras do topo, empilhados à $[90^\circ]_3$	123
4.20	(a) Análise de fração volumétrica por microscopia do CPRFB, (b) Identificação de fases fibra-matriz.	124
4.21	Análise de refino de malha do compartimento de manual e mapas de CPRFB.	125
4.22	Malha refinada do compartimento de manual e mapas de CPRFB via Abaqus.	125
4.23	Forças resultantes do compartimento de manual e mapas de CPRFB com 4 lâminas $[0/90/90/0]$ via MEF.	126
4.24	Momentos resultantes do compartimento de manual e mapas de CPRFB com 4 lâminas $[0/90/90/0]$ via MEF.	126
4.25	Função objetivo do método de otimização baseado em derivadas	130
4.26	Forças resultantes do compartimento de manual e mapas de CPRFB com 3 lâminas $[0/0/0]$ via MEF.	132
4.27	Momentos resultantes do compartimento de manual e mapas de CPRFB com 3 lâminas $[0/0/0]$ via MEF.	133

4.28	Análise de convergência do capô do <i>buggy</i> de CPRFB.	136
4.29	Malha refinada do capô do <i>buggy</i> de CPRFB.	137
4.30	Extração das forças resultantes da seção crítica do capô do <i>buggy</i> com 12 lâminas.	137
4.31	Extração dos momentos resultantes da seção crítica do capô do <i>buggy</i> com 12 lâminas.	138
4.32	Função objetivo do método de otimização baseado em derivadas - Capô do <i>buggy</i> 16 lâminas	143
4.33	Extração das forças resultantes da seção crítica do capô do <i>buggy</i> com 16 lâminas.	146
4.34	Extração dos momentos resultantes da seção crítica do capô do <i>buggy</i> com 16 lâminas.	146
4.35	Função objetivo do método de otimização baseado em derivadas - Capô do <i>buggy</i> 21 lâminas	150
4.36	Deslocamento máximo do capô do <i>buggy</i> de CPRFB com 21 lâminas extraído via MEF.	153
B.1	Gráfico Tensão vs. Deformação da fibra de bambu extraída do topo do colmo.	177
B.2	Gráfico Tensão vs. Deformação da fibra de bambu extraída do meio do colmo.	177
B.3	Gráfico Tensão vs. Deformação da fibra de bambu extraída da base do colmo.	178

Lista de Tabelas

1.1	Propriedades específicas das fibras naturais e sintéticas.	28
2.1	Propriedades mecânicas e físicas das fibras sintéticas.	38
2.2	Propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais.	39
2.3	Propriedades mecânicas e físicas dos BFRCE.	50
3.1	Dimensões do corpo de prova com fibras extraídas da região da base do colmo.	82
3.2	Dimensões do corpo de prova com fibras extraídas da região do meio do colmo.	83
3.3	Dimensões do corpo de prova com fibras extraídas da região do topo do colmo.	84
3.4	Propriedades mecânicas do CPRFB utilizados na abordagem numérica.	89
3.5	Resistências do CPRFB utilizados na abordagem numérica.	89
3.6	Dimensões, espessura e sequência de empilhamento do compartimento de manuais e mapas.	92
4.1	Densidades de fibras naturais e fibra de vidro.	99
4.2	Análise estatística das propriedades mecânicas da fibra de bambu . . .	104
4.3	Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[0^\circ]_3$ - Topo.	107
4.4	Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[0^\circ]_3$ - Meio.	108
4.5	Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[0^\circ]_3$ - Base.	109
4.6	Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[90^\circ]$ - Topo.	111
4.7	Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[90^\circ]_3$ - Meio.	112
4.8	Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[90^\circ]_3$ - Base.	113

4.9	Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[\pm 45^\circ]_{1S}$ - Topo.	115
4.10	Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[\pm 45^\circ]_{1S}$ - Meio.	116
4.11	Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[\pm 45^\circ]_{1S}$ - Base.	117
4.12	Comparações das propriedades mecânicas experimentais e analíticas do CPRFB.	119
4.13	Comparações entre propriedades mecânicas experimentais e da literatura do CPRFB.	120
4.14	Esforços da seção crítica extraído via MEF do compartimento de manuais e mapas fabricado de CPRFB com 4 lâminas - Sequência de empilhamento inicial $[0/90/90/0]$	127
4.15	Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada -125 (<i>mm</i>) - Sequência de empilhamento inicial com 4 lâminas.	128
4.16	Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada $0,74$ (<i>mm</i>) - Sequência de empilhamento inicial com 4 lâminas.	128
4.17	Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada 125 (<i>mm</i>) - Sequência de empilhamento inicial com 4 lâminas.	129
4.18	Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada -125 (<i>mm</i>) - Sequência de empilhamento inicial com 3 lâminas.	131
4.19	Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada $0,74$ (<i>mm</i>) - Sequência de empilhamento inicial com 3 lâminas.	131
4.20	Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada 125 (<i>mm</i>) - Sequência de empilhamento inicial com 3 lâminas.	132
4.21	Novos esforços da seção crítica extraído via MEF do compartimento de manuais e mapas fabricado de CPRFB com 3 lâminas.	133

4.22 Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada -125 (<i>mm</i>) - Sequência de empilhamento otimizada com 3 lâminas.	134
4.23 Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada 0,74 (<i>mm</i>) - Sequência de empilhamento otimizada com 3 lâminas,	134
4.24 Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada 125 (<i>mm</i>) - Sequência de empilhamento otimizada com 3 lâminas.	135
4.25 Massa das estruturas de CPRFB e CPRFV.	136
4.26 Esforços da seção crítica extraído via MEF do capô do <i>buggy</i> fabricado de CPRFB com 12 lâminas.	138
4.27 Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do capô do <i>buggy</i> de CPRFB considerando as superfícies médias - Sequência de empilhamento inicial.	140
4.28 Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do capô do <i>buggy</i> de CPRFB considerando as superfícies médias - Sequência de empilhamento com 12 lâminas - Mínimo.	141
4.29 Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do capô do <i>buggy</i> de CPRFB considerando as superfícies médias - Sequência de empilhamento com 12 lâminas - Máximo.	142
4.30 Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do capô do <i>buggy</i> de CPRFB considerando as superfícies médias - Sequência de empilhamento com 16 lâminas - Mínimo.	144
4.31 Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do capô do <i>buggy</i> de CPRFB considerando as superfícies médias - Sequência de empilhamento com 16 lâminas - Máximo.	145
4.32 Novos esforços da seção crítica extraído via MEF do capô do <i>buggy</i> fabricado de CPRFB com 16 lâminas.	147
4.33 Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do capô do <i>buggy</i> de CPRFB considerando as superfícies médias e novos esforços - Sequência de empilhamento com 16 lâminas - Mínimo.	148
4.34 Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do capô do <i>buggy</i> de CPRFB considerando as superfícies médias e novos esforços - Sequência de empilhamento com 16 lâminas - Máximo.	149
4.35 Novos esforços da seção crítica extraído via MEF do capô do <i>buggy</i> fabricado de CPRFB com 21 lâminas.	150

4.36 Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do capô do <i>buggy</i> de CPRFB considerando as superfícies médias e novos esforços - Sequência de empilhamento com 21 lâminas - Mínimo.	151
4.37 Comparação dos resultados obtidos com os da literatura.	153
A.1 Propriedades mecânicas e físicas do CPRFB, epóxi e fibra de bambu. .	170
B.1 Propriedades físicas e mecânicas das fibras de bambu - amostras do topo.	175
B.2 Propriedades físicas e mecânicas das fibras de bambu - amostras do meio.	176
B.3 Propriedades físicas e mecânicas das fibras de bambu - amostras da base.	176
C.1 Propriedades físicas do CPRFB $[0^\circ]_3$ - Fibras do topo.	179
C.2 Volume e frações volumétricas de cada fase (fibra e matriz) do CPRFB.	179
C.3 Propriedades físicas de cada fase (fibra e matriz) e do CPRFB.	180

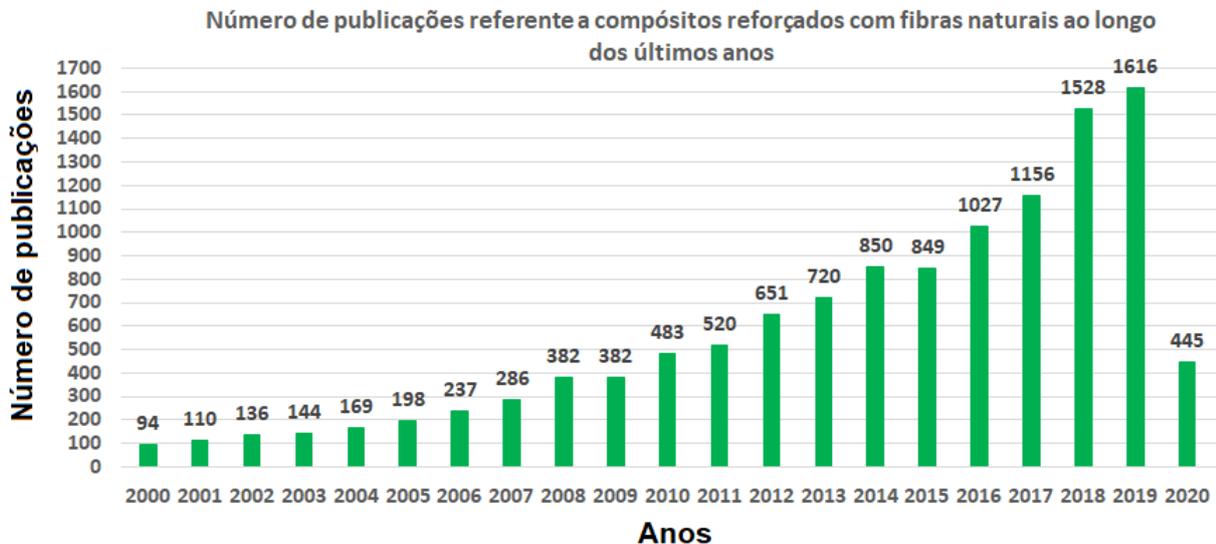
Capítulo 1

Introdução

O uso de materiais compósitos reforçado com fibras naturais teve seu início com os egípcios, há 3000 anos. Eles construíam as paredes de suas casas com tijolos de argila reforçados com palhas (PEPONI *et al.*, 2008). Até a década de 60, as fibras vegetais eram muito utilizadas, principalmente na indústria automobilística. Entretanto, com o surgimento das fibras sintéticas na década de 70 e 80, as fibras vegetais foram substituídas pelas sintéticas (GUIMARÃES Jr.; NOVACK; BOTARO, 2010). Atualmente, as propriedades mecânicas dos materiais compósitos reforçados com fibras sintéticas, em sua maioria, ainda são superiores aos dos compósitos reforçados com fibras naturais. No entanto, a crescente preocupação de resguardar o meio ambiente e o interesse de utilizar materiais derivados de recursos renováveis, tem instigado os pesquisadores e a indústria a adaptar seus projetos para uma abordagem eco sustentável, marcando o retorno do uso de fibras vegetais em determinadas aplicações (RANA; FANGUEIRO, 2016; PARDINI; NETO, 2006; KORONIS; SILVA, 2018). A Figura 1.1 mostra o aumento de publicações referentes a compósitos reforçados com fibras naturais ao longo dos últimos 20 anos.

As fibras vegetais apresentam diversas vantagens sobre as fibras sintéticas (PARDINI; NETO, 2006; GUIMARÃES Jr.; NOVACK; BOTARO, 2010), tais vantagens são baixo custo, baixa densidade e são encontradas com muita abundância no meio ambiente. Além disso, suas propriedades mecânicas específicas são comparáveis aos das fibras convencionais (como fibra de vidro), são biodegradáveis, de origem renovável, não requerem alta energia para obtenção das fibras e podem ser usadas como combustível para gerar energia (HARGITAI; RÁCZ; ANANDJIWALA, 2008; HEBEL *et al.*, 2014; JOSHI *et al.*, 2004). Ainda, as plantas apresentam a propriedade de fixar dióxido de carbono em sua estrutura, durante a sua fase de produção, podendo minimizar ou até mesmo neutralizar a poluição causada pela emissão de gases de todos segmentos, principalmente da indústria de transportes, a qual sua contribuição corresponde à cerca de 20 a 25% (HOLBERY; HOUSTON, 2006; RAJESH; PITCHAIMANI; RAJINI, 2016; KORONIS; SILVA, 2018). Por outro lado, apresentam algumas desvantagens como baixa adesão

Figura 1.1 – Número de publicações referente a materiais compósitos reforçados de fibras naturais ao longo dos últimos anos.



Fonte: Science (2019)

com algumas resinas poliméricas, alta absorção de umidade, limitação de temperatura no processo de fabricação e baixa resistência ao fogo (AZWA *et al.*, 2013; FAZITA *et al.*, 2016).

Nos últimos anos, a imposição de leis com a finalidade de exigir o uso de materiais renováveis em seus produtos vem forçando as indústrias a adequarem seus projetos, substituindo o uso de fibras sintéticas por fibras naturais, em especial as fibras vegetais que são mais abundantes (ZAKIKHANI *et al.*, 2014). A indústria automotiva é um dos segmentos que vem adequando seus projetos e beneficiando-se das vantagens mencionadas. Desde o ano de 2006, a União Europeia impôs, por meio de leis, que cerca de 80% de um veículo deve ser fabricado de materiais recicláveis ou reutilizados. Já no Japão, incluindo componentes que podem ser incinerados, o percentual estabelecido é de 88%. Por exemplo, empresas como a Mercedes-Benz têm fabricado componentes de veículos com materiais reforçados com fibras vegetais, tais como o linho, o sisal, o algodão, e o cânhamo. Os componentes já manufaturados são revestimentos de portas, forros de encosto e painéis de piso (conforme Figura 1.2). Vale ressaltar que o uso destes componentes proporcionaram uma redução de aproximadamente 40% da massa total do veículo quando comparado com os componentes fabricados de fibras de vidro. Outras empresas como DaimlerChrysler, BMW e General Motors também já fabricam componentes reforçados com fibras vegetais (HOLBERY; HOUSTON, 2006).

Figura 1.2 – Componentes do Mercedes-Benz E-Class fabricados com compósitos reforçados de fibras vegetais.



Fonte: adaptado de Holbery e Houston (2006)

No segmento aeronáutico, o qual apresenta total interesse em reduzir a massa de sua estrutura para reduzir o consumo de combustível, o uso de compósitos naturais são encontrados em estruturas de interior de aviões, principalmente em móveis de jatos executivos, como mesas. No entanto, há poucas documentações que apresentem informações em relação ao emprego de Compósitos Reforçados com Fibras Vegetais (CRFV) em estruturas aeronáuticas. Devido a isso, desde de 2008, o Grupo de Estruturas Aeronáuticas (GEA), da Escola e Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP), iniciou o desenvolvimento de investigações de estudos sobre a aplicabilidade de CRFV em estruturas aeronáuticas de interior (VERA, 2012).

Diante do exposto, e considerando que há poucas investigações acerca de compósitos reforçados com fibras vegetais, principalmente com fibras longas de bambu, o presente trabalho tem como motivação contribuir na documentação de possíveis aplicações de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bambu, bem como avaliar seu comportamento mecânico experimentalmente e computacionalmente. As fibras de bambu, da espécie *Guadua angustifolia*, foram extraídas por um método baseado na extração de lâminas de madeira, denominado *veneer rotary peeling*. Vale ressaltar que este método mecânico não tem sido relatado nas literaturas. Desta forma, buscou-se verificar as influências que as fibras obtidas por este método não tradicional apresenta nas propriedades deste compósito.

1.1 Justificativas e Motivação

Dentre as fibras vegetais o bambu se destaca devido a relação de alta resistência mecânica por unidade de massa, como mostrado na Tabela 1.1. Além disso, o plantio do bambu pode trazer benefícios sócio-econômicos e ecológicos (SÁNCHEZ; CAPOTE; CARRILLO, 2019). Os benefícios ecológicos são as reduções de deslizamentos, erosões, absorção de dióxido de carbono, propagação em regiões inóspitas, onde outros vegetais não conseguiriam sobreviver, além de converter terrenos improdutivos em produtivos. Já os benefícios sócio-econômicos são gerar uma fonte de renda aos produtores que além de fornecer matéria prima para obtenção de fibras de bambu, também podem fornecer a matéria prima, no seu formato natural, para empresas do segmento moveleiro, design de interiores e construção civil (ZAKIKHANI *et al.*, 2014; GUIMARÃES Jr.; NOVACK; BOTARO, 2010).

Tabela 1.1 – Propriedades específicas das fibras naturais e sintéticas.

Fibra	^(a) RTE (MPa)	^(b) MEE (GPa)
⁽¹⁾ ⁽²⁾ Bambu	100 - 1333,3	7,86 - 91,67
⁽¹⁾ ⁽²⁾ Linho	262 - 1000	33 - 80
⁽¹⁾ ⁽³⁾ Juta	271 - 689,7	9 - 41,5
⁽¹⁾ ⁽²⁾ Coco	96 - 264,3	12 - 38,3
⁽¹⁾ Sisal	224,7 - 275,3	5,3 - 6,7
⁽¹⁾ ⁽³⁾ Vidro	444,4 - 1480	25,93 - 28

^(a) Resistência à Tração Específica, ^(b) Módulo de Elasticidade Específico, ⁽¹⁾ (OSORIO *et al.*, 2011), ⁽²⁾ (DEFOIRDT *et al.*, 2010), ⁽³⁾ (RAMESH; SUDHARSAN, 2018), ⁽⁴⁾

Segundo Guimarães Jr., Novack e Botaro (2010), o Brasil é o país com maior número de espécies de bambu no mundo, com 34 gêneros e 232 espécies. Estas espécies, nativas e exóticas, correspondem à 8 milhões de hectares, o que representa 36% de área produtiva do mundo. As que mais se destacam são as espécies do gênero nativo *Guadua*, *Merostachys* e *Chusquea* e os gêneros exóticos como *Bambusa*, *Dendrocalamus* e *Phyllostachys* (AZZINI; BERALDO, 2001).

O maior plantio comercial no Brasil se encontra na região nordeste, no Maranhão, com uma área de aproximadamente 30.000 hectares. No estado de São Paulo, nas cidades de Pardinho e Mogi das Cruzes, onde são cultivadas 62 espécies de bambu e apresentam uma área com 120 hectares de bambu, respectivamente. Já no estado de Santa Catarina, as cidade que apresentam cultivos expressivos no estado, são Frei Rogério e Rio Negrinho, com 40 e 100 hectares, respectivamente (ORNELLAS *et al.*, 2017). Mesmo tendo uma vasta plantação disponível, as fibras de bambu ainda não estão sendo aplicadas em componentes estruturais secundários. Espera-se que

assim como na União Europeia e Japão, sejam impostas leis que exijam a produção de componentes que sejam obtidos a partir de fontes renováveis e possam ser reutilizadas. Desta maneira, será possível fortalecer a ideia de implementar uma cadeia produtiva e se tornar um potencial concorrente da China, a qual é líder da indústria de bambu (CHINA.ORG, 2010).

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o comportamento mecânico do compósito polimérico (matriz epoxídica) reforçado com fibras longas de bambu, de experimentalmente e computacionalmente, visando a aplicação em estruturas que possam substituir compósitos reforçados com fibras sintéticas. Considerando a abrangência deste trabalho, optou-se por subdividir o objetivo geral da seguinte maneira:

- Estudar a microestrutura das fibras de bambu, a fim de obter uma melhor compreensão sobre elas. Realizar ensaio de tração quase-estático de uma fibra singular para determinar as propriedades da fibra de bambu, os quais a partir delas, as propriedades analíticas do compósito são calculadas. Da mesma maneira, para estimar a densidade do compósito de forma analítica, determinou-se a densidade da fibra do bambu por meio do ensaio de picnometria. Por fim, para avaliar o comportamento de degradação térmica da fibra de bambu, utilizou-se o ensaio de termogravimetria.
- Determinar um método de manufatura do Compósito Polimérico Reforçado com Fibras de Bambu (CPRFB) e preparar os corpos de prova a partir das placas fabricadas, conforme as normas ASTM D3039 e D3518. Submetendo os corpos de prova ao ensaio de tração para determinação das propriedades mecânicas do CPRFB, tais como E_1 (módulo de elasticidade longitudinal), E_2 (módulo de elasticidade transversal), G_{12} (módulo de cisalhamento) e ν_{12} (coeficiente de Poisson).
- Avaliar o comportamento de degradação térmica do CPRFB por meio do ensaio de termogravimetria e, assim estimar a fração volumétrica de cada fase do compósito. Além disso, afim de realizar uma comparação entre diferentes métodos de obtenção da fração volumétrica, será utilizado o estereomicroscópio ótico. Uma vez que tendo as respectivas frações volumétricas de cada fase, calcular as propriedades mecânicas do compósito analiticamente;
- Realizar análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com a finalidade de verificar os mecanismos de falha presente na superfície de fratura;

- Avaliar duas estruturas fabricadas com CPRFB, segmento aeronáutico e automotivo, que considerará os carregamentos atuantes. Desta forma, será determinado os esforços solicitantes mais críticos da estrutura via Elementos Finitos. A análise de falha da estrutura empregará as propriedades elásticas e valores de resistência obtidas experimentalmente e analiticamente.
- Obter a melhor sequência de empilhamento das fibras e número de camadas sob dadas condições de carregamento, por meio de um método de otimização. O compósito com as novas sequência de empilhamento e número de camadas serão avaliadas pela metodologia proposta até obter a Margem de Segurança estabelecida.

1.3 Estrutura do Trabalho

A estrutura do trabalho está organizada de acordo com a seguinte forma:

- **Capítulo 1: Introdução** - Este capítulo faz uma abordagem introdutória acerca do tema proposto, bem como seus objetivos, motivações e escopo do estudo;
- **Capítulo 2: Revisão Bibliográfica** - Este capítulo apresenta as revisões bibliográficas sobre compósitos, fibras vegetais, bambu, fibras de bambu, principais métodos de extração de fibra de bambu, compósitos epoxídicos reforçados com fibras de bambu, análise micro e macro mecânica, análise de tensão-deformação de compósitos, Teoria Clássica dos Laminados, mecanismos de falha em materiais compósitos poliméricos e critérios de falha em materiais compósitos e otimização estrutural;
- **Capítulo 3: Materiais e Métodos** - Neste capítulo, a metodologia geral e metodologia de cada ensaio é apresentada. São descritas o processo de obtenção das fibras de bambu e ensaios relacionados à fibra como o ensaio de picnometria de gás, ensaio de tração, análise de termogravimetria e microscopia da fibra. Além disso, demonstra o processo de manufatura do CPRFB, bem como os ensaios de tração, termogravimetria, ensaio de microscopia eletrônica de varredura e determinação da fração volumétrica via estereomicroscópio. Por fim, a proposta de abordagem numérica é apresentada.
- **Capítulo 4: Resultados e Discussões** - Este capítulo apresenta os resultados e discussões de todos os ensaios experimentais relacionados à fibra e aos compósitos, conforme descrito no Capítulo 3. Além disso, os resultados e discussões da proposta da abordagem numérica, a qual utilizou uma metodologia de otimização é descrita.

- **Capítulo 5: Conclusões e Trabalhos Futuros** - São apresentados as principais conclusões obtidas no presente trabalho considerando as discussões e resultados do Capítulo 5. Desta maneira, finaliza-se a dissertação ressaltando as contribuições deste estudo e alguns tópicos a ser aprimorado em trabalhos futuros.
- **Capítulo 6: Referências Bibliográficas** - Estão dispostas todas as literaturas consultadas para a fundamentação teórica e comparação de resultados do presente trabalho.
- **Anexos:** - Apresentam materiais complementares como cálculos analíticos de propriedades mecânicas do CPRFB; tabelas e gráficos referentes ao ensaio de tração da fibra de bambu; e cálculo de quantidade de resina, a fim de auxiliar na argumentação e explicação do texto.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Este capítulo tem como finalidade fornecer um embasamento teórico dos principais conteúdos abordados para auxiliar nas discussões dos resultados obtidos deste trabalho.

2.1 Materiais Compósitos

Antes dos anos 2000, o material compósito não era muito difundido devido ao seu alto custo de obtenção. No entanto, pelo fato dos materiais compósitos apresentarem uma relação de ótimas propriedades mecânicas por massa específica, os pesquisadores passaram a aperfeiçoar os estudos deste material com a finalidade de substituir materiais convencionais, como os metálicos (REZENDE; BOTELHO, 2000). Considerando o cenário atual de crise energética e preocupação com o meio ambiente, reduzir a massa da estrutura do veículo transportador ou da carga é extremamente conveniente, pois pode-se aumentar a eficiência do consumo de combustíveis dos meios de transporte (RANA; FANGUEIRO, 2016). Além disso, os materiais compósitos se caracterizam pela alta resistência à corrosão; resistência à abrasão; capacidade de suportar altas temperaturas; resistência à fadiga e baixos custos de montagem (MENDONÇA, 2005; CAMPBELL, 2011). Suas principais aplicações estão direcionadas aos segmentos de infraestrutura, marinha, materiais esportivos, automotivo, aeronáutico, militar, médica e aeroespacial (MALLICK, 2007; PARDINI; NETO, 2006).

Conforme Jones (1999), os materiais compósitos são uma combinação de dois ou mais materiais, fase dispersa e fase matriz, em uma escala macroscópica, com a finalidade de obter um terceiro material. O termo macroscópico significa que os componentes podem ser identificados a olho nu. Muitos materiais podem ser combinados em uma escala microscópica, como por exemplo as ligas metálicas, no entanto o material resultante não pode ser distinguido a olho nu, ou seja, macroscopicamente são homogêneos. A fase dispersa, ou no âmbito da engenharia mecânica, também chamado

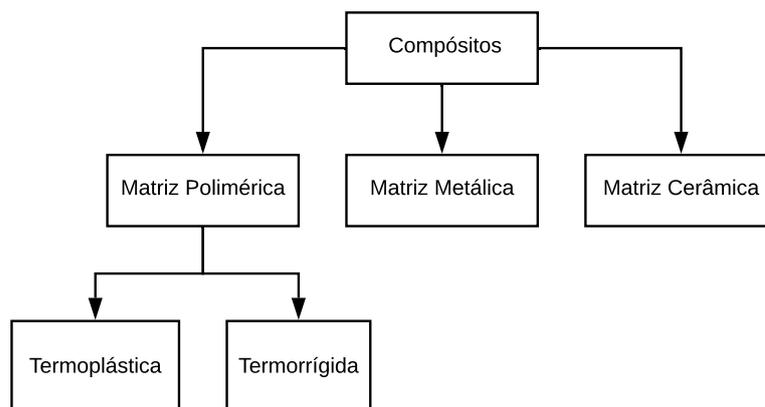
de reforço (fibra), é responsável por suportar o carregamento transferido pela matriz que a envolve. A matriz por sua vez, conhecida como fase contínua, além de transferir o carregamento para a fibra, fixa-a e protege-a de degradações causadas pela umidade e agentes químicos (MALLICK, 2007; CALLISTER, 2000). A combinação destes materiais visa obter propriedades que não conseguem ser obtidas pelos constituintes quando consideradas de forma individual, tais como resistência, rigidez, impacto, fadiga, condutibilidade térmica, condutibilidade elétrica e resistência à corrosão. Vale ainda ressaltar que estas propriedades, em sua maioria, apresentam valores intermediários ao das fibras e a da matriz, isto é, são inferiores ao das fibras e superiores ao das matrizes (MENDONÇA, 2005). Ainda, as propriedades mecânicas das matrizes, em geral, são menores que as fibras (KAW, 2005).

Esta classe de material permite obter um novo material de acordo com as propriedades desejáveis em um projeto, por meio de inúmeras combinações. Tais fatores que implicam consideravelmente nas propriedades mecânicas dos compósitos são os percentuais, tamanho, forma, distribuição e orientações das fibras. Além disso, o tipo de matriz e a interação que a mesma apresenta com a fibra é um fator essencial para um bom desempenho de um compósito, pois desta maneira assegura-se o transferência de carregamento da matriz para o reforço (CALLISTER, 2000; MENDONÇA, 2005). Por outro lado, apresentam desvantagens como alto custo de fabricação, complexidade no procedimento de caracterização do compósito e suas propriedades mecânicas nem sempre são as melhores em todas as direções, pois são fracas nas direções transversais às fibras (KAW, 2005; CAMPBELL, 2011).

2.1.1 Classificação dos Materiais Compósitos

Os materiais compósitos podem ser classificados através das matrizes e reforços pelas quais são fabricadas. Conforme Figura 2.1, as matrizes são divididas em poliméricas, metálicas e cerâmicas e os reforços em naturais, sintéticos e híbridos (PARDINI; NETO, 2006; MALLICK, 2007). Os compósitos de matriz metálica (CMM) apresentam vantagens sobre os metais monolíticos, como alto módulo específico, boas propriedades mecânicas à temperaturas elevadas e baixo coeficiente de expansão térmica. Já os de matriz cerâmica (CMC), apresentam alta dureza, resistência e rigidez. Por fim, os compósitos de matriz polimérica (CMP) são a classe mais utilizada, devido às suas boas propriedades quando reforçada e por não requerer altas energias durante o processo de fabricação (CHANDRAMOHAN; MARIMUTHU *et al.*, 2011).

Figura 2.1 – Classificação dos compósitos de acordo com a matriz.



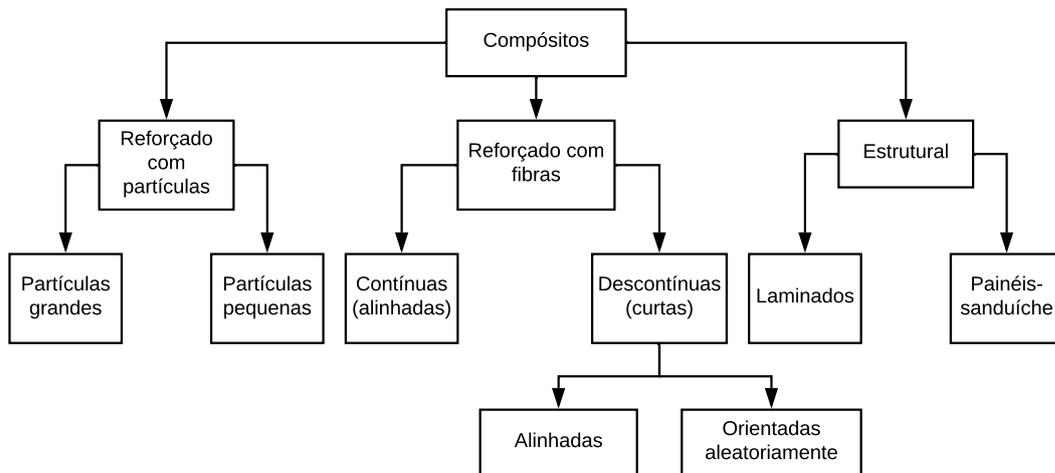
Fonte: adaptado de Nicolais, Meo e Milella (2011)

As matrizes poliméricas são divididas em duas classes, termorrígidas (termofixas) e termoplásticas. As matrizes termorrígidas, usualmente, consistem de uma resina misturada com um agente catalisador compatível com a mesma. O volume deste catalisador pode variar de acordo com cada aplicação, sendo este um fator determinante no tempo de cura. Uma vez que definido o volume de catalisador (normalmente indicado pelo fabricante), durante este processo de reação de cura, inúmeras ligações cruzadas são geradas entre as cadeias poliméricas formando uma rede com ligações covalentes. Por este motivo, esta classe não pode ser reprocessada quando aquecida. Diferentemente dos termorrígidos, os termoplásticos podem ser reprocessados, pois são moldáveis a alta temperatura e pressão, devido ao enfraquecimento das fracas ligações de Wan Der Waals (CAMPBELL, 2011; RANA; FANGUEIRO, 2016; MENDONÇA, 2005).

Um dos principais requerimentos das matrizes termorrígidas são alta ductibilidade, alta dureza, baixa viscosidade (menor que 500 *cps*) e tempo de gelificação maior que 20 minutos, estabilidade dimensional, boa compatibilidade com diversas fibras e baixa absorção de umidade (TALREJA; VARNA, 2015). Nesse contexto, a resina epóxi, além de ter boas propriedades mecânicas, é uma das matrizes mais utilizadas por apresentar boa aderência com a maior parte das fibras, resistência à absorção de umidade (absorve, em volume, em 24 horas de imersão, 0.08 a 0.15%) e estabilidade dimensional da ordem de 2% em volume (MENDONÇA, 2005).

Da mesma forma que os compósitos são classificados conforme a matriz que são fabricadas, eles também são classificados de acordo com o tipo de reforço que são obtidos. Conforme Figura 2.2, os materiais compósitos podem ser divididos em compósitos: reforçados com partículas, reforçados com fibras e estruturais.

Figura 2.2 – Classificação dos compósitos de acordo com o reforço.



Fonte: adaptado de Callister (2000)

2.1.1.1 Compósitos Reforçados por Partículas

Os compósitos reforçados por partículas são considerados isotrópicos porque são distribuídos aleatoriamente, isto é, apresentam as mesmas propriedades em várias direções (KAW, 2005). As partículas são consideradas mais duras e mais frágeis em relação à matriz. Tais partículas restringem o movimento da fase matriz ao redor de cada partícula. Desta forma, a matriz transfere parte da tensão às partículas, que suportam uma parcela da carga. Essa transferência de tensões depende do grau de interação da fase partícula/matriz (CALLISTER, 2000).

2.1.1.2 Compósitos Reforçados por Fibras

Os reforços, na forma de fibra, apresentam propriedades superiores aos fabricados do mesmo material na forma de bloco, pois na forma de fibra a sua estrutura é mais organizada e a presença de imperfeições são inferiores (MENDONÇA, 2005).

As fibras apresentam-se na forma contínua (longas) e descontínua (curtas), conforme Figura 2.2. Os compósitos obtidos por meio de fibras contínuas, permitem a configuração de fibras unidirecionais, bidirecionais (tecido) e multidirecionais, os quais podem formar o laminado. Quando comparado aos compósitos reforçados de fibras curtas ou particuladas, suas propriedades são mais eficientes devido às orientações das fibras estarem alinhadas nas direções do carregamento (PARDINI; NETO, 2006). Além disso, as fibras contínuas contribuem para o aumento da resistência ao impacto, estabilidade dimensional e melhor acabamento superficial. Por outro lado, as fibras curtas, apresentam baixo custo, são mais fáceis de trabalhar e fabricar, permitindo até

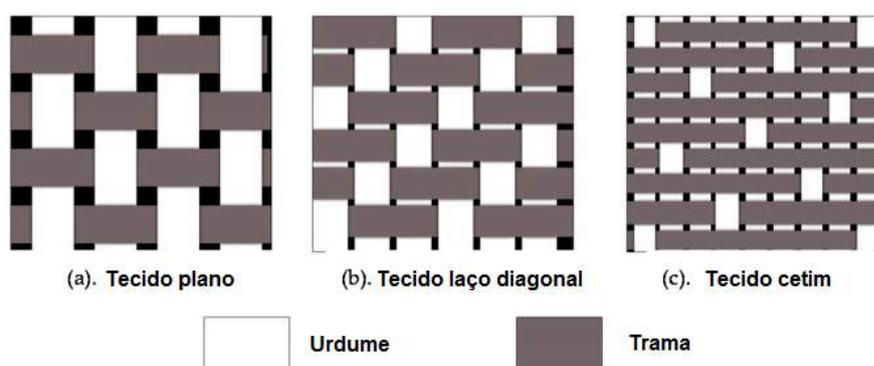
mesmo a injeção por moldes (KAW, 2005; MALLICK, 2018).

2.1.1.3 Compósitos Estruturais

Esta classe de compósitos é a mais comum em aplicações estruturais. Eles são constituídos de um empilhamento de várias camadas de fibras, com diferentes orientações angulares, os quais são chamados de sequência de empilhamento. A partir deste procedimento, obtêm-se o laminado (empilhamento de várias camadas), que pode ser resultado de inúmeras combinações de sequências de empilhamento, que decorrem em diferentes propriedades mecânicas (MALLICK, 2007).

As fibras quando consideradas de forma individual não apresentam um formato que lhes confira uma estrutura permanente, elas passaram a ser entrelaçadas, formando estruturas mais estáveis. A estas estruturas, foram denominadas como tecidos. O uso de tecido é amplamente difundido e são elementos básicos de reforços de compósitos estruturais (PARDINI; NETO, 2006). Apresentam uma estrutura em que os fios que estão paralelos ao rolo são denominados urdume, e os que estão perpendicular à direção do rolo são chamadas de trama. A resistência à tração de um tecido é igual a soma das forças dos fios dispostos ao longo da direção de tração. A Figura 2.3 apresenta as principais configurações de tecidos: tecido plano (a), tecido laço diagonal (b) e tecido cetim (c) (FAZITA *et al.*, 2016).

Figura 2.3 – Principais tipos de tecido.



Fonte: adaptado de Fazita *et al.* (2016)

Os compósitos sanduíche, também pertencente a classe de compósito estruturais, são materiais constituídos por três itens principais, duas placas externas finas denominada face e a camada interna, chamada núcleo. Com esta forma, pode-se aumentar a rigidez, isolamento, e condutividade térmica e resistência à degradação por umidade (MENDONÇA, 2005).

2.1.2 Fibras Sintéticas

Conhecida como fibras feita pelo homem (*manmade fibers*), as fibras sintéticas estão amplamente difundidas nas indústrias. Dentre elas as que mais se destacam são as fibras de vidro, carbono e aramida. As fibras de vidro são aplicadas em estruturas de baixo custo como pás de turbinas, navios e estruturas da engenharia civil. Já as fibras de carbono são utilizadas para estruturas do segmento aeroespacial e automobilístico. Por fim, as fibras de aramida são utilizadas em aplicações que exigem boa absorção de energia (TALREJA; VARNA, 2015). Na Tabela 2.1, estão dispostos as propriedades mecânicas e físicas das fibras sintéticas mais utilizadas. Vale ressaltar que fibra carbono HM e HS referem-se à fibras de carbono de alto módulo e alta resistência, respectivamente.

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas e físicas das fibras sintéticas.

Material	ρ ($kg.m^{-3}$)	E (GPa)	RT (MPa)	ε (%)
E-glass	2600	76	2000	2,6
<i>KevlarTM</i>	1450	130	3000	2,3
Carbono HM	1950	380	2400	0,6
Carbono HS	1750	230	3400	1,4

ρ = Densidade (kg/m^3), E = Módulo de Elasticidade axial (GPa), RT = Resistência à Tração (MPa), ε = Deformação até a falha (%)

Fonte: Adaptado de Talreja e Varna (2015)

2.1.3 Fibras Naturais

As fibras naturais são classificadas de acordo com sua origem: vegetal, mineral e animal. As fibras animais, constituídas de proteínas, são extraídas de seda, lã e cabelo, enquanto que as fibras vegetais são extraídas das plantas. As plantas fornecem matéria prima de várias formas tais como: semente, fruto, caule, gramas e folhas (OSORIO *et al.*, 2010), conforme Figura 2.4.

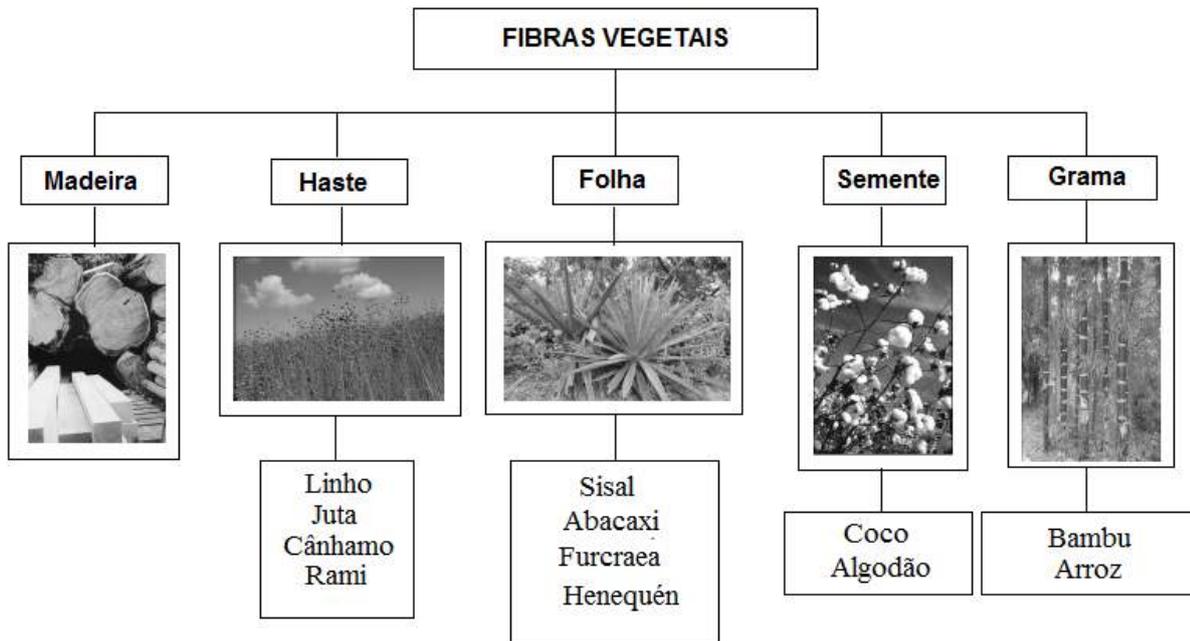
Devido a preocupação com o meio ambiente, aliado à boas propriedades mecânicas, disponibilidade da matéria prima e baixo custo, as fibras vegetais têm se destacado, e em determinadas aplicações, suas propriedades mecânicas são comparáveis aos dos compósitos reforçados com fibras de vidro, conforme apresentado na Tabela 2.2 (OSORIO *et al.*, 2011). Além disso, o seu uso vem crescendo juntamente com uma filosofia sustentável, que visa reduzir gradativamente a dependência do uso de fontes não renováveis, contribuindo para a preservação do meio ambiente (GUPTA, 2016; MOHANTY *et al.*, 2004; ROWELL *et al.*, 1997; RAJAN *et al.*, 2011).

Tabela 2.2 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais.

Fibra	Densidade (g/cm^3)	Deformação (%)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Diâmetro (μm)
Algodão	1,5 - 1,6	3 - 10	287 - 597	5,5 - 12,6	-
Linho	1,4 - 1,5	1,2 - 3,2	344 - 1500	27 - 100	17 - 20
Bambu	0,6 - 1,4	4,11	140 - 860	9,8 - 55	125 - 350
Juta	1,3 - 1,49	1,5 - 1,8	331 - 414	10 - 64	10 - 120
Cânhamo	1,4 - 1,49	1,6 - 4	550 - 900	70 - 96	15 - 60
Kenaf	1,2 - 1,45	1,6	930	53	14 - 33
Ramie	1,5	1,2 - 3,8	400 - 938	24,5 - 128	-
Sisal	1,2 - 1,5	2 - 4,3	510 - 700	9,4 - 38	7 - 200
Coco	1,15 - 1,25	15 - 44	120 - 304	2,5 - 6	7 - 450
Abacaxi	0,6 - 1,6	0,8 - 14,5	170 - 627	1,44 - 62	20 - 82
Vidro-E	2,5 - 2,7	0,5 - 3	2000 - 3500	70 - 73	4,8
Vidro-S	2,5 - 2,7	2,8	4570	86	5,4
Aramida	1,4	3,3 - 3,7	3000 - 3150	63 - 67	-
Carbono	1,4	1,4 - 1,8	4000	230 - 240	-

Referências (RANA; FANGUEIRO, 2016; WAMBUA; IVENS; VERPOEST, 2003; HOLBERY; HOUSTON, 2006; BISANDA; ANSELL, 1992; RAO; RAO, 2007; SRIDHAR *et al.*, 1982; OKUBO; FUJII, 2002; OKUBO; FUJII; YAMAMOTO, 2004; ZHANG *et al.*, 2018; JAIN; KUMAR; JINDAL, 1992; UGBOLUE, 1990; BISWAS *et al.*, 2013; GUPTA, 2014; MENDONÇA, 2005; ZHANG *et al.*, 2018; SANO *et al.*, 2002; HARGITAI; RÁCZ; ANANDJIWALA, 2008; ROE; ANSELL, 1985; RAMESH; SUDHARSAN, 2018; DEFOIRDT *et al.*, 2010).

Figura 2.4 – Classificação das fibras naturais de acordo com a sua origem.



Fonte: adaptado de Osorio *et al.* (2010)

2.1.3.1 Vantagens e Desvantagens

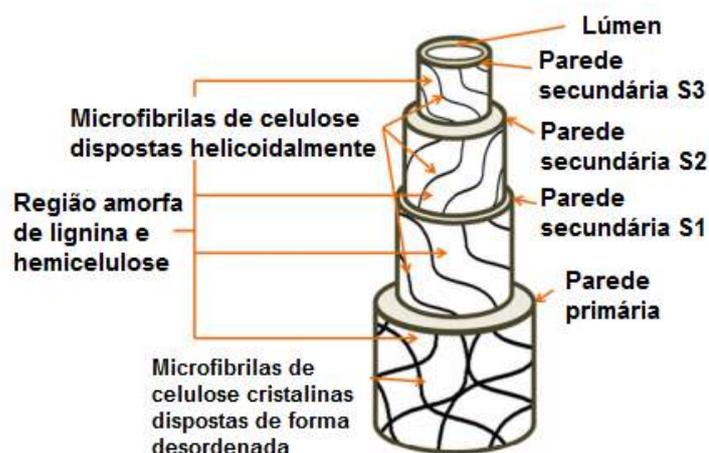
Além dos fatores já mencionados, há diversas vantagens que a aplicação de fibras vegetais em materiais compósitos apresentam, entre elas: baixa massa específica; baixa abrasão no processo de fabricação; facilidade de reciclar; não são tóxicos e agressivos à saúde quando comparado à fibra de vidro; baixo custo de obtenção das fibras; são isolantes acústicos (RAZERA, 2006; BLEDZKI; GASSAN, 1999), e baixo consumo de energia de produção das fibras (MOHANTY *et al.*, 2004; SAHEB; JOG, 1999; SHAH *et al.*, 2016; MALKAPURAM; KUMAR; NEGI, 2009). A energia requerida pra produzir fibras naturais é aproximadamente 17% da energia requerida para extrair fibras de vidro (PANDEY *et al.*, 2010). Em contrapartida, as fibras vegetais apresentam algumas desvantagens como baixas temperaturas de processamento (até 200°C) (PEPONI *et al.*, 2008; SAHEB; JOG, 1999; ARAUJO; WALDMAN; PAOLI, 2008), baixa adesão entre a fibra e matriz e baixa molhabilidade (LUNA; LIZARAZO-MARRIAGA; MARIÑO, 2016; FUENTES *et al.*, 2011). A baixa adesão pode ser minimizada modificando a superfície das fibras quimicamente. Este tipo de tratamento é aplicado também em fibras sintéticas. Além dessas, outras desvantagens podem ser destacadas, como a suscetibilidade à efeitos ambientais tais como absorção de umidade, influência do solo no desenvolvimento da planta, idade da planta e regiões em que a fibra é extraída do vegetal (ROWELL *et al.*,

1997; KORONIS; SILVA, 2018). A primeira acarreta na dilatação da fibra, o que contribui para a quebra da matriz e instabilidade dimensional do compósito (BANIK; DEY; SASTRY, 2017). Já os últimos, podem implicar nas propriedades mecânicas da planta, sendo a variação dos diâmetros um dos principais motivos.

2.1.3.2 Microestrutura das Fibras Vegetais

As fibras derivadas de plantas são constituídas de várias fibras elementares embutidas em uma matriz de lignina e hemicelulose. Estas fibras elementares formam uma estrutura complexa constituída por uma parede celular primária e três secundárias (Figura 2.5). A espessura da parede celular S2 determina as propriedades mecânicas da fibra. Diferentemente das fibras sintéticas, as fibras naturais são compostas por um furo chamado lúmen (AZWA *et al.*, 2013).

Figura 2.5 – Estrutura de uma fibra vegetal.



Fonte: adaptado de Azwa *et al.* (2013)

A composição química das fibras naturais variam de acordo com o tipo da planta. No entanto, a maior parte delas são formadas por celulose, hemicelulose, lignina, pectina e ceras. A celulose é considerada o componente essencial de todas as plantas, pois tem como principal função estabelecer ligações de hidrogênio intra e intermolecular. As propriedades mecânicas das fibras naturais dependem fortemente delas. A hemicelulose e lignina além de aglutinar a celulose, apresentam outras funções. A hemicelulose é responsável pelo caráter biodegradável, absorção de umidade e degradação térmica da fibra. Já a lignina é responsável pela degradação por raios ultravioletas, rigidez das plantas e auxiliam no transporte da água. Por fim, a pectina e a cera, promovem a flexibilidade e proteção superficial das fibras. Normalmente a proporção, em peso, de hemicelulose, celulose e lignina, são de 20 - 40, 60 - 80% e 5

- 25%, respectivamente (SAHEB; JOG, 1999; BLEDZKI; GASSAN, 1999; YANG *et al.*, 2007). O bambu apresenta em sua composição alto valor de lignina da ordem de 10 - 15%. Este alto valor, quando comparado às demais plantas, faz com que as fibras de bambu sejam mais frágeis (ZAKIKHANI *et al.*, 2014).

2.1.3.3 Degradação Térmica das Fibras Vegetais

Conforme supracitado, uma das limitações das fibras naturais como agente reforçante em materiais compósitos é que não suportam altas temperaturas. Devido a isto, é conveniente utilizar matrizes poliméricas. O aumento da temperatura pode alterar a cor, odor, estrutura dos constituintes e promover a evaporação de substâncias voláteis. Estas duas últimas, implicam nas propriedades mecânicas do compósito, sendo que a última é responsável pela geração de espaços vazios. Por este motivo, é importante estudar a estabilidade térmica das fibras naturais, a qual pode ser realizada pela termogravimetria (TG), que consiste na representação de perda de massa em função da temperatura (SAHEB; JOG, 1999; FAZITA *et al.*, 2016; HOLBERY; HOUSTON, 2006).

Segundo Fazita *et al.* (2016), a degradação das fibras naturais, avaliadas em atmosfera de ar, ocorrem basicamente em três estágios. O primeiro estágio ocorre a 250 a 300 °C devido aos componentes de baixo peso molecular como é caso da hemicelulose. No segundo estágio, o processo de degradação ocorre no intervalo de 300 a 400 °C a qual está associado com a degradação da celulose. E por fim, o último estágio ocorre aproximadamente a 450 °C, em que ocorre a decomposição da lignina. Outros estudos, como o de Yang *et al.* (2007), reporta que a degradação da lignina ocorre, lentamente, no intervalo de 160 a 900 °C, pois é um componente que apresenta maior resistência à se decompor. Devido às fibras naturais suportarem baixas temperaturas de processamento isto limita o uso de algumas resinas.

2.1.4 Bambu

A diversidade de fibras vegetais é ampla, no entanto a fibra de bambu se destaca das demais devido à relação de alta resistência mecânica por unidade de peso (densidade de 0,8 - 1,1 g/cm³) conforme apresentado na Tabela 2.2 (RAY *et al.*, 2004; OSORIO *et al.*, 2011; AMADA *et al.*, 1997). Além desta, há outros fatores que fazem das fibras de bambu mais atrativas para a aplicação de reforços, especificadamente porque o bambu: por pertencer a família das gramíneas, apresenta rápido crescimento da ordem de 20 a 100 cm por dia, atingindo uma altura de 30 metros, dependendo da espécie (SHARMA *et al.*, 2014; LIESE; WEINER, 1996; ESTRADA; LINERO; RAMÍREZ, 2013); o período de colheita é de 3 a 6 anos após o seu plantio (KHALIL *et al.*, 2012; SHARMA *et*

al., 2014; ZAKIKHANI *et al.*, 2014; LIESE; KÖHL, 2015); é perene e se propaga facilmente; é um recurso abundante com cerca de mais de 1000 espécies encontradas em sua maioria na Ásia e Américas do Sul (RAY *et al.*, 2004; ZAKIKHANI *et al.*, 2014; SHARMA *et al.*, 2014; KHALIL *et al.*, 2012; LIESE; KÖHL, 2015; SHIN *et al.*, 1989); não requer solos altamente férteis; pode ser cultivado em solo acidificado; contribui para o combate de erosões e deslizamentos (GUIMARÃES Jr.; NOVACK; BOTARO, 2010; LIESE; KÖHL, 2015); e é conhecido como capturador de dióxido de carbono (35% mais que as árvores) contribuindo para o combate à redução do efeito estufa (ZAKIKHANI *et al.*, 2014; TRUJILLO *et al.*, 2014; COSTA *et al.*, 2017; CRUZ, 2015; OSSE; MEIRELLES, 2011).

2.1.4.1 Bambu *Guadua angustifolia*

Conforme Fajardo *et al.* (2014) e Osorio *et al.* (2010), o bambu *Guadua angustifolia* é uma espécie nativa da Colômbia, Venezuela e Equador, sendo considerada economicamente a mais importante da América Latina. Além disso, é considerada a terceira maior espécie do mundo com 35 metros de altura e 25 centímetros de diâmetro. Seu cultivo é indicado em regiões que apresentam temperaturas de 20 a 26 °C e 900 a 1600 metros de altitude. Atinge a maturidade de 4 a 6 anos. Ainda, destaca-se pelo baixo índice de conicidade, alta capacidade de absorção de impacto e flexibilidade.

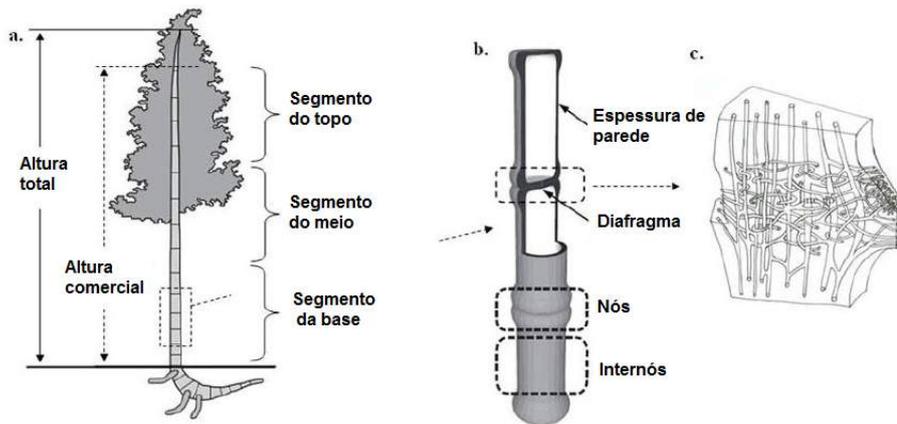
2.1.4.2 Morfologia do Bambu

Conforme Figura 2.6, o bambu apresenta uma forma cilíndrica com parede fina, a qual é chamada de colmo. Ao longo do seu comprimento, o colmo é dividido por diafragmas delimitando a região nodal e a internodal. A distância entre os nós e diafragmas denomina-se internodal ou entrenós (SHARMA *et al.*, 2015; ZAKIKHANI *et al.*, 2014). As fibras da região internodal, diferentemente das regiões internodais, que é unidirecional, apresenta propriedade isotrópica devido à orientação aleatória das fibras. Além disso, devido aos nós, o bambu se torna ainda mais resistente à flexão proveniente dos carregamentos dos ventos (AMADA *et al.*, 1997).

2.1.4.3 Diâmetros, Espessura de Parede e Comprimento Internodal do Colmo

O diâmetro, comprimento internodal e espessura da parede varia de acordo com o comprimento e a idade do colmo, conseqüentemente isto implica nas propriedades mecânicas das fibras (AMADA *et al.*, 1997; MONTOYA; SERNA; RÍOS, 2006). A Figura 2.7(a) mostra que o comprimento internodal do bambu tende a apresentar valores menores, enquanto que na região central do colmo, entre o vigésimo e trigésimo número de internó, o comprimento internodal é maior. Na Figura 2.7(b) e 2.7(c)

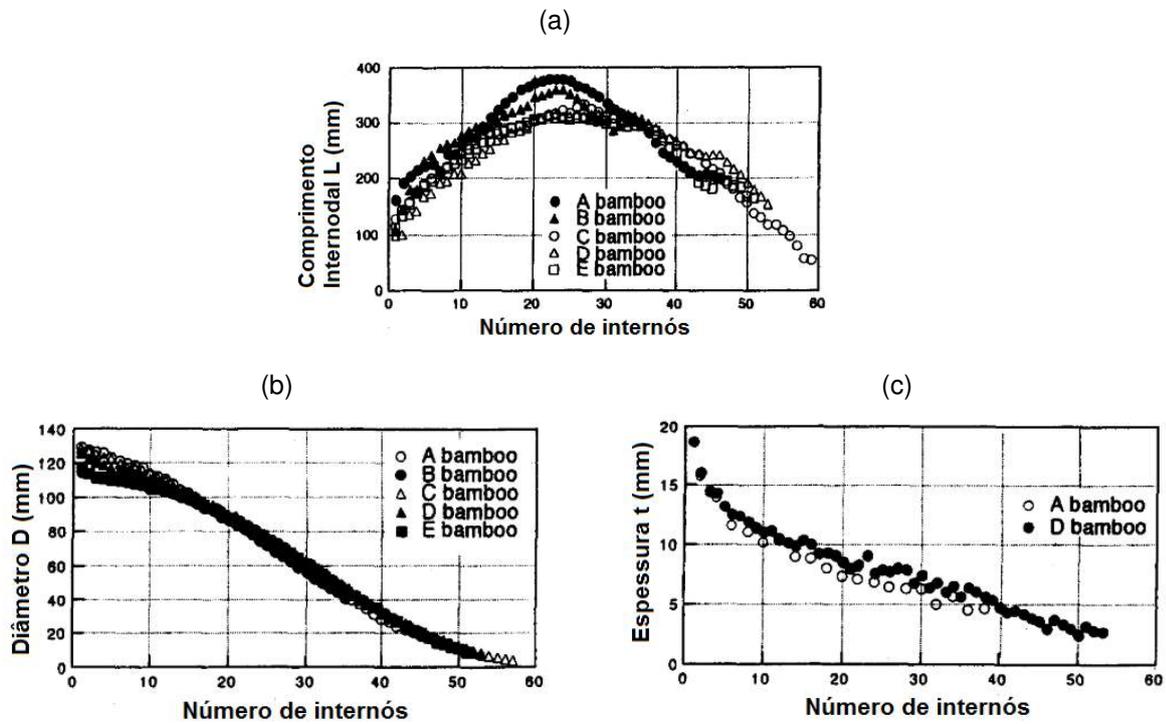
Figura 2.6 – Morfologia do bambu.



Fonte: adaptado de Trujillo (2014)

percebe-se como ocorre a variação da espessura de parede e do diâmetro ao longo do comprimento do colmo, no sentido longitudinal.

Figura 2.7 – (a) Variação do comprimento internodal ao longo do comprimento do colmo, (b) variação do diâmetro ao longo do comprimento do colmo (c) variação da espessura de parede ao longo do comprimento do colmo.



Fonte: adaptado de Amada *et al.* (1997)

2.1.4.4 Microestrutura do Bambu

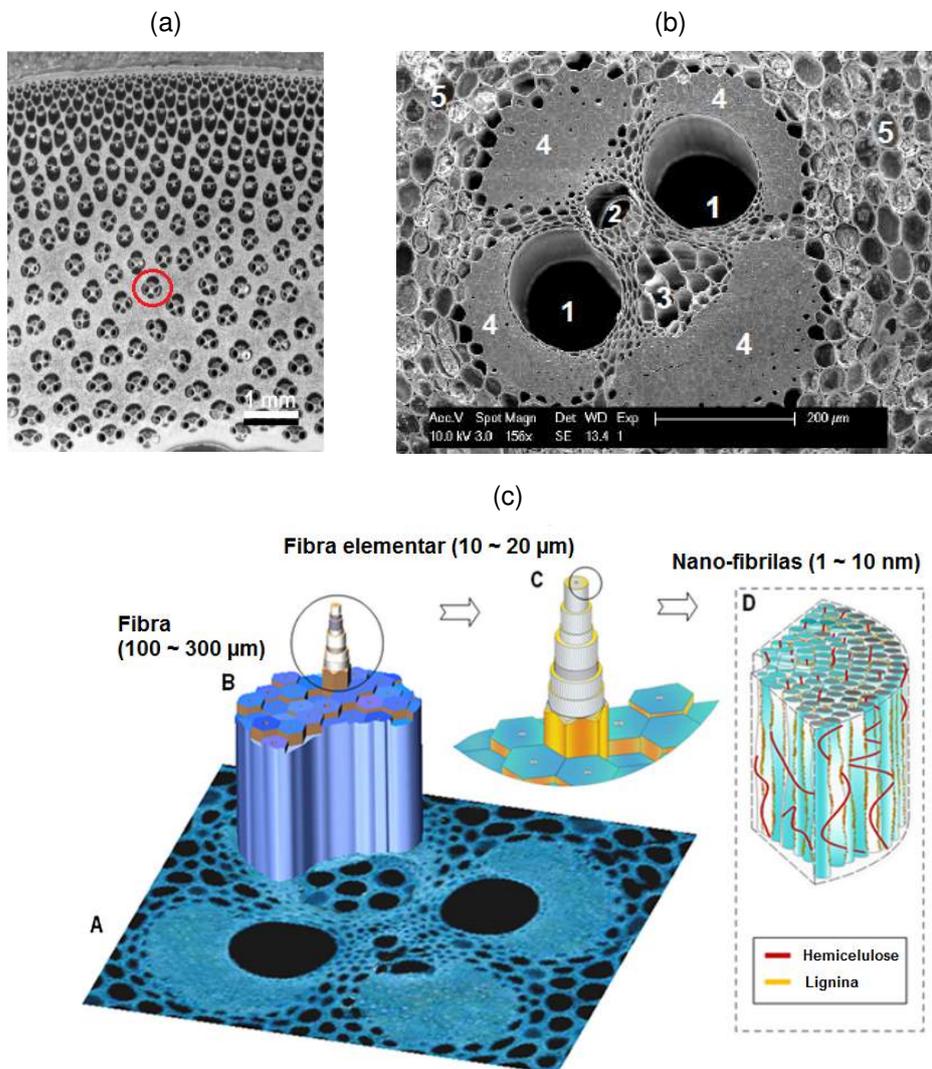
A microestrutura de fibras naturais são complexas devido à organização hierárquica que apresentam. A Figura 2.8 exhibe a organização da microestrutura do bambu, espécie *Guadua angustifolia*. A espessura de parede do bambu é composta por vários feixes vasculares (Figura 2.8(a)). Cada feixe vascular é formado por metaxilema (1), floema (2), protoxilema (3) e fibras (4) e são envolvidos por um tecido chamado parênquima, o qual é distribuído ao longo da espessura de parede (Figura 2.8(b)). A fibra, a qual é utilizada como reforço em compósitos, é composta por várias fibras elementares, que apresentam seções transversais hexagonais ou pentagonais, as quais formam um padrão de colmeia. Estas fibras elementares, consistem de diversas camadas em que nano-fibrilas de celulose cristalizadas são alinhadas com orientações distintas (pequenos ângulos), as quais são embutidas em matrizes de lignina e hemicelulose (Figura 2.8(c)). Esta estrutura determina a propriedade mecânica das fibras (OSORIO *et al.*, 2010; FUENTES *et al.*, 2011).

A presença de feixes vasculares não varia de acordo com a altura do colmo, apenas no sentido radial em que a concentração aumenta do raio interno para o externo. Já a concentração do tecido parenquimatoso diminui ao longo do comprimento do colmo, sendo maior na base. Em geral, um colmo é composto por aproximadamente 50% de tecido parenquimatoso, 40% de fibras e 10% de outros tecidos e vasos (LIESE; KÖHL, 2015). De acordo com o estudo de Montoya, Serna e Ríos (2006), as fibras de bambu que são extraídas próximas da região do raio interno da espessura de parede, apresentam melhores propriedades mecânicas em relação aos que estão próximos da região do raio externo. Já considerando a região em que as fibras são extraídas do colmo, no sentido axial, (topo, meio e base), estas não apresentam consideráveis influências nas propriedades mecânicas das fibras (OSORIO *et al.*, 2011).

2.1.4.5 Extração de Fibras de Bambu

Há vários métodos de extração, os quais são classificados em três tipos: químico, mecânico e químico-mecânico. Conforme o método de extração, as propriedades mecânicas das fibras variam, sendo mais um fator que implica nas propriedades dos compósitos (ZAKIKHANI *et al.*, 2014). O método de extração química consiste em submeter varetas do colmo em banho de soluções aquosas com produtos químicos, como por exemplo banhos em soluções de NaOH. Por este motivo, por gerar resíduos, quando descartadas inadequadamente podem impactar o meio ambiente (PHONG *et al.*, 2012). Já o método de extração mecânica, não gera resíduos químicos, pois consiste na extração manual ou por meio de dispositivos mecânicos das fibras. Dentre os métodos de extração mecânica, para obter fibras curtas, o método de *steam explosion* é conhecido por retirar a lignina de maneira efetiva (OKUBO; FUJII; YAMAMOTO, 2004). Já

Figura 2.8 – (a) Área da seção transversal da parede do colmo *Guadua angustifolia*, (b) Composição do feixe vascular (1) metaxilema, (2) floema, (3) protoxilema, (4) fibras, e (5) tecido parenquimatoso, (c) composição das fibras elementares.



Fonte: adaptado de Osorio *et al.* (2010), Fuentes *et al.* (2011)

para extrair fibras longas sem causar danos a elas, o processo é mais complexo, pois o comprimento máximo das fibras de bambu é da distância internodal do colmo, que varia de acordo com a espécie (Qi *et al.*, 2015)(OSORIO *et al.*, 2011). Esta é uma das razões pela qual não é possível obtê-la na forma de filamento contínuos com mais de 50cm (PERREMANS *et al.*, 2018).

2.1.5 Compósitos Epoxídicos Reforçados com Fibras de Bambu

Diversas investigações acerca de compósitos epoxídicos reforçados com fibras de bambu (CERFB) deixaram registrados suas contribuições com o objetivo de com-

preender o comportamento mecânico deste material em potencial. Nesta subseção, estão apresentadas os principais trabalhos.

O estudo Shin *et al.* (1989) avaliaram as propriedades mecânicas, tais como resistência à tração, compressão, flexão e cisalhamento interlaminar, de compósitos epoxídicos reforçados com fibras unidirecionais de bambu. Estas fibras foram extraídas por meio de um processo de compressão composto por dois cilindros de aço. A partir destas fibras, foram fabricadas amostras onde cada lâmina apresentou aproximadamente 1 *mm* de espessura. Três tipos de laminados com diferentes número de lâminas foram obtidas, e as mesmas foram submetidas aos respectivos ensaios, acima mencionados. A média dos módulos de tração, compressão, flexão e cisalhamento interlaminar obtidos foram iguais a 61 *GPa*, 27,9 *GPa*, 20,2 *GPa*, and 752 *MPa*, respectivamente. A média do coeficiente de Poisson obtido a partir do ensaio à tração foi igual 0,38. Vale ressaltar, que foi um dos primeiros trabalhos referente a compósito reforçado com fibra de bambu.

A contribuição de Jain, Kumar e Jindal (1992) foi realizar diversos ensaios, como tração (ASTM D638), flexão (D790) e impacto, visando obter os respectivos valores de resistência, de compósitos fabricados com tecidos de fibra de bambu (fixadas com linhas de algodão) e feixes de bambu trançados, os quais ambos foram fabricados com as seguintes sequências de empilhamento: (0°), (0°/90°), (0₂/±45°/ 90°), (0₂/±30°/±60°/90°) e, (0₂/±22,5°/±67,5°/90°). As fibras de bambu do tecido, apresentaram diâmetros de 0,1 a 0,3 *mm* e 400 *mm* de comprimento. Estas foram secadas em um forno à 105°C durante 3h. Já os feixes de bambu trançados foram fabricados apresentando dimensões de 600 x 600 x 0,5 *mm* e seção transversal de cada feixe igual a 4 x 0,3 *mm*. Os resultados obtidos estão na Tabela 2.3. O compósito unidirecional fabricado pelo tecido de bambu, (0°), apresentou 175,27 *MPa* e baixa densidade de 0,975 $\frac{kg}{m^3}$ em relação aos demais compósitos avaliados. Este compósito, apresentou valores de resistência à tração comparável aos demais estudos de CPRFB, como o de Shin *et al.* (1989). Em relação à resistência à flexão, os compósitos fabricados pelo tecido de bambu empilhados à (0₂/±22,5°/±67,5°/90°), obteve 186,38 *MPa*. Este valor, também foi comparável ao compósito de Shin *et al.* (1989). Por fim, a resistência ao impacto, o compósito fabricado pelo tecido, com fração volumétrica de fibra igual 35%, apresentou propriedades mais elevadas do que os compósitos fabricados pelos feixes trançados.

A investigação de Biswas e Satapathy (2010) avaliou a microdureza, resistência à tração, flexão, cisalhamento interlaminar e impacto dos compósitos de fibra de bambu (tecido bidirecional), com diferentes percentuais de preenchimento de argila vermelha. Os compósitos fabricados com percentuais igual a 10% em peso, obtiveram as melhores propriedades quando comparados aos outros percentuais (0 e 20%). Estas propriedades mencionadas encontram-se na Tabela 2.3.

Osorio *et al.* (2011) estudaram as propriedades mecânicas de compósitos reforçados com fibras, tratadas (com três concentrações diferentes de banho alcalino, 1,3 e 5%) e não tratadas, da espécie *Guadua angustifolia*. Dois tipos de compósitos foram fabricados, um com orientações no sentido longitudinal e outro no transversal. O principal objetivo deste estudo foi determinar as propriedades de flexão destes compósitos. A resistência máxima de flexão longitudinal do compósito com fibras não tratadas apresentou valor de 310 *MPa*. Este valor é superior aos compósitos submetidos à tratamento de superfície. O maior valor da resistência máxima de flexão transversal, foi o compósito com fibras tratadas em um banho com 3% de concentração de NaOH. Vale ressaltar que o desempenho do compósito foi promissor, pois os resultados obtidos para os compósitos com fibras de bambu não tratadas atingiram, aproximadamente, 73% do valor teórico da resistência e 95% do módulo de flexão longitudinal.

A investigação realizada por Muhammad e Aziz (2015) avaliou as propriedades mecânicas por meio dos ensaios de tração e flexão de compósitos com diferentes frações volumétricas (V_f). As fibras foram obtidas por um procedimento denominado *degumming*, combinado com um processo mecânico. Em seguida, todas as fibras foram submetidas à tratamento de superfície em um banho de solução alcalina com concentração de 5%. Os resultados do ensaio à tração apresentaram 84,5 *MPa*, 0,090 *mm/mm*, e 7,1 *GPa*, sendo resistência à tração, deformação longitudinal, e módulo de elasticidade longitudinal, respectivamente. Em relação ao ensaio de flexão, os valores obtidos foram 74,6 *MPa* com $V_f=47,3\%$, 3,19 *GPa* com $V_f=47,3\%$ e 0,07 *mm/mm* com $V_f=21,1\%$, sendo resistência à flexão, módulo de flexão, e deformação, respectivamente.

O estudo realizado por Khan, Yousif e Islam (2017) avaliaram a tenacidade à fratura de compósitos reforçados com fibras de bambu, experimentalmente e computacionalmente. Os compósitos foram fabricados com fibras tratadas (com percentual de 6% de NaOH) e não tratadas. O ensaio de tenacidade à fratura foi baseado na norma ASTM D5045. Este estudo também realizou ensaio à tração, o qual foi baseado na norma ASTM D638. O uso de extensômetros permitiu mensurar as deformações transversais e longitudinais. Desta forma, pode-se determinar o coeficiente de Poisson. As amostras foram fabricadas com fibras orientadas randomicamente. A resistência ao cisalhamento interfacial de compósitos com fibras tratadas, com diâmetro de 0,2 *mm* apresentaram 22,14 *MPa*, o que corresponde a um valor 7% maior que os compósitos de fibras não tratadas. Já o resultados do ensaio à tração, a médias dos valores obtidos foi de 31,26 *MPa*, 3,34 *GPa*, e 0,372, sendo resistência à tração, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, respectivamente.

A contribuição de Prabhu, Joel e Bhat (2017) foi avaliar as propriedades obtidas pelo ensaio à tração e de dureza dos compósitos com fibras de bambu tratadas (hidróxido de sódio) e compósitos de pó de coco, ambos com diferentes percentuais

de fração volumétrica. O compósito reforçado com fibra de bambu, com fração volumétrica de 30% se destacou dentre os demais, apresentando um valor de resistência à tração de 62,31 *MPa*. Já o compósito reforçado com pó de coco apresentou baixas propriedades mecânicas, porque a resistência do pó de coco é inferior ao da fibra de bambu. Dentre todas as amostras, o valor de maior dureza obtida foi o do epóxi puro com valor de 72,33 *RHN* (Número de Dureza Rockwell), seguido de 71 *RHN* do compósito reforçado com fibra de bambu.

O trabalho de Roslan *et al.* (2018), teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico de compósitos epoxídicos reforçados com fibra de bambu da espécie *Bambusa vulgaris*. As longas fibras de 200 *mm* obtidas foram submetidas a tratamento com diferentes soluções de NaOH, visando avaliar a influência da alcalinização nas propriedades mecânicas dos compósitos. A fabricação das amostras foram baseadas na norma ASTM D638 com diferentes orientações, [0°], [90°] e [45°]. A resistência à tração e módulo de elasticidade dos respectivos empilhamentos, com fibras não tratadas, foram iguais 138,88 *MPa* and 4,96 *GPa*, 8,42 *MPa* and 1,37 *GPa*, 5,89 *MPa* and 1,09 *GPa*. Vale ressaltar que a avaliação da influência do tratamento com diferentes concentrações de NaOH foi realizada apenas nos compósitos empilhados a [0°]. Sendo assim, os compósitos que tiveram as fibras submersas durante 9h no banho de NaOH, com concentração igual 3% e posteriormente foram secadas em um forno durante 48h, destacou-se das demais apresentando valor de resistência à tração de 339,27 *MPa*. Quando comparado ao valor do compósito não tratado, este apresentou melhores propriedades porque o tratamento de superfície, o qual removeu as substâncias químicas presentes, propiciou melhor ancoramento da matriz sobre a fibra.

No estudo de Zhang *et al.* (2018) foram caracterizados o módulo de flexão, resistência à flexão e tenacidade à fratura de CERFB. Os compósitos foram obtidos usando fibras curtas, as quais foram tratadas em um solução de NaOH com 6%. Além disso, a influência da variação da fração volumétrica e comprimento da fibra de bambu nas propriedades mecânicas foram avaliadas. Desta forma, o compósito fabricado com fração volumétrica de fibra igual a 20% e fibras de 20 *mm* de comprimento (BF/EP_20_10) obteve resistência à flexão de $87,2 \pm 3,5$ *MPa*. Em relação ao módulo de flexão e resistência à tenacidade à fratura, os compósitos que apresentaram melhores propriedades foram fabricados com 30% de fração volumétrica de fibra com 15 *mm* de comprimento (BF/EP_30_15) e 20% de fração volumétrica de fibra com 15 *mm* de comprimento (BF/EP_20_15), os valores obtidos foram de $5,35 \pm 0,29$ *MPa* and $3,79 \pm 0,27$ *MPa* \sqrt{m} , respectivamente.

Na Tabela 2.3 estão apresentadas as principais propriedades mecânicas dos estudos mencionados nesta breve revisão de estudos referentes a compósitos epoxídicos reforçados com fibras de bambu.

Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas e físicas dos BFRCE.

Compósito	D	TS	YM	FS	FM	CS	IM	INT	HD	Ref
BFRC-lay-av-uni-0	-	203	61	235	20,2	93	-	13,2		(SHIN <i>et al.</i> , 1989)
BFRC-0-uni	0,97	175 ±4,29		151,83 ±3,86	-	-	-	-	-	(JAIN; KUMAR; JINDAL, 1992)
BFRC-0-90-mat	0,90	110 ± 2,49		93,6 ± 4,98	-	-	-	-	-	(JAIN; KUMAR; JINDAL, 1992)
BFRC-0-45-90-mat	0,93	80,5 ±1,4	-	108,56 ±1,52	-	-	-	-	-	(JAIN; KUMAR; JINDAL, 1992)
BFRC-0-30-60-90-mat	0,93	87,99 ± 0,31	-	124,52 ±2,86	-	-	-	-	-	(JAIN; KUMAR; JINDAL, 1992)
BFRC-0-22,5-45-67,5-90-mat	0,925	92,65 ± 0,7	-	134,59 ±3,78	-	-	-	-	-	(JAIN; KUMAR; JINDAL, 1992)
BFRC-0-45-90-mult	1,03	99,34±3,96	-	130,23±5,28	-	-	-	-	-	(JAIN; KUMAR; JINDAL, 1992)
BFRC-0-30-60-90-mult	1,01	82,2±3,96	-	161,1±2,85	-	-	-	-	-	(JAIN; KUMAR; JINDAL, 1992)
BFRC-0-22,5-45-67,5-90-mult	1,00	70,13±3,96	-	186,38±2,85	-	-	-	-	-	(JAIN; KUMAR; JINDAL, 1992)
Fill-10wt-redmud	1,29	134,51	4,87	160	-	-	0,321	88,73	36,5	(BISWAS; SATAPATHY, 2010)
BFRC-uni-flex	-	-	-	310	21	-	-	-	-	(OSORIO <i>et al.</i> , 2011)
BFRC-30-wt	-	84,5	7,1	74,6	3,19	-	-	-	-	(MUHAMMAD; AZIZ, 2015)
Compósito	D	TS	YM	FS	FM	CS	FT	HD	-	Ref
BFRC-avg-rand	-	3,26	3,34	-	-	-	2,67 ±0,33	-	-	(KHAN; YOUSIF; ISLAM, 2017)
BFRC-20-wt	-	62,31	-	-	-	-	-	71 (RHN)	-	(PRABHU; JOEL; BHAT, 2017)
BFRC-0-uni	-	138,88	4,96	-	-	-	-	-	-	(ROSLAN <i>et al.</i> , 2018)
BFRC-45-uni	-	8,42	1,37	-	-	-	-	-	-	(ROSLAN <i>et al.</i> , 2018)
BFRC-90 -uni	-	5,89	1,09	-	-	-	-	-	-	(ROSLAN <i>et al.</i> , 2018)
BFRC-Treat-uni	-	339,27	3,7	-	-	-	-	-	-	(ROSLAN <i>et al.</i> , 2018)
BFRC-20-wt-rand	-	-	-	87,2 ±3,5	4,78±0,16	-	3,03 ±0,27	-	-	(ZHANG <i>et al.</i> , 2018)

D = Densidade (g/cm^3), TS = Resistência à Tração (MPa), YM = Módulo de Elasticidade Longitudinal (GPa), FS = Resistência à Flexão (MPa), FM = Módulo de Flexão (GPa), CS = Resistência à Compressão (MPa), FT = Tenacidade à Fratura ($MPa.m^{1/2}$), IM = Impacto (J), INT = Resistência ao Cisalhamento Interlaminar (τ_{13}) (MPa), HD = Dureza (Hv)

2.2 Análise Micromecânica de Materiais Compósitos

As propriedades mecânicas dos materiais compósitos podem ser avaliadas de forma micromecânica, que considera a interação dos constituintes de um laminado de forma microscópica. As propriedades mecânicas do laminado são estimadas através das propriedades mecânicas de cada constituinte. Neste contexto, os métodos mais comuns para tal determinação são regra das misturas e o modelo semiempírico Halphin-Tsai.

2.2.1 Regra das Misturas

Diversos estudos utilizaram o método da Regra das Misturas para prever as propriedades mecânicas de materiais compósitos unidirecionais (HAHN; TSAI, 1980; JACQUET; TRIVAUDEY; VARCHON, 2000; MADSEN; LILHOLT, 2003). Shao *et al.* (2010) utilizaram este modelo micromecânico para estimar a resistência à tração e módulo de elasticidade longitudinal de um colmo de bambu. Osorio *et al.* (2011) determinaram os valores teóricos de módulos de elasticidade longitudinal e transversal de compósito de matriz epóxi reforçados com fibras de bambu. E por fim, Ku *et al.* (2011), no estudo de revisão de compósitos poliméricos reforçado com fibras naturais, reportaram alguns estudos que compararam as propriedades dos compósitos obtidas experimentalmente com as obtidas pela Regra das Misturas.

Conforme Chawla (2012), as propriedades de um material compósito, no caso uma lâmina, podem ser estimadas por meio da regra das misturas, a qual é obtida em função das porcentagens de cada componente da mistura do compósito, reforço e matriz. Para determinar as frações volumétricas da fibra e matriz, aplicam-se

$$V_f = \frac{vo_f}{vo_c}, \quad (2.2.1)$$

$$V_m = \frac{vo_m}{vo_c}, \quad (2.2.2)$$

onde vo_c , vo_f , vo_m denotam o volume do compósito, fibra e matriz, respectivamente.

Desta maneira, quando negligenciado as frações dos vazios, assume-se $V_m + V_f = 1$. Assim, de acordo com Voyiadjis e Kattan (2005), uma vez que definida as frações volumétricas dos respectivos componentes, é possível estimar o módulo de elasticidade longitudinal (E_1), conforme

$$E_1 = E_1^f V_f + E_1^m V_m, \quad (2.2.3)$$

sendo E_1^f e E_1^m os módulos de elasticidade longitudinal da fibra e da matriz; o módulo de elasticidade transversal (E_2)

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_2^f} + \frac{V_m}{E_m}, \quad (2.2.4)$$

em que E_2^f e E_2^m são os módulos de elasticidade transversal da fibra e da matriz; o coeficiente de Poisson (ν_{12}) como

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m, \quad (2.2.5)$$

onde ν_f e ν_m são os coeficientes de Poisson da fibra e da matriz; o módulo de cisalhamento (G_{12}) de acordo com

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_{12}^f} + \frac{V_m}{G_m}, \quad (2.2.6)$$

em que G_{12}^f e G_m são os módulos de cisalhamento da fibra e matriz, respectivamente; e por fim, a densidade do compósito (ρ_c) conforme

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_m V_m, \quad (2.2.7)$$

sendo ρ_f e ρ_m as densidades da fibra e matriz, respectivamente. De forma análoga, por meio das regras das misturas, pode ser estimado as resistências à tração transversal e longitudinal do material compósito, desde que as propriedades mecânicas de cada fase sejam conhecidas (TRUJILLO, 2014; OSORIO *et al.*, 2011).

É importante ressaltar que a regra das misturas é regida por 5 hipóteses:

1. A lâmina é linear elástica e não possui tensões internas e térmicas;
2. as fibras são uniformes, homogêneas, de mesmo diâmetro, contínuas, paralelas e regularmente espaçadas;
3. a matriz é homogênea, isótropa e apresenta comportamento linear elástico;
4. há uma perfeita ligação entre fibras e matriz bem como ausência de vazios;
5. a interface é infinitamente fina, podendo ser desconsiderada nos cálculos (VASILIEV; MOROZOV, 2001).

2.2.2 Halphin-Tsai

O modelo micromecânico de Halphin-Tsai foi desenvolvido originalmente para compósitos com fibras contínuas. Este modelo baseou-se nos trabalhos de Hill (1964) e Chow e Hermans (1969). De acordo com Chawla (2012), Kaw (2005), Halphin e Tsai desenvolveram seus modelos como equações simples através dos ajuste das

curvas e resultados baseados em elasticidade. Uma vez que os parâmetros envolvidos no ajuste da curva transportam significado físico, as equações se tornam de natureza semi-empírica. Este método também é utilizado para estimar propriedades dos compósitos reforçados com fibras descontínuas e curtas alinhadas na direção do carregamento. Assim, para a determinação das propriedades, como por exemplo, o módulo de elasticidade longitudinal (E_1), pode ser utilizada a Equação 2.2.3, entretanto o módulo de elasticidade transversal (E_2) é obtido por

$$\frac{E_2}{E_m} = \frac{\eta \cdot \xi \cdot V_f + 1}{1 - \eta \cdot V_f}, \quad (2.2.8)$$

onde

$$\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi}, \quad (2.2.9)$$

ξ é um fator de reforço cujo valor depende da geometria da fibra e das condições de carregamento; E_m e E_f são os módulos de elasticidade da matriz e fibra, respectivamente; V_f é fração volumétrica da fibra.

O valor de ξ é igual a 2 para lâmina com fibras circulares em um volume elementar quadrado. Enquanto que para lâminas com fibras de seções transversais retangulares de comprimento a e largura b , em um volume elementar hexagonal, é igual a $2(a/b)$, onde o b é a direção do carregamento. Desta forma, pode-se determinar o valor de η , conforme Equação 2.2.9.

Para estimar o coeficiente de Poisson (ν_{12}), aplica-se a mesma equação da regras misturas (conforme Equação 2.2.5). Já o módulo de cisalhamento (G_{12}) é calculado por

$$\frac{G_{12}}{G_m} = \frac{\eta \cdot \xi \cdot V_f + 1}{1 - \eta \cdot V_f}, \quad (2.2.10)$$

$$\eta = \frac{\frac{G_f}{G_m} + 1}{\frac{G_f}{G_m} + \xi}, \quad (2.2.11)$$

sendo G_m o módulo de cisalhamento da matriz; ξ o fator de reforço que depende da geometria e das condições de carregamento.

Neste caso, adota-se $\xi=1$ para fibras circulares em um volume elementar quadrado e $\sqrt{3} \cdot \ln \frac{a}{b}$ para fibras com seções transversais retangulares de comprimento a e largura b , em um volume elementar hexagonal, onde a é a direção do carregamento.

De acordo com Kaw (2005), para compósitos cujo volume de fibras é superior a 50%, utiliza-se a função de ajuste

$$\xi = 1 + 40V_f^{10}. \quad (2.2.12)$$

É importante ressaltar que este método quando comparado à regra das misturas, apresenta melhor desempenho na estimativa das propriedades, como módulo de elasticidade transversal e módulo de cisalhamento, pois os fatores ξ e η apresentam significados físicos.

Vários estudos utilizaram o método de Halphin-Tsai para determinar as propriedades mecânicas dos compósitos (GINER; FRANCO; VERCHER, 2014; FACCA; KORTSCHOT; YAN, 2006, 2007). O estudo de revisão de propriedades mecânicas de compósitos poliméricos de fibras naturais como o de Ku *et al.* (2011), estimou as propriedades mecânicas de compósitos de polietileno de alta densidade (PEAD) reforçados com celulose de extraídos da madeira, casca de arroz, cânhamo e fibra de vidro. Os valores obtidos analiticamente foram comparados com os valores experimentais. Comparando os valores dos módulos de elasticidade, pode-se verificar que a diferença máxima entre os valores dos compósitos avaliados foi de 4 *GPa*. Desta forma, conforme pode ser visto, o método de Halphin-Tsai é capaz de prever as propriedades mecânicas de um compósito de maneira satisfatória.

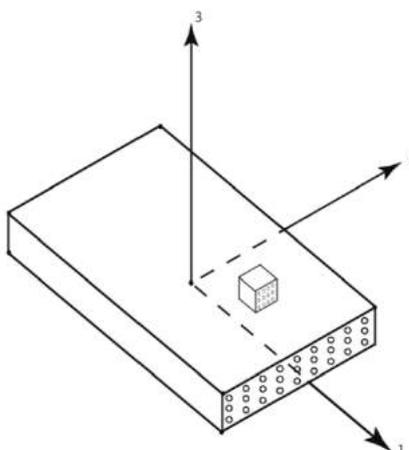
2.3 Análise Macromecânica de Materiais Compósitos

A abordagem da análise macromecânica refere-se ao comportamento mecânico do laminado. Sendo assim, nesta seção será apresentada uma breve abordagem da relação tensão-deformação e teoria clássica dos laminados.

2.3.1 Relação Tensão-Deformação

A Figura 2.9 mostra uma lâmina de material compósito reforçado com fibra. Nota-se que ela está representada com 1 sistema de coordenadas de referência, com três eixos ortogonalmente entre si. O eixo 1 representa a direção em que as fibras estão alinhadas, o eixo 2 representa o eixo transversal ao das fibras e por fim, o terceiro eixo denota o plano transversal ao das fibras e à lâmina. Desta maneira, este material apresenta propriedades diferentes em cada direção, os quais são conhecidos como material ortotrópico (VOYIADJIS; KATTAN, 2005).

Figura 2.9 – Material ortotrópico com seus respectivos planos.



Fonte: adaptado de Voyiadjis e Kattan (2005)

De acordo com Marinucci (2011), a análise macromecânica não leva em consideração a carga nas fibras e matriz separadamente, pois considera o material como homogêneo. Um compósito estrutural, também chamado de laminado, é composto por várias lâminas (camadas), que podem apresentar diferentes orientações em relação a um eixo referencial. Estas orientações apresentam influências nas propriedades mecânicas do compósito. O comportamento dos materiais compósitos são modelados de acordo com a lei de Hook generalizada, na forma tensorial como

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl}, \quad (2.3.13)$$

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}\sigma_{kl}. \quad (2.3.14)$$

sendo σ_{ij} e σ_{kl} os componentes de tensões; C_{ijkl} a matriz de rigidez; ε_{ij} e ε_{kl} os componentes de deformações. Além disso, por meio de uma relação entre tensão e deformação é possível determinar a deformação invertendo a matriz de rigidez C , a qual passa a ser chamada matriz de flexibilidade, denotada por S e é representada pela Equação 2.3.14.

A matriz de rigidez e a matriz de flexibilidade de um elemento tridimensional anisotrópico, de acordo com a Figura 2.9, apresenta 81 elementos. No entanto, devido à simetria dos tensores de deformação e tensão, é possível reduzi-la para 36 elementos, que pode ser escrita na forma de notação de engenharia ou notação de Voigt, como

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix}, \quad (2.3.15)$$

onde σ_i são as tensões normais; τ_{ij} as tensões cisalhamento; ε_j as deformações normais e γ_{ij} as deformações de cisalhamento.

Como o material compósito é ortotrópico, pois apresenta dois planos de simetria entre si, isto resulta em uma redução do número de elementos na matriz de rigidez, a qual é formada por apenas 9 constantes independentes, gerando a matriz

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix}. \quad (2.3.16)$$

Quando a espessura de um laminado é bem menor do que a largura e o comprimento (relação entre comprimento/espessura e largura/espessura maior que 10), o estudo da relação tensão-deformação é realizado considerando apenas os efeitos nas direções 1 e 2 e no plano 1-2, ou seja, estado plano de tensão. Desta maneira, a relação de tensão-deformação para materiais ortotrópicos no estado plano de tensões, permite a redução da matriz de rigidez para a 4 constantes independentes devido a nulidade dos componentes σ_3 , τ_{23} e τ_{13} . Desse modo, obtêm-se a representação condensada conhecida como matriz de rigidez reduzida,

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix}. \quad (2.3.17)$$

Os elementos da matriz de rigidez reduzida são determinadas por meio das proprie-

dades elásticas da lâmina unidirecional

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad (2.3.18)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad (2.3.19)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad (2.3.20)$$

$$Q_{66} = G_{12}. \quad (2.3.21)$$

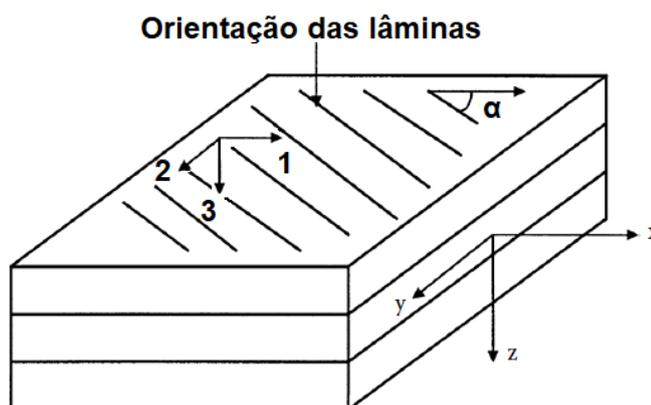
em que E_1 é o módulo de elasticidade longitudinal; E_2 é o módulo de elasticidade transversal; G_{12} é o módulo de cisalhamento e ν_{12} e ν_{21} os coeficientes de Poisson dos respectivos planos.

Vale ressaltar que a formulação da matriz de rigidez reduzida pode ser aplicada em análises que abordam a Teoria Clássica dos Laminados.

2.3.2 Teoria Clássica dos Laminados

Conforme já visto, compósitos são fabricados pelo empilhamento de diversas lâminas, formando um laminado. Vale ressaltar que as lâminas podem apresentar orientações distintas. Assim, para a análise do laminado utiliza-se dois sistema de coordenadas, sendo o x, y, z (global) e 1, 2, 3 (local), conforme representado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Coordenadas globais e locais de um laminado.



Fonte: adaptado de Kaw (2005)

O sistema global é utilizado para definir parâmetros do laminado, enquanto que o sistema local para definir os parâmetros de cada lâmina. Torna-se então necessário obter a relação de rotação para o sistema de coordenadas. A matriz T , chamada de matriz de transformação ou cossenos diretores, que exprime a rotação dos compo-

nentes do sistema global para o sistema local e vice-versa, em função do ângulo α . Esta rotação plana é expressa por

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\alpha)^2 & \sin(\alpha)^2 & 2\cos(\alpha)\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha)^2 & \cos(\alpha)^2 & -2\cos(\alpha)\sin(\alpha) \\ -\cos(\alpha)\sin(\alpha) & \cos(\alpha)\sin(\alpha) & \cos(\alpha)^2 - \sin(\alpha)^2 \end{bmatrix}. \quad (2.3.22)$$

Portanto, tem-se a expressão da transformação plana de tensões do sistema global para o local

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (2.3.23)$$

As deformações são transformadas de forma análoga

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{Bmatrix}. \quad (2.3.24)$$

Como pode ser visto, para as deformações cisalhantes ocorre uma divisão por 2, a qual é responsável pela conversão da notação tensorial de deformação para a notação de deformação de Engenharia. Por este motivo utiliza-se a matriz de Reuter (Equação 2.3.26) e a sua inversão (Equação 2.3.27) para que os valores de deformação sejam compatíveis com a Equação 2.3.24. Vale ressaltar que o uso da matriz de Reuter é uma forma mais conveniente de manipular as expressões, evitando valores como $1/2$ e 2 em várias linhas e colunas da matriz. Então, reescrevendo a Equação 2.3.24, tem-se

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [R] [T] [R]^{-1} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (2.3.25)$$

onde

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad (2.3.26)$$

e

$$[R]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}. \quad (2.3.27)$$

Para a análise de tensões e deformações nas lâminas no sistema de coordenadas globais é necessário estabelecer uma relação entre a tensão e deformação no sistema de coordenadas local, dada por

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (2.3.28)$$

onde

$$[\bar{Q}] = [T]^{-1} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} [T], \quad (2.3.29)$$

é a matriz de rigidez reduzida transformada.

Segundo Jones (1999), por meio da Teoria Clássica dos Laminados (TCL) obtêm-se as deformações e as tensões de qualquer lâmina do laminado a partir das deformações e curvaturas da superfície média. Para isto, a TCL considera as seguintes hipóteses:

- O laminado é plano e seu plano médio está contido no plano xy ;
- As lâminas estão perfeitamente vinculadas entre si, promovendo a continuidade de deslocamentos;
- A matriz entre lâminas é infinitesimalmente fina, não sendo deformável por cisalhamento;
- Para laminados finos são empregadas aproximações cinemáticas de Kirchhoff, o que acarreta em $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = \varepsilon_z = 0$ e $\sigma_{xz}, \sigma_{yz} \ll \tau_{xy}, \sigma_y, \sigma_x$.

Considerando estas hipóteses, pode-se investigar o comportamento mecânico de um laminado determinando os esforços normais e momentos por meio de,

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix}, \quad (2.3.30)$$

onde N remete às forças (representado na Figura 2.11(a)) e M os momentos (representado na Figura 2.11(b)) resultantes por unidade de comprimento da seção transversal de cada ponto no laminado. A matriz $ABBD$ refere-se à matriz constitutiva do

laminado onde, submatrizes A e D representam a rigidez extensional e flexional, respectivamente. A matriz A , relaciona as forças resultantes por unidade de comprimento com as deformações, obtidas por

$$A = A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}), \quad (2.3.31)$$

onde \bar{Q}_{ij} é a matriz de rigidez reduzida transformada (demonstrada como é obtida na Eq. 2.3.28) nas coordenadas globais, n é o número de camadas, k é a camada que está sendo avaliada e z é a posição do plano médio de cada camada. Já a matriz D , a qual relaciona os momentos resultantes com as curvaturas, é calculada por

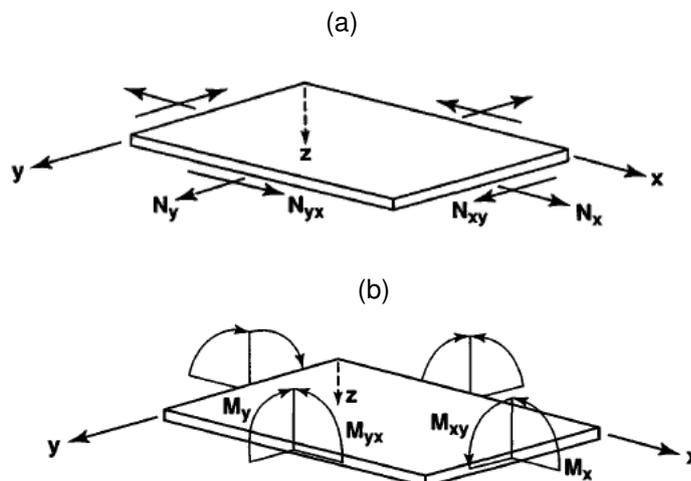
$$D = D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3). \quad (2.3.32)$$

Enquanto que a submatriz B , a qual é a matriz de acoplamento entre flexão e extensão, é definida por,

$$B = B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2). \quad (2.3.33)$$

Quando a matriz B não for nula, forças normais e cisalhantes atuantes no plano médio de uma laminado resultam em, além de deformações normais e distorções angulares, flexão e torção, que produzem as curvaturas. Da mesma maneira, a ação de momentos fletores, resultam em deformações no plano médio, além das curvaturas. Por fim, ε^0 e κ , representam as deformações e curvaturas do laminado, respectivamente (HAFTKA; GÜRDAL, 2012).

Figura 2.11 – (a) Forças resultantes no laminado, (b) Momento resultante no laminado.



A partir da Equação 2.3.33 são determinadas as deformações no plano médio e curvaturas do laminado medidas em relação ao plano médio (em termos do sistema de coordenadas globais), aplicando uma multiplicação esquerda da matriz $ABBD$ inversa

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix}. \quad (2.3.34)$$

A determinação das tensões e das deformações em cada lâmina é de suma importância para avaliar se haverá ou não ocorrência de falha da lâmina para um dado carregamento aplicado (TITA, 2006), o qual será abordado na seção 2.5. Vale ressaltar que é possível realizar uma abordagem onde considera-se as posições superior e inferior das camadas, o que resulta na obtenção das tensões e deformações também no topo e base da lâmina, possibilitando uma análise mais detalhada.

2.4 Mecanismos de Falha em Materiais Compósitos

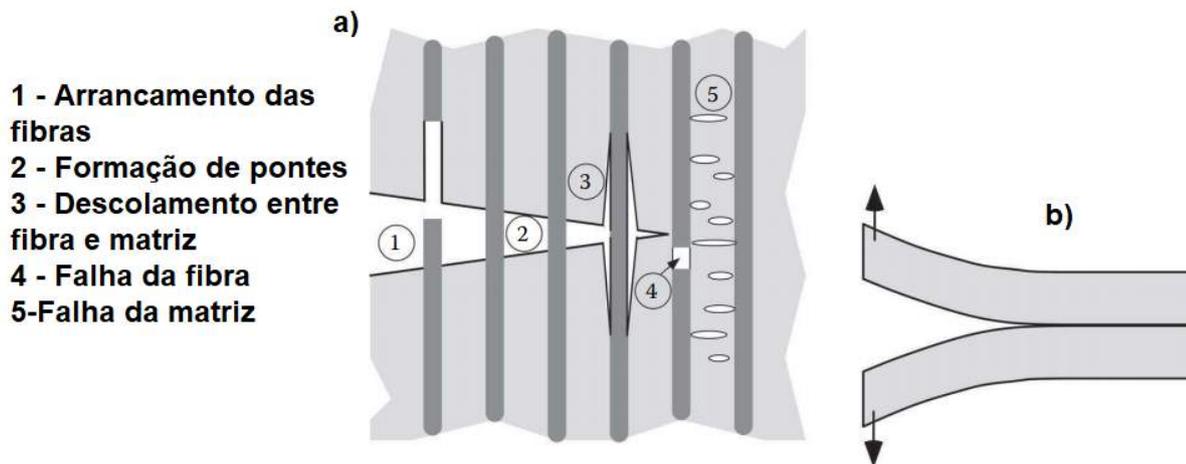
A análise de falha e fratura em materiais compósitos é mais complexa do que os metais, não só pelo fato de ser um material anisotrópico, em sua maioria, mas também por suas propriedades serem dependentes dos materiais selecionados, processo de fabricação e, principalmente, pela sequência de empilhamento das camadas definida (MARINUCCI, 2011).

Segundo Greenhalgh (2009), a falha de um material compósito reforçados com fibras contínuas, pode ser classificada em:

- FALHA TRANSLAMINAR - Ocorre no plano transversal, ou seja, no plano perpendicular às orientações longitudinais das fibras. Por meio desta, obtêm-se um plano seccionado do laminado e é possível avaliar a adesão da fibra com a matriz, bem como a fratura da fibra.
- FALHA INTERLAMINAR - Ocorre em planos paralelos aos das camadas. O seu mecanismo tende a ser dominado pela quebra da matriz e separação entre a fibra e a matriz (camadas), caracterizando uma má adesão entre as mesmas.
- FALHA INTRALAMINAR - São falhas que ocorrem internamente nas camadas. Elas são dependentes das condições de carregamento e o grau de adesão entre a fibra e matriz.

Conforme Greenhalgh (2009), a fractografia consiste na avaliação visual após a falha, a qual pode nos fornecer informações importantes, por meio dos mecanismos que levaram o laminado à falha. Na Figura 2.12, apresentam os principais mecanismos de falha em materiais compósitos.

Figura 2.12 – Mecanismo de falha em materiais compósitos poliméricos.



Fonte: adaptado de Anderson (2017)

2.4.1 Descolamento das Fibras - (*Fiber Debonding*)

Assumindo que um laminado com fibras contínuas e alinhadas na direção do carregamento apresente um entalhe perpendicular à direção das fibras. A partir do momento em que as tensões aumentam, concentram-se tensões nesta região formando uma microtrinca que, posteriormente tendem a se propagar. A microtrinca, na prática, se encontra na forma de descontinuidades na matriz. A transferência da carga da matriz para as fibras ocorre na forma de tensões de cisalhamento na interface fibra/matriz e quando há uma microtrinca na matriz, ocorre um aumento acentuado da tensão de cisalhamento que rompe a interface fibra/matriz. Uma vez que o carregamento aumenta, a trinca se propaga pela região da interface resultando no descolamento. Este mecanismo também é conhecido como *Fiber Debonding*, conforme Figura 2.12(a)(3). O descolamento das fibras é causado também pela fraca adesão entre a fibra e a matriz. Após o descolamento, ainda ocorre a transferência do carregamento para a fibra. Isto ocorre devido ao encolhimento da matriz, durante o processo de fabricação, as forças interfaciais são o meio para transferir o carregamento. Essas forças geram uma tensão desuniforme ao longo da fibra que se apresenta descolada, resultando na falha da fibra. Este fenômeno denomina-se arrancamento das fibras (*Pull-out*), conforme Figura 2.12(a)(1) (MARINUCCI, 2011). Depois do arrancamento das fibras, a propagação das trincas ocorrem através da matriz, e as fibras fraturadas se interconectam entre as superfícies de falha da matriz, formando pontes, e por este motivo são denominados como *Fiber Bridging*, representado na Figura 2.12(a)(2) (TALREJA; SINGH, 2012).

2.4.2 Falha da Fibra - (*Fiber Failure*)

As fibras podem apresentar defeitos como vazios e fratura no plano de cada fibra individual. Geralmente, estes, se encontram no interior da fibra e não na parte superficial (GREENHALGH, 2009). A falha de uma fibra, *Fiber Failure* (Figura 2.12(a)(4)), se origina a partir de uma fibra fraturada. Os compósitos unidirecionais, sob carregamento na mesma direção das fibras, tendem a falhar individualmente no seu ponto mais fraco. Este fato implica na redistribuição de tensões entre a matriz e as fibras, que por sua vez afeta as fibras da vizinhança, em muitas delas podem falhar (TALREJA; SINGH, 2012). Se as fibras que apresentam falhas forem aplicadas para a fabricação de compósitos, eles resultarão no aumento de fratura das fibras e levará o compósito à fratura (TALREJA; VARNA, 2015).

2.4.3 Falha da Matriz - (*Matrix Cracking*)

A falha da matriz, conforme Figura 2.12(a)(5), se origina a partir de forças transversais de tração em relação às fibras ou de forças de cisalhamento paralelas em relação às fibras, ou ainda, uma combinação dos dois. Devido à baixa resistência transversal das fibras, os compósitos tendem a se dividir transversalmente. Esta divisão depende de vários fatores como resistências das fibras/matriz, rigidez e resistência da matriz e a presença de danos secundários como a delaminação. Conforme o carregamento aumenta, o número de divisões aumenta, resultando em um menor espaçamento entre eles (GREENHALGH, 2009).

2.4.4 Falhas Interlaminares - (*Delamination*)

A delaminação, também conhecido como trinca interlaminar (Figura 2.12(b)), é o mecanismo de falha que ocorre entre as camadas, provocando a separação das mesmas (TALREJA; SINGH, 2012). Segundo Greenhalgh (2009), a delaminação é conhecida como o calcanhar de Aquiles dos compósitos laminados, pois causa a redistribuição das tensões no interior do laminado gerando a rupturas das camadas primárias da carga, reduzindo o ciclo de vida útil do material compósito (MALLICK, 2007). Este mecanismo é oriundo de impactos, entalhes, defeitos de fabricação e concentrações de tensão. São mais críticos em tensões compressivas diretas ou induzidas por flexão (TALREJA; SINGH, 2012).

2.5 Critérios de Falha de Materiais Compósitos

Em um projeto, é necessário assegurar que a estrutura resista ao carregamento imposto pela aplicação, e verificar se as tensões oriundas pelos carregamentos não excedam o limite de resistência do laminado (material compósito) ou de apenas uma lâmina (MARINUCCI, 2011). Quando apenas uma lâmina falha, denomina-se como *First Ply Failure* (FPF). Já quando ocorre a falha no laminado denomina-se como *Last Ply Failure* (LPF). O primeiro é considerado um método mais conservador, pois a falha de uma lâmina determina falha do material compósito. Deste modo, pode-se utilizar baixos coeficientes de segurança. Já o segundo, é considerado um método mais complexo, pois necessita de um estudo mais aprofundado em relação às condições de carregamento e distribuições de tensões. Além disso, este método exige altos coeficientes de segurança em seus projetos (TITA, 2006).

O comportamento sob carregamentos de um laminado é avaliado por modelos matemáticos os quais requerem valores das propriedades do material por meio analítico ou experimental. Tal avaliação permite antecipar ajustes necessários com a finalidade de reduzir o número de ensaios, conseqüentemente, os custos do projeto. Os critérios de falha mais usuais são o da máxima tensão, Tsai-Wu e Tsai-Hill.

2.5.1 Critério de Falha da máxima tensão

De acordo com Voyiadjis e Kattan (2005), o critério da máxima tensão considera que o laminado falha quando as tensões atuantes excedem as respectivas resistências. Este critério é denotado matematicamente por 5 subcritérios conforme

$$\sigma_1^T \geq X_T, \quad (2.5.35)$$

$$\sigma_1^C \leq -X_C, \quad (2.5.36)$$

$$\sigma_2^T \geq Y_T, \quad (2.5.37)$$

$$\sigma_2^C \leq -Y_C, \quad (2.5.38)$$

$$|\tau_{12}| \geq S_{12}, \quad (2.5.39)$$

onde σ_1^T é a tensão normal trativa longitudinal da lâmina; X_T é a resistência máxima de tração longitudinal; σ_1^C é a tensão normal compressiva longitudinal da lâmina; X_C é a resistência máxima de compressão longitudinal; σ_2^T é a tensão normal trativa trans-

versal da lâmina; Y_T é a resistência máxima de tração transversal; σ_2^C é a tensão normal compressiva transversal da lâmina; Y_C é a resistência máxima de compressão transversal e S_{12} é resistência máxima de cisalhamento.

2.5.2 Critério de Falha de Tsai-Hill

Conforme Chawla (2012), esta teoria de falha baseou-se no critério da energia de distorção para materiais dúcteis. Ela estabelece que a falha de um material ortotrópico no estado plano de tensões ocorre de acordo com

$$f(\sigma) = \frac{\sigma_1}{X} + \frac{\sigma_2}{Y} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\tau_{12}}{S_{12}} \leq 1, \quad (2.5.40)$$

sendo X as resistências na direção longitudinal; Y as resistências na direção transversal e S_{12} as resistências de cisalhamento no plano 1-2.

Se as tensões de compressão estiverem envolvidas, as respectivas resistências de compressões devem ser consideradas, ou seja, se σ_1 e σ_2 forem ambas positivas ou ambas negativas, respectivamente as resistências trativas X_T e Y_T e compressivas X_C e Y_C deverão ser utilizadas nas equações, conforme Equações 2.5.41, 2.5.42 2.5.43 e 2.5.44. A partir destas equações é possível obter os envelopes e verificar se o material falhou graficamente através de

$$\frac{\sigma_1}{X_T} + \frac{\sigma_2}{Y_T} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X_T^2} + \frac{\tau_{12}}{S_{12}} \leq 1, \quad (2.5.41)$$

$$\frac{\sigma_1}{X_C} + \frac{\sigma_2}{Y_T} + \frac{\sigma_1\sigma_2}{X_C^2} + \frac{\tau_{12}}{S_{12}} \leq 1, \quad (2.5.42)$$

$$\frac{\sigma_1}{X_C} + \frac{\sigma_2}{Y_C} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X_C^2} + \frac{\tau_{12}}{S_{12}} \leq 1, \quad (2.5.43)$$

$$\frac{\sigma_1}{X_T} + \frac{\sigma_2}{Y_C} + \frac{\sigma_1\sigma_2}{X_T^2} + \frac{\tau_{12}}{S_{12}} \leq 1. \quad (2.5.44)$$

De acordo com Tita (2006), na prática, para verificar se o laminado falhou ou não, é utilizado um fator de segurança ($FS = \sqrt{f(\sigma)}$) e margem de segurança (MS) definida por

$$MS = \frac{1}{\sqrt{f(\sigma)}} - 1. \quad (2.5.45)$$

Considerando a relação mostrada na Equação 2.5.45, se MS for menor que zero a lâmina irá falhar. Se MS for maior que zero a lâmina apresenta uma resistência satis-

fatória. Segundo Marinucci (2011), a limitação que o método de Tsai-Hill apresenta é a de não identificar o tipo de falha (por meio de tração, compressão ou cisalhamento) associada às fibras que falharam. Por outro lado, ela nos oferece o recurso de calcular, por meio da tensão, a carga que cada laminado resiste.

2.5.3 Critério de Falha de Tsai-Wu

De acordo com Kaw (2005) e Tita (2006), o critério de falha de Tsai-Wu é aplicado em lâminas no estado plano de tensão. A falha de uma lâmina ocorre de acordo com

$$AS_f^2 + BS_f < 1, \quad (2.5.46)$$

onde

$$\begin{aligned} A &= H_{11}\sigma_1^2 + H_{22}\sigma_2^2 + H_{66}\tau_{12}^2 + 2H_{12}\sigma_1\sigma_2 \\ B &= H_1\sigma_1 + H_2\sigma_2 + H_6 \end{aligned} \quad (2.5.47)$$

Este critério é mais geral que Tsai-Hill, visto que diferencia resistências de compressão, de tensão da lâmina e cisalhamento no plano σ_i^C, σ_i^T e σ_{ij} , respectivamente. Desta maneira, os componentes $H_1, H_2, H_6, H_{11}, H_{22}$ e H_{66} da Equação 2.5.46 são determinados por cinco parâmetros de resistência de uma lâmina unidirecional conforme

$$H_1 = \frac{1}{(\sigma_1^T)} - \frac{1}{(\sigma_1^C)}, \quad (2.5.48)$$

$$H_{11} = \frac{1}{(\sigma_1^T)(\sigma_1^C)}, \quad (2.5.49)$$

$$H_2 = \frac{1}{(\sigma_2^T)} - \frac{1}{(\sigma_2^C)}, \quad (2.5.50)$$

$$H_{22} = \frac{1}{(\sigma_2^T)(\sigma_2^C)}, \quad (2.5.51)$$

$$H_6 = 0, \quad (2.5.52)$$

$$H_{66} = \frac{1}{(\tau_{12})^2}. \quad (2.5.53)$$

O único componente que não pode ser obtido diretamente é o H_{12} , pois é determinado experimentalmente por meio de um ensaio biaxial, o qual considera um acoplamento entre σ_1 e σ_2 . Desta maneira, determina-se H_{12} por

$$H_{66} = -\frac{1}{2}\sqrt{H_{11}H_{22}}. \quad (2.5.54)$$

Resolvendo a Equação 2.5.46, obtêm-se:

$$S_f^+ = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4A}}{2A},$$

$$S_f^- = \left| \frac{-B - \sqrt{B^2 + 4A}}{2A} \right|. \quad (2.5.55)$$

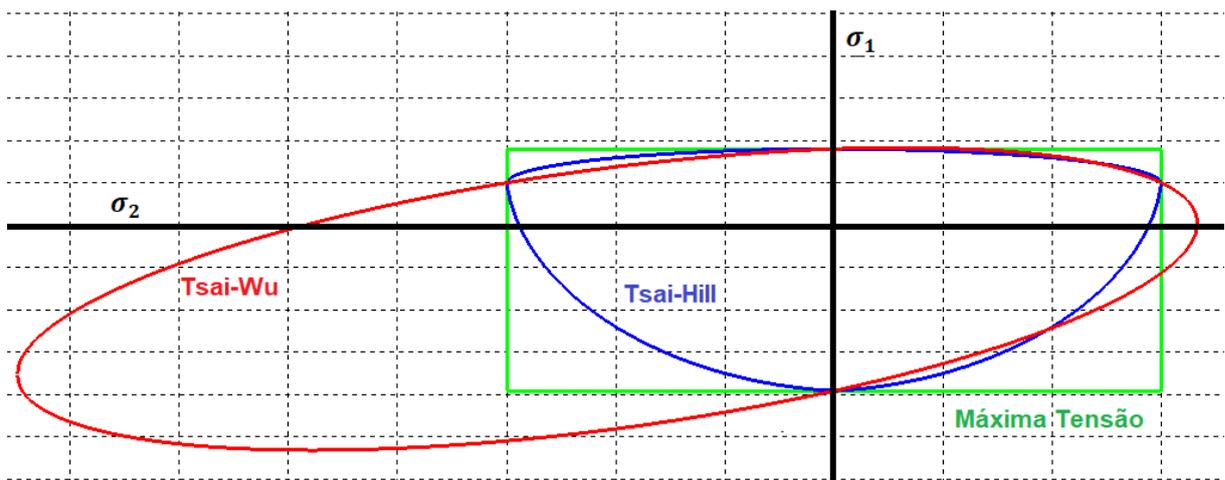
Destes dois valores obtidos pela Eq. 2.5.55, conforme Tita (2006), o menor é escolhido como fator de segurança (S_f^- e S_f^+) e segue para o cálculo da margem de segurança

$$MS = S_f - 1. \quad (2.5.56)$$

Do mesmo modo que a margem de segurança do critério de Tsai-Hill, se a MS obtida for maior que zero a lâmina apresenta uma resistência satisfatória.

Vale ressaltar que nos três critérios apresentados, pode-se verificar se houve a falha graficamente. Quando as tensões estimadas estiverem fora do envelope, ocorre a falha da estrutura. A Figura 2.13 mostra uma comparação entre o envelope de máxima tensão, Tsai-Wu e Tsai-Hill.

Figura 2.13 – Comparação entre os três envelopes de falha: Máxima tensão, Tsai-Wu e Tsai-Hill.



Fonte: produção do próprio autor.

2.6 Otimização Estrutural

A otimização estrutural consiste em um procedimento matemático que tem como finalidade obter a extremização de funcionais (ARORA, 2004). Esta extremização de funcionais consiste em determinar os pontos máximos ou mínimos de uma função de várias variáveis (variáveis de projeto), como valores dentro de uma determinada região do espaço multidimensional. Pode-se tomar como exemplo funcionais de máximo deslocamento, minimização de massa e de flexibilidade. No entanto, além da característica de determinar a extremização, ou seja, obter o melhor resultado de uma dada operação, a otimização estrutural deve respeitar uma série de restrições (HAFTKA; GÜRDAL, 2012).

Conforme Arora (2004), define-se um problema de otimização determinando um vetor

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.6.57)$$

de variáveis de projeto que minimizem ou maximizem a função custo, também denominada função objetivo

$$f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.6.58)$$

que pode ser sujeito a p restrições de igualdade

$$h_j(\mathbf{x}) = h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; \quad j = 1 \text{ até } p \quad (2.6.59)$$

e a m restrições de desigualdade

$$g_i(\mathbf{x}) = g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; \quad i = 1 \text{ até } m \quad (2.6.60)$$

Ainda, os limites laterais das variáveis de projeto, também conhecidos como restrições laterais, são definidos como

$$x_{il} \leq x_i \leq x_{iu}, \quad (2.6.61)$$

onde x_{il} é o limite inferior e x_{iu} o limite superior de uma variável de projeto. Estes limites podem ser implementados como restrições de desigualdade.

Os métodos numéricos de otimização são divididos em duas principais áreas: os combinatórios e evolucionários, e os métodos baseados em gradiente. Os métodos combinatórios e evolucionários, assim como o próprio nome sugere, encontram a solução ótima a partir de várias combinações. Por este motivo, estes tendem a não ficar presos em um mínimo local (candidatos à mínimos globais), no entanto isto implica em um maior custo computacional. Já os métodos baseados em gradiente (os quais cal-

culam a derivada parcial das funções), também conhecido como métodos de descida, apresentam menor custo computacional porque o método tende a encontrar o mínimo local mais próximo do ponto de partida. Desta forma, a probabilidade deste método ficar preso em um mínimo local é maior. Nestes casos, avalia-se o problema de otimização partindo de diversos pontos iniciais até encontrar o menor valor da função objetivo.

A Figura 2.14 mostra as etapas de um procedimento de algoritmo de otimização numérica. A primeira etapa consiste em estimar um ponto inicial de partida, o qual é testado. Se o ponto não satisfizer as condições, inicia-se a busca do ponto ótimo por meio de um processo iterativo até o momento que satisfizer as condições de otimalidade. Conforme Arora (2004), a atualização dos pontos avaliados a cada iteração, ou seja, as variáveis de projeto, são definidas por

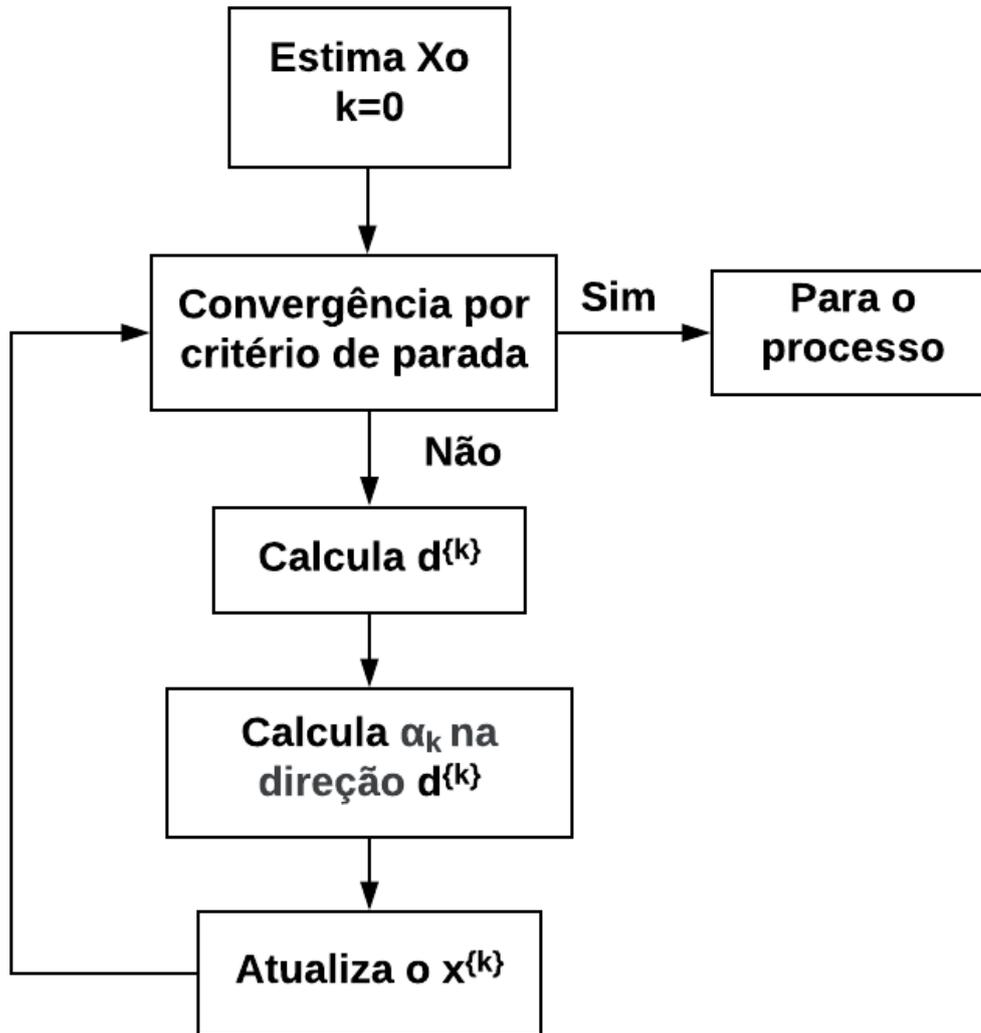
$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^{(k)} + \Delta\mathbf{x}; \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.6.62)$$

em que k é o número da iteração atual e $\Delta\mathbf{x}$ refere-se a mudança do ponto atual. Este processo ocorre até que a solução ótima, \mathbf{x}^k seja obtida. Por fim, para calcular a mudança $\Delta\mathbf{x}^{(k)}$,

$$\Delta\mathbf{x} = \alpha_k \mathbf{d}^{(k)}, \quad (2.6.63)$$

onde $\mathbf{d}^{(k)}$ é a direção de busca e α_k é um escalar positivo denominado como passo. A direção de busca é a direção para o mínimo de cada iteração e o passo é quanto será necessário andar na direção $\mathbf{d}^{(k)}$. Há diferentes métodos para determinar o passo ideal, tais como busca do Intervalo Igual, Busca Alternada do Intervalo Igual e Razão Áurea. Já em relação os métodos de direção de busca, os métodos baseado em gradiente mais usuais são *Steepest Descent*, Gradiente Conjugados, Newton Modificado e Quasi-Newton.

Figura 2.14 – Procedimento geral de um algoritmo de otimização numérica.



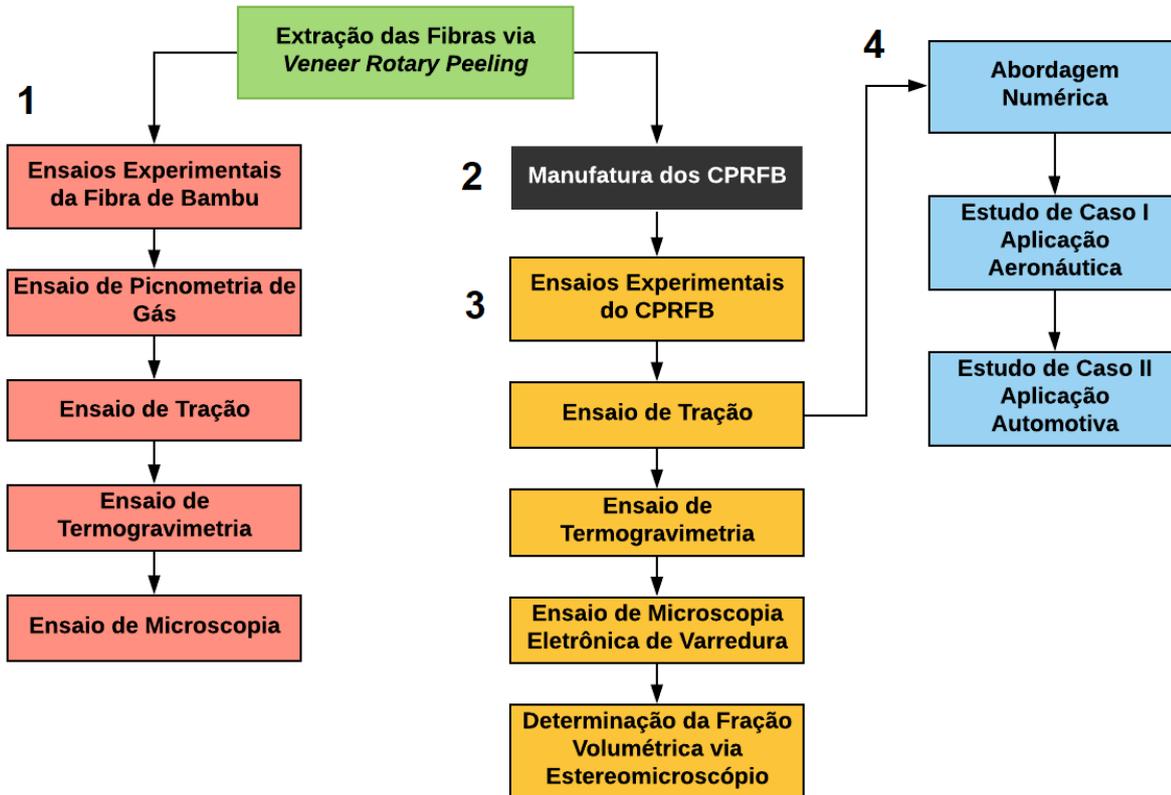
Fonte: produção do próprio autor.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Este capítulo apresenta, as metodologias e materiais utilizados em todas as etapas do presente trabalho, as quais foram divididas em quatro partes: ensaios experimentais da fibra de bambu, manufatura dos CPRFB, ensaios experimentais do CPRFB e abordagem numérica. Conforme Figura 3.1, a metodologia geral inicia-se explicando o processo de extração mecânica das fibras de bambu, seguido da primeira etapa, a qual apresenta o procedimento dos ensaios experimentais da fibra de bambu, como ensaio de picnometria de gás, ensaio de tração, termogravimetria e microscopia da fibra. A segunda e terceira etapas apresentam os procedimentos de fabricação da placa e corpos de prova do CPRFB e ensaios experimentais do CPRFB, como ensaio de tração, termogravimetria, microscopia eletrônica de varredura e determinação da fração volumétrica via estereomicroscópio. Por fim, a última etapa, a abordagem numérica, apresenta a metodologia utilizada nos dois estudos de casos que estabeleceu uma avaliação da aplicabilidade e viabilidade de CRPFB em estruturas aeronáuticas e automotivas. Ainda, a metodologia de otimização que determina o número de camadas e sequência de empilhamento ideal para dados carregamentos é apresentada.

Figura 3.1 – Procedimento da metodologia geral do trabalho.



Fonte: produção do próprio autor.

3.1 Fibras de Bambu Extraídas por *Veneer Rotary Peeling*

Os ensaios realizados com as fibras de bambu, *Guadua angustifolia*, foram adquiridos da empresa Associação Agroecológica Viverde (São Paulo). Estas fibras foram extraídas a partir de um método de extração usualmente utilizado em madeira, chamado *veneer rotary peeling*, conforme Figura 3.2(a). Foram utilizados dois colmos de 6 metros com aproximadamente 3,5 anos de idade. O comprimento internodal definiram o comprimento máximo das fibras de bambu, conforme Figura 3.2(b).

Figura 3.2 – (a) Extração mecânica via *veneer rotary peeling*, (b) comprimento das fibras de bambu.



Fonte: Viverde (2019)

As fibras extraídas de acordo com a região do colmo, topo, meio e base, representados na Figura 3.3, não foram submetidos à tratamento de superfície. Por esta razão, elas ficaram cobertas pelo tecido parenquimatoso (tecido vegetal) implicando na variação dos diâmetros das mesmas.

Figura 3.3 – Fibras de bambu extraídas conforme a região do colmo - (a) topo, (b) meio, (c) base.



Fonte: Viverde (2019)

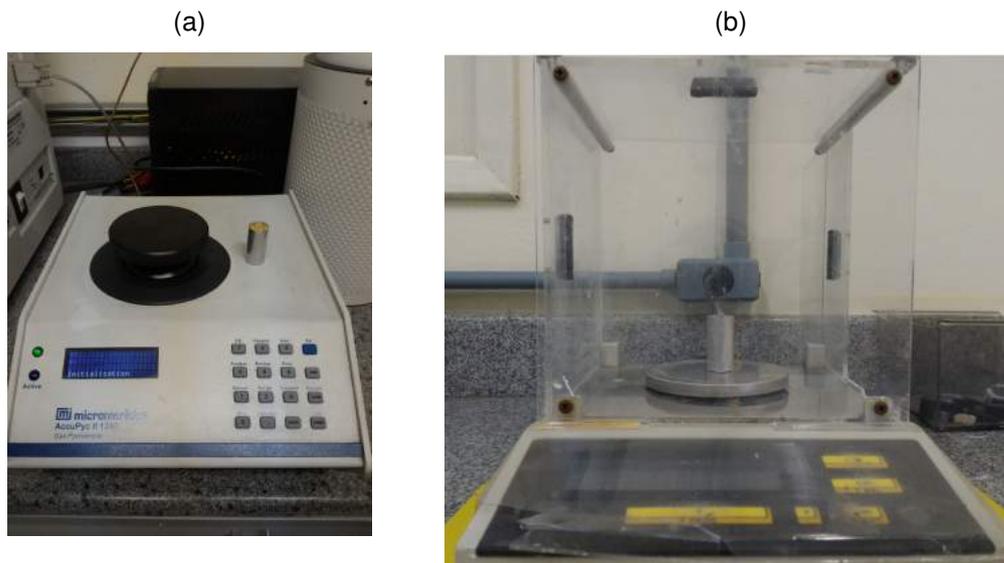
3.2 Ensaios Experimentais da Fibra de Bambu

3.2.1 Ensaio da Densidade por Picnometria de Gás

O ensaio de picnometria, realizado no CMU - Centro Multiusuário do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina (CCT/UEDESC), foi utilizado para determinar a densidade da fibra de bambu *Guadua angustifolia*. O dispositivo utilizado foi *AccuPyc II 1340 Pycnometer* (conforme Figura 3.4 (a)), o qual

utilizou gás hélio para realizar a comparação da variação da pressão na câmara. Algumas fibras das regiões do topo, meio e base foram cortadas e inseridas em um recipiente (cadinho), com volume conhecido. A massa da amostra foi aferida na balança de precisão milesimal (conforme Figura 3.4 (b)), em que foi obtida o valor de 1,092 g. Para fins estatísticos, a mesma amostra foi submetida a 10 ensaios.

Figura 3.4 – (a) Dispositivo de picnometria de gás, (b) balança.

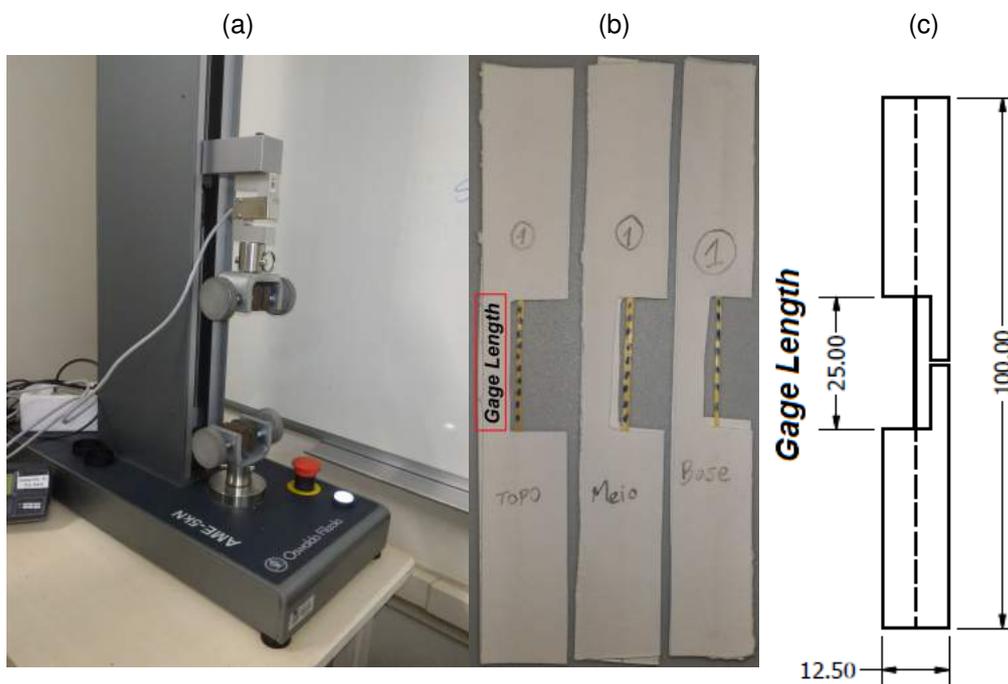


Fonte: produção do próprio autor.

3.2.2 Ensaio de Tração da Fibra de Bambu

O ensaio de tração da fibra de bambu, realizado no CMU - Centro Multiusuário do CCT/UEDESC, baseou-se na norma ASTM D3379 (ASTM, 1975). O experimento foi realizado na máquina universal de testes Oswaldo Filizola, modelo AME-5kN (conforme Figura 3.5(a)), sob condição de carga e deslocamento controlados. A velocidade de tração de 2 mm/min foi selecionada conforme a norma ASTM D3379. Dez amostras de cada região do colmo (topo, meio e base) foram preparadas, conforme Figura 3.5(b). A avaliação das propriedades mecânicas das fibras de diferentes regiões do colmo tem como objetivo verificar o exposto na teoria, que não há consideráveis influências. As extremidades das fibras foram coladas e na região do *gage length* (conforme representado nas Figuras 3.5(b) 3.5(c)) o corpo de prova foi reforçado com uma tira de papel com a finalidade de preservar a fibra até o momento do ensaio, o qual foi cortada antes de ser fixada na máquina universal de tração. Na Figura 3.5(c) estão dispostas as dimensões dos corpos de prova. O *gage length* apresentou 25 mm de comprimento e as fibras 100 mm de comprimento.

Figura 3.5 – (a) Máquina universal de testes, (b) corpos de prova do ensaio à tração de fibra de bambu, (c) dimensões do corpo de prova (mm).



Fonte: produção do próprio autor.

Os diâmetros das fibras de bambu foram mensurados com o micrômetro externo 0-25 mm digital Mitutoyo com resolução milesimal, conforme mostrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Micrômetro externo digital.



Fonte: produção do próprio autor.

3.2.3 Ensaio de Termogravimetria da Fibra de Bambu

O estudo da estabilidade térmica da fibra de bambu foi realizado por meio da análise de termogravimetria (TG), em que utilizou-se o analisador térmico simultâneo Netzsch STA 449 C (Figura 3.7), do CMU - Centro Multiusuário do CCT/UDESC. Na análise, a amostra com 25.21 *mg* foi submetida à temperatura de 20 até 650°C, sob uma taxa de 10 °C/*min*. A atmosfera de trabalho adotada foi o gás nitrogênio o qual foi configurado com uma vazão da ordem de 40 *ml/min*.

Figura 3.7 – Analisador térmico simultâneo Netzsch STA 449 C.



Fonte: produção do próprio autor.

3.2.4 Ensaio de Microscopia da fibra

Com o objetivo de verificar a superfície da fibra de bambu obtida pelo método de extração veneer rotary peeling foi utilizado o estereomicroscópio Leica MZ9.5 do CMU - Centro Multiusuário do CCT/UDESC.

Figura 3.8 – Estereomicroscópio Leica MZ9.5.



Fonte: produção do próprio autor.

3.3 Manufatura dos Corpos de Prova - CPRFB

O processo de manufatura utilizado para obter as placas de CPRFB foi baseado no método de moldagem por transferência de resina assistida à vácuo. Consistiu na aplicação da resina diretamente sobre as fibras e não por sucção conforme o método original. A resina epóxi AR260 utilizada com endurecedor AH260 (na proporção 3:1), foi adquirida da empresa Barracuda, Rio de Janeiro. A viscosidade da resina e endurecedor a 25 °C é de 1200 e 30 *cps*, respectivamente. O tempo de gelificação é de 290 minutos a 25 °C. Com o finalidade de retirar a umidade, as fibras de bambu foram submetidas ao forno à 60 °C durante 6 horas. As placas de 30 x 30 *cm* tiveram as fibras empilhadas de acordo com as seguintes orientações, $[0^\circ]_3$, $[90^\circ]_3$ e $[\pm 45^\circ]_{1S}$, as quais foram baseada nas normas ASTM D3039 (ASTM, 1971) e D3518 (ASTM, 1976). A forma estabelecida para controlar a quantidade de fibras em cada camada foi por meio da massa, onde foi adotada 22 *g* por camada. Uma vez definido a massa das fibras utilizadas em cada placa, pode-se estimar a quantidade de resina requerida para a fabricação do mesmo (o cálculo utilizado para determinar a quantidade de resina a partir da massa das fibras está disposto no anexo C). Vale ressaltar que com o objetivo de avaliar a influência das propriedades mecânicas de acordo com a região que as fibras de bambu foram retiradas do colmo, o empilhamento mencionado foi realizado com as fibras do topo, meio e base, respectivamente.

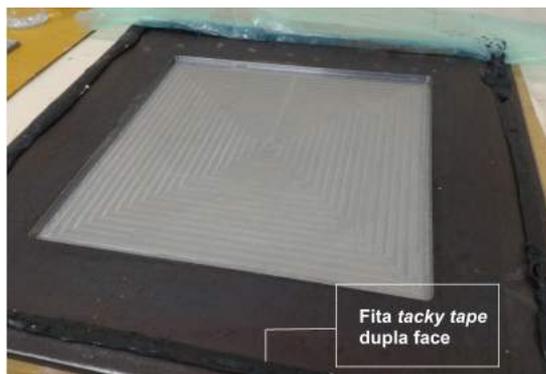
O processo de manufatura, resumidamente, consistiu nas seguintes etapas:

Etapas 1 → Preparo do molde

O preparo do molde consiste em limpar o molde e a tampa de aço carbono e

delimitar o perímetro da bolsa à vácuo com fita *tacky tape* (fita selante) dupla face. Este é um produto a base de borrachas e resinas sintéticas, utilizado nos processos de laminação a vácuo, sistemas por infusão e auto clave para vedar ou isolar o filme de vácuo (bolsa), permitindo exercer o máximo de pressão negativa ao realizar a laminação.

Figura 3.9 – Molde de aço carbono.



Fonte: produção do próprio autor.

Etapa 2 → Aplicação do agente desmoldante

Os agentes desmoldantes proporcionam uma barreira física e/ou química na superfície de moldagem, facilitando que a peça moldada seja separada do molde. Sem essa barreira, o substrato se fundiria à superfície do molde, resultando em difícil limpeza e perda na eficiência da produção, devido aos constantes reparos, tanto na peça acabada quanto no molde. A cera desmoldante também proporciona maior brilho aos moldes e, em decorrência, aos produtos moldados. Em geral, ela é formulada a partir da combinação de ceras naturais de carnaúba, solventes e outros componentes especiais, que juntos possibilitam uma fácil aplicação, sendo indicadas para moldes abertos.

Etapa 3 → Forramento do molde

Após a aplicação do agente desmoldante, o molde e a tampa são forrados com um tecido desmoldante, *Peel Ply*, conforme Figura 3.10. *Peel Ply* é um tecido sintético que é colocado sobre a superfície com epóxi à medida em que este se ajusta. Os tecidos do tipo *Peel Ply* são produzidos em diversas formas de textura, que produzem uma rugosidade determinada para cada tipo de estrutura. Geralmente o peso destes tecidos variam entre 65 e 85 g/m², sendo os mais pesados, mais resistentes à desmoldagem. Estes tecidos são produzidos de forma que possam ser facilmente removidos mesmo nas condições de colagem mais rígidas.

Figura 3.10 – Aplicação do agente e tecido desmoldante.



Fonte: produção do próprio autor.

Etapa 4 → Empilhamento das camadas

O empilhamento das camadas é o procedimento em que se insere as camadas das fibras conforme as sequências de empilhamento e orientações do projeto. Neste processo, as fibras foram posicionadas e colocadas manualmente com o auxílio de uma pinça.

Figura 3.11 – Empilhamentos das fibras de bambu de acordo com suas respectivas sequências e orientações.



Fonte: produção do próprio autor.

Etapa 5 → Aplicação da resina

O sistema de resina epóxi de alta performance AR260 de baixa viscosidade com endurecedor AH260 foi selecionado para laminação com *vacuum bag* e infusão a vácuo. Segundo a Barracuda Composites (2020), o sistema foi desenvolvido para um endurecedor AH260 na proporção de mistura 100:26 e que apresenta excelentes propriedades mecânicas quando curadas à temperatura ambiente. O sistema tem um tempo de laminação de aproximadamente 4 horas a temperatura de 25 °C o que proporciona extrema flexibilidade para a construção de peças. Após o preparo do sistema de resina, a mesma é distribuída na região central do laminado.

Etapa 6 → Fechamento do molde

Conforme mencionado, após o revestimento da tampa de aço com uma camada de agente e tecido desmoldante, a mesma é encaixada sobre o molde.

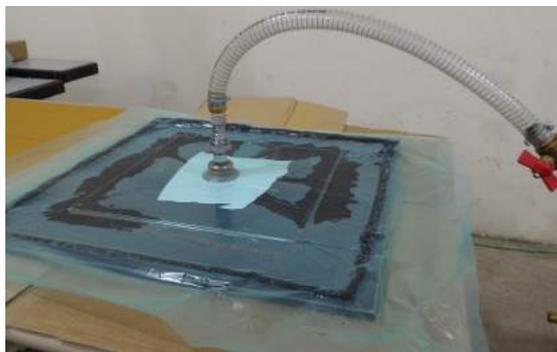
Etapa 7 → Fechamento da bolsa

Após o fechamento do molde, um filme plástico é selado no perímetro do molde, com o auxílio da fita dupla face, de onde o ar será retirado por uma bomba de vácuo.

Etapa 8 → Aplicação do vácuo

Por meio de uma bomba de vácuo, o ar contido na bolsa é succionado gerando uma diferença de pressão. Desta forma, o plástico exerce pressão sobre a tampa de aço, garantindo a compactação do compósito. A aplicação de vácuo irá depender do tempo de gelificação da resina epóxi, que para o sistema AR206 é de aproximadamente 4 horas a temperatura de 25 °C.

Figura 3.12 – Aplicação do vácuo.



Fonte: produção do próprio autor.

Etapa 9 → Tempo de cura

Após desligar a bomba à vácuo, a placa (laminado) fica diposta 36 horas no molde até curar por completo.

Etapa 10 → Obtenção da placa

Compósito epoxídico reforçado com fibras de bambu após a impregnação.

Figura 3.13 – Placa de matriz epóxi reforçado com fibras de bambu impregnada.



Fonte: produção do próprio autor.

Etapa 10 → Obtenção dos corpos de prova

Com o auxílio de uma máquina de corte (Clipper TR232L), conforme Figura 3.14(a), os corpos de prova do CPRFB são cortados acordo com as normas ASTM D3039 e D3518 (Figura 3.14(b)).

Figura 3.14 – (a) Máquina de corte, (b) corpos de prova (*mm*).



Fonte: produção do próprio autor.

3.3.1 Dimensões dos Corpos de Prova - CPRFB

Os corpos de provas foram mensurados com um paquímetro digital e manual da Mitutoyo, com incremento digital/valor de divisão de $0,01 \text{ mm}$ e $0,05 \text{ mm}$, respectivamente. O primeiro foi utilizado para mensurar a largura e a espessura. Já o segundo, foi utilizado para mensurar o comprimento. Nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3, estão dispostas as dimensões de cada corpo de prova (CDP), incluindo as respectivas área das seções transversais.

Cabe mencionar que as espessuras dos corpos de prova de cada sequência de empilhamento apresentaram grande variação, o qual pode ser justificado por alguns fatores do processo de manufatura utilizado. A variação da proporção de resina/fibra aplicada sobre o molde e do procedimento de ajuste do avanço da tampa de aço sobre o laminado durante a compactação, resultou em placas com diferentes espessuras.

Tabela 3.1 – Dimensões do corpo de prova com fibras extraídas da região da base do colmo.

Empilhamento	CDP	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)	Largura 3 (mm)	Largura Média (mm)	Espessura 1 (mm)	Espessura 2 (mm)	Espessura 3 (mm)	Espessura Média (mm)	Área Média (mm ²)
[0°] ₃	1	25,41	25,29	25,4	25,37	8,96	8,75	7,51	8,41	213,25
	2	25,59	25,38	25,27	25,41	9,27	8,57	8,55	8,80	223,55
	3	25,4	25	24,82	25,07	7,32	8,47	6,93	7,57	189,89
	4	25,18	24,78	24,94	24,97	7,56	8,11	7,42	7,70	192,16
	5	25,34	25,1	25,61	25,35	7,53	8,25	8,12	7,97	201,96
[±45°] _{1S}	1	25,55	25,48	25,33	25,45	6,58	6,78	5,8	6,39	162,56
	2	25,73	25,16	25,85	25,58	7,07	6,12	6,36	6,52	166,70
	3	25,68	25,81	25,49	25,66	5,65	6,36	7,08	6,36	163,28
	4	25,32	25,25	25,71	25,43	7,52	6,22	5,96	6,57	166,97
	5	25,51	25,25	25,33	25,36	5,92	6,84	6,31	6,36	161,23
[90°] ₃	1	25,32	25,27	25,08	25,22	4,25	4,47	4,23	4,32	108,88
	2	25,01	25,11	25,07	25,06	3,67	4,38	4,19	4,08	102,26
	3	25,55	25,45	25,2	25,40	3,83	4,79	3,64	4,09	103,80
	4	25,46	25,26	25,7	25,47	4,04	4,31	3,56	3,97	101,13
	5	25,55	25,35	25,25	25,38	4,02	4,38	4,02	4,14	105,09

Tabela 3.2 – Dimensões do corpo de prova com fibras extraídas da região do meio do colmo.

Empilhamento	CDP	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)	Largura 3 (mm)	Largura Média (mm)	Espessura 1 (mm)	Espessura 2 (mm)	Espessura 3 (mm)	Espessura Média (mm)	Área Média (mm ²)
[0°] ₃	1	25,62	25,8	25,83	25,75	6,53	6,89	5,91	6,44	165,92
	2	25,18	25,26	25,14	25,19	6,32	6,82	5,11	6,08	153,26
	3	25,63	25,31	25,61	25,52	5,66	6,55	6,12	6,11	155,91
	4	25,4	25,32	25,14	25,29	5,73	6,52	6,6	6,28	158,88
	5	25,5	25,57	25,52	25,53	7,61	6,7	6,15	6,82	174,11
[±45°] _{1S}	1	25,47	25,12	25,23	25,27	6,65	7,91	7,78	7,45	188,20
	2	25,54	25,67	25,46	25,56	7,11	7,74	7,54	7,46	190,74
	3	24,96	24,97	25,15	25,03	6,26	7,37	7,84	7,16	179,11
	4	25	25,72	25,44	25,39	7,04	7,61	7,55	7,40	187,86
	5	25,32	25,72	25,18	25,41	6,23	7,61	7,87	7,24	183,86
[90°] ₃	1	25,29	25,79	25,39	25,49	3,21	4,03	3,39	3,54	90,32
	2	25,39	25,19	25,07	25,22	3,63	3,95	3,27	3,62	91,20
	3	25,34	25,18	25,39	25,30	3,31	3,35	3,84	3,50	88,56
	4	25,20	25,13	25,21	25,18	3,55	4,15	3,35	3,68	92,75
	5	25,14	25,6	25,6	25,45	3,6	4,05	3,3	3,65	92,88

Tabela 3.3 – Dimensões do corpo de prova com fibras extraídas da região do topo do colmo.

Empilhamento	CDP	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)	Largura 3 (mm)	Largura Média (mm)	Espessura 1 (mm)	Espessura 2 (mm)	Espessura 3 (mm)	Espessura Média (mm)	Área Média (mm ²)
[0°] ₃	1	25,1	25,27	25,34	25,24	2,89	3,77	4,11	3,59	90,60
	2	25,34	25,55	25,55	25,48	3,62	3,93	3,58	3,71	94,53
	3	25,24	25,61	25,89	25,58	4,64	3,93	3,5	4,02	102,92
	4	25,40	25,42	25,47	25,43	3,42	3,8	2,71	3,31	84,17
	5	25,63	25,63	24,96	25,41	4,03	4,36	3,81	4,07	103,32
[±45°] _{1S}	1	24,95	25,22	25,39	25,19	5,76	6,45	5,85	6,02	151,62
	2	25,53	25,37	25,54	25,48	5,64	6	6,24	5,96	151,86
	3	25,52	25,19	25,2	25,30	6,41	6,01	5,6	6,01	151,99
	4	25,08	25,25	25,55	25,29	5,72	6,29	6,02	6,01	152,01
	5	25,11	25,15	25,16	25,14	5,55	6,16	5,76	5,82	146,40
[90°] ₃	1	25,13	25,19	25,28	25,20	4,72	4,87	5,14	4,91	123,73
	2	25,25	25,61	25,2	25,35	4,85	4,89	4,99	4,91	124,48
	3	25,3	25,25	25,31	25,29	4,89	4,88	4,8	4,86	122,81
	4	25,14	25,23	25,34	25,24	4,79	4,89	5,14	4,94	124,67
	5	25,15	25,11	25,61	25,29	5,06	4,93	4,74	4,91	124,17

3.4 Ensaios Experimentais do CPRFB

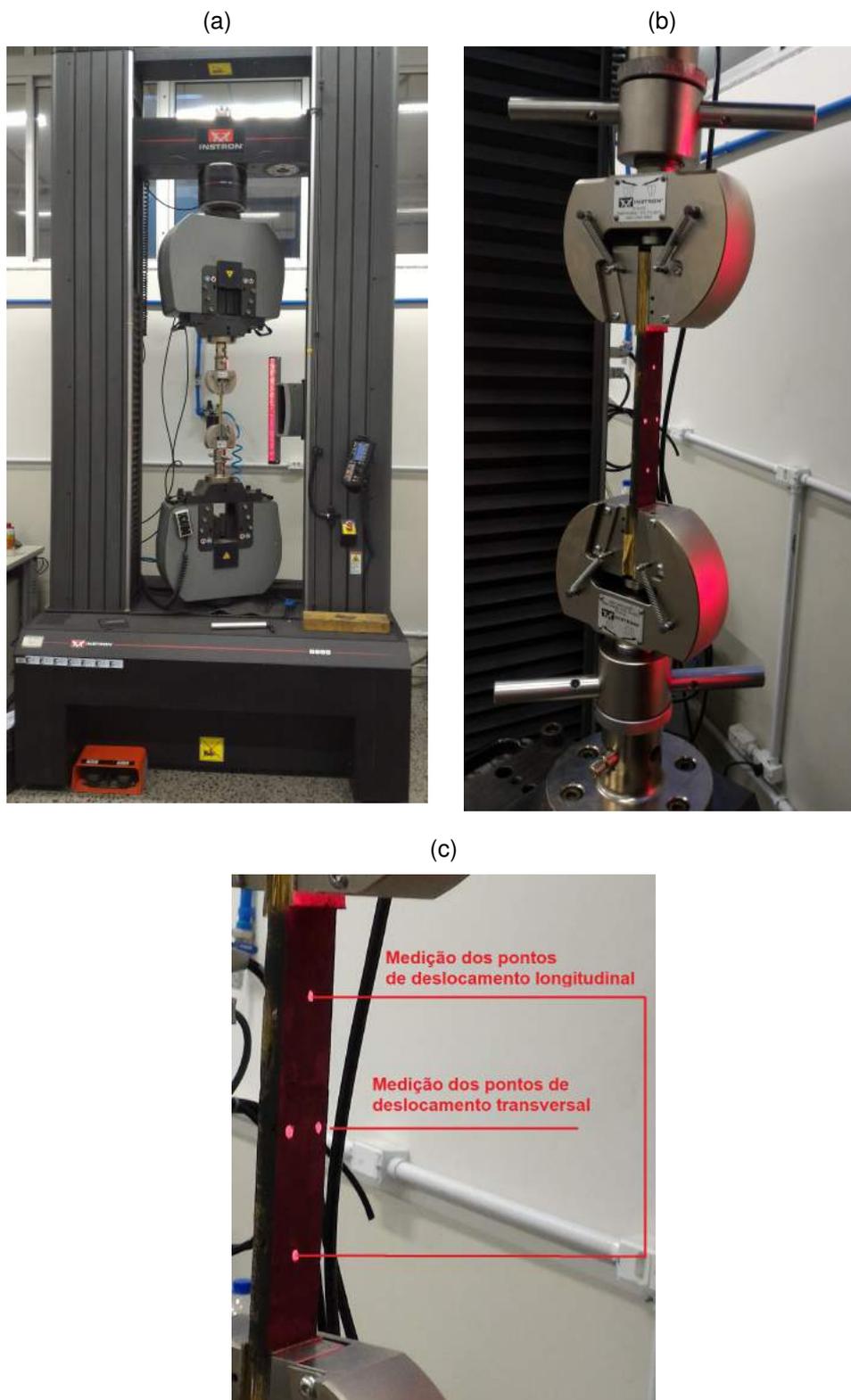
3.4.1 Ensaio de Tração do CPRFB

O ensaio de tração dos CPRFB, realizado no LATECME - Laboratório de Caracterização Mecânica do SENAI de Joinville, baseou-se na norma ASTM D3039 (ASTM, 1975) e D3518 (ASTM, 1976). O experimento foi realizado na máquina universal de testes Instron, modelo 5988 (carga máxima de 40 toneladas), (conforme Figura 3.15(a)), sob condição de carga e deslocamento controlados. A velocidade de tração de 2 mm/min foi selecionada conforme a norma ASTM D3039. O número total de amostras preparadas foi de 45, sendo 5 amostras de cada região do colmo (topo, meio e base) e de cada empilhamento ($[0^\circ]_3$, $[90^\circ]_3$ e $[\pm 45^\circ]_{1S}$). Conforme Figura 3.15(b), nota-se que a superfície da amostra foi pintada de preto para que os pontos monitorados pelos sensores óticos apresentassem contraste e obtivesse uma leitura dos deslocamento dos pontos (3.15(c)). Desta maneira, a partir dos deslocamentos transversais e longitudinais, foram calculados as deformações transversais e longitudinais das amostras, possibilitando a obtenção do coeficiente de Poisson (ν_{12}) dos compósitos empilhados à $[0^\circ]_3$. Para cada ensaio, as áreas de cada seção transversal dos corpos de prova foram inseridas no sistema da máquina de tração. Tais áreas, estão dispostas nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3.

3.4.2 Ensaio de Termogravimetria do CPRFB

Conforme supracitado, as fibras vegetais começam a se degradar a partir dos 160°C , desta forma não é possível utilizar o método da digestão para avaliar o percentual de vazios em um material compósito, pois normalmente, as temperaturas chegam a 500°C . Assim, é utilizado, um outro método denominado calcinação, que consiste em realizar o ensaio de termogravimetria da amostra e mensurar a variação de massa da amostra em função da temperatura. A partir das curvas da derivada da massa de cada fase do compósito, obtidas pelo método da deconvolução, calcula-se as suas respectivas áreas, que correspondem à fração volumétrica de cada fase. Sendo assim, utilizou-se o analisador térmico simultâneo Netzsch STA 449 C (conforme demonstrado na Figura 3.7) para analisar a estabilidade térmica do CPRFB. Na análise, a amostra com $14,6 \text{ mg}$ foi submetida à temperatura de 20 até 800°C , sob uma taxa de 20 K/min . A atmosfera de trabalho adotada foi o gás nitrogênio o qual foi configurado com uma vazão da ordem de 40 ml/min .

Figura 3.15 – (a) Máquina universal de testes Instron, (b) corpo de prova fixado na garra, (c) pontos de medições dos deslocamentos transversais e longitudinais.



Fonte: produção do próprio autor.

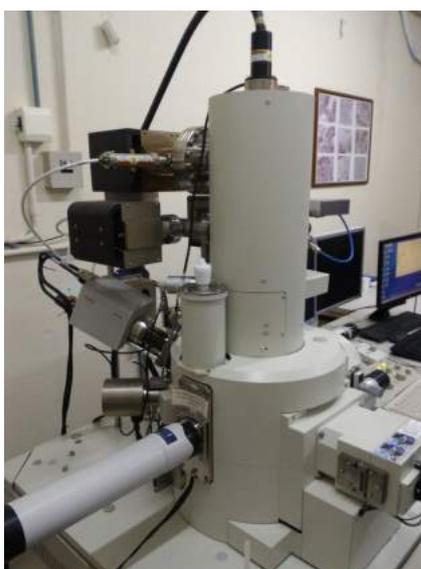
3.4.2.1 Ensaio de Termogravimetria do Epóxi

Considerando a possibilidade de que a temperatura de degradação térmica das fibras de bambu e epóxi ocorresse em intervalos de temperatura similares, optou-se por avaliar a degradação térmica do epóxi e verificar o comportamento de degradação do mesmo. Utilizando o mesmo analisador térmico (demonstrado na Figura 3.7), nesta análise a amostra com 43,81 *mg* foi submetida à temperatura de 20 até 800°C, sob uma taxa de 20 *K/min*. A atmosfera de trabalho adotada foi o gás nitrogênio o qual foi configurado com uma vazão da ordem de 40 *ml/min*.

3.4.3 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura do CPRFB

O ensaio da superfície de falha dos CPRFB foi realizado utilizando o microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo JEOL JSM 7100F (MEV-FEG), conforme mostrado na Figura 3.16, do CMU - Centro multiusuário do CCT/UDESC, para verificar maiores evidências de algum mecanismo de falha ou vazios presentes na superfície de falha do corpo de prova. Neste ensaio, devido ao caráter não condutor da amostra de CPRFB, houve a necessidade de recobri-lo com uma fina camada de ouro com a finalidade de se obter uma imagem de qualidade. Foram avaliados CPRFB sob empilhamento à $[0^\circ]_3$, $[90^\circ]_3$ e $[\pm 45^\circ]_{1S}$ (todas considerando apenas as fibras do topo). A energia de feixe de elétrons utilizado foi de 15 *kV*.

Figura 3.16 – Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM 7100F.



Fonte: produção do próprio autor.

3.4.4 Determinação da Fração Volumétrica via Estereomicroscópio

Considerando um cenário em que não fosse possível obter as frações volumétricas pelo método da calcinação, optou-se por estimá-los utilizando o *software* de arquivamento e processamento de imagem, *Image Manager*, do estereomicroscópio Leica MZ9.5 (dispositivo representado na Figura 3.8). Para este procedimento, analisou-se apenas uma amostra. O compósito selecionado foi o CPRFB empilhado à $[0^\circ]_3$, com fibras do topo, com a finalidade de obter uma melhor imagem, visto que as seções transversais das fibras estarão posicionadas ortogonalmente em relação a lente do dispositivo.

3.5 Abordagem Numérica

A abordagem numérica tem como finalidade avaliar o comportamento mecânico de possíveis estruturas fabricadas de CPRFB, visando a substituição de estruturas fabricadas de compósito reforçados com fibra sintéticas. A metodologia empregada está representada na Figura 3.17. A primeira etapa da metodologia consiste em utilizar a sequência de empilhamento de um componente fabricado de material compósito reforçado com fibra sintética, bem como sua geometria, propriedades e número de lâminas. Nas Tabelas 3.4 e 3.5, estão dispostas as propriedades elásticas e de resistência do CPRFB que foram consideradas nas análises. Tais propriedades foram obtidas a partir dos ensaios de tração, valores da literatura e calculados analiticamente. Em seguida, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), determina-se os carregamentos (momentos e forças resultantes) da seção crítica da estrutura avaliadas ao longo da coordenada X. Desta maneira, os carregamentos obtidos foram aplicados na análise da Teoria Clássica dos Laminados (TCL), onde foi implementado os critérios de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill, descritos no Cap. 2, seção 2.5. Ao avaliar o resultado da análise da TCL, se o material não falhou, ou seja, se os valores das margens de segurança (MS) e fator de segurança (FS) apresentem valores definidos no projeto, considera-se o projeto viável e finaliza-se a análise. Caso o projeto esteja superdimensionado, verifica-se a possibilidade de retirar lâminas, onde é utilizado um procedimento de otimização que determina as melhores sequências de empilhamento sob uma dada condições de carregamento. Caso ocorra a falha do projeto, busca-se aumentar o número de lâminas e determinar a melhor sequência de empilhamento por meio do método de otimização proposta. Por fim, quando o projeto viável da estrutura otimizada é encontrada, realiza-se uma verificação final do mesmo considerando os novos esforços resultantes obtidos pelo MEF.

Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas do CPRFB utilizados na abordagem numérica.

Propriedades	Valor	Unidade
⁽¹⁾ Módulo de Elasticidade Longitudinal - E_1	8,98	GPa
⁽¹⁾ Módulo de Elasticidade Transversal - E_2	2,74	GPa
⁽²⁾ Densidade do Compósito - ρ_c	1064,4	$\frac{kg}{m^3}$
⁽¹⁾ Módulo de Cisalhamento - G_{12}	4	GPa
⁽¹⁾ Módulo de Cisalhamento - G_{13}	4	GPa
⁽²⁾ Módulo de Cisalhamento - G_{23}	0,913	GPa
⁽¹⁾ Coeficiente de Poisson - ν_{12}	0,36	-

⁽¹⁾ Valor obtido experimentalmente conforme demonstrado na seção 4.2 do capítulo 4, ⁽²⁾ Valor calculado analiticamente os quais estão apresentados em detalhes no Apêndice A.

Fonte: produção do próprio autor.

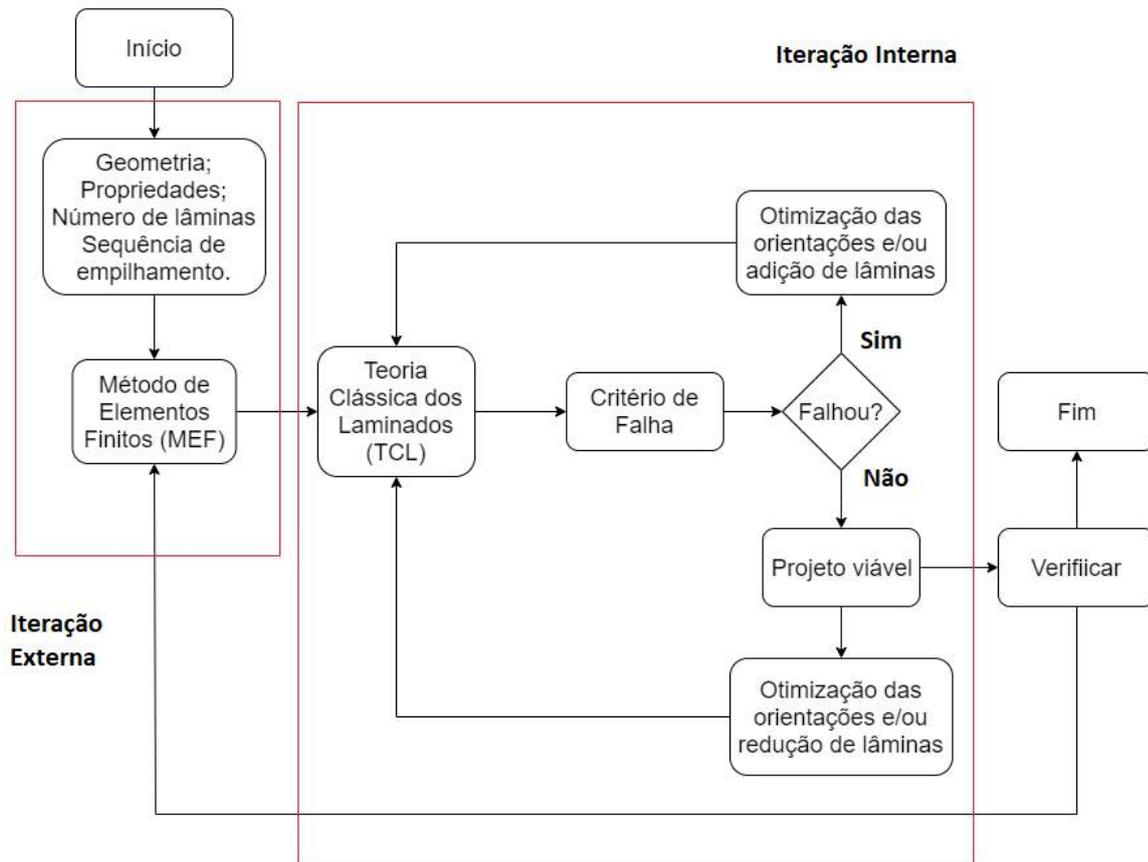
Tabela 3.5 – Resistências do CPRFB utilizados na abordagem numérica.

Resistência	Valor	Unidade
⁽¹⁾ Resistência à Tração - X_t	83,42	MPa
⁽²⁾ Resistência à Compressão - X_c	-93	MPa
⁽¹⁾ Resistência à Tração - Y_t	9,77	MPa
⁽³⁾ Resistência à Compressão - Y_c	-38,7	MPa
⁽¹⁾ Resistência ao Cisalhamento - S_{12}	13,66	MPa

⁽¹⁾ Valor obtido experimentalmente conforme demonstrado na seção 4.2 do capítulo 4, ⁽²⁾ (SHIN *et al.*, 1989), ⁽³⁾ Valor calculado analiticamente os quais estão apresentados em detalhes no Apêndice A.

Fonte: produção do próprio autor.

Figura 3.17 – Fluxograma do procedimento da abordagem numérica proposta.



Fonte: produção do próprio autor.

A otimização mencionada fundamenta-se na minimização da deformação do laminado de acordo com a nova sequência de empilhamento. O método de otimização utilizado foi o de restrições, Lagrangiano Aumentado, o qual empregou o Gradiente Conjugado como método de otimização irrestrita para atualizar as variáveis de projeto, que são as sequências de empilhamento, de tal forma que satisfaçam os requerimentos do critério de falha. A função objetivo utilizada neste trabalho foi a norma Euclidiana da deformação do laminado (calculado consoante Equação 2.3.34, disposto na seção 2.3.1). Considerando que as tensões avaliadas no laminado estão relacionadas com a magnitude da deformação, $\|\varepsilon\|$, a qual ao minimizar este valor por meio das sequências de empilhamento do laminado, pode-se obter maior resistência. Desta forma, a formulação do problema de otimização é definida por

$$\begin{cases} \text{Minimizar } \|\varepsilon\| \\ g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, \dots, n_g \end{cases} \quad (3.5.1)$$

onde $g_j(x)$ é a j th restrição e n_g é o número total de restrições. As restrições são formuladas a partir dos critérios de falha de Tsai-Wu (apresentado no Cap. 2, seção

2.5),

$$f_{(WT_j)}(\sigma_{A_j}) < 1 \quad j = 1, \dots, n_g, \quad (3.5.2)$$

onde σ_{A_j} são as tensões. Então, reescrevendo-as obtêm-se as restrições na forma

$$g_j = -f_{(WT_j)}(\sigma_{A_j}) + 1 > 0 \quad j = 1, \dots, n_g. \quad (3.5.3)$$

Os resultados obtidos por este método podem ser contínuos, o que implica no processo de fabricação devido às tolerâncias. Sendo assim, os resultados obtidos pela otimização são arredondados para os valores para cima e para baixo, os quais estão denominados neste estudo como sequência de empilhamento máximo e mínimo. Ambas as sequências de empilhamento são submetidas à análise da TCL, verificando se os mesmos satisfazem os critérios de falha.

As estruturas selecionadas, para avaliar o comportamento mecânico, determinar a melhor sequência de empilhamento e número de camadas, utilizando o procedimento supracitado, foram o compartimento de manual e mapas, do setor aeronáutico, e o capô de *buggy*, do setor automotivo.

3.5.1 Estudo de Caso I - Exemplo de uma Aplicação Aeronáutica

O segmento aeronáutico foi um dos primeiros a reconhecer e utilizar materiais compósitos reforçados com fibras de vidro, carbono e aramida para obtenção de seus componentes. Considerando este fato, há diversas estruturas secundárias que podem ser reforçados com fibras vegetais. Desta forma, neste estudo de caso, buscou-se realizar uma análise via MEF de um compartimento de manuais e mapas (conforme representado na Figura 3.18) fabricado com CPRFB com a finalidade de verificar a viabilidade de substituir a estrutura original, a qual é fabricada a partir de um compósito reforçado com fibra vidro (resina fenólica) - CPRFV. Este compartimento de manuais e mapas apresenta as dimensões, espessura e sequência de empilhamento conforme demonstrado na Tabela 3.6 e Figura 3.19.

Figura 3.18 – Seleção de uma estrutura aeronáutica - Compartimento de manuais e mapas.



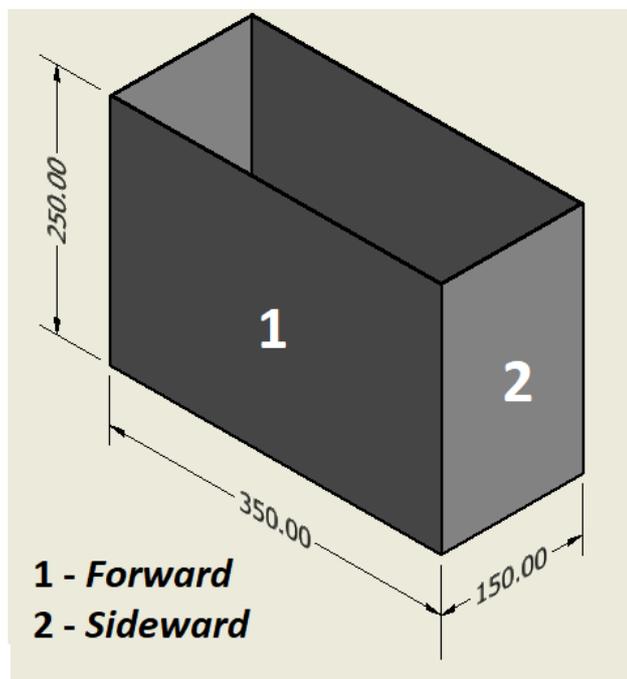
Fonte: Airlines.net (2010) apud (VERA, 2012)

Tabela 3.6 – Dimensões, espessura e sequência de empilhamento do compartimento de manuais e mapas.

Estrutura	Valor	Unidade
Comprimento	350	mm
Largura	150	mm
Altura	250	mm
Espessura de cada lâmina	0,29	mm
Sequência de empilhamento do laminado	[0°/90°/90°/0°]	-

Fonte: baseado no estudo de Vera (2012)

Figura 3.19 – Modelo da estrutura - Dimensões do compartimento de manuais e mapas (mm).



Fonte: produção do próprio autor.

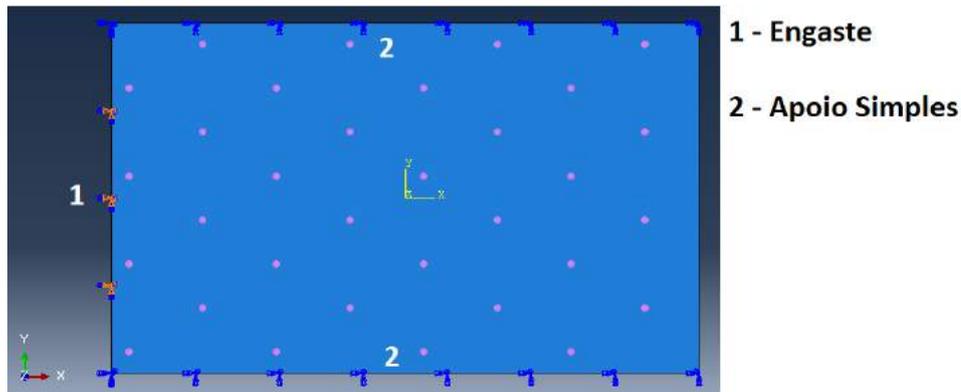
Vale ressaltar que devido ao fato de ser uma estrutura aeronáutica, o compartimento de manual e mapas é uma estrutura certificada, que atende alguns requisitos da *Federal Aviation Regulation - FAR*, como fator de segurança igual 1,5. Nesta análise, assumiu-se que o compartimento de manual e mapas armazena uma massa de 0,5 kg. Conforme FAR (2020), adotou-se uma condição de pouso forçado onde ocorre a desaceleração máxima *sideward* e *forward* (representados na Figura 3.19), com magnitudes de 4g e 9g, respectivamente. O valor adotado para a aceleração gravitacional foi de 9,81 m/s². Com a finalidade de simplificar a abordagem numérica, optou-se por considerar o valor de distribuição de força por área mais crítica, que foi a condição de desaceleração máxima *sideward*, o qual obteve um valor de pressão igual a

$$\frac{m \cdot 4 \cdot g}{A} FS = 784,8 \text{ Pa}, \quad (3.5.4)$$

onde m é igual a massa, g é aceleração gravitacional e FS o fator de segurança. Para determinar os carregamentos atuantes mais críticos via MEF (Abaqus 6.12), a estrutura foi modelada considerando as dimensões representada na Figura 3.19, as propriedades contidas na Tabela 3.4 e sequência de empilhamento apresentado na Tabela 3.6. As condições de contorno do modelo computacional foram que a base lateral do compartimento é engastada ($u_x = u_y = u_z = Rot_x = Rot_y = Rot_z = 0$) e as arestas laterais são restringidas os os graus de liberdade de rotação ($u_z = u_x =$

$u_y \neq 0$ e $Rot_x = Rot_y = Rot_z = 0$), conforme representado na Figura 3.20. A pressão aplicada foi distribuída por toda estrutura com a magnitude de 784,8 Pa, conforme Equação 3.5.4.

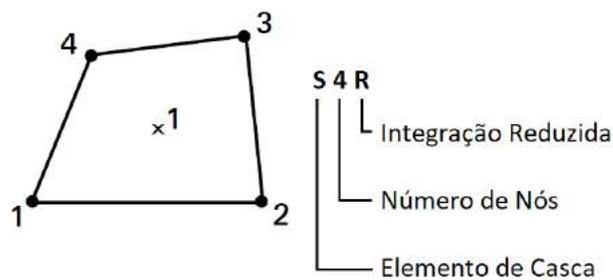
Figura 3.20 – Condições de contorno e carregamento do modelo computacional do compartimento de CPRFB.



Fonte: produção do próprio autor.

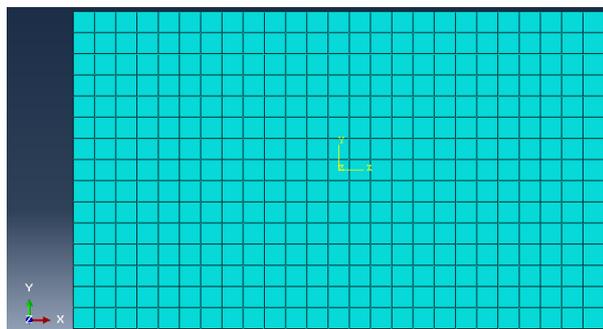
O elemento selecionado foi o de casca quatro nós com integração numérica reduzida (S4R), conforme representado na Figura 3.21. A Figura 3.22 apresenta o modelo computacional do compartimento de manual e mapas de CPRFB com malha sem refinamento.

Figura 3.21 – Elemento de casca S4R.



Fonte: adaptado de Simulia (2020)

Figura 3.22 – Malha do compartimento de manual e mapas de CPRFB via Abaqus sem refinamento.



Fonte: produção do próprio autor.

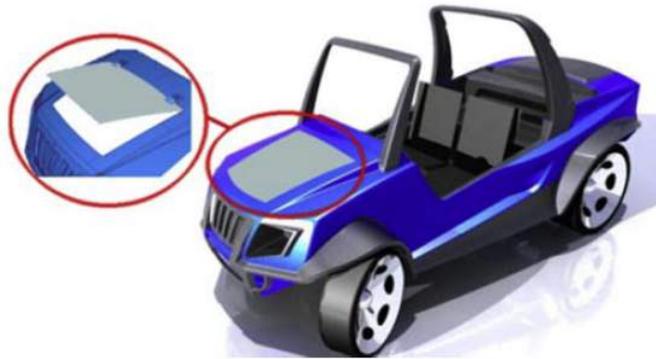
3.5.2 Estudo de Caso II - Exemplo de uma Aplicação Automotiva

O *buggy* é um automóvel aberto puramente de lazer, o qual, em sua maioria, sua carenagem é fabricada em compósitos de fibra de vidro e apresenta distância entre eixos menores do que os automóveis comuns. O fato de utilizar compósitos em sua estrutura, torna-o o veículo mais leve resultando em maior economia de combustível. Considerando as potencialidades das fibras vegetais, as quais foram apresentadas nas seções anteriores, alguns estudos como o de Koronis e Silva (2018) investigaram a possibilidade de substituir a fibra de vidro por fibras vegetais, como a juta e o rami, como material reforçante de estruturas de veículos como o de *buggy*. Desta forma, este estudo de caso tem como finalidade verificar o comportamento mecânico e suas potencialidades de um capô de *buggy* fabricado com CPRFB. Estes capôs, conforme mostrado na Figura 3.23, são usualmente fabricados de material compósito epoxídico reforçado por fibras de vidro e apresenta uma demanda anual de 600 unidades. É uma estrutura que não está sujeito a esforços constantes, pois não é de natureza estrutural primária do *buggy*. No entanto, é necessário dimensioná-lo com o devido cuidado para preservar a sua integridade quando o mesmo for submetido a esforços ocasionais, estabelecendo um bom funcionamento do veículo.

Neste estudo de caso, a simulação computacional foi realizada no *software* comercial Abaqus 6.12. A estrutura foi modelada assumindo as dimensões dispostas na Figura 3.24 (as quais foram baseadas nos valores de Furtado (2009)), propriedades mecânicas da Tabela 3.4 e com a sequência de empilhamento inicial de $[0/90/45/ - 45/0/90]_S$.

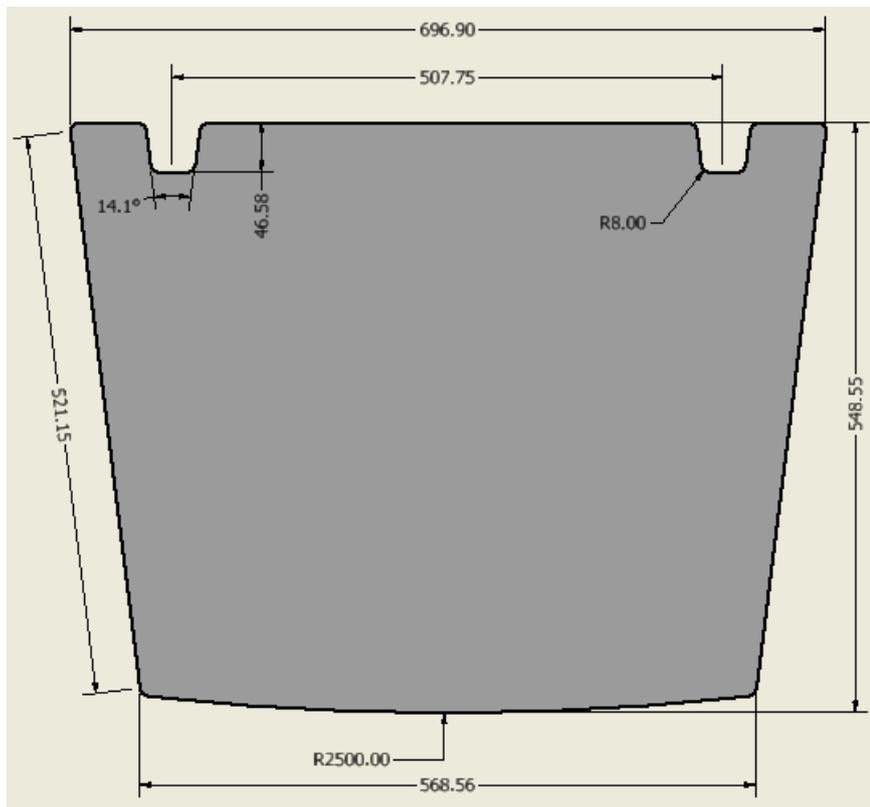
O esforço ocasional considerado foi uma carga de 80 *kg* (800 *N*) no centro do capô sobre uma área de 125600 mm^2 (raio igual a 200 *mm*), representando uma pessoa de pé sobre o capô, conforme demonstrado na Figura 3.25. As condições de contorno adotadas foram engaste na região da dobradiça ($u_x = u_y = u_z = Rot_x =$

Figura 3.23 – *Buggy* com o capô em destaque.



Fonte: Koronis e Silva (2018)

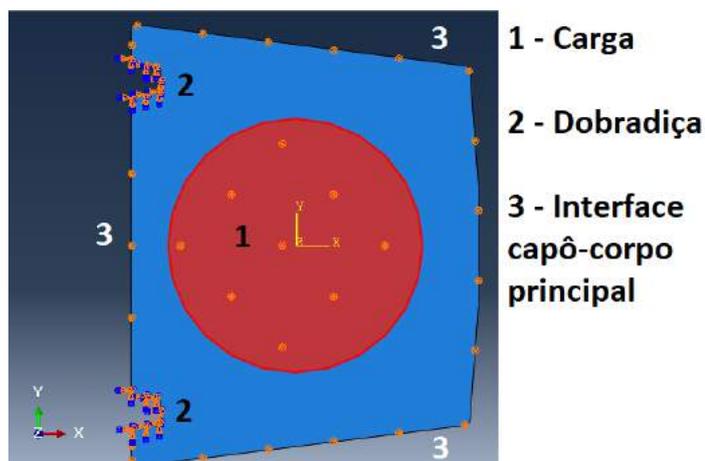
Figura 3.24 – Dimensões do capô do *buggy* (*mm*) adotado no modelo computacional.



Fonte: produção do próprio autor.

$Rot_y = Rot_z = 0$) e apoio simples na região que o capô está sobre o corpo principal do *buggy* ($u_z = 0$ e $u_x = u_y = Rot_x = Rot_y = Rot_z \neq 0$), ou seja, interface capô-corpo principal, conforme representado na Figura 3.25.

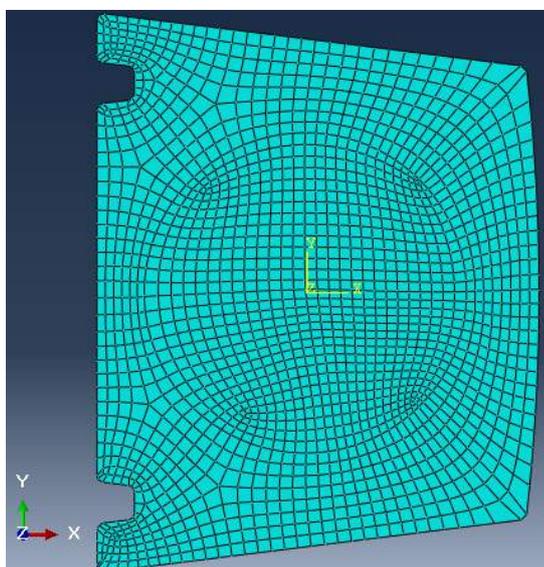
Figura 3.25 – Condições de contorno do modelo computacional do capô.



Fonte: produção do próprio autor.

Devido a sua simplicidade, o elemento de casca de quatro nós e integração numérica reduzida (S4R) foram selecionados. A Figura 3.26 apresenta o modelo computacional do capô de CPRFB com malha sem refinamento.

Figura 3.26 – Malha do capô de *buggy* de CPRFB via Abaqus sem refinamento.



Fonte: produção do próprio autor.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 Análise das Propriedades da Fibra de Bambu

4.1.1 Análise do Ensaio de Picnometria de Gás

Submetendo a amostra ao ensaio, em que foi configurado 10 análises, obteve-se o valor médio de volume igual a $1,264 \text{ cm}^3$ com desvio padrão de $0,009 \text{ cm}^3$. A partir deste valor, definiu-se o valor médio da densidade, que foi de $0,864 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ com desvio padrão de $0,006 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Mesmo não verificando a influência que as fibras extraídas de diferentes regiões, como topo, meio e base, apresentam, o valor de densidade obtido é comparável ao valores de fibra de bambu da literatura, conforme pode ser visto na Tabela 4.1. Além disso, nota-se que a densidade de fibra de bambu encontrada neste estudo quando comparado às demais fibras vegetais, como o linho, juta e coco, e fibra de vidro, apresenta valor consideravelmente inferior, sendo um fator que pode proporcionar a obtenção de estruturas mais leves.

Tabela 4.1 – Densidades de fibras naturais e fibra de vidro.

Fibra	Densidade ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)	Ref.
Bambu	0,6 - 1,4	(DEFOIRDT <i>et al.</i> , 2010; TRUJILLO, 2014)
Bambu	$0,864 \pm 0,006$	Presente estudo
Linho	1 - 1,5	(RAMESH; SUDHARSAN, 2018)
Juta	1,3 - 1,45	(DEFOIRDT <i>et al.</i> , 2010)
Coco	1,15 - 1,25	(DEFOIRDT <i>et al.</i> , 2010)
Vidro	2,5 - 2,7	(RAMESH; SUDHARSAN, 2018)

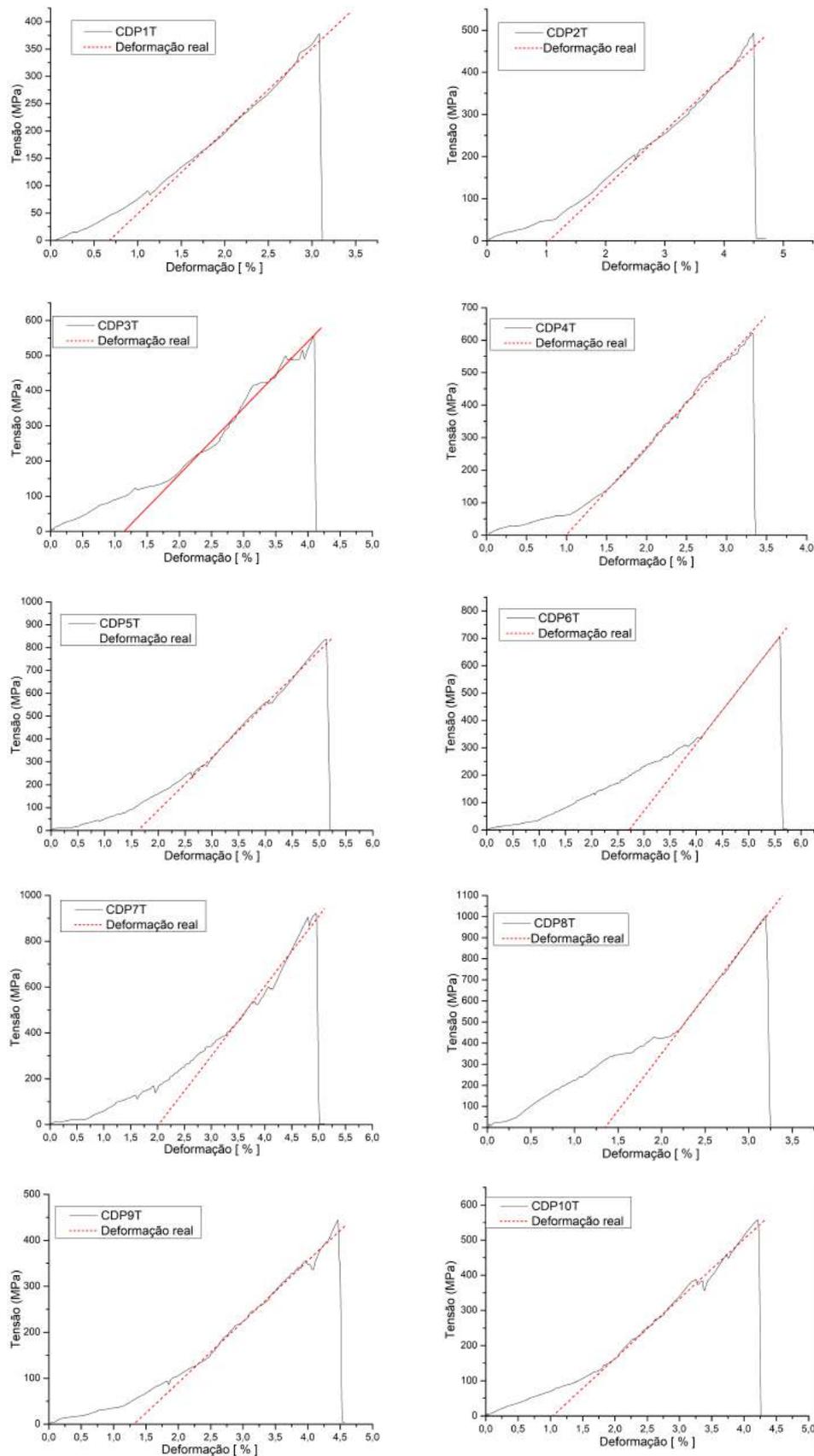
Fonte: produção do próprio autor.

4.1.2 Avaliação do Ensaio à Tração da Fibra de Bambu

Nas Tabelas B.1, B.2 e B.3 (apresentadas no anexo B), estão dispostas os diâmetros das fibras de bambu, que são os valores médios de 3 medições. Vale ressaltar que as fibras foram consideradas de forma circular e tais valores foram configurados no sistema da máquina universal de testes. A variação de diâmetro observada, neste estudo, considerando todas as amostras, também foi encontrada por Trujillo *et al.* (2014). No entanto, os diâmetros obtidos por ele apresentaram valores de 0,09 a 0,250 *mm*, porque o processo de extração mecânica removeu o tecido parenquimatoso de forma mais efetiva, resultando na obtenção de fibras de menor diâmetro. Outro fator que pode ser destacado é que os diâmetros das fibras obtidas pelo método *veneer rotary peeling*, 0,167 a 0,550 *mm*, está entre os valores da literatura que reportam uma variação do diâmetro das fibras de acordo com método de extração da fibra. Nos estudos de Trujillo *et al.* (2014), Defoirdt *et al.* (2010), esses valores são de 0,09 a 0,9 *mm*.

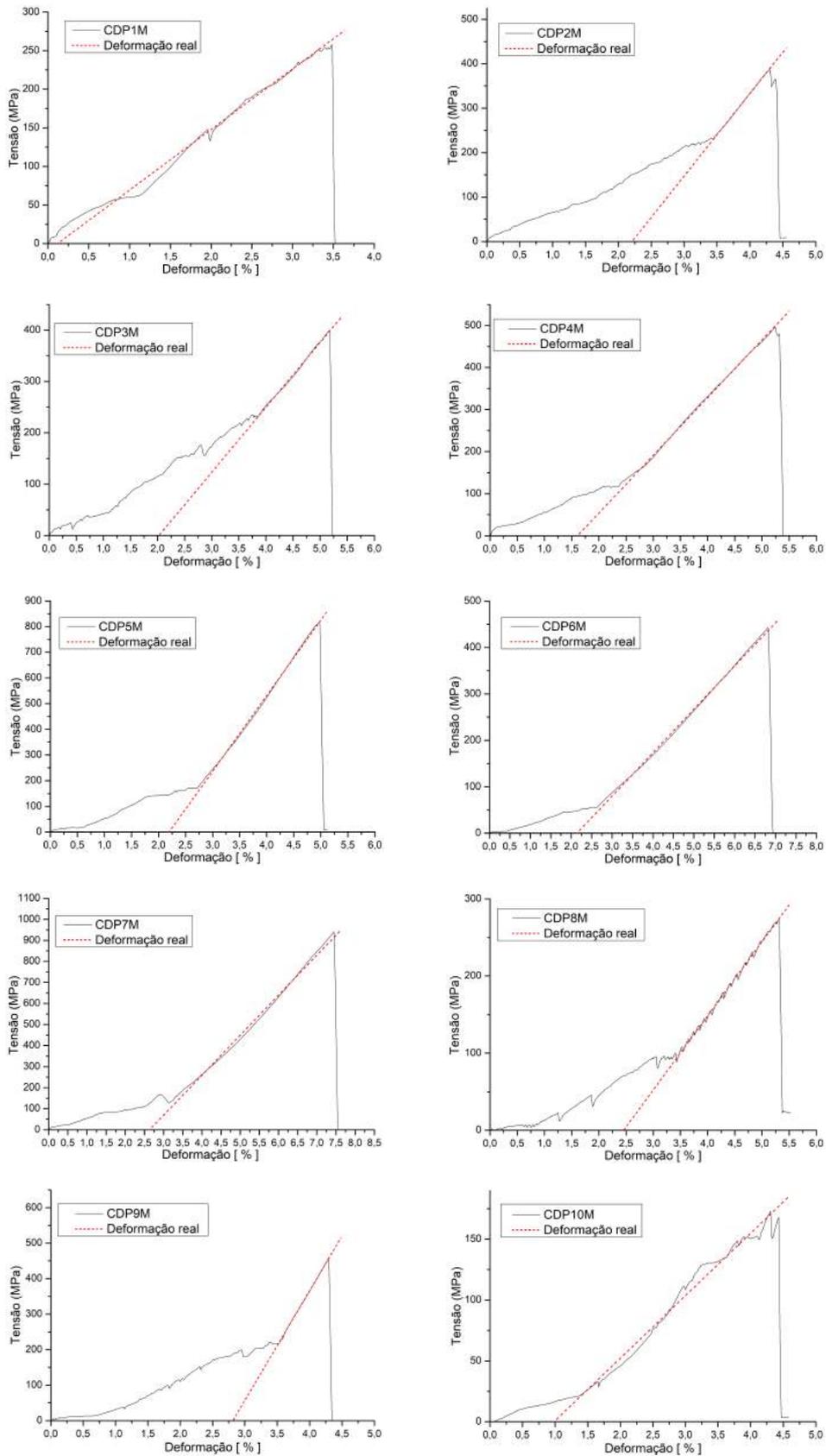
O procedimento de fixar os corpos de prova na máquina de tração foi realizado com cautela para não danificar a fibra. Além disso, após fixá-los na garra da máquina, o corpo de prova não foi pré-tensionado. Por este motivo, nos gráficos de tensão-deformação de cada amostra (Figuras 4.1, 4.2 e 4.3), verificou-se a folga no sistema, o que resultou na deformação não real. Com objetivo de determinar a deformação real, criou-se uma linha de tendência afim de considerar os valores da região estável da curva. Desta maneira, obteve-se uma aproximação das deformações reais e consequentemente os valores do módulo de elasticidade longitudinal da fibra de bambu pelo método tangencial, que consiste na relação de tensão pela deformação real. Estas propriedades mecânicas, de todas as amostras, estão apresentadas nas Tabelas B.1, B.2 e B.3 (apresentadas no anexo B). Ainda, no anexo B estão disponibilizadas os gráficos tensão vs. deformação da fibra de bambu, os quais estão separados pela região em que as fibras foram extraídas.

Figura 4.1 – Gráficos tensão vs. deformação do ensaio de tração da fibra de bambu (amostras do topo).



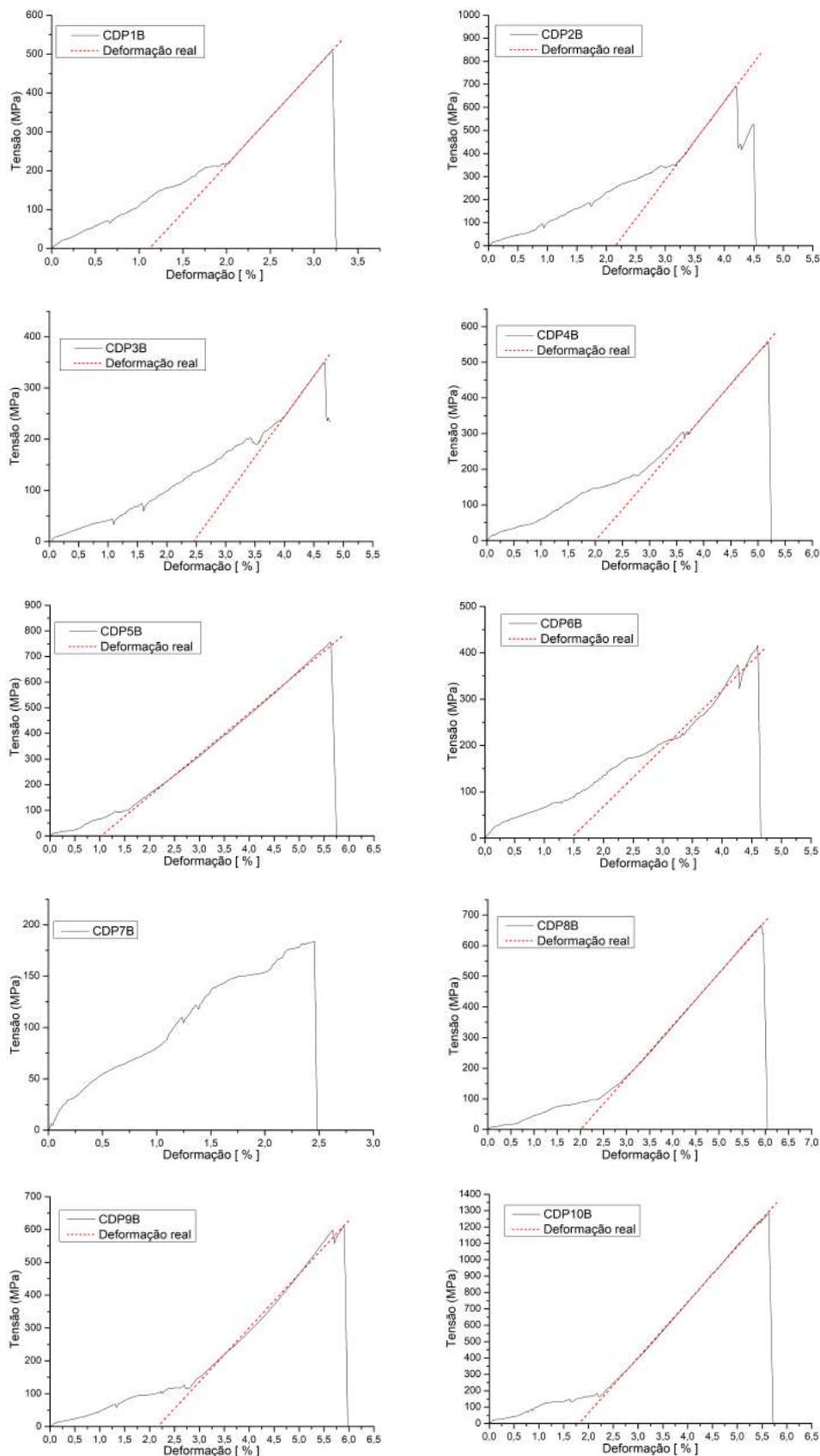
Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4.2 – Gráficos tensão vs. deformação do ensaio de tração da fibra de bambu (amostras do meio).



Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4.3 – Gráficos tensão vs. deformação do ensaio de tração da fibra de bambu (amostras da base).



Fonte: produção do próprio autor.

Com o objetivo de minimizar as incertezas do ensaio, na análise estatística, foram retirados da avaliação, os corpos de prova que apresentaram maior dispersão (portanto, retirados 2,4,8 corpos de prova topo, meio e base, respectivamente). Esta dispersão pode ser justificada pelo fato das fibras terem sido danificadas durante o processo de extração, quando apresentaram menor resistência à tração. Já quando apresentaram maiores valores de resistência, este fato pode ser explicado pelo fato de não ter removido o tecido parenquimatoso por completo, o que resultou na aglutinação de várias fibras. Desta forma, apenas os corpos de provas que apresentaram valores de resistência à tração entre 300 a 850 MPa foram considerados na análise estatística. O intervalo de confiança, considerando um valor de 95% com nível de significância estatística de $\alpha = 0,05$ foi adotado, resultando nos valores dispostos na Tabela 4.2. Nota-se que os valores de todas as amostras da resistência à tração das fibras estão entre $500,27 \pm 128,57$ a $572,97 \pm 101,44$ MPa . Enquanto que o módulo de elasticidade longitudinal apresentou valores entre $18,57 \pm 7,10$ a $19,39 \pm 3,54$ GPa e a deformação entre $3,05 \pm 0,92$ a $3,29 \pm 0,78$ %. As propriedades mecânicas obtidas estão entre os valores encontrados na literatura, conforme Tabela 2.2 e estudos de Trujillo *et al.* (2014), Defoirdt *et al.* (2010). Além disso, não obteve-se uma diferença considerável das propriedades mecânicas de acordo com a região extraídas das fibras, conforme a literatura reporta. Desta forma, desde que seja realizada uma inspeção das fibras, a fim de retirar as fibras danificadas e aglutinadas, as fibras extraídas pelo método mecânico *veneer rotary peeling* se mostraram viáveis para aplicação como material reforçante de compósitos.

Tabela 4.2 – Análise estatística das propriedades mecânicas da fibra de bambu

	$\sigma_T^{(a)}$ (MPa)		$E^{(b)}$ (GPa)		$\epsilon^{(c)}$ (%)	
	DP ⁽⁴⁾	IC ⁽⁵⁾	DP ⁽⁴⁾	IC ⁽⁵⁾	DP ⁽⁴⁾	IC ⁽⁵⁾
CDPT ⁽¹⁾	146,39	572,97 ± 101,44	5,10	19,39 ± 3,54	0,41	2,99 ± 0,29
CDPM ⁽²⁾	160,69	500,27 ± 128,57	8,88	18,57 ± 7,10	1,414	3,05 ± 0,92
CDPB ⁽³⁾	140,18	568,96 ± 97,13	6,79	18,57 ± 4,70	1,13	3,29 ± 0,78

⁽¹⁾ Corpo de prova do topo, ⁽²⁾ Corpo de prova do meio, ⁽³⁾ Corpo de prova da base, ⁽⁴⁾ DP = Desvio padrão, ⁽⁵⁾ IC = Intervalo de confiança, ^(a) Resistência à Tração, ^(b) Módulo de Elasticidade, ^(c) Deformação.

Fonte: produção do próprio autor.

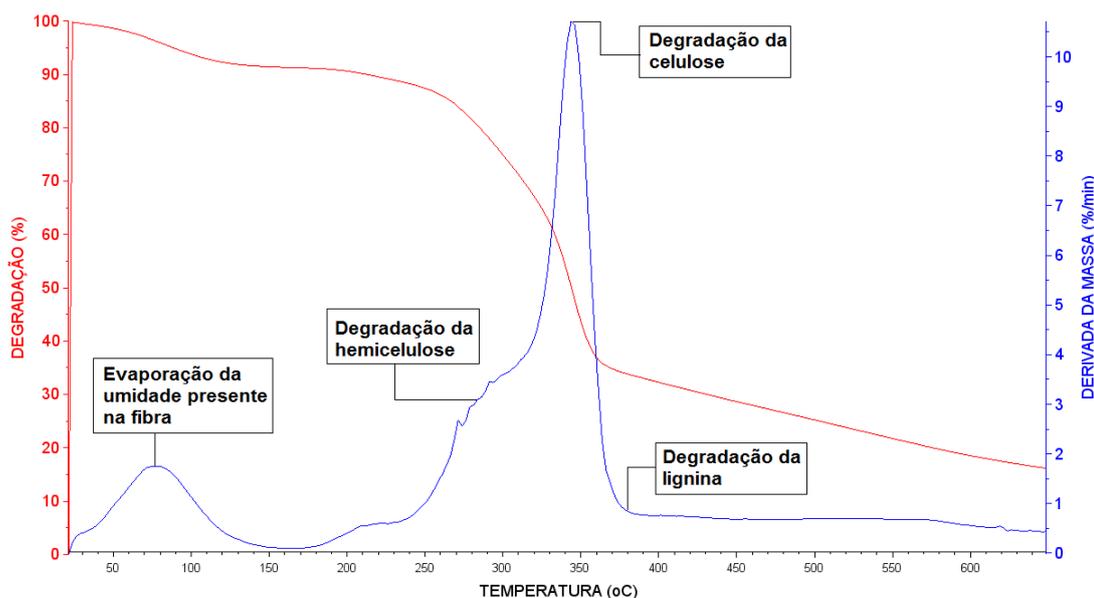
4.1.3 Análise de Termogravimetria da Fibra de Bambu

Por meio do gráfico da Figura 4.4, obtida pela TG, é possível avaliar a degradação térmica da fibra de bambu. A análise fornece a curva da degradação e derivada da massa em relação ao aumento da temperatura. A segunda curva, a derivada da

massa, indica por meio de picos e inflexões o intervalo que ocorre a degradação. Nesta análise, devido ao fato de que a degradação das fibras naturais ocorre simultaneamente, em alguns intervalos de temperatura, os picos e inflexões não ficaram tão evidentes. Considerando que a deconvolução não foi utilizada para separar os picos, estes resultados foram comparados com os obtidos da literatura, como os estudos de Azwa *et al.* (2013), Zhang, Wang e Keer (2015).

Na primeira etapa, abaixo de $100 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, há uma variação da massa da amostra devido à vaporização da umidade das fibras de bambu, da ordem de 10%. No segundo estágio, a variação de massa inicia-se aproximadamente de $160 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, a qual está associado à degradação da hemicelulose e celulose, comportamento observado por Zhang, Wang e Keer (2015). O grande pico, como mostrado na derivada da massa, conforme Figura 4.4, a $343 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, representa a degradação da celulose, que é o componente que apresenta maior percentual de peso na composição das fibras. Este comportamento foi encontrado no estudo realizado por Zhang, Wang e Keer (2015). No terceiro estágio, a partir de $343 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, a perda de massa ocorre devido à degradação da lignina. Segundo Azwa *et al.* (2013), Yang *et al.* (2007), a decomposição da lignina ocorre até os $900 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, o que explica o resíduo obtido próximo de 20% de massa, relatado também por Zhang, Wang e Keer (2015) (esta referência foi utilizada com base para configurar a temperatura máxima da análise de termogravimetria, que foi de $650 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$). É importante considerar que a degradação do tecido parenquimatoso não foi identificando nesta análise.

Figura 4.4 – Análise de termogravimetria da fibra de bambu.

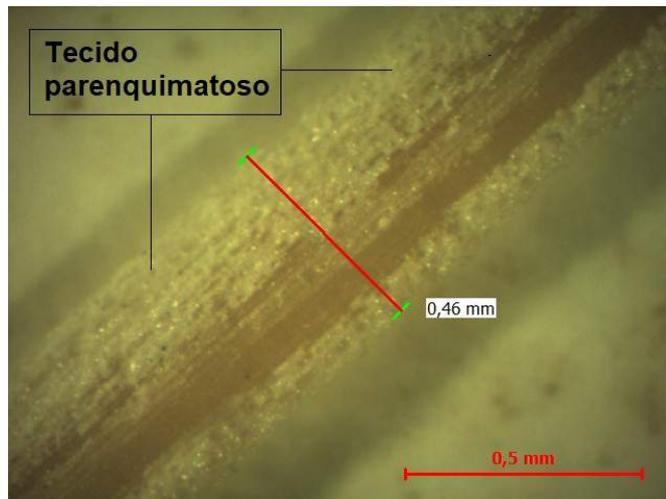


Fonte: produção do próprio autor.

4.1.4 Análise de Microscopia da Fibra de Bambu

A fibra de bambu utilizada no ensaio de microscopia foi selecionada aleatoriamente. Conforme pode ser verificado na Figura 4.5, a superfície da fibra de bambu está coberta pelo tecido parenquimatoso, sendo um dos fatores que justifica a variação dos diâmetros das fibras. Como pode ser visto, a fibra apresenta diâmetro de 0,46 mm, valor que está entre o intervalo de diâmetros de fibras encontrado pelo método mecânico *veneer rotary peeling*, que é de 0,167 a 0,550 mm.

Figura 4.5 – Análise da superfície da fibra de bambu.



Fonte: produção do próprio autor.

4.2 Análise do Ensaio de Tração do CPRFB

A partir do sistema da máquina universal de testes Instron, a qual fornece dados de força vs. deslocamento, então determinou-se a curva tensão vs. deformação. Vale ressaltar que, não foi considerado a alteração da seção transversal ao longo do tracionamento de cada corpo de prova, uma vez que todos os gráficos tensão-deformação obtidos apresentaram comportamento linear. Com base nesses valores obtidos, foram plotados os gráficos de tensão vs. deformação e determinadas as propriedades mecânicas.

4.2.1 Análise do Ensaio à Tração do CPRFB $[0^\circ]_3$

A obtenção das propriedades mecânicas do compósito, com empilhamento à $[0^\circ]_3$, foram baseadas na norma ASTM D3039, ASTM (1971). A partir dos gráficos tensão vs deformação foram obtidos a resistência máxima (X_t), a deformação longitudinal (ε_l) e a transversal (ε_t) e, por fim, o módulo de elasticidade longitudinal (E_1),

obtido pelo método tangencial. As Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam os gráficos e as Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 as propriedades mecânicas calculadas, dos CPRFB fabricados com fibras extraídas, do topo, meio e base, respectivamente. Nota-se, nas tabelas mencionadas, que a média das resistências máximas dos corpos de provas fabricados com fibras da base (44,15 *MPa*) e meio (50,96 *MPa*) apresentaram resistências inferiores ao do topo (83,42 *MPa*). Este fato pode ser explicado devido a diferença das áreas das seções transversais dos corpos de prova. O compósito com fibras da base e meio apresentaram média de espessura igual a 8,09 e 6,34 *mm*, respectivamente. Já o compósito com fibras do topo apresentaram 3,74 *mm*. Sendo assim, considerando que o percentual de fibra foi igual para todos, então o percentual que mudou foi o da matriz, o que resultou em compósitos com diferentes frações volumétricas. Logo, com maior quantidade de epóxi no compósito, aumentou-se as chances de iniciar a fratura na matriz devido à presença de vazios. Vale ressaltar que este comportamento implica nas deformações. Já os módulos de elasticidades, os quais são obtidos pelo coeficiente angular, não sofreram grandes influências.

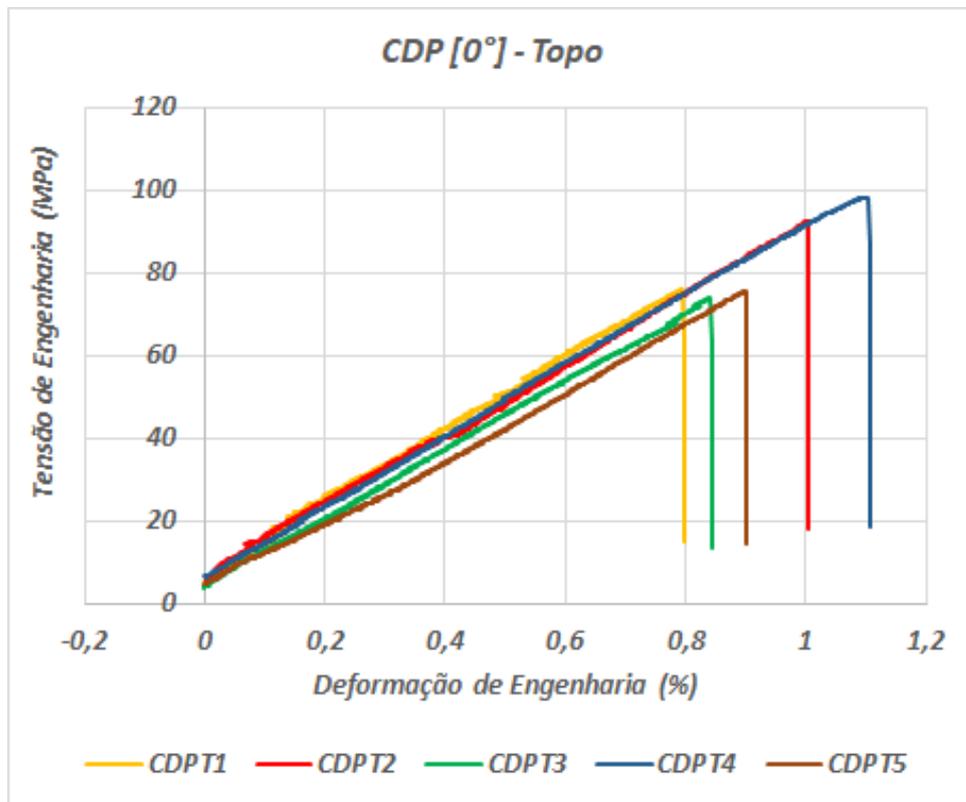
Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[0^\circ]_3$ - Topo.

Sequência de Empilhamento - $[0^\circ]_3$						
CDP	$X_t^{(1)}$	$E_1^{(2)}$	$\varepsilon_t^{(3)}$	$\varepsilon_t^{(4)}$	$\nu_{12}^{(5)}$	
CDPT1	75,96	9,49	0,8	0,31	0,39	
CDPT2	92,80	9,28	1	0,38	0,38	
CDPT3	73,95	8,80	0,84	0,33	0,39	
CDPT4	98,51	8,88	1,11	0,38	0,34	
CDPT5	75,87	8,43	0,9	0,31	0,34	
Média	83,42	8,98	0,93	0,34	0,36	
Desvio Padrão	11,38	0,42	0,13	0,04	0,02	

⁽¹⁾ Resistência à Tração Longitudinal (*MPa*), ⁽²⁾ Módulo de Elasticidade Longitudinal (*GPa*), ⁽³⁾ Deformação Transversal de Engenharia (%), ⁽⁴⁾ Deformação Longitudinal de Engenharia (%), ⁽⁵⁾ Coeficiente de Poisson, CDP = Corpo de Prova.

Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4.6 – Resultados dos ensaios à tração CDPT- $[0^\circ]_3$ - Gráfico tensão vs. deformação.



Fonte: produção do próprio autor.

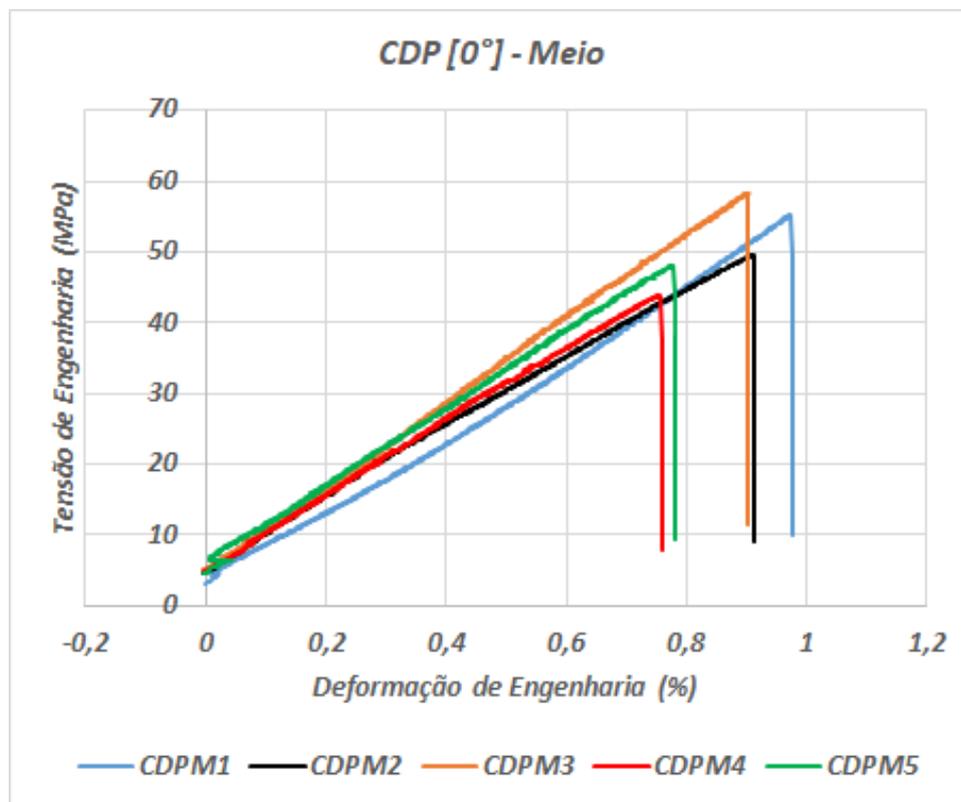
Tabela 4.4 – Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[0^\circ]_3$ - Meio.

Sequência de Empilhamento - $[0^\circ]_3$					
CDP	$X_t^{(1)}$	$E_1^{(2)}$	$\epsilon_l^{(3)}$	$\epsilon_t^{(4)}$	$\nu_{12}^{(5)}$
CDPM1	55,16	5,69	0,97	0,23	0,24
CDPM2	49,50	5,44	0,91	0,22	0,24
CDPM3	58,30	7,20	0,81	-	-
CDPM4	43,73	5,75	0,76	0,29	0,38
CDPM5	48,08	6,16	0,78	0,34	0,44
Média	50,96	6,05	0,846	0,27	0,32
Desvio Padrão	5,79	0,69	0,09	0,06	0,10

⁽¹⁾ Resistência à Tração Longitudinal (MPa), ⁽²⁾ Módulo de Elasticidade Longitudinal (GPa), ⁽³⁾ Deformação Transversal de Engenharia (%), ⁽⁴⁾ Deformação Longitudinal de Engenharia (%), ⁽⁵⁾ Coeficiente de Poisson, CDP = Corpo de Prova.

Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4.7 – Resultados dos ensaios à tração CDPM - $[0^\circ]_3$ - Gráfico tensão vs. deformação.



Fonte: produção do próprio autor.

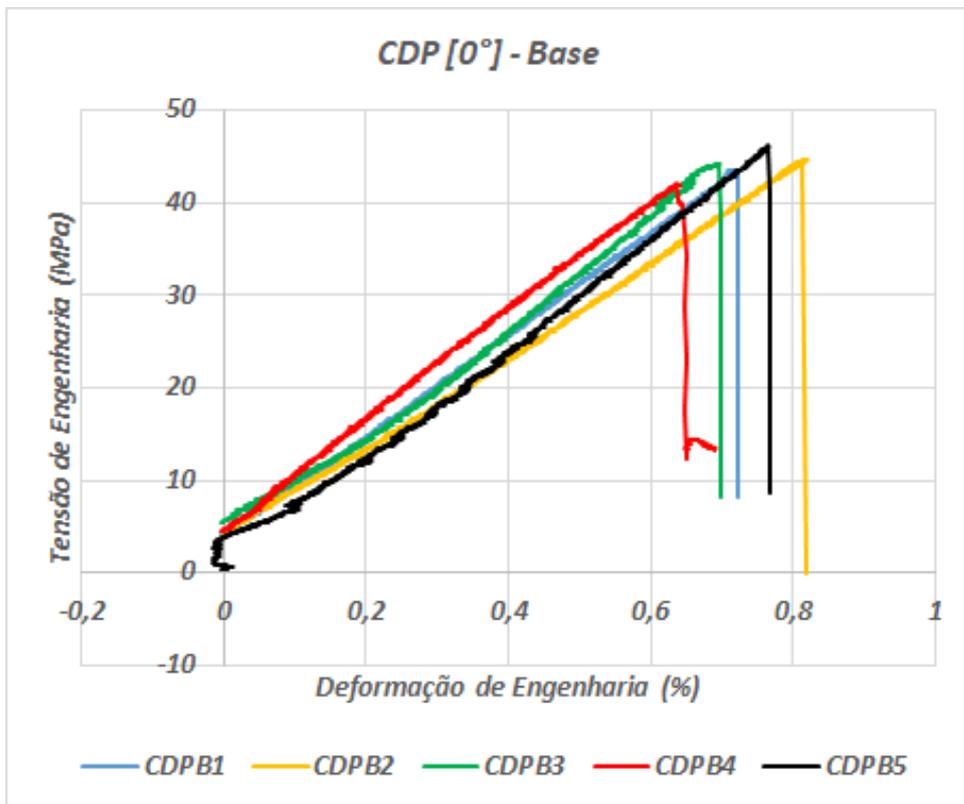
Tabela 4.5 – Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[0^\circ]_3$ - Base.

Sequência de Empilhamento - $[0^\circ]_3$					
CDP	$X_t^{(1)}$	$E_1^{(2)}$	$\epsilon_l^{(3)}$	$\epsilon_t^{(4)}$	$\nu_{12}^{(5)}$
CDPB1	43,56	6,05	0,72	0,23	0,32
CDPB2	44,72	5,45	0,82	0	0,00
CDPB3	44,25	6,41	0,69	0,19	0,28
CDPB4	42,03	6,47	0,65	0,17	0,26
CDPB5	46,17	6,00	0,77	0,19	0,25
Média	44,15	6,08	0,73	0,195	0,28
Desvio Padrão	1,52	0,41	0,07	0,03	0,03

(1) Resistência à Tração Longitudinal (MPa), (2) Módulo de Elasticidade Longitudinal (GPa), (3) Deformação Transversal de Engenharia (%), (4) Deformação Longitudinal de Engenharia (%), (5) Coeficiente de Poisson, CDP = Corpo de Prova.

Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4.8 – Resultados dos ensaios à tração CDPB - $[0^\circ]_3$ - Gráfico tensão vs. deformação.



Fonte: produção do próprio autor.

4.2.2 Análise do Ensaio de Tração do CPRFB $[90^\circ]_3$

As propriedades mecânicas do compósito, sob sequência de empilhamento à $[90^\circ]_3$, também foram baseadas na norma ASTM D3039, ASTM (1971). Por meio dos gráficos tensão vs deformação foram obtidos a resistência máxima (Y_t), a deformação longitudinal (ϵ_l) e a transversal (ϵ_t) e o módulo de elasticidade transversal (E_2), obtido pelo método tangencial. As Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam os gráficos e as Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 as propriedades mecânicas calculadas, dos CPRFB fabricados com fibras extraídas, do topo, meio e base, respectivamente. Diferentemente dos CPRFB sob empilhamento de $[0^\circ]_3$, os corpos de prova sob empilhamento de $[90^\circ]_3$ não apresentaram consideráveis diferenças em suas espessuras, sendo as médias das espessuras, 4,91 mm (compósito com fibras do topo), 3,59 mm (compósitos com fibras do meio) e 4,12 mm (compósitos com fibras da base). Sendo assim, a média de suas resistências máximas, bem como deformações e módulos de elasticidade transversal apresentaram valores próximos, conforme pode ser vistos nas respectivas tabelas.

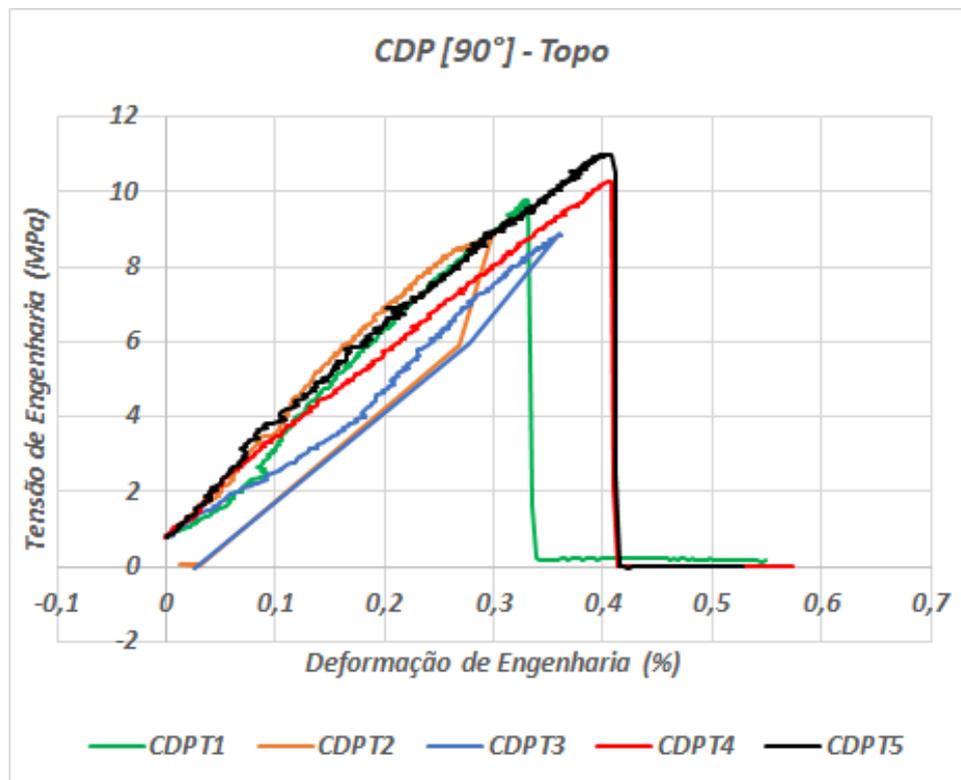
Tabela 4.6 – Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à [90°] - Topo.

Sequência de Empilhamento - [90°]				
CDP	$Y_t^{(1)}$	$E_2^{(2)}$	$\varepsilon_l^{(3)}$	$\varepsilon_t^{(4)}$
CDPT1	9,78	2,96	0,33	0,11
CDPT2	8,88	3,06	0,29	0,03
CDPT3	8,87	2,47	0,36	0,01
CDPT4	10,28	2,51	0,41	0,02
CDPT5	11,02	2,69	0,41	0,01
Média	9,77	2,74	0,36	0,04
Desvio Padrão	0,92	0,27	0,05	0,04

(¹) Resistência à Tração Transversal (*MPa*), (²) Módulo de Elasticidade Transversal (*GPa*), (³) Deformação Longitudinal de Engenharia (%), (⁴) Deformação Transversal de Engenharia (%), CDP = Corpo de Prova.

Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4.9 – Resultados dos ensaios à tração CDPB - [90°]₃ - Gráfico tensão vs. deformação.



Fonte: produção do próprio autor.

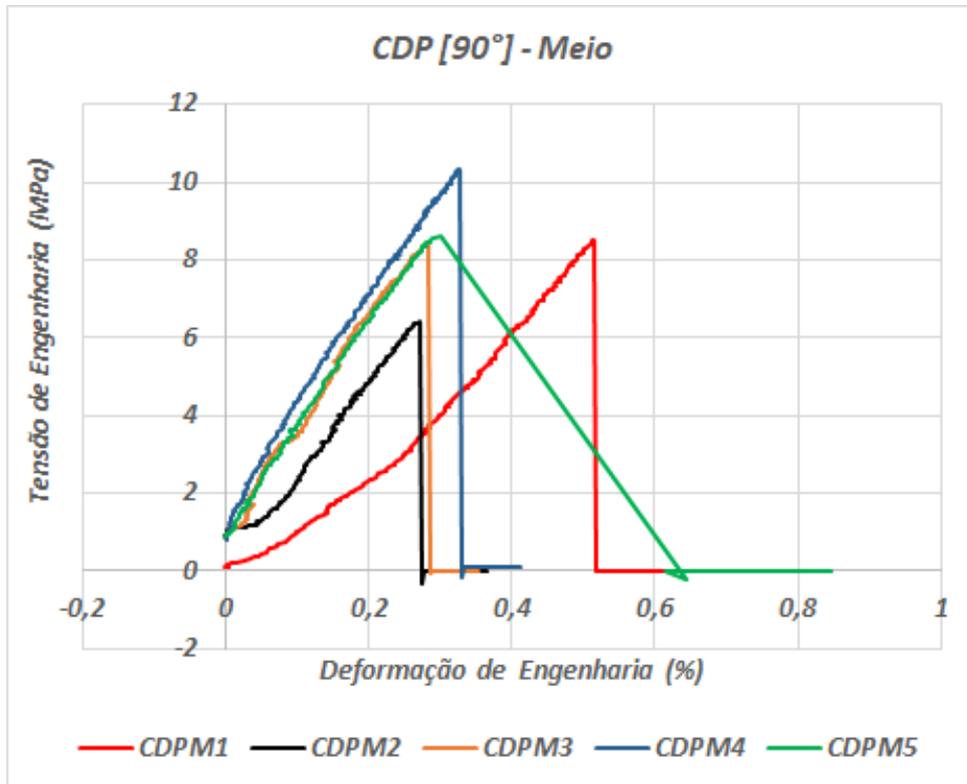
Tabela 4.7 – Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[90^\circ]_3$ - Meio.

Sequência de Empilhamento - $[90^\circ]_3$				
CDP	$Y_t^{(1)}$	$E_2^{(2)}$	$\varepsilon_l^{(3)}$	$\varepsilon_t^{(4)}$
CDPM1	8,53	1,67	0,51	0,07
CDPM2	6,41	2,37	0,27	0,05
CDPM3	8,41	3,00	0,28	0,05
CDPM4	10,34	3,45	0,3	0,15
CDPM5	8,61	2,87	0,3	0,09
Média	8,46	2,67	0,33	0,08
Desvio Padrão	1,39	0,68	0,10	0,04

(¹) Resistência à Tração Transversal (MPa), (²) Módulo de Elasticidade Transversal (GPa), (³) Deformação Longitudinal de Engenharia (%), (⁴) Deformação Transversal de Engenharia (%), CDP = Corpo de Prova.

Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4.10 – Resultados dos ensaios à tração CDPM - $[90^\circ]_3$ - Gráfico tensão vs. deformação.



Fonte: produção do próprio autor.

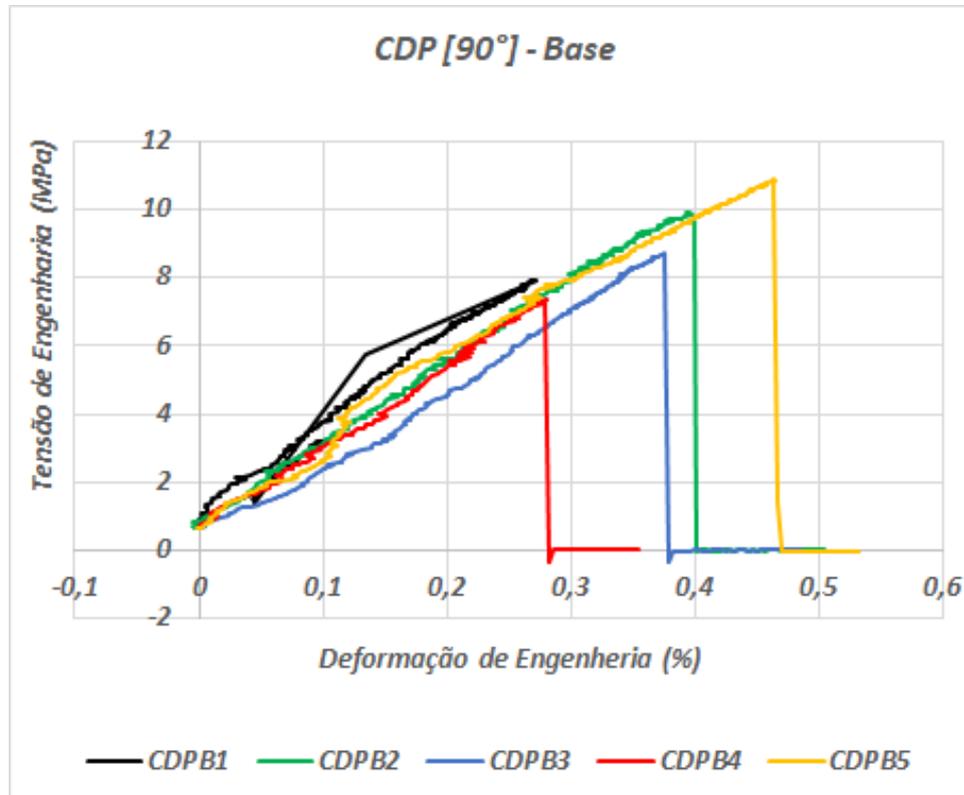
Tabela 4.8 – Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[90^\circ]_3$ - Base.

Sequência de Empilhamento - $[90^\circ]_3$				
CDP	$Y_t^{(1)}$	$E_2^{(2)}$	$\varepsilon_l^{(3)}$	$\varepsilon_t^{(4)}$
CDPB1	7,93	2,94	0,27	0,07
CDPB2	9,89	2,47	0,4	0,07
CDPB3	8,71	2,29	0,38	0,04
CDPB4	7,37	2,63	0,28	0,01
CDPB5	10,88	2,31	0,47	0,06
Média	8,96	2,53	0,36	0,05
Desvio Padrão	1,43	0,27	0,08	0,03

(¹) Resistência à Tração Transversal (MPa), (²) Módulo de Elasticidade Transversal (GPa), (³) Deformação Longitudinal de Engenharia (%), (⁴) Deformação Transversal de Engenharia (%), CDP = Corpo de Prova.

Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4.11 – Resultados dos ensaios à tração CDPB - $[90^\circ]_3$ - Gráfico tensão vs. deformação.



Fonte: produção do próprio autor.

4.2.3 Análise do Ensaio de Tração do CPRFB $[\pm 45^\circ]_{1S}$

Conforme Gibson (2016) e a norma ASTM D 3518 ASTM (1976), para obter as propriedades mecânicas de laminados simétricos e orientados à $[\pm 45^\circ]_{1S}$, esta análise deve considerar que as tensões de cisalhamento, τ_{12} , estão associadas à tensão de tração uniaxial que atua sobre o laminado,

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_{xx}}{2}. \quad (4.2.1)$$

Já a deformação por cisalhamento, γ_{12} , é determinada por,

$$\gamma_{12} = \varepsilon_x - \varepsilon_y, \quad (4.2.2)$$

onde ε_x é deformações longitudinais e ε_y são deformações transversais. Ambas são obtidas por meio do ensaio de tração do laminado $[\pm 45^\circ]_{1S}$. A partir dos valores de τ_{12} e γ_{12} encontrados, gera-se um novo gráfico denominado tensão de cisalhamento vs. deformação por cisalhamento, onde a resistência ao cisalhamento (S_{12}) e o módulo de cisalhamento (G_{12}) podem ser avaliados. Desta forma, esta metodologia foi utilizada para determinar as propriedades mecânicas dos CPRFB empilhados à $[\pm 45^\circ]_{1S}$. As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam os gráficos e as Tabelas 4.9, 4.10 e 4.10 as propriedades mecânicas calculadas, dos CPRFB fabricados com fibras extraídas, do topo, meio e base, respectivamente. Neste caso, os compósitos com fibras do topo, meio e base apresentaram o valor médio de espessura igual a $5,96\text{mm}$, $7,34\text{ mm}$ e $6,44\text{ mm}$, respectivamente. Os compósitos que apresentaram menor espessura, foram os com fibras do topo, valor de resistência máxima ao cisalhamento superior aos demais. Consequentemente, as distorções angulares e módulo de cisalhamento, também apresentam uma pequena diferença, conforme pode ser visto nas tabelas.

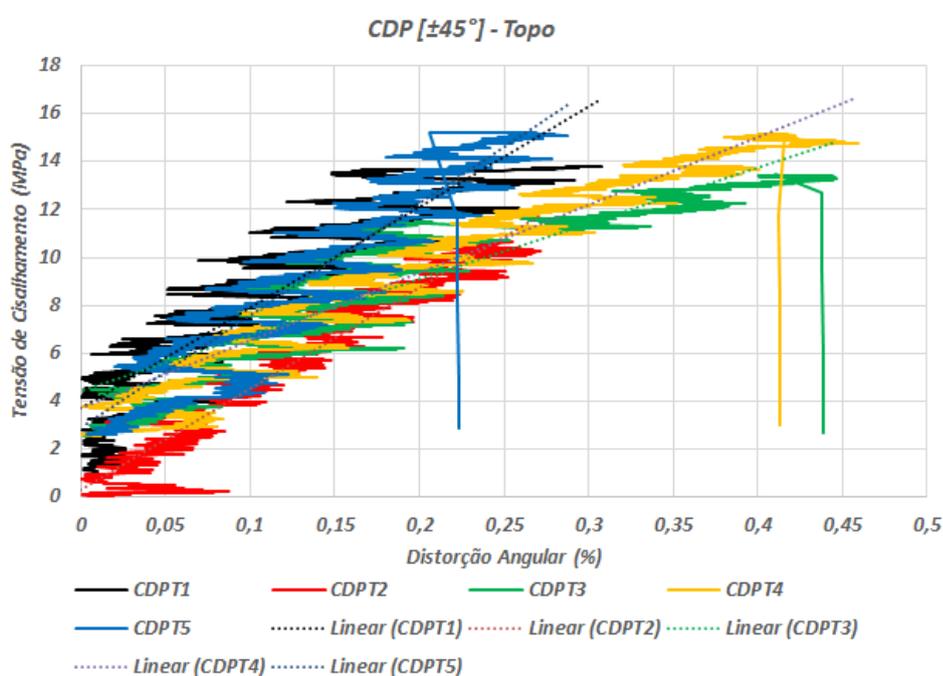
Tabela 4.9 – Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[\pm 45^\circ]_{1S}$ - Topo.

Sequência de Empilhamento - $[\pm 45^\circ]_{1S}$			
CDP	$S_{12}^{(1)}$	$G_{12}^{(2)}$	$\gamma_{12}^{(3)}$
CDPM1	13,83	4,46	0,31
CDPM2	10,65	3,94	0,27
CDPM3	13,44	3,05	0,44
CDPM4	15,15	3,29	0,46
CDPM5	15,22	5,25	0,29
Média	13,66	4,00	0,35
Desvio Padrão	1,86	0,89	0,09

- (1) Resistência ao Cisalhamento (MPa), (2) Módulo de de Cisalhamento (GPa),
 (3) Distorção Angular (%), CDP = Corpo de Prova.

Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4.12 – Resultados dos ensaios à tração CDPT - $[\pm 45^\circ]_{1S}$ - Gráfico tensão vs. deformação.



Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 4.10 – Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[\pm 45^\circ]_{1S}$ - Meio.

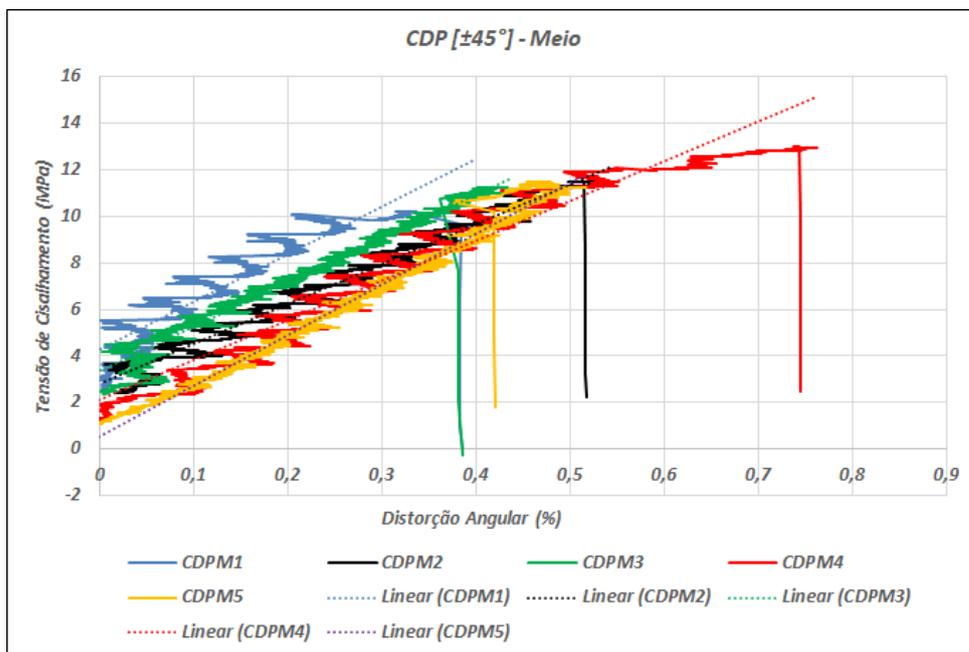
Sequência de Empilhamento - $[\pm 45^\circ]_{1S}$			
CDP	$S_{12}^{(1)}$	$G_{12}^{(2)}$	$\gamma_{12}^{(3)}$
CDPT1	10,22	2,76	0,37
CDPT2	11,51	2,26	0,51
CDPT3	11,23	2,96	0,38
CDPT4	12,98	1,75	0,74
CDPT5	11,50	2,30	0,50
Média	11,49	2,41	0,50
Desvio Padrão	0,99	0,47	0,15

(1) Resistência ao Cisalhamento (MPa), (2) Módulo de de Cisalhamento (GPa),

(3) Distorção Angular (%), CDP = Corpo de Prova.

Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4.13 – Resultados dos ensaios à tração CDPM - $[\pm 45^\circ]_{1S}$ - Gráfico tensão vs. deformação.



Fonte: produção do próprio autor.

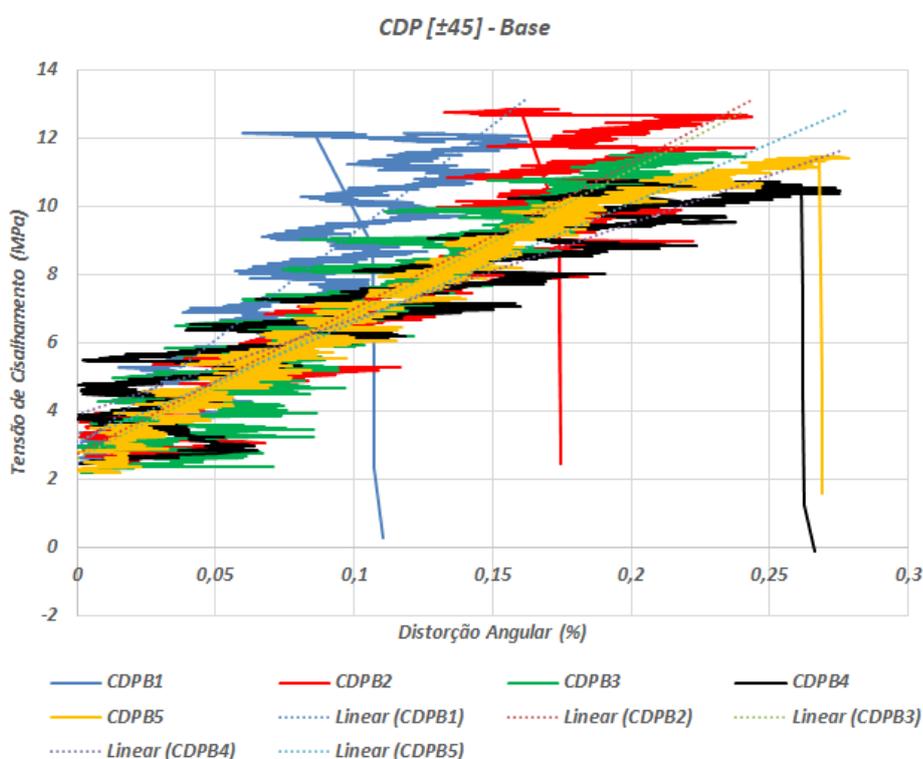
Tabela 4.11 – Propriedades mecânicas do CPRFB com sequência de empilhamento à $[\pm 45^\circ]_{1S}$ - Base.

Sequência de Empilhamento - $[\pm 45^\circ]_{1S}$			
	$S_{12}^{(1)}$	$G_{12}^{(2)}$	$\gamma_{12}^{(3)}$
CDPT1	12,16	7,15	0,17
CDPT2	12,86	5,36	0,24
CDPT3	11,56	4,82	0,24
CDPT4	10,80	4,15	0,26
CDPT5	11,45	4,24	0,27
Média	11,77	5,14	0,24
Desvio Padrão	0,78	1,22	0,04

(1) Resistência ao Cisalhamento (MPa), (2) Módulo de de Cisalhamento (GPa),
 (3) Distorção Angular (%), CDP = Corpo de Prova.

Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4.14 – Resultados dos ensaios à tração CDPB - $[\pm 45^\circ]_{1S}$ - Gráfico tensão vs. deformação.



Fonte: produção do próprio autor.

Com a finalidade de utilizar as propriedades mecânicas do CPRFB determinadas experimentalmente na abordagem numérica deste trabalho, foram selecionadas

os maiores valores. Os CPRFB que apresentaram propriedades promissoras foram os reforçados com fibras do topo, conforme representado na Tabela 4.12. Uma justificativa para este comportamento é uma combinação de vários fatores. Primeiro motivo está associado ao fato de ter sido as últimas placas fabricadas, as quais não apresentaram excesso de resina quando comparado aos demais compósitos reforçados com fibra do meio e base. Segundo porque as fibras do topo, conforme exposto por Liese e Köhl (2015), tendem a apresentar menor percentual de tecido parenquimatoso favorecendo uma boa adesão, apesar de não ter sido submetido à tratamento de superfície como alcalinização. Visando a verificação do desempenho do CPRFB com fibra do topo foi realizado uma comparação com valores da literatura e estimados analiticamente. Na Tabela 4.12, estão dispostas as propriedades mecânicas calculadas por Regra das Misturas (*RM*) Halphin-Tsai (*HT*), cálculo da resistência à tração longitudinal analítica e experimentalmente (a obtenção das propriedades mecânicas por meio destes métodos em detalhes estão apresentados no Apêndice A). Nestas comparações, é de suma importância considerar o resultados do ensaio de superfície de falha do CPRFB, o qual está descrito na seção 4.4 deste capítulo. O módulo de elasticidade longitudinal, E_1 , obtido pela regra das misturas apresentou valores satisfatórios quando comparado ao valor experimental, sendo 7,86 e 8,98 *GPa*, respectivamente. O erro percentual é de 12,49, o que indica que a fração de vazios que o compósito apresenta teve influência no resultado. Devido a carência de dados referentes à fibra de bambu, como o módulo de elasticidade transversal da fibra, E_2^f , e módulo de cisalhamento da fibra, G_{12}^f , considerou-se as fibras como material isotrópico. A partir desta consideração, obteve-se os módulos de elasticidade transversal, E_2 , e módulo de cisalhamento, G_{12} , analíticos, os quais obtiveram diferenças de 34,61% e 56,73% respectivamente, pelo método da *RM* e diferenças de 48,53% e 50,30%, pelo método de *HT*, quando comparados aos valores experimentais. Tais diferenças, podem estar associados ao fato de ter considerado as fibras como material isotrópico, fator de reforço e valor do módulo de cisalhamento do epóxi retirado da literatura (detalhes dos cálculos dispostos no Apêndice A). Para a determinação do coeficiente de Poisson do CPRFB, devido a escassez de dados relacionados ao coeficiente de Poisson, utilizou-se o coeficiente de Poisson da fibra de Henequén (valor baseado no estudo de Trujillo (2014)). Já o coeficiente de Poisson do epóxi foi baseado no valor encontrado em Kaw (2005). O valor calculado obtido por *RM*, apresenta uma diferença de 14,17% quando comparado ao experimental. Por fim, a resistência máxima do CPRFB experimental quando comparado com os valores estimados analiticamente, apresentam uma diferença de 61,35%, por *RM*, e uma diferença de 49,22% quando comparado com o método analítico de resistência à tração de um laminado. Estas diferenças podem estar associado ao percentual de vazios presentes no compósitos (conforme pode ser visto nas micrografias disposta na seção 4.4 do capítulo 4) que proporcionam regiões

que concentram tensões e originam a fratura, impedindo que o mesmo atinja a sua resistência máxima.

Tabela 4.12 – Comparações das propriedades mecânicas experimentais e analíticas do CPRFB.

	RM ⁽¹⁾	Erro (%)	HT ⁽²⁾	Erro (%)	X_t ⁽³⁾	Erro (%)	EXP ⁽⁴⁾	Unidade
E_1	7,86	12,49	-	-	-	-	$8,98 \pm 0,42$	<i>GPa</i>
E_2	4,19	34,61	5,32	48,53	-	-	$2,74 \pm 0,27$	<i>GPa</i>
G_{12}	1,73	56,73	1,99	50,30	-	-	$4 \pm 0,89$	<i>GPa</i>
ν_{12}	0,309	14,17	-	-	-	-	$0,36 \pm 0,02$	-
X_t	215,86	61,35	-	-	164,28	49,22	$83,42 \pm 11,38$	<i>MPa</i>

Valores obtidos por ⁽¹⁾ Regras das Misturas, ⁽²⁾ Halphin-Tsai, ⁽³⁾ Cálculo da Resistência à Tração Longitudinal Analítico, ⁽⁴⁾ Experimentalmente - CPRFB com fibras do topo.

Fonte: produção do próprio autor.

As propriedades mecânicas do CPRFB obtidas neste estudo foram comparados com os valores da literatura investigados por Roslan *et al.* (2018) e Sato (2018), conforme Tabela 4.13, os quais avaliaram as propriedades de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de bambu (CERFB) e de algodão (CERFA), respectivamente. Vale ressaltar que no estudo de Roslan *et al.* (2018), as fibras não foram submetidas a tratamento de superfície. Em geral, as propriedades elásticas como os módulos do CPRFB do presente estudo foram maiores que os do CERFB. Este fato pode ser explicado devido ao comportamento mais frágil do CPRFB, que apresenta deformação máxima menor e resistência máxima maior que o CERFB. Já em relação aos compósito de matriz epóxi reforçados com fibras de algodão, do estudo de Sato (2018), os valores do CPRFB são comparáveis às propriedades mecânicas do CERFA. Sendo assim, uma vez que os devidos ajustes relacionado ao processo de manufatura do laminado, como espessura da redução sejam implementados, o CPRFB pode obter melhores resultados.

Tabela 4.13 – Comparações entre propriedades mecânicas experimentais e da literatura do CPRFB.

	Roslan <i>et al.</i> (2018) CERFB ⁽¹⁾	Sato (2018) CERFA ⁽²⁾	Presente Estudo
E_1	4,96	8,37 ± 2,21	8,98 ± 0,42
E_2	1,09	2,83 ± 0,17	2,74 ± 0,27
G_{12}	1,37	3,27 ± 0,53	4,00 ± 0,89
ν_{12}	-	-	0,36 ± 0,02
X_t	138,88	79,96 ± 5,58	83,42 ± 11,38

⁽¹⁾ Compósito Epoxídico Reforçado com Fibra de Bambu, ⁽²⁾ Compósito Epoxídico Reforçado com Fibra de Algodão.

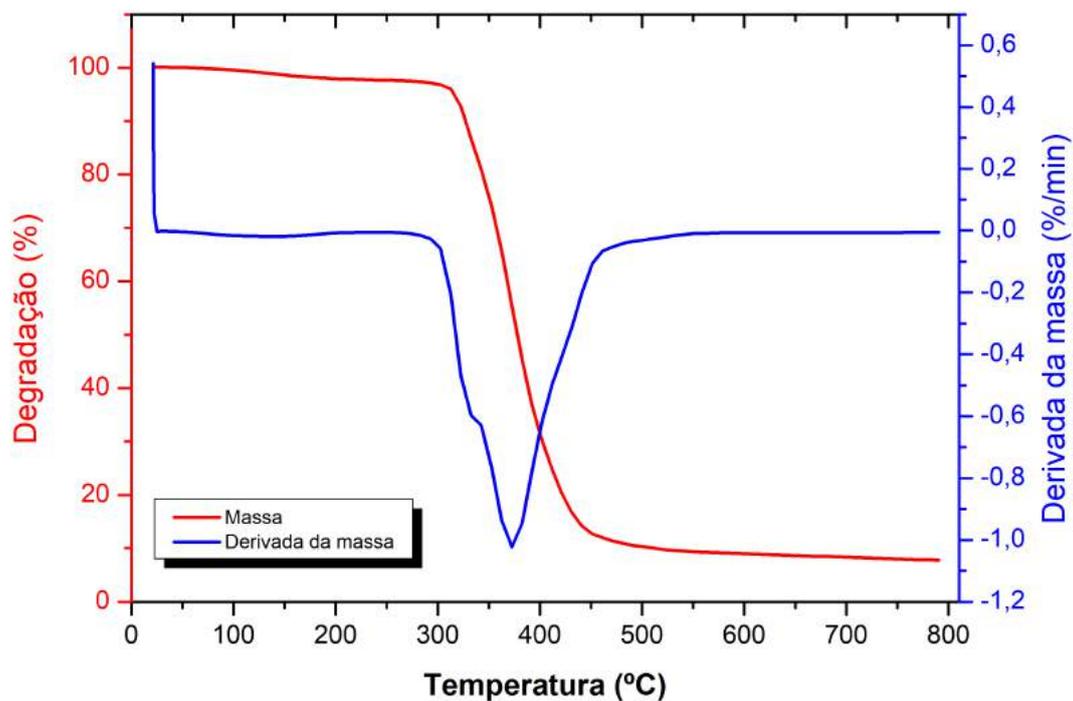
Fonte: produção do próprio autor.

4.3 Análise de Termogravimetria do Epóxi e CPRFB

Para analisar o resultado de termogravimetria do CPRFB, primeiro foi necessário verificar o comportamento de degradação térmica do epóxi. A Figura 4.15 apresenta a curva de degradação, em vermelho, e a de derivada de massa, em azul. Nota-se que até 300 ± 2 °C, o epóxi apresenta uma degradação de menos de 5% de massa. Já a maior degradação ocorre aproximadamente à 375 ± 2 °C. Tal comportamento similar a este estudo foi reportado por Zhang *et al.* (2018), onde a temperatura de degradação máxima encontrada foi de 392 ± 2 °C.

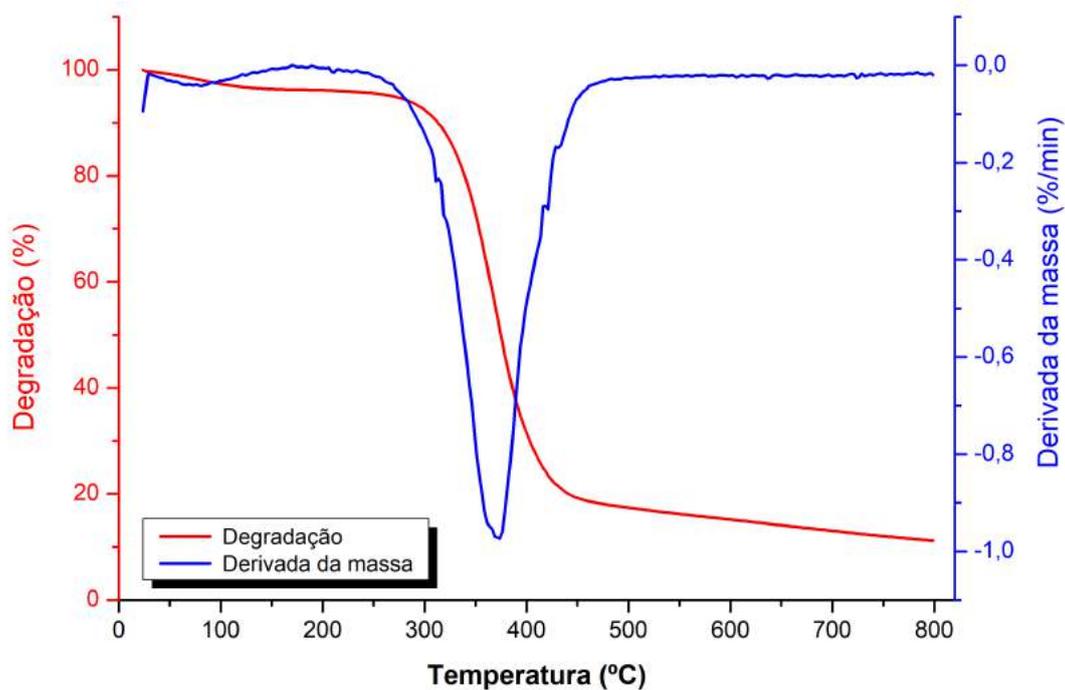
Conhecendo o comportamento de degradação térmica do epóxi, foi possível analisar o resultado de degradação térmica do CPRFB. Conforme esperado, houve uma sobreposição das curvas de degradação do epóxi e da fibra, não sendo possível determinar as frações volumétricas de cada fase por este método. Esta sobreposição está associado ao fato das fases apresentarem temperatura de degradação próximas. Em relação a degradação térmica do CPRFB, esta ocorre aproximadamente entre 350 a 390 ± 2 °C, que pode ser comparado com o estudo de Zhang *et al.* (2018), o qual reporta que a temperatura de degradação do CPRFB, também com fibras não tratadas, ocorre à 386 ± 2 °C.

Figura 4.15 – Termogravimetria do epóxi.



Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4.16 – Termogravimetria do CPRFB.

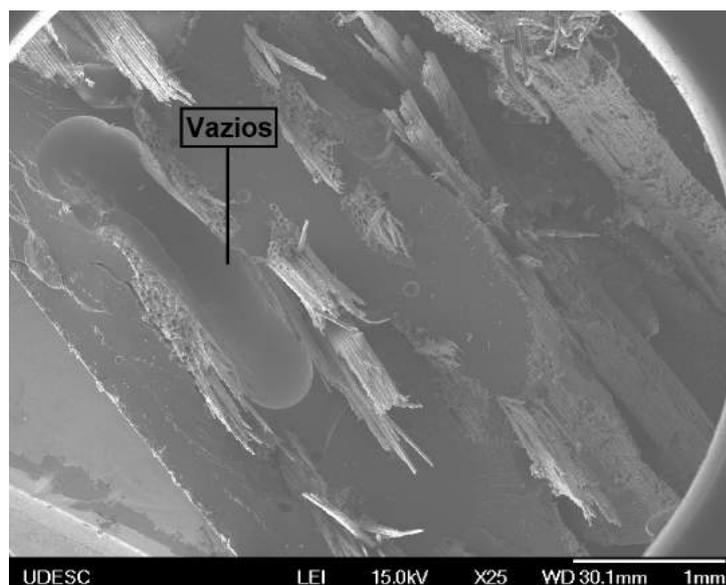


Fonte: produção do próprio autor.

4.4 Análise da Superfície de Falha dos CPRFB

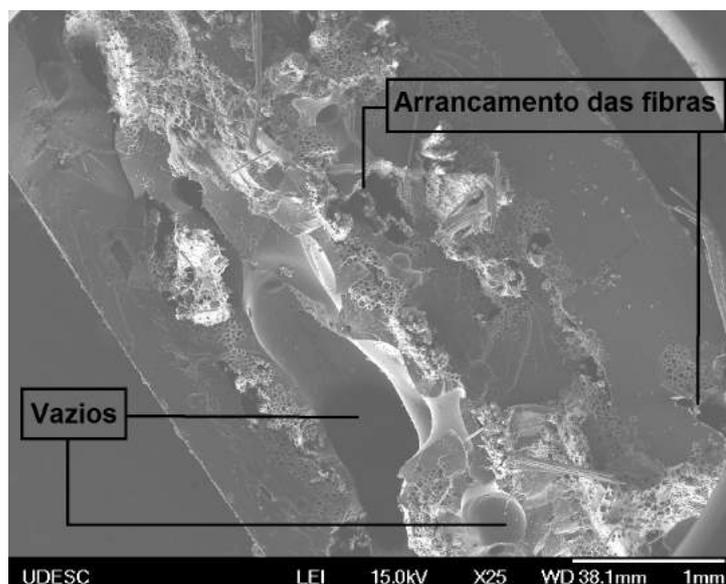
A partir do ensaio de microscopia eletrônica de varredura, foram obtidas as micrografias com ampliação de até 25x, os quais são apresentados nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19, referentes aos compósitos empilhados à $[\pm 45^\circ]_{1S}$, $[0^\circ]_3$ e $[90^\circ]_3$, respectivamente. Vale ressaltar que os CPRFB do topo foram selecionados, visto que foram os corpos de prova que apresentaram menor seção de área transversal. Conforme esperado, há presença de vazios, os quais estão associados ao processo de fabricação, como pode ser visto nas Figuras 4.17 e 4.18. Ainda, nestas mesmas imagens, nota-se que há presença de algumas cavidades decorrente do arrancamento de algumas fibras (*pull-out*), fenômeno também encontrado no estudo de Khan, Yousif e Islam (2017). Já em outras fibras, ainda que as fibras não foram tratadas, nota-se que houve ancoramento da matriz sobre a fibra de bambu.

Figura 4.17 – Análise de fractografia dos CPRFB, fibras do topo, empilhados à $[\pm 45^\circ]_{1S}$.



Fonte: produção do próprio autor.

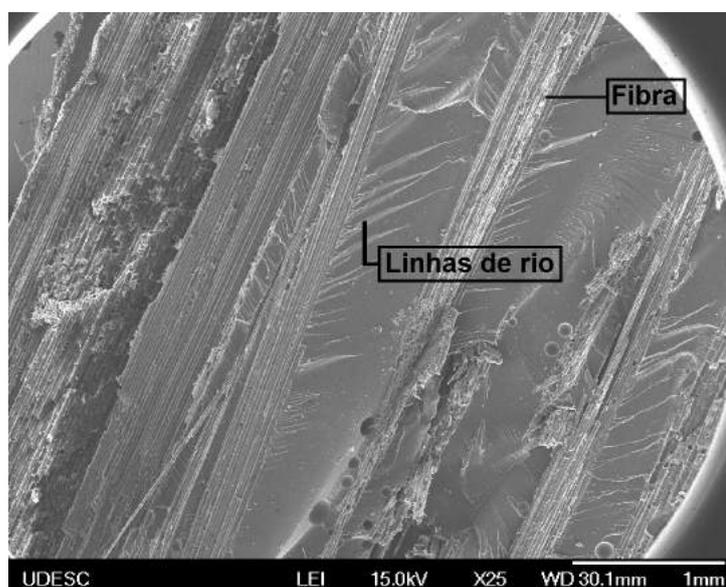
Figura 4.18 – Análise de fractografia dos CPRFB, fibras do topo, empilhados à $[0^\circ]_3$.



Fonte: produção do próprio autor.

Por último, no CPRFB sob empilhamento à $[90^\circ]_3$, conforme representado na Figura 4.19, nota-se que ocorreu uma trinca intralaminar. A fratura ocorreu na fibra, e se propagou para a matriz, pois as linhas de rio estão partindo das fibras e convergindo em direção oposta às das fibras. As linhas de rio também foram encontradas no estudo de Khan, Yousif e Islam (2017), que investigou os comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras curtas de bambu. No entanto, diferentemente deste caso, a falha iniciou-se na matriz.

Figura 4.19 – Análise de fractografia dos CPRFB, fibras do topo, empilhados à $[90^\circ]_3$.

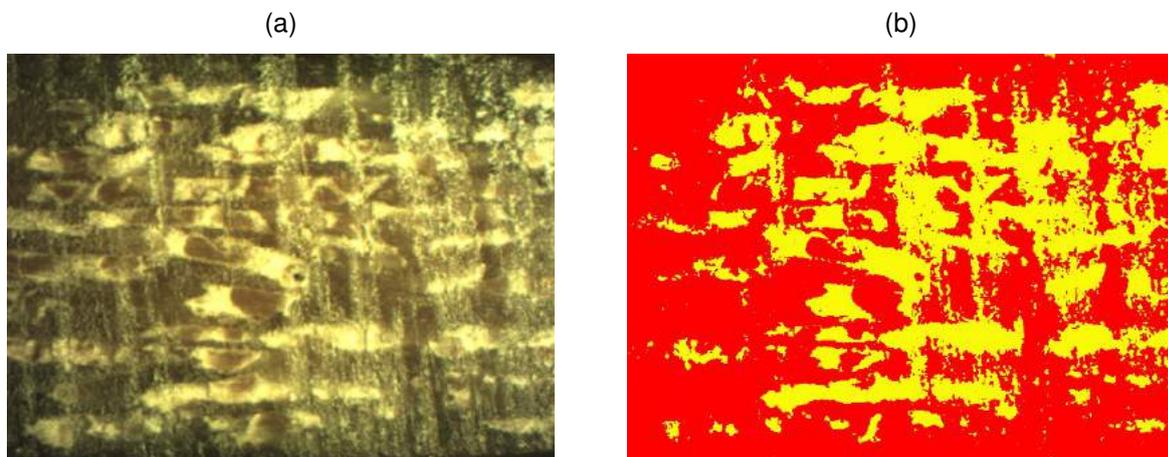


Fonte: produção do próprio autor.

4.4.0.1 Análise da Fração Volumétrica via Estereomicroscópio

A partir do estereomicroscópio Leica MZ9.5, obteve-se as imagens a partir de uma amostra mostrada na Figura 4.20. Na Figura 4.20(a) pode ser visto a seção transversal do compósito empilhado à $[0^\circ]_3$, onde a região branca são as fibras de bambu e região mais escura o epóxi. A partir desta imagem, o *software* de arquivamento e processamento de imagem, *Image Manager*, estimou as respectivas fases do compósito conforme pode ser visto na Figura 4.20(b). As frações encontradas foram 70% de matriz epóxi (em vermelho) e 30% de fibra de bambu (em amarelo), o que foi comparável com os valores estimados no cálculo de quantidade de resina (disposto no anexo C).

Figura 4.20 – (a) Análise de fração volumétrica por microscopia do CPRFB, (b) Identificação de fases fibra-matriz.



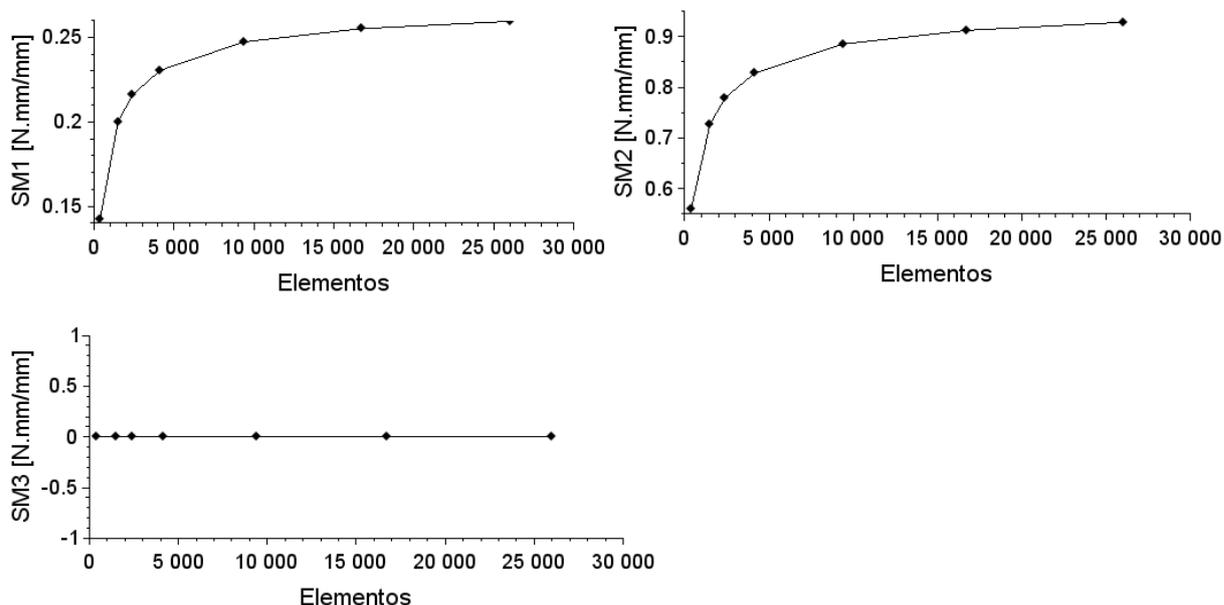
Fonte: produção do próprio autor.

4.4.1 Abordagem Computacional

4.4.1.1 Estudo de Caso I: Aplicação em um Estrutura Aeronáutica

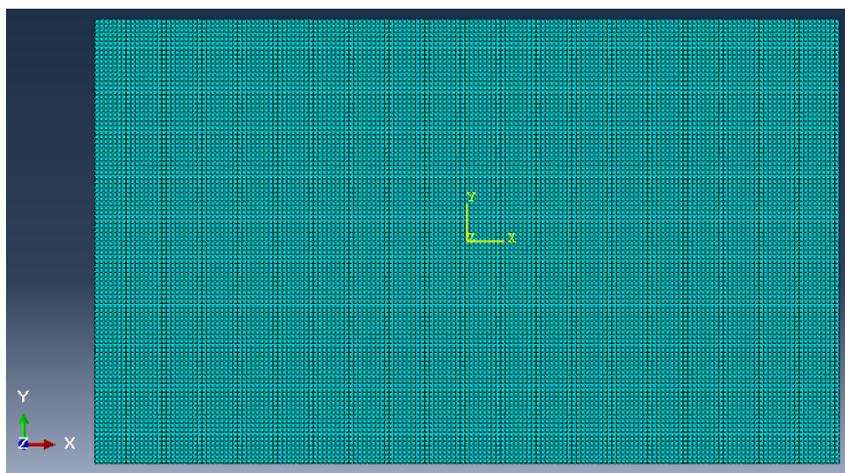
A análise de refino de malha foi realizada avaliando apenas os momentos resultantes porque as forças resultantes apresentaram valores nulos. Conforme mostrado na Figura 4.21, os momentos resultantes (SM), os quais estão sendo monitorados, apresentaram pequenas influência nos resultados, a partir de 15000 elementos. Desta forma, em toda análise deste estudo de caso foi utilizado 16700 elementos, como visto na Figura 4.22.

Figura 4.21 – Análise de refino de malha do compartimento de manual e mapas de CPRFB.



Fonte: produção do próprio autor.

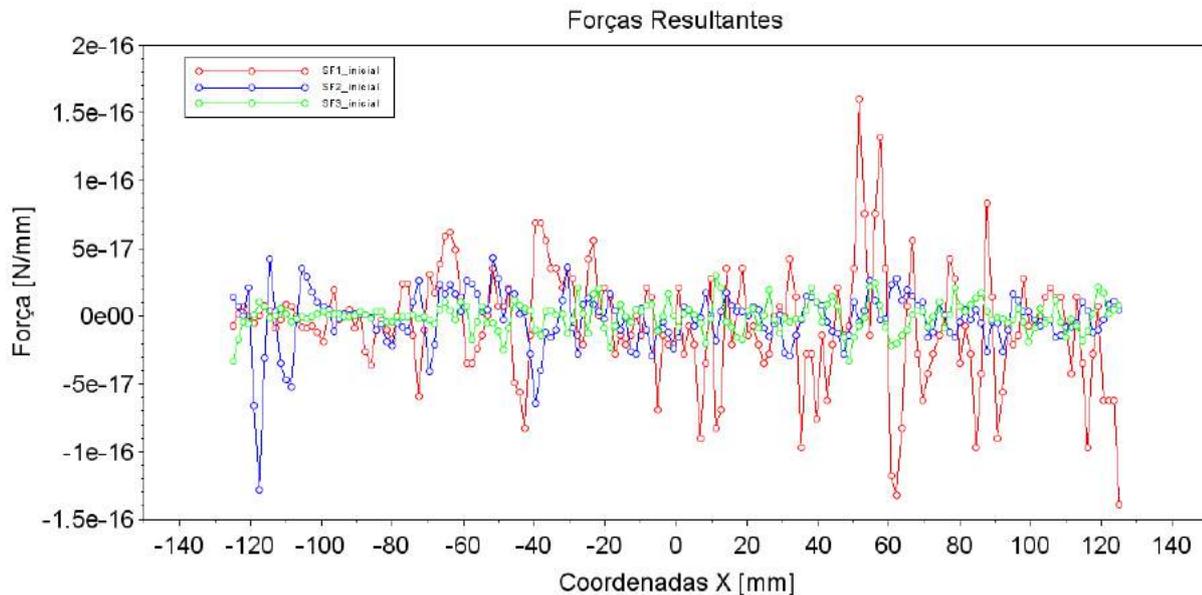
Figura 4.22 – Malha refinada do compartimento de manual e mapas de CPRFB via Abaqus.



Fonte: produção do próprio autor.

Conforme mencionado anteriormente, as forças resultantes obtidas ao longo da coordenada X da estrutura foram extraídas via MEF do laminado inicial (*SM*), apresentaram valores nulos, como pode ser visto na Figura 4.23. Este fato pode ser explicado devido à simetria da sequência de empilhamento que resulta no desacoplamento das forças e momentos sob o laminado. Desta forma, como o carregamento predominante sobre o laminado é de momento, não gera esforços normais.

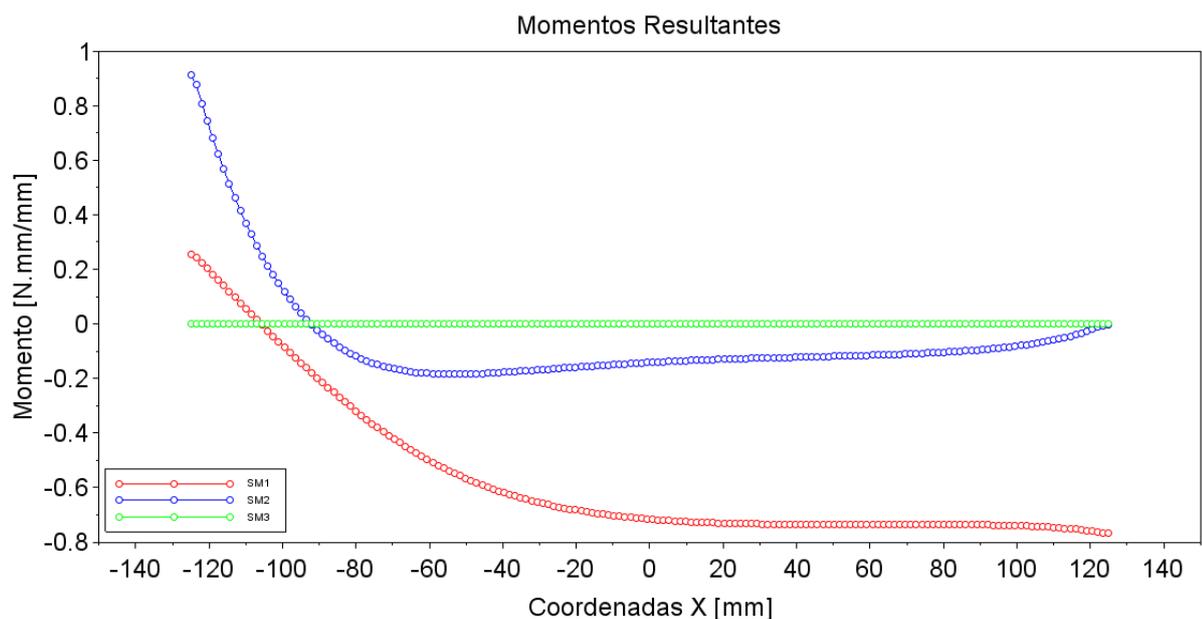
Figura 4.23 – Forças resultantes do compartimento de manual e mapas de CPRFB com 4 lâminas [0/90/90/0] via MEF.



Fonte: produção do próprio autor.

Já os momentos resultantes obtidos ao longo da coordenada X da estrutura, também extraídos via MEF, estão apresentados na Figura 4.24. Nota-se que os momentos apresentam maiores valores próximo ao engaste (coordenada -125), visto que nesta região concentram-se as maiores tensões.

Figura 4.24 – Momentos resultantes do compartimento de manual e mapas de CPRFB com 4 lâminas [0/90/90/0] via MEF.



Fonte: produção do próprio autor.

Com o objetivo de analisar o laminado considerando três seções críticas, isto é, os pontos onde os esforços atuantes apresentam maiores valores. Tais pontos, os quais são localizados por meio das coordenadas ao longo do eixo X, situam-se nas coordenadas -125, 0,74 e 125. A Tabela 4.14, apresenta os respectivos valores dos momentos e forças resultantes em cada ponto.

Tabela 4.14 – Esforços da seção crítica extraído via MEF do compartimento de manuais e mapas fabricado de CPRFB com 4 lâminas - Sequência de empilhamento inicial [0/90/90/0].

Esforços	Coord. -125 (mm)	Coord. 0,74 (mm)	Coord. 125 (mm)	Unidade
SF1 ⁽¹⁾	0	0	0	N/mm
SF2 ⁽²⁾	0	0	0	N/mm
SF3 ⁽³⁾	0	0	0	N/mm
SM1 ⁽⁴⁾	0,255	-0,717	-0,767	N.mm/mm
SM2 ⁽⁵⁾	0,912	-0,141	0	N.mm/mm
SM3 ⁽⁶⁾	0	0	0	N.mm/mm

⁽¹⁾ Força na direção x , ⁽²⁾ Força na direção y , ⁽³⁾ Força distorciva, ⁽⁴⁾ Momento em relação ao eixo x , ⁽⁵⁾ Momento em relação ao eixo y , ⁽⁶⁾ Momento distorcivo.

Fonte: produção do próprio autor.

Desta forma, aplicando os carregamentos extraídos nas três seções críticas a estrutura apresentou os fatores e margens de segurança dos critérios de Tsai-Hill e Tsai-Wu, os quais dispostos nas Tabelas 4.15, 4.16 e 4.17. Como pode ser visto, as margens de segurança da estrutura, considerando os esforços atuantes das três seções críticas iniciais, apresentaram valores superiores a zero, o que indica que não houve falha da estrutura analisada. Nota-se que, quando considerado os carregamentos do ponto próximo ao engaste, coordenada -125, os valores da margem de segurança são inferiores, visto que é a região com maior esforço.

Tabela 4.15 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada -125 (*mm*) - Sequência de empilhamento inicial com 4 lâminas.

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
FS	MS	Situação	FS	MS	Situação
4,1628	3,16	Não falhou a camada 1 (0°)	0,0036	15,64	Não falhou a camada 1 (0°)
24,4552	23,46	Não falhou a camada 2 (90°)	0,0007	35,60	Não falhou a camada 2 (90°)
24,4552	23,46	Não falhou a camada 3 (90°)	0,0017	23,18	Não falhou a camada 3 (90°)
4,1628	3,16	Não falhou a camada 4 (0°)	0,0589	3,12	Não falhou a camada 4 (0°)

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 4.16 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada 0,74 (*mm*) - Sequência de empilhamento inicial com 4 lâminas.

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
FS	MS	Situação	FS	MS	Situação
19,8687	18,87	Não falhou a camada 1 (0°)	0,0028	18,04	Não falhou a camada 1 (0°)
35,9106	34,91	Não falhou a camada 2 (90°)	0,0008	34,05	Não falhou a camada 2 (90°)
35,9106	34,91	Não falhou a camada 3 (90°)	0,0001	138,72	Não falhou a camada 3 (90°)
19,8687	18,87	Não falhou a camada 4 (0°)	0,0008	34,64	Não falhou a camada 4 (0°)

Fonte: produção do próprio autor.

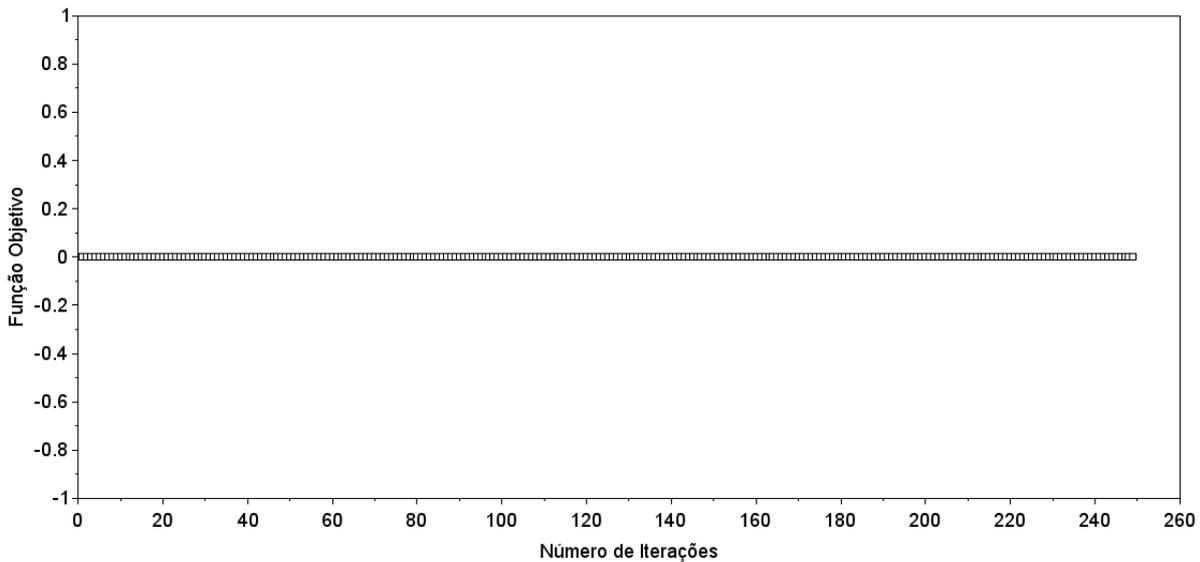
Tabela 4.17 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada 125 (*mm*) - Sequência de empilhamento inicial com 4 lâminas.

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
FS	MS	Situação	FS	MS	Situação
28,4869	27,49	Não falhou a camada 1 (0°)	0,0012	28,30	Não falhou a camada 1 (0°)
35,8623	34,86	Não falhou a camada 2 (90°)	0,0007	35,80	Não falhou a camada 2 (90°)
35,8623	34,86	Não falhou a camada 3 (90°)	0,0000	148,41	Não falhou a camada 3 (90°)
28,4869	27,49	Não falhou a camada 4 (0°)	0,0009	32,37	Não falhou a camada 4 (0°)

Fonte: produção do próprio autor.

Ao verificar que a estrutura não irá falhar e apresenta margens de segurança satisfatórias, buscou-se investigar a possibilidade de otimizar a estrutura reduzindo uma lâmina. Utilizando o procedimento proposto de otimização, conforme mencionado no Capítulo 3, Seção 3.5, considerando as mesmas condições e carregamentos do laminado inicial, obteve-se a nova sequência de empilhamento igual [0/0/0]. A Figura 4.25, demonstra o comportamento da função objetivo que é norma Euclidiana da deformação. Nota-se que, neste estudo de caso, não houve variação da função objetivo ao longo das iterações. Vale ressaltar que o método de otimização é baseado em derivadas, então seu bom desempenho está associado ao ponto inicial. Considerando este fato, o ponto inicial foi determinado aleatoriamente, o que pode estar associado ao fato deste método convergir em poucas iterações ou até mesmo em uma iteração, como foi neste caso.

Figura 4.25 – Função objetivo do método de otimização baseado em derivadas



Fonte: produção do próprio autor.

A estrutura com nova sequência de empilhamento e número de lâminas, [0/0/0] foi submetidas à análise da TCL sob os carregamentos iniciais, nas três seções críticas, conforme Tabela 4.14. Cabe mencionar que não foi necessário arredondar os valores da solução encontrada (sequência de empilhamento máximo e mínimo), visto que a sequência de empilhamento obtida foi discreta, isto é, não apresentou Algarismos significativos. Como pode ser visto, nas Tabelas 4.18, 4.19 e 4.20, a sequência de empilhamento pelo método de otimização satisfaz os critérios de falha, Tsai-Hill e Tsai-Wu, sob os carregamentos iniciais. Para verificar e assegurar que a estrutura suporta os novos esforços resultantes sob nova configuração, as quais foram extraídas via MEF, pode ser visto nas Figuras 4.26 e 4.27 e descritas na Tabela 4.21. Como a estrutura apresenta sequência de empilhamento simétrico, as forças resultantes foram nulas.

Tabela 4.18 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada -125 (*mm*) - Sequência de empilhamento inicial com 3 lâminas.

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
FS	MS	Situação	FS	MS	Situação
2,0457	1,05	Não falhou a camada 1 (0°)	0,0150	7,17	Não falhou a camada 1 (0°)
Inf	Inf	Não falhou a camada 2 (0°)	0,0000	Inf	Não falhou a camada 2 (0°)
2,0457	1,05	Não falhou a camada 3 (0°)	0,2427	1,03	Não falhou a camada 3 (0°)

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 4.19 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada 0,74 (*mm*) - Sequência de empilhamento inicial com 3 lâminas.

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
FS	MS	Situação	FS	MS	Situação
12,1872	11,19	Não falhou a camada 1 (0°)	0,0075	10,57	Não falhou a camada 1 (0°)
Inf	Inf	Não falhou a camada 2 (0°)	0,0000	Inf	Não falhou a camada 2 (0°)
12,1872	11,19	Não falhou a camada 3 (0°)	0,0017	23,22	Não falhou a camada 3 (0°)

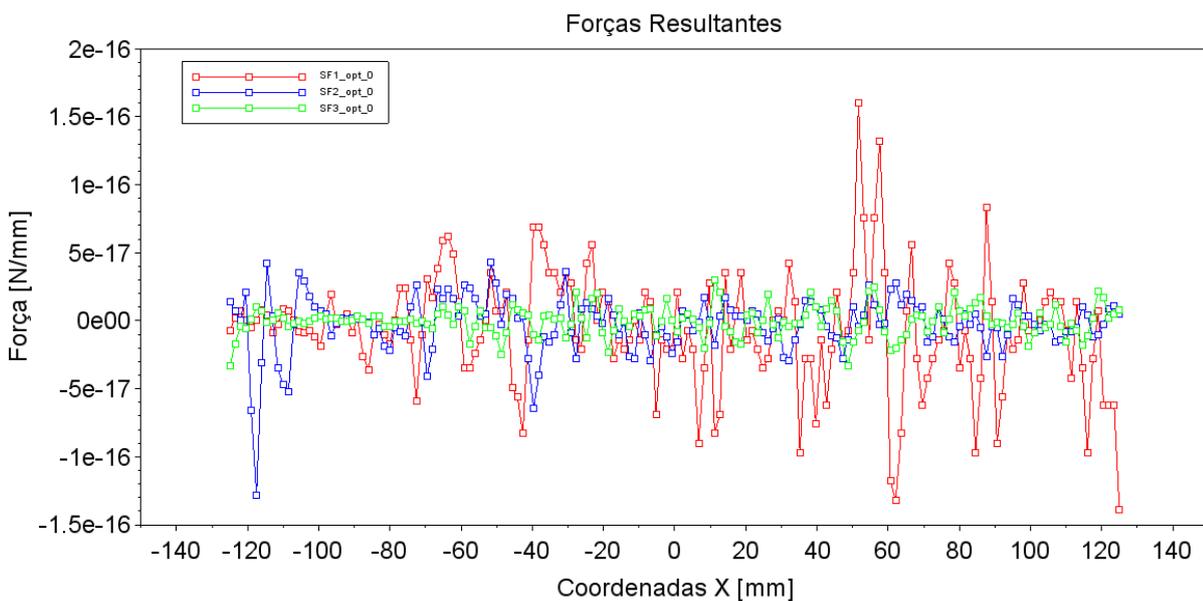
Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 4.20 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada 125 (mm) - Sequência de empilhamento inicial com 3 lâminas.

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
FS	MS	Situação	FS	MS	Situação
20,5804	19,58	Não falhou a camada 1 (0°)	0,0024	19,58	Não falhou a camada 1 (0°)
Inf	Inf	Não falhou a camada 2 (0°)	0,0000	Inf	Não falhou a camada 2 (0°)
20,5804	19,58	Não falhou a camada 3 (0°)	0,0019	21,94	Não falhou a camada 3 (0°)

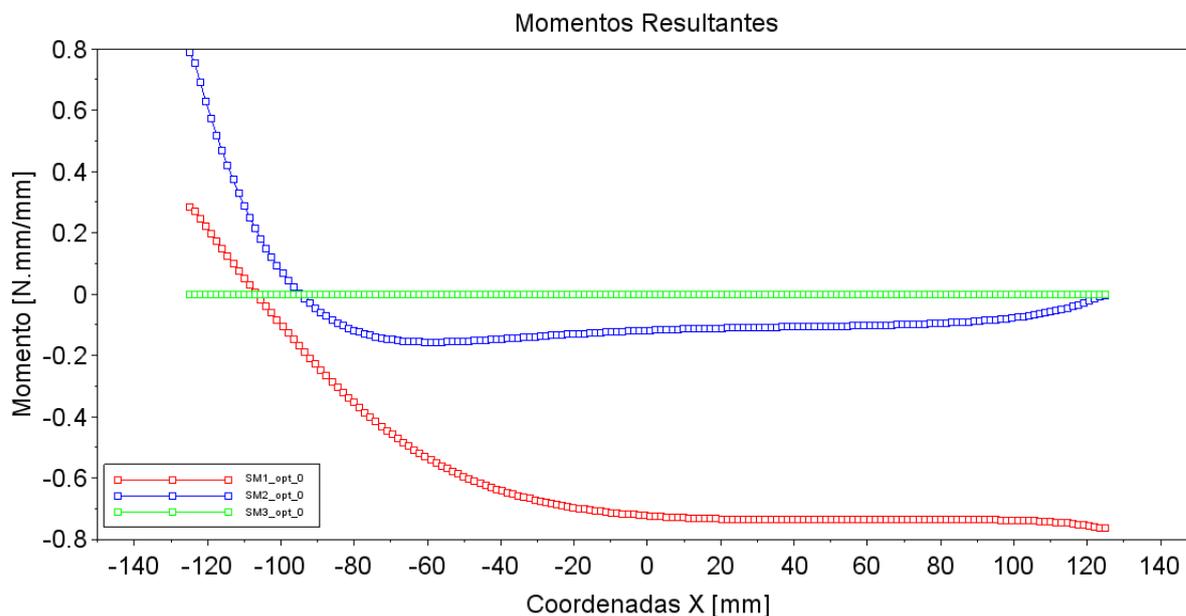
Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4.26 – Forças resultantes do compartimento de manual e mapas de CPRFB com 3 lâminas [0/0/0] via MEF.



Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4.27 – Momentos resultantes do compartimento de manual e mapas de CPRFB com 3 lâminas [0/0/0] via MEF.



Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 4.21 – Novos esforços da seção crítica extraído via MEF do compartimento de manuais e mapas fabricado de CPRFB com 3 lâminas.

Esforços	Coord. -125 (mm)	Coord. 0,74 (mm)	Coord. -125 (mm)	Unidade
SF1 ⁽¹⁾	0	0	0	N/mm
SF2 ⁽²⁾	0	0	0	N/mm
SF3 ⁽³⁾	0	0	0	N/mm
SM1 ⁽⁴⁾	0,283	-0,724	-0,763	N.mm/mm
SM2 ⁽⁵⁾	0,787	-0,119	0	N.mm/mm
SM3 ⁽⁶⁾	0	0	0	N.mm/mm

⁽¹⁾ Força na direção x , ⁽²⁾ Força na direção y , ⁽³⁾ Força distorciva, ⁽⁴⁾ Momento em relação ao eixo x , ⁽⁵⁾ Momento em relação ao eixo y , ⁽⁶⁾ Momento distorcivo.

Fonte: produção do próprio autor.

Investigando o comportamento da estrutura otimizada sob novos carregamentos por meio da análise TCL, nas mesmas seções críticas do laminado inicial, obteve-se os fatores e margens de segurança dispostos nas Tabelas 4.22, 4.23 e 4.24. Nota-se que em todos os pontos e análises com a estrutura otimizada, as lâminas do meio do laminado apresentaram valores dos fatores e margens de segurança iguais a Inf . Isto pode ser explicado devido ao fato de que na linha neutra não há tensões atuantes o que implica em uma divisão por zero no cálculo do fator de segurança de Tsai-Hill e de Tsai-Wu, resultando em um valor que tende ao infinito (Inf).

Tabela 4.22 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada -125 (*mm*) - Sequência de empilhamento otimizada com 3 lâminas.

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
FS	MS	Situação	FS	MS	Situação
2,3762	1,38	Não falhou a camada 1 (0°)	0,0111	8,50	Não falhou a camada 1 (0°)
Inf	Inf	Não falhou a camada 2 (0°)	0,0000	Inf	Não falhou a camada 2 (0°)
2,3762	1,38	Não falhou a camada 3 (0°)	0,1806	1,35	Não falhou a camada 3 (0°)

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 4.23 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada 0,74 (*mm*) - Sequência de empilhamento otimizada com 3 lâminas,

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
FS	MS	Situação	FS	MS	Situação
13,5863	12,59	Não falhou a camada 1 (0°)	0,0059	12,02	Não falhou a camada 1 (0°)
Inf	Inf	Não falhou a camada 2 (0°)	0,0000	Inf	Não falhou a camada 2 (0°)
13,5863	12,59	Não falhou a camada 3 (0°)	0,0017	23,41	Não falhou a camada 3 (0°)

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 4.24 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do compartimento de mapas e manuais de CPRFB considerando as superfícies médias e esforços da coordenada 125 (*mm*) - Sequência de empilhamento otimizada com 3 lâminas.

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
FS	MS	Situação	FS	MS	Situação
20,6883	19,69	Não falhou a camada 1 (0°)	0,0023	19,69	Não falhou a camada 1 (0°)
Inf	Inf	Não falhou a camada 2 (0°)	0,0000	Inf	Não falhou a camada 2 (0°)
20,6883	19,69	Não falhou a camada 3 (0°)	0,0023	19,69	Não falhou a camada 3 (0°)

Fonte: produção do próprio autor.

Visto que as margens de segurança dos critérios de Tsai-Hill e Tsai-Wu da estrutura com três lâminas apresentaram valores satisfatórios, o procedimento de reduzir o número de lâminas para duas foi realizado, no entanto, ocorreu a falha na primeira lâmina. Sendo assim, o número de lâminas considerado ideal para a estrutura encontrada, sob os carregamentos adotados, foram três, com sequência de empilhamento igual a $[0/0/0]$. Conforme demonstrado na Tabela 4.25, a retirada de uma lâmina implicou em uma redução de massa da ordem de 25% em relação à estrutura fabricado de CPRFB com quatro lâminas ($[0/90/90/0]$). Além disso, nota-se que a fabricação do compartimento de manual e mapas de CPRFB apresenta uma redução de massa em relação à mesma estrutura fabricada CPRFV da ordem de 33%. Conforme exposto e verificado, a estrutura abordada neste estudo de caso, fabricado de CPRFB, atenderia aos requisitos da FAR 25 e apresentaria menor massa, sendo um potencial candidato a substituir os compartimentos de manual e mapas fabricados de material convencional como é o caso do CPRFV. No entanto, no que diz respeito as propriedades térmicas, ainda deve-se realizar um estudo mais profundo na flamabilidade da mesma, conforme requisitos da FAR 25. O aditivo que poderia ser aplicado é a Alumina Tri-hidratada (ATH), o qual foi utilizado por (VERA, 2012).

Tabela 4.25 – Massa das estruturas de CPRFB e CPRFV.

Quantidade de camadas	CPRFB ⁽¹⁾		CPRFV ^(*) ⁽²⁾		Unidade
	4 camadas	3 camadas	4 camadas	3 camadas	
Densidade do Compósito		1064,4		1590	kg/m^3
Volume da Estrutura	350900	263175	350900	263175	mm^3
Massa da Estrutura	373,49	280,12	557,93	418,44	g

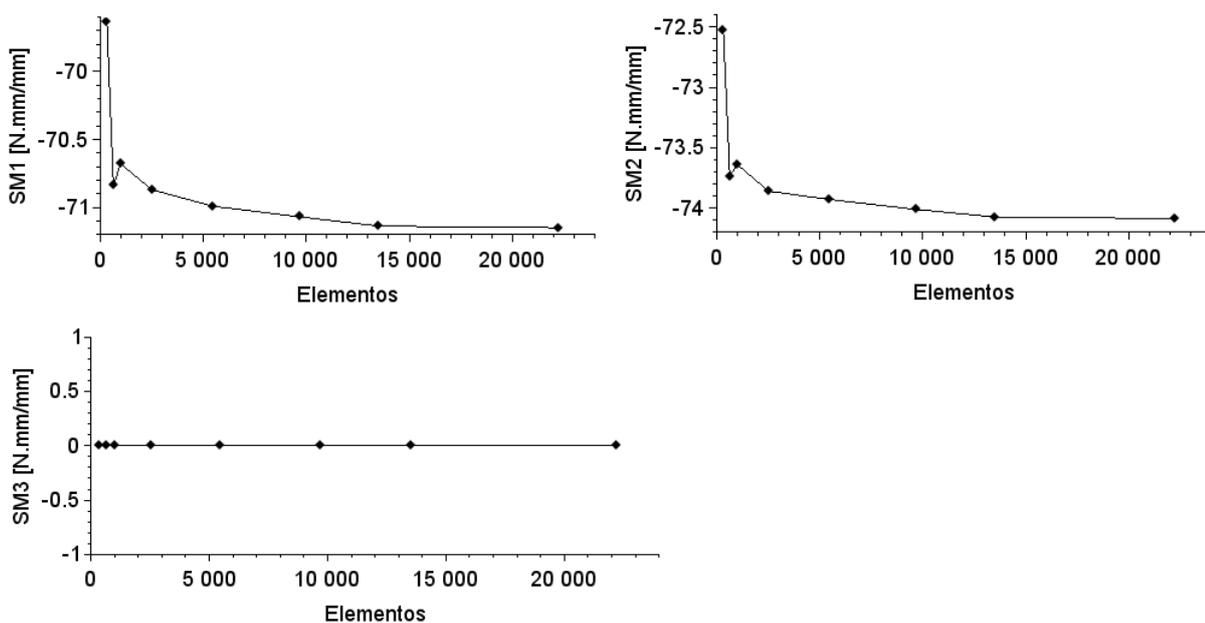
⁽¹⁾ Compósito de Resina Epóxi com Fibra de Bambu, ⁽²⁾ Compósito de Resina Fenólica com Fibra de Vidro, ^(*) Valores baseados no estudo de Vera (2012).

Fonte: produção do próprio autor.

4.4.1.2 Estudo de Caso II: Aplicação em uma Estrutura Automotiva

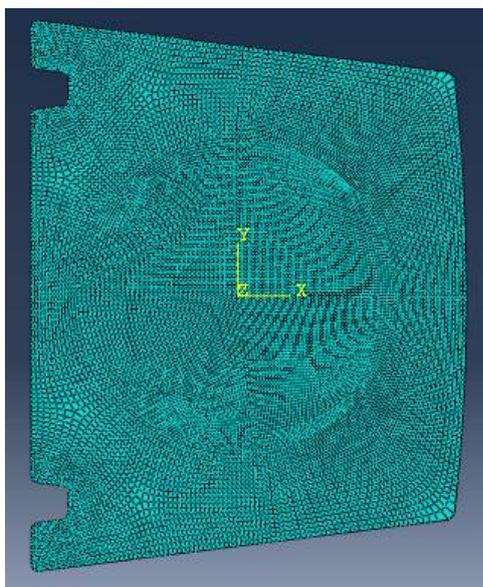
A análise de refino de malha do modelo computacional elaborado no *software* Abaqus 6.12, foi realizada avaliando os momentos resultantes, visto que as forças resultantes apresentaram valores iguais a zero. Conforme demonstrado na Figura 4.28, os momentos resultantes não apresentaram consideráveis diferenças a partir de 10000 elementos. Desta forma, em toda análise deste estudo de caso foi utilizado 13529 elementos, conforme pode ser visto na Figura 4.29.

Figura 4.28 – Análise de convergência do capô do *buggy* de CPRFB.



Fonte: produção do próprio autor.

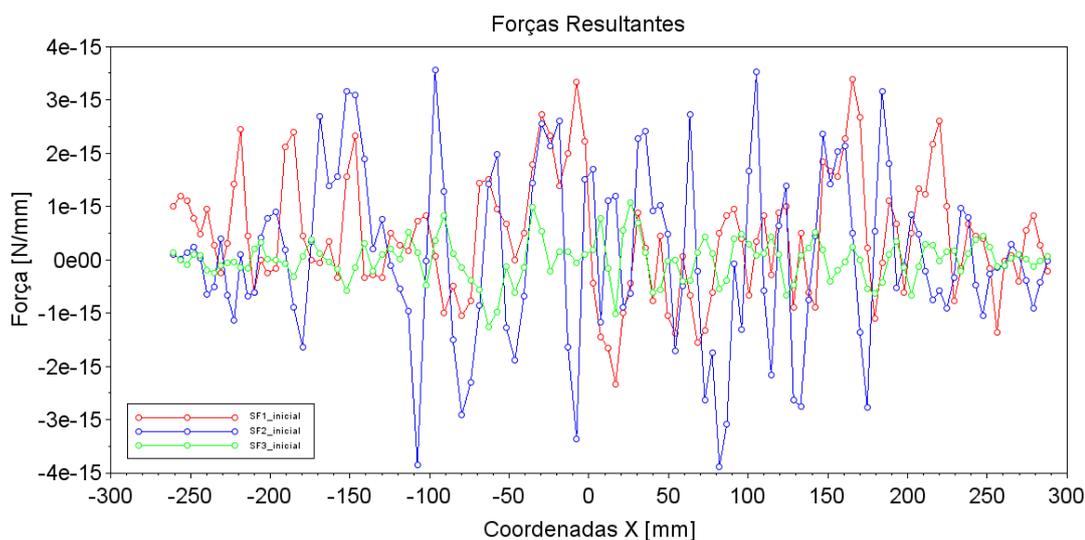
Figura 4.29 – Malha refinada do capô do *buggy* de CPRFB.



Fonte: produção do próprio autor.

Da mesma maneira que no compartimento de manual e mapas de CPRFB, com empilhamento inicial e simétrico, o capô do *buggy* sob empilhamento inicial e simétrico, apresentou as forças resultantes nulas. Tais forças resultantes foram extraídas via MEF ao longo da coordenada X da estrutura, conforme Figura 4.30.

Figura 4.30 – Extração das forças resultantes da seção crítica do capô do *buggy* com 12 lâminas.

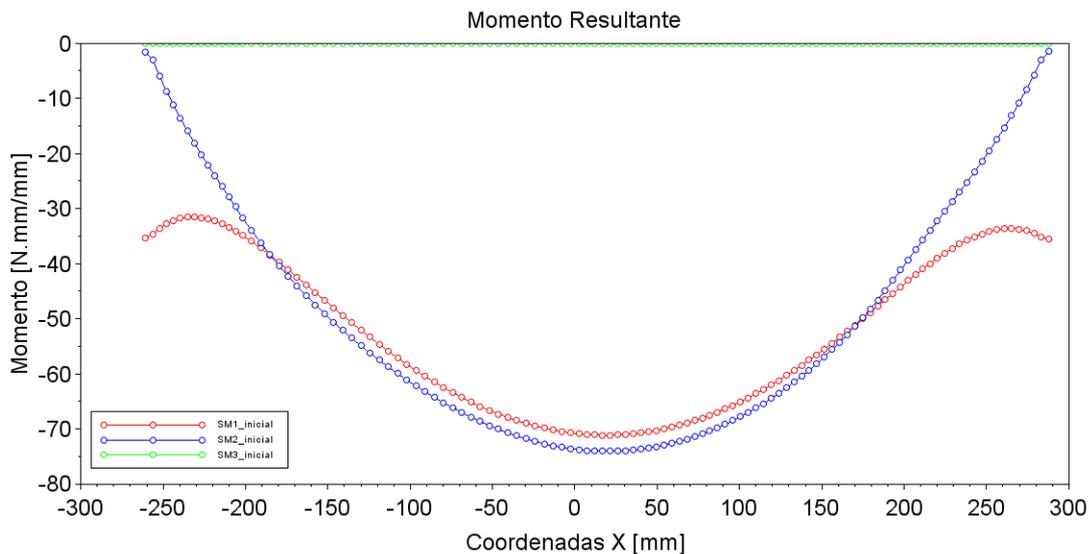


Fonte: produção do próprio autor.

Já os momentos resultantes extraídas estão representados na Figura 4.31. Conforme pode ser visto, a região que apresenta maior esforço de momento encontra-se na coordenada 0. Portanto, esta foi a seção crítica selecionada para análise da

TCL. Os valores das forças e momentos resultantes estão representados na Tabela 4.26.

Figura 4.31 – Extração dos momentos resultantes da seção crítica do capô do *buggy* com 12 lâminas.



Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 4.26 – Esforços da seção crítica extraído via MEF do capô do *buggy* fabricado de CPRFB com 12 lâminas.

Esforços	Valor	Unidade
SF1 ⁽¹⁾	0	N/mm
SF2 ⁽²⁾	0	N/mm
SF3 ⁽³⁾	0	N/mm
SM1 ⁽⁴⁾	-70,811	N.mm/mm
SM2 ⁽⁵⁾	-73,702	N.mm/mm
SM3 ⁽⁶⁾	0	N.mm/mm

⁽¹⁾ Força na direção x , ⁽²⁾ Força na direção y , ⁽³⁾ Força distorciva, ⁽⁴⁾ Momento em relação ao eixo x , ⁽⁵⁾ Momento em relação ao eixo y , ⁽⁶⁾ Momento distorcivo.

Fonte: produção do próprio autor.

Ao aplicar os carregamentos críticos encontrados, sequência de empilhamento e propriedades mecânicas (apresentadas na seção 3.5 do capítulo 3) na análise da TCL, obteve-se os fatores e margens de segurança pelos critérios de Tsa-Wu e Tsai-Hill que estão apresentados na Tabela 4.27. Nota-se que as margens de segurança das lâminas 1, 2, 11 e 12 apresentaram valores negativos, indicando que a estrutura apresentou falha. Desta forma, recorreu-se ao método de otimização para determinar

as melhores sequência de empilhamento sob os carregamentos críticos. A sequência de empilhamento obtida foi [77, 25/17, 17/-22, 89/-27, 49/ - 33, 35/-39, 99/40, 02/33, 37/27, 51/22, 90/-17, 15/-78, 75]. Considerando que a solução encontrada pelo método de otimização é contínua, utilizou-se a metodologia mencionada na seção 3.5 do capítulo 3, a qual busca arredondar as orientações para cima e para baixo, os quais serão chamados de sequência de empilhamento máximo e mínimo, respectivamente. Sendo assim, ambas as soluções foram analisadas via TCL, os quais também apresentaram falha, nas mesmas camadas do empilhamento inicial, conforme representado nas Tabelas 4.28 e 4.29.

Tabela 4.27 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do capô do *buggy* de CPRFB considerando as superfícies médias - Sequência de empilhamento inicial.

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
FS	MS	Situação	FS	MS	Situação
0,6790	-0,32	Falhou a camada 1 - (0°)	2,3909	-0,35	Falhou a camada 1 - (0°)
0,9207	-0,08	Falhou a camada 2 - (90°)	1,3199	-0,13	Falhou a camada 2 - (90°)
1,0878	0,09	Não falhou a camada 3 - (45°)	0,9252	0,04	Não falhou a camada 3 - (45°)
1,5809	0,58	Não falhou a camada 4 - (-45°)	0,4401	0,51	Não falhou a camada 4 - (-45°)
2,4896	1,49	Não falhou a camada 5 - (0°)	0,1778	1,37	Não falhou a camada 5 - (0°)
8,2861	7,29	Não falhou a camada 6 - (90°)	0,0163	6,83	Não falhou a camada 6 - (90°)
8,2861	7,29	Não falhou a camada 7 - (90°)	0,0021	20,83	Não falhou a camada 7 - (90°)
2,4896	1,49	Não falhou a camada 8 - (0°)	0,0167	6,75	Não falhou a camada 8 - (0°)
1,5809	0,58	Não falhou a camada 9 - (-45°)	0,0572	3,18	Não falhou a camada 9 - (-45°)
1,0878	0,09	Não falhou a camada - 10 (45°)	0,1077	2,05	Não falhou a camada 10 - (45°)
0,9207	-0,08	Falhou a camada 11 - (90°)	0,1700	1,43	Não falhou a camada 11 - (90°)
0,6790	-0,32	Falhou a camada 12 - (0°)	0,2240	1,11	Não falhou a camada 12 -(0°)

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 4.28 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do capô do *buggy* de CPRFB considerando as superfícies médias - Sequência de empilhamento com 12 lâminas - Mínimo.

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
FS	MS	Situação	FS	MS	Situação
0,7413	-0,26	Falhou a camada 1 - (77 °)	2,0346	-0,30	Falhou a camada 1 - (77 °)
0,8722	-0,13	Falhou a camada 2 - (17 °)	1,4582	-0,17	Falhou a camada 2 - (17 °)
1,1071	0,11	Não falhou a camada 3 - (-22 °)	0,9051	0,05	Não falhou a camada 3 - (-22 °)
1,5425	0,54	Não falhou a camada 4 - (-27 °)	0,4659	0,47	Não falhou a camada 4 - (-27 °)
2,5354	1,54	Não falhou a camada 5 - (-33 °)	0,1720	1,41	Não falhou a camada 5 - (-33 °)
7,0178	6,02	Não falhou a camada 6 - (-39 °)	0,0221	5,73	Não falhou a camada 6 - (-39 °)
7,0096	6,01	Não falhou a camada 7 - (40 °)	0,0017	23,23	Não falhou a camada 7 - (40 °)
2,5316	1,53	Não falhou a camada 8 - (33 °)	0,0160	6,90	Não falhou a camada 8 - (33 °)
1,5403	0,54	Não falhou a camada 9 - (27 °)	0,0451	3,71	Não falhou a camada 9 - (27 °)
1,1058	0,11	Não falhou a camada 10 - (22 °)	0,0889	2,35	Não falhou a camada 10 - (22 °)
0,8739	-0,13	Falhou a camada 11 - (-17 °)	0,1558	1,53	Não falhou a camada 11 - (-17 °)
0,7418	-0,26	Falhou a camada 12 - (-78 °)	0,2342	1,07	Não falhou a camada 12 - (-78 °)

Fonte: produção do próprio autor.

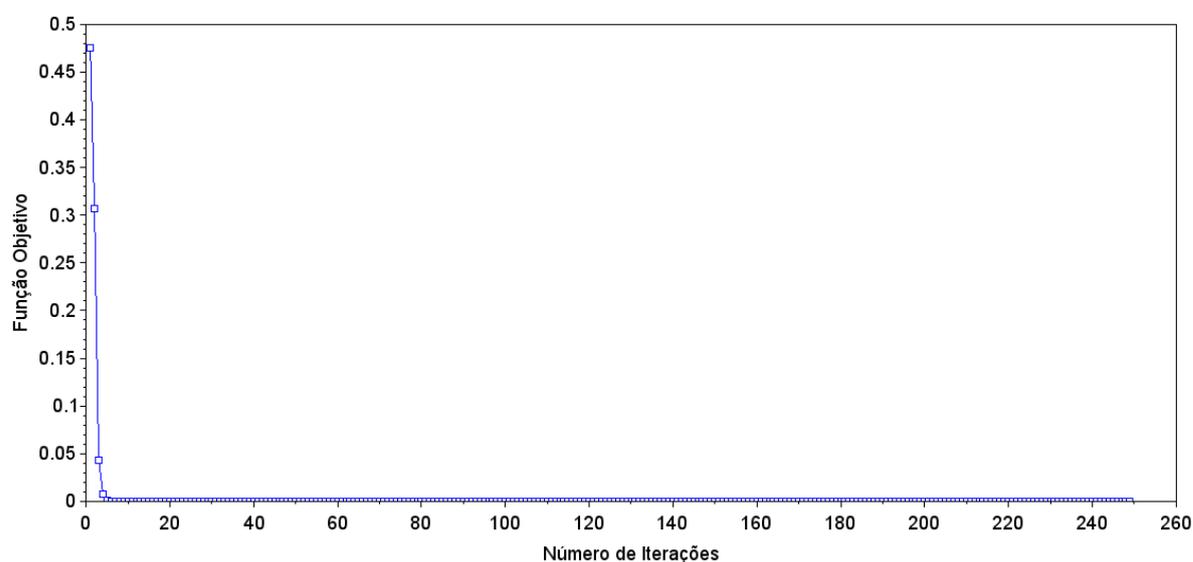
Tabela 4.29 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do capô do *buggy* de CPRFB considerando as superfícies médias - Sequência de empilhamento com 12 lâminas - Máximo.

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
FS	MS	Situação	FS	MS	Situação
0,7386	-0,26	Falhou a camada 1 - (78°)	2,0484	-0,30	Falhou a camada 1 - (78°)
0,8773	-0,12	Falhou a camada 2 - (18°)	1,4429	-0,17	Falhou a camada 2 - (18°)
1,1088	0,11	Não falhou a camada 3 - (-23°)	0,9027	0,05	Não falhou a camada 3 - (-23°)
1,5418	0,54	Não falhou a camada 4 - (-28°)	0,4663	0,46	Não falhou a camada 4 - (-28°)
2,5246	1,52	Não falhou a camada 5 - (-34°)	0,1734	1,40	Não falhou a camada 5 - (-34°)
6,8860	5,89	Não falhou a camada 6 - (-40°)	0,0228	5,62	Não falhou a camada 6 - (-40°)
6,8959	5,90	Não falhou a camada 7 - (41°)	0,0017	23,16	Não falhou a camada 7 - (41°)
2,5245	1,52	Não falhou a camada 8 - (37°)	0,0160	6,92	Não falhou a camada 8 - (37°)
1,5416	0,54	Não falhou a camada 9 - (28°)	0,0452	3,71	Não falhou a camada 9 - (28°)
1,1086	0,11	Não falhou a camada 10 - (23°)	0,0891	2,35	Não falhou a camada 10 - (23°)
0,8805	-0,12	Falhou a camada 11 - (-18°)	0,1563	1,53	Não falhou a camada 11 - (-18°)
0,7382	-0,26	Falhou a camada 12 - (-79°)	0,2333	1,07	Não falhou a camada 12 - (-79°)

Fonte: produção do próprio autor.

Com a necessidade de aumentar as margens de segurança e obter uma estrutura que satisfaça os critérios de falha, buscou-se acrescentar lâminas para aumentar a resistência do laminado, principalmente à flexão. Desta forma, utilizou-se o método de otimização para determinar a melhor sequência de empilhamento sob os carregamentos críticos. Os testes realizados com 13, 14 e 15 lâminas, não obtiveram resultados promissores. Na análise com 16 lâminas, a sequência de empilhamento encontrada foi [2, 1/90/1, 6/66, 39/-80, 26/-84, 11/0/54, 19/15, 22/12, 81/14, 99/34, 22/25, 69/87, 47/88, 39/-33, 42]. A convergência da função objetivo está representada na Figura 4.32, a qual indica que a melhor solução foi encontrada em poucas iterações, diferentemente do caso do compartimento de manual e mapas que convergiu em uma iteração. Considerando as sequências de empilhamento máximo e mínimo, na análise da TCL, obteve-se as margens e fatores de segurança, dispostas nas Tabelas 4.30 e 4.31. Os resultados obtidos demonstram que ambas as sequências de empilhamento atendem os requisitos do critério de falha, uma vez que as margens de segurança obtidas foram positivas. Sendo assim, para confirmar se o projeto é viável, realizou-se uma nova análise via TCL com os novos carregamentos da estrutura otimizada.

Figura 4.32 – Função objetivo do método de otimização baseado em derivadas - Capô do *buggy* 16 lâminas



Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 4.30 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do capô do *buggy* de CPRFB considerando as superfícies médias - Sequência de empilhamento com 16 lâminas - Mínimo.

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
FS	MS	Situação	FS	MS	Situação
1,2567	0,26	Não falhou a camada 1 - (2°)	0,7052	0,19	Não falhou a camada 1 - (2°)
1,4619	0,46	Não falhou a camada 2 - (90°)	0,5218	0,38	Não falhou a camada 2 - (90°)
1,7140	0,71	Não falhou a camada 3 - (1°)	0,3791	0,62	Não falhou a camada 3 - (1°)
2,1083	1,11	Não falhou a camada 4 - (66°)	0,2508	1,00	Não falhou a camada 4 - (66°)
2,7134	1,71	Não falhou a camada 5 - (-80°)	0,1514	1,57	Não falhou a camada 5 - (-80°)
3,7982	2,80	Não falhou a camada 6 - (-84°)	0,0773	2,60	Não falhou a camada 6 - (-84°)
6,2966	5,30	Não falhou a camada 7 - (0°)	0,0281	4,97	Não falhou a camada 7 - (0°)
18,9837	17,98	Não falhou a camada 8 - (54°)	0,0031	16,98	Não falhou a camada 8 - (54°)
18,6892	17,69	Não falhou a camada 9 - (15°)	0,0003	54,19	Não falhou a camada 9 - (15°)
6,2638	5,26	Não falhou a camada 10 - (12°)	0,0030	17,37	Não falhou a camada 10 - (12°)
3,7629	2,76	Não falhou a camada 11 - (14°)	0,0082	10,01	Não falhou a camada 11 - (14°)
2,6952	1,70	Não falhou a camada 12 - (34°)	0,0162	6,85	Não falhou a camada 12 - (34°)
2,0941	1,09	Não falhou a camada 13 - (25°)	0,0268	5,11	Não falhou a camada 13 (25°)
1,7290	0,73	Não falhou a camada 14 - (87°)	0,0404	3,98	Não falhou a camada 14 (87°)
1,4629	0,46	Não falhou a camada 15 - (88°)	0,0564	3,21	Não falhou a camada 15 (88°)
1,2596	0,26	Não falhou a camada 16 - (-33°)	0,07462	2,66	Não falhou a camada 16 (-33°)

Fonte: produção do próprio autor.

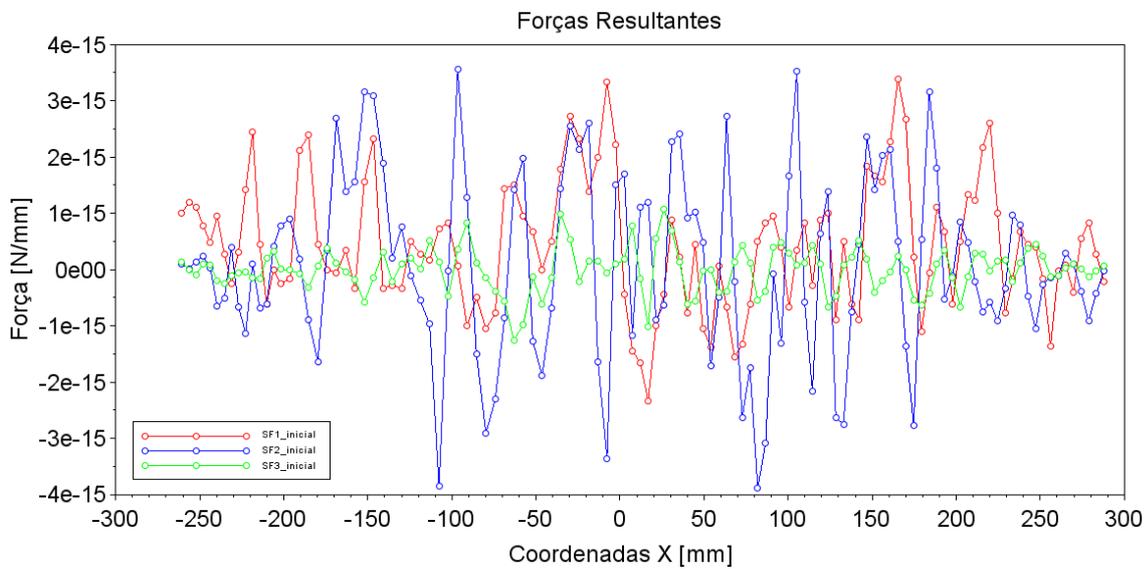
Tabela 4.31 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do capô do *buggy* de CPRFB considerando as superfícies médias - Sequência de empilhamento com 16 lâminas - Máximo.

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
FS	MS	Situação	FS	MS	Situação
1,2583	0,26	Não falhou a camada 1 - (3°)	0,7035	0,19	Não falhou a camada 1 - (3°)
1,4578	0,46	Não falhou a camada 2 - (90°)	0,5245	0,38	Não falhou a camada 2 - (90°)
1,7155	0,72	Não falhou a camada 3 - (2°)	0,3785	0,63	Não falhou a camada 3 - (2°)
2,0990	1,10	Não falhou a camada 4 - (67°)	0,2529	0,99	Não falhou a camada 4 - (67°)
2,7101	1,71	Não falhou a camada 5 - (-81°)	0,1518	1,57	Não falhou a camada 5 - (-81°)
3,7925	2,79	Não falhou a camada 6 - (-85°)	0,0775	2,59	Não falhou a camada 6 - (-85°)
6,2710	5,27	Não falhou a camada 7 - (1°)	0,0283	4,94	Não falhou a camada 7 - (1°)
18,4270	17,43	Não falhou a camada 8 - (55°)	0,0033	16,49	Não falhou a camada 8 - (55°)
19,2717	18,27	Não falhou a camada 9 - (16°)	0,0003	53,31	Não falhou a camada 9 - (16°)
6,3371	5,34	Não falhou a camada 10 - (13°)	0,0030	17,29	Não falhou a camada 10 - (13°)
3,7936	2,79	Não falhou a camada 11 - (15°)	0,0083	9,98	Não falhou a camada 11 - (15°)
2,7105	1,71	Não falhou a camada 12 - (35°)	0,0163	6,84	Não falhou a camada 12 - (35°)
2,1052	1,11	Não falhou a camada 13 - (26°)	0,0269	5,10	Não falhou a camada 13 - (26°)
1,7235	0,72	Não falhou a camada 14 - (88°)	0,0402	3,99	Não falhou a camada 14 - (88°)
1,4583	0,46	Não falhou a camada 15 - (89°)	0,0561	3,22	Não falhou a camada 15 - (89°)
1,2609	0,26	Não falhou a camada 16 - (-34°)	0,0745	2,66	Não falhou a camada 16 - (-34°)

Fonte: produção do próprio autor.

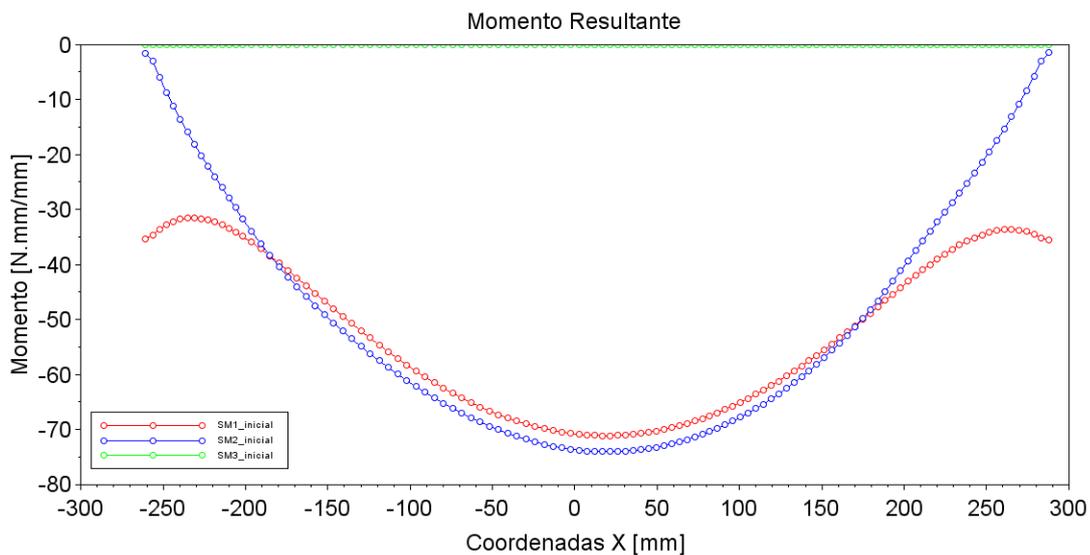
Conforme representados nas Figuras 4.33 e 4.34 as forças e momentos resultantes foram extraídas via MEF. Nota-se que as forças resultantes não apresentaram valores nulos devido à sequência de empilhamento não simétrica, que implica no acoplamento das forças normais e momentos atuantes. No entanto, a força resultante oriunda a partir dos momentos atuantes apresentam valores baixos. Já os momentos resultantes apresentaram comportamento similar ao da estrutura inicial.

Figura 4.33 – Extração das forças resultantes da seção crítica do capô do *buggy* com 16 lâminas.



Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4.34 – Extração dos momentos resultantes da seção crítica do capô do *buggy* com 16 lâminas.



Fonte: produção do próprio autor.

Considerando a mesma seção crítica selecionada da abordagem inicial, 0 *mm*, foram extraídas os novos esforços da seção crítica da estrutura, conforme Tabela 4.32.

Tabela 4.32 – Novos esforços da seção crítica extraído via MEF do capô do *buggy* fabricado de CPRFB com 16 lâminas.

Esforços	Valor	Unidade
SF1 ⁽¹⁾	-0,005	N/mm
SF2 ⁽²⁾	-0,146	N/mm
SF3 ⁽³⁾	-0,146	N/mm
SM1 ⁽⁴⁾	-71,344	N.mm/mm
SM2 ⁽⁵⁾	-76,707	N.mm/mm
SM3 ⁽⁶⁾	0	N.mm/mm

⁽¹⁾ Força na direção *x*, ⁽²⁾ Força na direção *y*, ⁽³⁾ Força distorciva, ⁽⁴⁾ Momento em relação ao eixo *x*, ⁽⁵⁾ Momento em relação ao eixo *y*, ⁽⁶⁾ Momento distorcivo.

Fonte: produção do próprio autor.

Ao analisar os empilhamentos máximos e mínimos sob novos carregamentos, obteve-se os fatores e margem de segurança, os quais apresentaram valores satisfatórios, como pode ser visto nas Tabelas 4.33 e 4.31. Como as margens de segurança das lâminas 1, 2, 15 e 16 apresentaram valores inferiores a 1, avaliou-se a possibilidade de aumentar as margens de segurança destas camadas das extremidades para maior ou igual a 1, com a finalidade de assegurar a integridade da estrutura. Tal aumento da margem de segurança foi adotada porque, diferentemente da estrutura aeronáutica, não foi utilizada nenhum fator de segurança normatizado.

Tabela 4.33 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do capô do *buggy* de CPRFB considerando as superfícies médias e novos esforços - Sequência de empilhamento com 16 lâminas - Mínimo.

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
FS	MS	Situação	FS	MS	Situação
1,2183	0,22	Não falhou a camada 1 - (2°)	0,7493	0,16	Não falhou a camada 1 - (2°)
1,4433	0,44	Não falhou a camada 2 - (90°)	0,5360	0,37	Não falhou a camada 2 - (90°)
1,6627	0,66	Não falhou a camada 3 - (1°)	0,4023	0,58	Não falhou a camada 3 - (1°)
2,0766	1,08	Não falhou a camada 4 - (66°)	0,2586	0,97	Não falhou a camada 4 - (66°)
2,6823	1,68	Não falhou a camada 5 - (-80°)	0,1551	1,54	Não falhou a camada 5 - (-80°)
3,7625	2,76	Não falhou a camada 6 - (-84°)	0,0789	2,56	Não falhou a camada 6 - (-84°)
6,1482	5,15	Não falhou a camada 7 - (0°)	0,0294	4,83	Não falhou a camada 7 - (0°)
19,1550	18,16	Não falhou a camada 8 - (54°)	0,0030	17,14	Não falhou a camada 8 - (54°)
17,6223	16,62	Não falhou a camada 9 - (15°)	0,0004	51,57	Não falhou a camada 9 - (15°)
6,0106	5,01	Não falhou a camada 10 - (12°)	0,0031	16,84	Não falhou a camada 10 - (12°)
3,6245	2,62	Não falhou a camada 11 - (14°)	0,0087	9,73	Não falhou a camada 11 - (14°)
2,6098	1,61	Não falhou a camada 12 - (34°)	0,0172	6,62	Não falhou a camada 12 - (34°)
2,0255	1,03	Não falhou a camada 13 - (25°)	0,0282	4,95	Não falhou a camada 13 - (25°)
1,6983	0,70	Não falhou a camada 14 - (87°)	0,0431	3,82	Não falhou a camada 14 - (87°)
1,4377	0,44	Não falhou a camada 15 - (88°)	0,0601	3,08	Não falhou a camada 15 - (88°)
1,2221	0,22	Não falhou a camada 16 - (-33°)	0,0789	2,56	Não falhou a camada 16 - (-33°)

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 4.34 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do capô do *buggy* de CPRFB considerando as superfícies médias e novos esforços - Sequência de empilhamento com 16 lâminas - Máximo.

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
FS	MS	Situação	FS	MS	Situação
1,2201	0,22	Não falhou a camada 1 - (3°)	0,7473	0,16	Não falhou a camada 1 - (3°)
1,4394	0,44	Não falhou a camada 2 - (90°)	0,5387	0,36	Não falhou a camada 2 - (90°)
1,6644	0,66	Não falhou a camada 3 - (2°)	0,4016	0,58	Não falhou a camada 3 - (2°)
2,0681	1,07	Não falhou a camada 4 - (67°)	0,2606	0,96	Não falhou a camada 4 - (67°)
2,6799	1,68	Não falhou a camada 5 - (-81°)	0,1554	1,54	Não falhou a camada 5 - (-81°)
3,7579	2,76	Não falhou a camada 6 - (-85°)	0,0791	2,56	Não falhou a camada 6 - (-85°)
6,1236	5,12	Não falhou a camada 7 - (1°)	0,0297	4,81	Não falhou a camada 7 - (1°)
18,5577	17,56	Não falhou a camada 8 - (55°)	0,0032	16,63	Não falhou a camada 8 - (55°)
18,1572	17,16	Não falhou a camada 9 - (16°)	0,0004	50,72	Não falhou a camada 9 - (16°)
6,0812	5,08	Não falhou a camada 10 - (13°)	0,0032	16,75	Não falhou a camada 10 - (13°)
3,6547	2,65	Não falhou a camada 11 - (15°)	0,0087	9,70	Não falhou a camada 11 - (15°)
2,6263	1,63	Não falhou a camada 12 - (35°)	0,0172	6,62	Não falhou a camada 12 - (35°)
2,0371	1,04	Não falhou a camada 13 - (26°)	0,0283	4,95	Não falhou a camada 13 - (26°)
1,6934	0,69	Não falhou a camada 14 - (88°)	0,0428	3,83	Não falhou a camada 14 - (88°)
1,4334	0,43	Não falhou a camada 15 - (89°)	0,0598	3,09	Não falhou a camada 15 - (89°)
1,2244	0,22	Não falhou a camada 16 - (-34°)	0,0785	2,57	Não falhou a camada 16 - (-34°)

Fonte: produção do próprio autor.

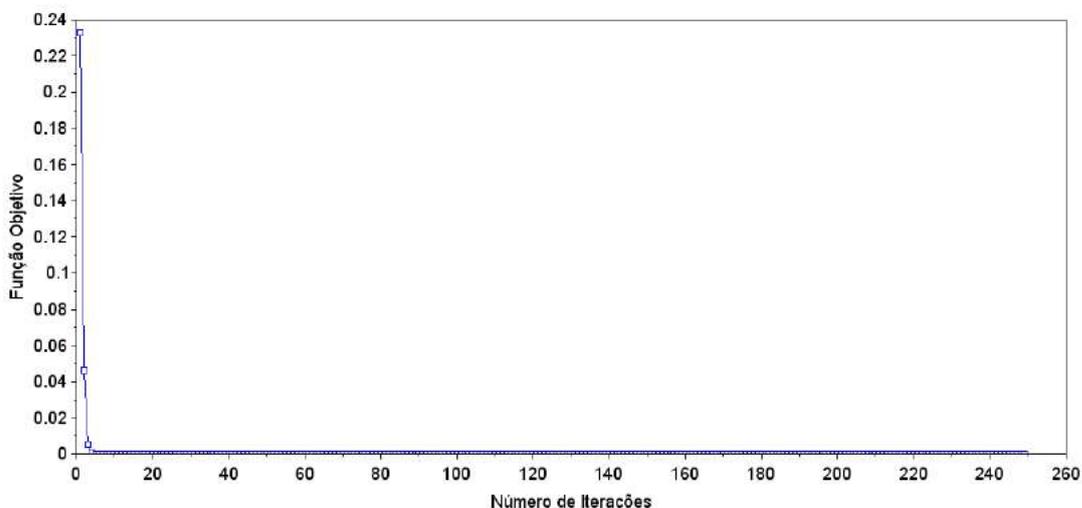
Tabela 4.35 – Novos esforços da seção crítica extraído via MEF do capô do *buggy* fabricado de CPRFB com 21 lâminas.

Esforços	Valor	Unidade
SF1 ⁽¹⁾	0,1	N/mm
SF2 ⁽²⁾	0,077	N/mm
SF3 ⁽³⁾	0,001	N/mm
SM1 ⁽⁴⁾	-66,019	N.mm/mm
SM2 ⁽⁵⁾	-84,473	N.mm/mm
SM3 ⁽⁶⁾	0	N.mm/mm

⁽¹⁾ Força na direção x , ⁽²⁾ Força na direção y , ⁽³⁾ Força distorciva, ⁽⁴⁾ Momento em relação ao eixo x , ⁽⁵⁾ Momento em relação ao eixo y , ⁽⁶⁾ Momento distorcivo.
Fonte: produção do próprio autor.

Ao realizar diversos testes utilizando o mesmo procedimento descrito anteriormente (no procedimento de otimização da estrutura com 16 lâminas), a sequência de empilhamento encontrada (a qual o gráfico da função objetivo apresentou convergência em poucas iterações, conforme Figura 4.35), que obteve margens de segurança igual ou maior que 1 nas lâminas das extremidades, considerando os novos esforços críticos (Tabela 4.35), foi igual a [-50/4/84/80/10/84/57/28/3/13/62/86/29/71/84/0/-79/74/0/-86/0], conforme pode ser visto na Tabela 4.36. Neste caso, baseado na análise anterior, foram apresentados apenas os valores das margens e fatores de segurança da estrutura com sequência de empilhamento mínimo por não apresentarem consideráveis diferenças com os valores sob sequência de empilhamento máximo.

Figura 4.35 – Função objetivo do método de otimização baseado em derivadas - Capô do *buggy* 21 lâminas



Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 4.36 – Critério de falha de Tsai-Wu e Tsai-Hill do capô do *buggy* de CPRFB considerando as superfícies médias e novos esforços - Sequência de empilhamento com 21 lâminas - Mínimo.

Tsai-Wu			Tsai-Hill		
Fator de Segurança	MS	Situação	Fator de Segurança	MS	Situação
2,0312	1,03	Não falhou a camada 1 - (-50°)	0,2652	0,94	Não falhou a camada 1 - (-50°)
2,1481	1,15	Não falhou a camada 2 - (4°)	0,2389	1,05	Não falhou a camada 2 - (4°)
2,7161	1,72	Não falhou a camada 3 - (84°)	0,1519	1,57	Não falhou a camada 3 - (84°)
3,0898	2,09	Não falhou a camada 4 - (80°)	0,1172	1,92	Não falhou a camada 4 - (80°)
3,2237	2,22	Não falhou a camada 5 - (10°)	0,1060	2,07	Não falhou a camada 5 - (10°)
4,3371	3,34	Não falhou a camada 6 - (84°)	0,0596	3,10	Não falhou a camada 6 - (84°)
5,1414	4,14	Não falhou a camada 7 - (57°)	0,0416	3,91	Não falhou a camada 7 - (57°)
6,5029	5,50	Não falhou a camada 8 - (28°)	0,0259	5,21	Não falhou a camada 8 - (28°)
9,6250	8,62	Não falhou a camada 9 - (3°)	0,0119	8,16	Não falhou a camada 9 - (3°)
19,1635	18,16	Não falhou a camada 10 - (13°)	0,0030	17,25	Não falhou a camada 10 - (13°)
678,9181	677,92	Não falhou a camada 11 - (62°)	0,0000	685,39	Não falhou a camada 11 - (62°)
22,3963	21,40	Não falhou a camada 12 - (86°)	0,0003	56,83	Não falhou a camada 12 - (86°)
9,8845	8,88	Não falhou a camada 13 - (29°)	0,0013	26,78	Não falhou a camada 13 - (29°)
7,1981	6,20	Não falhou a camada 14 - (71°)	0,0029	17,60	Não falhou a camada 14 - (71°)
5,4867	4,49	Não falhou a camada 15 - (84°)	0,0049	13,30	Não falhou a camada 15 - (84°)
3,8782	2,88	Não falhou a camada 16 - (0°)	0,0065	11,37	Não falhou a camada 16 - (0°)
3,6211	2,62	Não falhou a camada 17 - (-79°)	0,0113	8,41	Não falhou a camada 17 - (-79°)
3,0861	2,09	Não falhou a camada 18 - (74°)	0,0156	7,01	Não falhou a camada 18 - (74°)
2,4220	1,42	Não falhou a camada 19 - (0°)	0,0168	6,72	Não falhou a camada 19 - (0°)
2,4302	1,43	Não falhou a camada 20 - (-86°)	0,0248	5,35	Não falhou a camada 20 - (-86°)
1,9371	0,94	Não falhou a camada 21 - (0°)	0,0263	5,17	Não falhou a camada 21 - (0°)

Fonte: produção do próprio autor.

Com os resultados obtidos, pode-se fazer algumas comparações com o estudo de Furtado (2009), o qual realizou análises do capô fabricado com compósito reforçado com fibra de juta (tecido bidirecional) e compósito reforçado com fibra de vidro (tecido bidirecional). Conforme dados apresentados na Tabela 4.37, com o aumento de número de lâminas, além de aumentar a margem de segurança do projeto, o deslocamento máximo na direção z (valores obtidos por meio do Abaqus conforme Figura 4.36) obtido pelo capô de CPRFB com 21 lâminas reduziu ($23,45 \text{ mm}$) sendo comparável com os valores obtidos pelo capô de CPRFJ ($26,04 \text{ mm}$) e CPRFV ($24,82 \text{ mm}$). Vale ressaltar que o capô de CPRFB assumiu que cada camada apresenta $0,33 \text{ mm}$, valor o qual corresponde ao diâmetro de uma fibra de bambu (a partir deste valor calculou-se as espessuras dos capôs de CPRFB com 12, 16 e 21 camadas). Os valores da massa total da estrutura também foram comparáveis, apesar do capô de CPRFB ter quase o dobro de lâminas, o que correspondeu a uma aumento de espessura (número de camadas \times espessura) de aproximadamente 42% em relação aos de CPRFJ e CPRFV. No entanto, o uso de CPRFB para fabricar o capô de *buggy* apresenta grande potencial e viabilidade, visto que quando comparado com a estrutura reforçada com fibras de vidro, ao longo do ciclo de vida da estrutura o CPRFB estabelece uma maior qualidade do ecossistema e de saúde humana, pois as fibras são biodegradáveis e não causam irritação aos operadores que atuam na fabricação dos componentes reforçados com fibra de vidro (FURTADO, 2009). Além disso, possibilitam uma redução de custo no processo de fabricação, visto que a matéria prima é abundante na natureza e requer 17% da energia utilizada para fabricar fibras de vidro (PANDEY *et al.*, 2010). Em relação à estrutura reforçada com fibra de juta o capô reforçado com fibra de bambu pode apresentar vantagens como investimentos de baixo custo durante o processo de produção, visto que é de cultivo perene, não requer fertilizantes e irrigações constantes (FAZITA *et al.*, 2016). Sendo assim, além da juta e fibra de vidro, o CPRFB é um material em potencial alternativo para fabricar o capô de *buggy*. Vale a pena ressaltar que o uso da resina epóxi, mesmo não sendo biodegradável é um bom candidato para estas aplicações pois são facilmente encontrado, são hidrofóbico e apresentam boa transferência do carregamento sobre as fibras de bambu (OSORIO *et al.*, 2018).

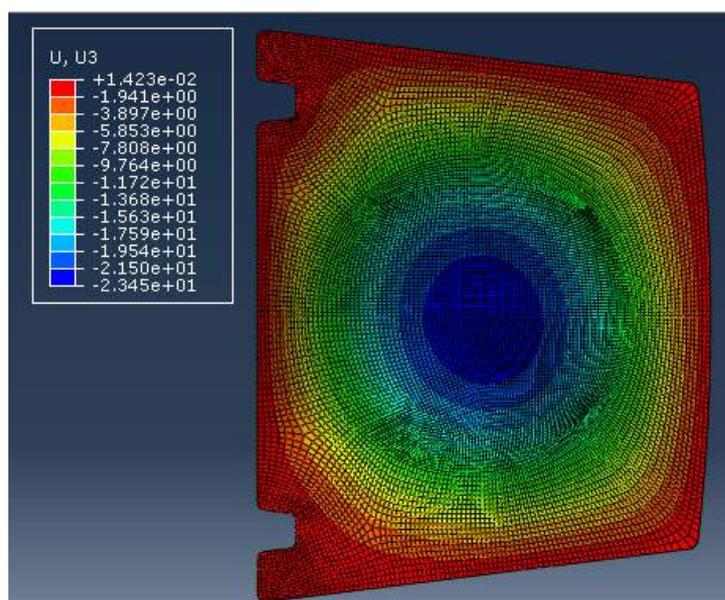
Tabela 4.37 – Comparação dos resultados obtidos com os da literatura.

Material do Capô	Número de lâminas	Espessura (mm)	Deslocamento Máximo (mm)	Massa (kg)	Referência
CPRFB	12	3,96	85,34	1,43	Presente estudo
CPRFB	16	5,28	45,12	1,9	Presente estudo
CPRFB	21	6,93	23,45	2,5	Presente estudo
CPRFJ ⁽¹⁾	12	4	26,04	2,09	Furtado (2009)
CPRFV ⁽²⁾	12	4	24,82	2,39	Furtado (2009)

⁽¹⁾ Compósito Polimérico Reforçado com Fibra de Juta, ⁽²⁾ Compósito Polimérico Reforçado com Fibra de Vidro.

Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4.36 – Deslocamento máximo do capô do *buggy* de CPRFB com 21 lâminas extraído via MEF.



Fonte: produção do próprio autor.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

O principal objetivo deste trabalho consistiu em realizar uma análise de compósitos reforçados com fibras longas de bambu (CPRFB) de forma experimental e computacional, visando a substituição de estruturas reforçadas com fibras sintéticas pelo material proposto. Desta forma, as principais considerações deste trabalho são:

- O estudo da microestrutura da fibra de bambu permitiu uma compreensão sobre o método de extração das fibras e comportamento térmico, físico e mecânico das mesmas. As fibras de bambu analisadas neste trabalho foram extraídas por um método pouco usual chamado *veneer rotary peeling*, as quais não foram submetidas à tratamento de superfície, com a finalidade de não gerar resíduos químicos. Desta maneira, com o objetivo de verificar as potencialidades da fibra de bambu, *Guadua angustifolia* extraída por este método, foram realizados os ensaios de tração, termogravimetria e picnometria de gás. O fato das fibras não passarem por tratamento de superfície, resultou na maior presença do tecido parenquimatoso sobre a superfície das fibras que acabou aglutinando-as, implicando na variação do diâmetro das fibras. Desta forma, selecionar as fibras durante o processo de extração é uma etapa fundamental. A partir do ensaio estático realizado na máquina universal de testes, foram obtidas a resistência à tração, módulo de elasticidade longitudinal e deformação das fibras de bambu. Conforme esperado e exposto na literatura, as propriedades mecânicas das fibras de bambu extraídas pelo método *veneer rotary peeling* não apresentaram consideráveis variações de acordo com a região em que foi extraída do colmo, e foram comparáveis com os valores que literatura reporta. Por meio da análise de termogravimetria foi possível avaliar a estabilidade térmica da fibra de bambu. A degradação da fibra inicia-se aproximadamente em 160 °C, a qual está associada a degradação da hemicelulose. O maior percentual de degradação ocorre

a 343 °C, que está associada a degradação da celulose. Já a degradação da lignina ocorre de 343 até 900 °C. Os intervalos de temperatura de degradação são comparáveis com os valores da literatura, reportado por Zhang, Wang e Keer (2015). Com estes valores, pode-se realizar o método da calcinação, método utilizado para determinar as frações volumétricas de cada fase do compósito. Por fim, o último ensaio de picnometria de gás, determinou a densidade da fibra de bambu extraída pelo *veneer rotary peeling*. O valor encontrado foi $0,864 \frac{g}{cm^3}$. A partir deste valor, juntamente com o valor da densidade da resina epóxi, pode-se determinar o valor teórico da densidade do CPRFB ($1064,4 \frac{kg}{m^3}$).

- Para obter as placas de compósito, adotou-se como método de manufatura do CPRFB uma adaptação do método de moldagem por transferência de resina assistida à vácuo. Como a fibra vegetal permite maior escoamento quando a bomba à vácuo é ligada, um molde metálico com cavidade foi fabricado. Sobre esta cavidade foi inserida uma tampa metálica com o objetivo de compactar o laminado por meio da diferença de pressão gerada entre a atmosfera e a bolsa de vácuo. Determinar a quantidade ideal de resina epóxi e a espessura do laminado foi um desafio, pois o procedimento de fabricação de compósito reforçados com fibra de bambu era algo inédito para o laboratório de materiais compósitos. Por estas razões obteve-se placas com diferentes espessuras e, conseqüentemente, corpos de prova com espessuras diferentes. Vale ressaltar que com o objetivo de verificar comportamento mecânico de compósitos reforçados com as fibras do topo, meio e base do colmo, sob seqüência de empilhamento $[0^\circ]_3$, $[90^\circ]_3$ e $[\pm 45^\circ]_{1S}$. Os corpos de prova foram fabricados conforme as normas ASTM D3039 e D3518. Ao submeter os corpos de prova no ensaio de tração, obteve-se as curvas de tensão vs. deformação, onde a partir delas pode-se calcular os módulos, deformações e resistências máximas, dos CPRFB. Os valores encontrados foram: módulo de elasticidade longitudinal, E_1 , 8,98 GPa, módulo de elasticidade transversal, E_2 , 2,74 GPa, módulo de cisalhamento no plano 12, G_{12} , 4 GPa, coeficiente de Poisson, ν_{12} , 0,309, resistência à tração longitudinal, X_t , 83,45 MPa, resistência à tração transversal, Y_t , 9,77 GPa e resistência ao cisalhamento, S_{12} , 13,66 MPa. As propriedades elásticas encontradas foram comparáveis aos valores reportados por Roslan *et al.* (2018). Já os valores de resistências máximas foram inferiores quando comparados aos valores da literatura. Este fato está associado a presença de vazios que implicou na fratura precoce do CPRFB.
- A partir do ensaio de microscopia eletrônica de varredura realizada por emissão de campo, foi possível avaliar a superfície de fratura dos CPRFB orientados a $[0^\circ]_3$, $[90^\circ]_3$ e $[\pm 45^\circ]_{1S}$. Os compósitos apresentaram grandes regiões de vazios,

principalmente nos $[0^\circ]_3$ e $[\pm 45^\circ]_{1S}$. Desta maneira, torna-se necessário uma avaliação de quais parâmetros podem ser ajustados no processo de fabricação para reduzir o percentual de vazios e obter uma espessura definida.

- Na análise de termogravimetria do CPRF, as curvas de degradação da fibra de bambu e do epóxi ficaram sobrepostas (aproximadamente no intervalo de temperatura de 350 a 390 °C), não sendo possível a determinação de fração volumétrica de cada fase do compósito pelo método da calcinação. Sendo assim, as frações volumétricas foram estimadas via estereomicroscópio, onde foi considerando apenas uma amostra. A partir do *software* do sistema do estereomicroscópio determinou-se que o CPRFB é composto por 30% de fibra e 70% de epóxi. Com os valores das frações volumétricas, foi possível calcular as propriedades mecânicas analiticamente, pelos modelos micromecânicos Halphin-Tsai e Regra das Misturas e método das resistências máximas.
- Dentre as contribuições do estudo computacional, destaca-se os estudos de casos de duas estruturas, sendo uma do setor aeronáutico e outra do setor automobilístico. É importante ressaltar que devido a escassez dos valores referentes a fibra (módulo de elasticidade transversal, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson) e até mesmo de compósitos reforçados com fibras de bambu (resistência máxima à compressão transversal e longitudinal), foi necessário estimar algumas propriedades mecânicas de forma analítica. Estes valores estimados, foram configurados na análise pelo MEF. No primeiro estudo de caso, a estrutura selecionada para realizar a análise via TCL foi o compartimento de manual e mapas de CPRFB com 4 lâminas e sequência de empilhamento $[0/90/90/0]$. Considerando um cenário de pouso forçado, adotou-se as desacelerações máximas e fatores de segurança conforme requisitos da *Federal Aviation Regulation (FAR)*. Ao extrair os carregamentos críticos via MEF, estes foram aplicados na análise da TCL, onde a estrutura apresentou margens de segurança satisfatória e relativamente alta. Sendo assim, ao retirar uma lâmina, foi utilizado o método de otimização que determina a melhor sequência de empilhamento para o respectivo carregamento atuante. A sequência de empilhamento otimizada foi de $[0/0/0]$, a qual satisfaz os critérios de falha. Desta forma, o processo de otimização proposto encontrou uma solução viável que permitiu a redução de uma camada da estrutura inicial. Sendo assim, o compartimento de manual e mapas fabricado de CPRFB atenderia aos requisitos da FAR e seria um potencial candidato a substituir o material convencional utilizado que é o compósito polimérico reforçado com fibra de vidro (CPRFV). No segundo estudo de caso, o capô de *buggy* foi selecionado como uma possível estrutura para ser fabricada de CPRFB sob sequência de empilhamento $[0/90/45/-45/0/90]$. Sendo assim, ao extrair os carregamen-

tos via MEF verificou-se o comportamento mecânico do laminado por meio da análise da TCL. Neste caso, as margens de segurança apresentaram valores negativos, indicando a falha da estrutura. Desta forma, buscou-se determinar a quantidade ideal de lâminas, bem como a sequência de empilhamento. Ao utilizar a metodologia de otimização, o laminado obtido que satisfaz os critérios de falha foi [-50/4/84/80/10/84/57/28/3/13/62/86/29/71/84/0/-79/74/0/-86/0]. Comparando com outros estudos, mesmo aumentando 9 lâminas, o capô de *buggy* de CPRFB apresentou massa total e deslocamento máximo compatível com os valores da literatura. Embora o capô de CPRFB apresenta uma massa 16% maior que o capô de CPRFJ, alguns fatores fazem do bambu uma matéria prima mais atrativa devido as vantagens em relação ao cultivo da juta, como abundância na natureza, pode ser cultivado em solos acidentados, não requer alto investimento com fertilizantes e não necessita ser replantado. Sendo assim, o CPRFB apresenta potencial de substituir o CPRFV e até mesmo compósito polimérico reforçado com fibra de juta (CPRFJ).

Considerando o exposto, a aplicação de compósitos reforçados com fibras longas bambu apresenta uma boa perspectiva em segmentos aeronáuticos e automobilístico. É importante ressaltar que o uso deste material além de reduzir custos de produção, obter estruturas leves e obter as demais vantagens já citas ao longo deste trabalho, pode gerar impactos sócio-econômicos, possibilitando uma nova fonte de renda aos produtores rurais, bem como gerar empregos.

5.2 Trabalhos Futuros

Para potencializar e aprimorar os resultados do presente trabalho, sugere-se:

- Aprimorar o método de extração de fibras *veneer rotary peeling* com a finalidade de obter fibras sem danos e com baixo percentual de tecido parenquimatoso;
- Realizar alguns ajustes no processo de manufatura das placas, com o objetivo de obter maior controle em relação à espessura do compósito. Além disso, aumentar o percentual de fibras;
- Verificar a influência do tratamento de superfície das fibras de bambu, como alcalinização, nas propriedades mecânicas;
- Realizar ensaio de flamabilidade, visando verificar a influência do mesmo nas propriedades mecânicas. Vale ressaltar que o tratamento de inflamabilidade é um requisito obrigatório conforme a *FAA (Federal Aviation Administration)*,

- Automatizar o processo de otimização para variáveis discretas bem como propor o uso de métodos de otimização heurísticos, visando a redução de mínimos locais, permitindo a obtenção de melhores soluções.

Referências Bibliográficas

AMADA, S. *et al.* Fiber texture and mechanical graded structure of bamboo. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 28, n. 1-2, p. 13–20, 1997.

ANDERSON, T. L. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. [S.l.]: CRC press, 2017.

ARAUJO, J.; WALDMAN, W.; PAOLI, M. D. Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect. *Polymer degradation and stability*, Elsevier, v. 93, n. 10, p. 1770–1775, 2008.

ARORA, J. S. *Introduction to optimum design*. [S.l.]: Elsevier, 2004.

ASTM. D3039 standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. *ASTM Internacional*, West Conshohocken, PA, 1971.

ASTM. D3379 standard test method for tensile strength and young's modulus for high modulus single-filament materials. *ASTM Internacional*, West Conshohocken, PA, 1975.

ASTM. D3518 standard test method for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by tensile test of a $\pm 45^\circ$ laminate. *ASTM Internacional*, West Conshohocken, PA, 1976.

AZWA, Z. *et al.* A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials & Design*, Elsevier, v. 47, p. 424–442, 2013.

AZZINI, A.; BERALDO, A. Métodos práticos para utilização do bambu. *Campinas: UNICAMP*, 2001.

BANIK, N.; DEY, V.; SASTRY, G. An overview of lignin & hemicellulose effect upon biodegradable bamboo fiber composites due to moisture. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, v. 4, n. 2, p. 3222–3232, 2017.

BARRACUDA COMPOSITES. 2020. Comunicação privada, envio do datasheet do sistema de resina AR 260 e AH 260.

BISANDA, E.; ANSELL, M. P. Properties of sisal-cnsl composites. *Journal of Materials Science*, Springer, v. 27, n. 6, p. 1690–1700, 1992.

BISWAS, S. *et al.* Physical and mechanical properties of jute, bamboo and coir natural fiber. *Fibers and Polymers*, Springer, v. 14, n. 10, p. 1762–1767, 2013.

BISWAS, S.; SATAPATHY, A. A comparative study on erosion characteristics of red mud filled bamboo–epoxy and glass–epoxy composites. *Materials & Design*, Elsevier, v. 31, n. 4, p. 1752–1767, 2010.

BLEDZKI, A.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in polymer science*, Elsevier, v. 24, n. 2, p. 221–274, 1999.

CALLISTER, W. *Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.

CAMPBELL, F. C. *Manufacturing technology for aerospace structural materials*. [S.l.]: Elsevier, 2011.

CHANDRAMOHAN, D.; MARIMUTHU, K. *et al.* A review on natural fibers. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, Academic Research Publishing Agency, Suite 2 Islamabad Pakistan, v. 8, n. 2, p. 194–206, 2011.

CHAWLA, K. K. *Composite materials: science and engineering*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.

CHINA.ORG. *China's bamboo industry booms for greener economy*. 2010. Disponível em: <www.china.org.cn/business/2010-07/18/content_20518853.htm>.

CHOW, T.; HERMANS, J. The elastic constants of fiber reinforced materials. *Journal of Composite materials*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 3, n. 3, p. 382–396, 1969.

COSTA, M. M. *et al.* Influence of physical and chemical treatments on the mechanical properties of bamboo fibers. *Procedia engineering*, Elsevier, v. 200, p. 457–464, 2017.

CRUZ, R. B. D. *Avaliação do comportamento balístico de blindagem multicamadas com compósitos de epóxi reforçados com fibras ou plaquetas de bambu*. 111 p. Tese (Doutorado) — Instituto Militar de Engenharia, 2015.

DEFOIRDT, N. *et al.* Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Elsevier, v. 41, n. 5, p. 588–595, 2010.

ESTRADA, M.; LINERO, D. L.; RAMÍREZ, F. Constitutive relationship of the fiber cluster of bamboo guadua angustifolia, determined by means of a weibull probability function and a model of progressive failure. *Mechanics of Materials*, Elsevier, v. 63, p. 12–20, 2013.

FACCA, A. G.; KORTSCHOT, M. T.; YAN, N. Predicting the elastic modulus of natural fibre reinforced thermoplastics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, v. 37, n. 10, p. 1660–1671, 2006.

FACCA, A. G.; KORTSCHOT, M. T.; YAN, N. Predicting the tensile strength of natural fibre reinforced thermoplastics. *Composites Science and Technology*, Elsevier, v. 67, n. 11-12, p. 2454–2466, 2007.

FAJARDO, P. *et al.* Caraterísticas do Bambu Guadua angustifolia , como uma espécie a serviço do meio ambiente . p. 1–8, 2014.

FAR. *PART 25 - AIRWORTHINESS STANDARDS: TRANSPORT CATEGORY AIRPLANES*. 2020. Disponível em: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=93b769dec9614869c1922c4610d8be17&mc=true&node=pt14.1.25&rtn=div5\#se14.1.25_1303>.

FAZITA, M. N. *et al.* Green composites made of bamboo fabric and poly (lactic) acid for packaging applications—a review. *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 6, p. 435, 2016.

FUENTES, C. *et al.* Wetting behaviour and surface properties of technical bamboo fibres. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Elsevier, v. 380, n. 1-3, p. 89–99, 2011.

FURTADO, S. Cálculo estrutural numérico e experimental da carenagem de um veículo. *Lisboa: Engenharia Mecânica, Universidade Técnica de Lisboa*, 2009.

GIBSON, R. F. *Principles of composite material mechanics*. [S.l.]: CRC press, 2016.

GINER, E.; FRANCO, V.; VERCHER, A. Estimation of the reinforcement factor ξ for calculating e_2 with the halpin–tsai equations using the finite element method. In: *ECCM16-16th European Conference on Composite Materials*. [S.l.: s.n.], 2014.

GREENHALGH, E. *Failure analysis and fractography of polymer composites*. [S.l.]: Elsevier, 2009.

GUIMARÃES Jr., M.; NOVACK, K. M.; BOTARO, V. R. Caracterização anatômica da fibra de bambu (*bambusa vulgaris*) visando sua utilização em compósitos poliméricos. 2010.

GUPTA, A. Synthesis, chemical resistance, and water absorption of bamboo fiber reinforced epoxy composites. *Polymer Composites*, v. 37, n. 1, p. 141–145, 2016.

GUPTA, S. K. *A study on mechanical behavior of bamboo fiber based polymer composites*. Tese (Doutorado), 2014.

HAFTKA, R. T.; GÜRDAL, Z. *Elements of structural optimization*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. v. 11.

HAHN, H. T.; TSAI, S. W. *Introduction to composite materials*. [S.l.]: CRC Press, 1980.

HARGITAI, H.; RÁCZ, I.; ANANDJIWALA, R. D. Development of hemp fiber reinforced polypropylene composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 21, n. 2, p. 165–174, 2008.

HEBEL, D. E. *et al.* Process-controlled optimization of the tensile strength of bamboo fiber composites for structural applications. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 67, p. 125–131, 2014.

HILL, R. Theory of mechanical properties of fibre-strengthened materials: I. elastic behaviour. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Elsevier, v. 12, n. 4, p. 199–212, 1964.

HOLBERY, J.; HOUSTON, D. Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications. *Jom*, Springer, v. 58, n. 11, p. 80–86, 2006.

JACQUET, E.; TRIVAUDEY, F.; VARCHON, D. Calculation of the transverse modulus of a unidirectional composite material and of the modulus of an aggregate. application of the rule of mixtures. *Composites science and technology*, Elsevier, v. 60, n. 3, p. 345–350, 2000.

JAIN, S.; KUMAR, R.; JINDAL, U. Mechanical behaviour of bamboo and bamboo composite. *Journal of Materials Science*, Springer, v. 27, n. 17, p. 4598–4604, 1992.

JONES, R. M. *Mechanics of composite materials*. [S.l.]: CRC press, 1999.

JOSHI, S. V. *et al.* Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, Elsevier, v. 35, n. 3, p. 371–376, 2004.

KAW, A. K. *Mechanics of composite materials*. [S.l.]: CRC press, 2005.

KHALIL, H. A. *et al.* Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review. *Materials & Design*, Elsevier, v. 42, p. 353–368, 2012.

KHAN, Z.; YOUSIF, B.; ISLAM, M. Fracture behaviour of bamboo fiber reinforced epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 116, p. 186–199, 2017.

KORONIS, G.; SILVA, A. *Green Composites for Automotive Applications*. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2018.

KU, H. *et al.* A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 42, n. 4, p. 856–873, 2011.

LIESE, W.; KÖHL, M. *Bamboo: the plant and its uses*. [S.l.]: Springer, 2015.

LIESE, W.; WEINER, G. Ageing of bamboo culms. a review. *Wood Science and Technology*, Springer, v. 30, n. 2, p. 77–89, 1996.

LUNA, P.; LIZARAZO-MARRIAGA, J.; MARIÑO, A. Guadua angustifolia bamboo fibers as reinforcement of polymeric matrices: An exploratory study. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 116, p. 93–97, 2016.

MADSEN, B.; LILHOLT, H. Physical and mechanical properties of unidirectional plant fibre composites—an evaluation of the influence of porosity. *Composites Science and Technology*, Elsevier, v. 63, n. 9, p. 1265–1272, 2003.

MALKAPURAM, R.; KUMAR, V.; NEGI, Y. S. Recent development in natural fiber reinforced polypropylene composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 28, n. 10, p. 1169–1189, 2009.

MALLICK, P. K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. [S.l.]: CRC press, 2007.

MALLICK, P. K. *Processing of polymer matrix composites*. [S.l.]: CRC press, 2018.

MARINUCCI, G. *Materiais compósitos poliméricos: Fundamentos e tecnologia*. São Paulo: Artliber Editora, 2011.

MENDONÇA, P. d. T. R. D. *Materiais compostos e estruturas-sanduiche: projeto e análise*. [S.l.]: Manole, 2005.

MOHANTY, S. *et al.* Effect of mapp as a coupling agent on the performance of jute–pp composites. *Journal of reinforced plastics and composites*, SAGE Publications, v. 23, n. 6, p. 625–637, 2004.

MONTOYA, L. E. M.; SERNA, L. R. O.; RÍOS, E. E. T. De los. Estudio de las propiedades mecánicas de haces de fibra de guadua angustifolia. *Ingeniería y desarrollo*, Universidad del Norte, n. 20, p. 125–133, 2006.

MUHAMMAD, B. N. R.; AZIZ, R. H. Tensile and flexural properties of bamboo (*gigantochloa apus*) fiber/epoxy green composites. In: TRANS TECH PUBL. *Applied Mechanics and Materials*. [S.l.], 2015. v. 758, p. 119–123.

NICOLAIS, L.; MEO, M.; MILELLA, E. *Composite materials: a vision for the future*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011.

OKUBO, K.; FUJII, T. Eco-composites using natural fibres and their mechanical properties. *WIT Transactions on The Built Environment*, WIT Press, v. 59, 2002.

OKUBO, K.; FUJII, T.; YAMAMOTO, Y. Development of bamboo-based polymer composites and their mechanical properties. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, Elsevier, v. 35, n. 3, p. 377–383, 2004.

ORNELLAS, T. S. *et al.* Micropropagação do bambu americano guadua chacoensis (rojas) londoño & pm peterson. 2017.

OSORIO, L. *et al.* In-depth study of the microstructure of bamboo fibres and their relation to the mechanical properties. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 37, n. 17, p. 1099–1113, 2018.

OSORIO, L. *et al.* The relation between bamboo fibre microstructure and mechanical properties. In: *14TH European Conference on Composite Materials. Paper ID*. [S.l.: s.n.], 2010.

OSORIO, L. *et al.* Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of bamboo/epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 30, n. 5, p. 396–408, 2011.

OSSE, V. C.; MEIRELLES, C. R. M. O potencial do bambu na minimização dos problemas climáticos nos espaços urbanos. *Revista LABVERDE*, n. 3, p. 36–53, 2011.

PANDEY, J. K. *et al.* Recent advances in the application of natural fiber based composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, Wiley Online Library, v. 295, n. 11, p. 975–989, 2010.

PARDINI, L. C.; NETO, F. L. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. *Edição. Ed. Edgard Blucher. São Paulo*, 2006.

PEPONI, L. *et al.* Statistical analysis of the mechanical properties of natural fibers and their composite materials. i. natural fibers. *Polymer Composites*, Wiley Online Library, v. 29, n. 3, p. 313–320, 2008.

- PERREMANS, D. *et al.* Effect of discontinuities in bamboo fibre reinforced epoxy composites. *Composites Science and Technology*, Elsevier, v. 155, p. 50–57, 2018.
- PHONG, N. T. *et al.* Study on how to effectively extract bamboo fibers from raw bamboo and wastewater treatment. *Journal of Materials Science Research*, Citeseer, v. 1, n. 1, p. 144, 2012.
- PRABHU, R.; JOEL, C.; BHAT, T. Development and Characterization of Low Cost Bamboo Fibre Reinforced Polymer Composites. *American Journal of Materials Science*, v. 7, n. 5, p. 130–134, 2017.
- QI, J. *et al.* Effects of characteristic inhomogeneity of bamboo culm nodes on mechanical properties of bamboo fiber reinforced composite. *Journal of Forestry Research*, Springer, v. 26, n. 4, p. 1057–1060, 2015.
- RAJAN, K. P. *et al.* Extraction of bamboo microfibrils and development of biocomposites based on polyhydroxybutyrate and bamboo microfibrils. *Journal of composite materials*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 45, n. 12, p. 1325–1329, 2011.
- RAJESH, M.; PITCHAIMANI, J.; RAJINI, N. Free vibration characteristics of banana/sisal natural fibers reinforced hybrid polymer composite beam. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 144, p. 1055–1059, 2016.
- RAMESH, M.; SUDHARSAN, P. Experimental investigation of mechanical and morphological properties of flax-glass fiber reinforced hybrid composite using finite element analysis. *Silicon*, Springer, v. 10, n. 3, p. 747–757, 2018.
- RANA, S.; FANGUEIRO, R. *Fibrous and textile materials for composite applications*. [S.l.]: Springer, 2016.
- RAO, K. M. M.; RAO, K. M. Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo. *Composite structures*, Elsevier, v. 77, n. 3, p. 288–295, 2007.
- RAY, A. K. *et al.* Microstructural characterization of bamboo. *Journal of Materials Science*, Springer, v. 39, n. 3, p. 1055–1060, 2004.
- RAZERA, I. A. T. *Fibras lignocelulósicas como agente de reforço de compósitos de matriz fenólica e lignofenólica*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006.
- REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. *Polímeros*, SciELO Brasil, v. 10, n. 2, p. e4–e10, 2000.
- ROE, P.; ANSELL, M. P. Jute-reinforced polyester composites. *Journal of Materials Science*, Springer, v. 20, n. 11, p. 4015–4020, 1985.
- ROSLAN, S. A. H. *et al.* Tensile behaviour of chemical treatment for bamboo epoxy composites. *Chemical Engineering Transactions*, v. 63, p. 745–750, 2018.
- ROWELL, R. M. *et al.* Utilization of natural fibers in plastic composites: problems and opportunities. *Lignocellulosic-plastics composites*, Citeseer, v. 13, p. 23–51, 1997.
- SAHEB, D. N.; JOG, J. P. Natural fiber polymer composites: a review. *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*, Wiley Online Library, v. 18, n. 4, p. 351–363, 1999.

SÁNCHEZ, M. L.; CAPOTE, G.; CARRILLO, J. Composites reinforced with guadua fibers: Physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 228, p. 116749, 2019.

SANO, O. *et al.* Study on the interfacial shear strength of bamboo fiber reinforced plastics. *WIT Transactions on The Built Environment*, WIT Press, v. 59, 2002.

SATO, E. S. Fabricação e ensaios experimentais de biocompósitos: estudo comparativo visando aplicações em estruturas aeronáuticas. 2018.

SCIENCE, W. of. *Web of Science - Publication Years*. 2019. Disponível em: <<http://apps-webofknowledge.ez74.periodicos.capes.gov.br/RAMore.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=5FyCcTF2zQRsVjIOMyh&qid=1&ra_mode=more&ra_name=PublicationYear&colName=WOS&viewType=raMore>.>

SHAH, A. U. M. *et al.* A review on the tensile properties of bamboo fiber reinforced polymer composites. *BioResources*, v. 11, n. 4, p. 10654–10676, 2016.

SHAO, Z.-P. *et al.* Tensile properties of moso bamboo (*phyllostachys pubescens*) and its components with respect to its fiber-reinforced composite structure. *Wood science and technology*, Springer, v. 44, n. 4, p. 655–666, 2010.

SHARMA, B. *et al.* Engineered bamboo: state of the art. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, Thomas Telford Ltd, v. 168, n. 2, p. 57–67, 2014.

SHARMA, B. *et al.* Engineered bamboo for structural applications. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 81, p. 66–73, 2015.

SHIN, F. *et al.* Analyses of the mechanical properties and microstructure of bamboo-epoxy composites. *Journal of Materials Science*, Springer, v. 24, n. 10, p. 3483–3490, 1989.

SIMULIA. *Abaqus Analysis User's Guide*. 2020. Disponível em: <<http://dsk.ippt.pan.pl/docs/abaqus/v6.13/books/usb/default.htm?startat=pt06ch29s06ael17.html>>.

SRIDHAR, M. *et al.* Evaluation of jute as a reinforcement in composites. NISCAIR-CSIR, India, 1982.

TALREJA, R.; SINGH, C. V. *Damage and failure of composite materials*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2012.

TALREJA, R.; VARNA, J. *Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials*. [S.l.]: Elsevier, 2015.

TITA, V. Projeto e fabricação de estruturas aeronáuticas em material compósito polimérico. *Universidade de São Paulo, São Carlos*, 2006.

TRUJILLO, E. *Polymer composite materials based on bamboo fibres*. 220 p. Tese (Doutorado) — KU Leuven, 2014.

TRUJILLO, E. *et al.* Bamboo fibres for reinforcement in composite materials: Strength weibull analysis. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, v. 61, p. 115–125, 2014.

UGBOLUE, S. Structure/property relationships in textile fibres. *Textile progress*, Taylor & Francis, v. 20, n. 4, p. 1–43, 1990.

VASILIEV, V. V.; MOROZOV, E. V. *Mechanics and analysis of composite materials*. [S.l.]: Elsevier, 2001.

VERA, R. V. *Estruturas aeronáuticas de interior em compósito natural: fabricação, análise estrutural e de inflamabilidade*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012.

VIVERDE, A. A. 2019. Comunicação privada, envio de fotos.

VOYIADJIS, G. Z.; KATTAN, P. I. *Mechanics of composite materials with MATLAB*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2005.

WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites science and technology*, Elsevier, v. 63, n. 9, p. 1259–1264, 2003.

YANG, H. *et al.* Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, Elsevier, v. 86, n. 12-13, p. 1781–1788, 2007.

ZAKIKHANI, P. *et al.* Extraction and preparation of bamboo fibre-reinforced composites. *Materials & Design*, Elsevier, v. 63, p. 820–828, 2014.

ZHANG, K. *et al.* Thermal and mechanical properties of bamboo fiber reinforced epoxy composites. *Polymers*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 6, p. 608, 2018.

ZHANG, X.; WANG, F.; KEER, L. Influence of surface modification on the microstructure and thermo-mechanical properties of bamboo fibers. *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 10, p. 6597–6608, 2015.

Apêndice A

Cálculo Analítico das Propriedades Mecânicas

A.1 Método das Resistência Máximas

Conforme Kaw (2005), há maneiras de se estimar as resistências máximas de um laminado utilizando por meio de algumas relações de parâmetros e medidas. Neste estudo, utilizou-se o método das resistências máximas para estimar as resistências máximas de compressão transversal e de tração longitudinal do CPRFB.

A.1.1 Resistência à Compressão Transversal do CPRFB

Devido a escassez de dados relacionados à resistência à compressão transversal de compósitos reforçados com fibras de bambu (Y_c) e ao fato de não ter realizado ensaio experimental de compressão do CPRFB, foi utilizado o método analítico, conforme descrito por Kaw (2005), para obtê-lo. A resistência à compressão transversal é obtida por

$$(\sigma_2)^C = E_2(\varepsilon_2), \quad (\text{A.1})$$

$$(\varepsilon_2)^C = \left[\frac{d}{s} \frac{E_m}{E_f} + \left(1 - \frac{d}{s}\right) \right] \varepsilon_m, \quad (\text{A.2})$$

onde E_2 é módulo de elasticidade transversal do compósito, ε_2 a deformação da compressão última transversal do compósito, d/s é a razão diâmetro (d) por espaçamento (s) em mm , E_f módulo de elasticidade longitudinal da fibra, E_m módulo de elasticidade longitudinal da matriz e ε_m a deformação da compressão do epóxi.

Tabela A.1 – Propriedades mecânicas e físicas do CPRFB, epóxi e fibra de bambu.

Propriedade	Valor	Unidade
E_2	2,74	<i>GPa</i>
ε_2	0,0141	-
d	0,3	<i>mm</i>
s	0,5	<i>mm</i>
d/s	0,6	-
E_f	18,8	<i>GPa</i>
E_m	3,15	<i>GPa</i>
ε_m	0,0282	<i>GPa</i>

Fonte: produção do próprio autor.

Aplicando os respectivos valores da Tabela A.1 na Equação A.2 e substituindo em A.2, obtêm-se o valor de resistência à compressão transversal igual

$$(\sigma_2)^C = 38,7 \text{ MPa.} \quad (\text{A.3})$$

A.1.2 Resistência à Tração Longitudinal do CPRFB

A resistência à tração longitudinal do CPRFB pode ser estimado considerando as seguintes formulações como a deformação máxima da fibra,

$$(\varepsilon_f) = \frac{(\sigma_f)}{E_f}, \quad (\text{A.4})$$

deformação máxima da matriz,

$$(\varepsilon_m) = \frac{(\sigma_m)}{E_m}, \quad (\text{A.5})$$

e resistência à tração máxima do laminado

$$(\sigma_1^T) = (\sigma_f)V_f + (\varepsilon_m E_m(1 - V)). \quad (\text{A.6})$$

Considerando algumas propriedades dispostas na Tabela A.1 e assumindo σ_f , que é a resistência à tração máxima da fibra obtida experimentalmente igual 547,4 *MPa* e σ_m a resistência máxima do epóxi 73,77 *MPa* obtido pelo fabricante Barracuda Composites (2020). Substituindo os respectivos valores nas Equações A.4, A.5 e A.6, obtêm-se a resistência máxima do laminado igual a

$$(\sigma_1^T) = 164,28 \text{ MPa.} \quad (\text{A.7})$$

A.2 Regra das Misturas

A partir da Teoria da Regra das Misturas, a qual está descrita na seção 2.2.1, do capítulo 2, pode-se estimar as propriedades mecânicas do compósito como densidade, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, módulo de cilhamento, coeficiente de Poisson e resistência à tração máxima. Vale ressaltar que as frações volumétricas consideradas foram $V_f=0,3$ e $V_m = 0,7$.

A.2.1 Densidade do CPRFB

A densidade da fibra de bambu determinada pelo ensaio de picnometria é igual a $\rho_f=864 \text{ kg/m}^3$. Já a densidade do epóxi foi obtida pelo fabricante da empresa Barracuda Composites (2020), a qual apresenta valor de $\rho_m=1150,33$. Calcula-se a densidade do compósito, ρ_c , é estimado por

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m. \quad (\text{A.8})$$

Substituindo os valores, obtêm-se

$$\rho_c = 1064,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad (\text{A.9})$$

A.2.2 Módulo de Elasticidade Longitudinal do CPRFB

O módulo de elasticidade longitudinal da fibra obtido experimentalmente é igual a $E_1^f = 18,8 \text{ GPa}$. Enquanto que o módulo de elasticidade longitudinal do epóxi obtido do fabricante Barracuda Composites (2020), é igual a $E_1^m=3,15 \text{ GPa}$. Desta forma módulo de elasticidade do compósito longitudinal, E_1 , é calculado por

$$E_1 = E_1^f V_f + E_1^m V_m. \quad (\text{A.10})$$

Substituindo os valores, obtêm-se

$$E_1 = 7,84 \text{ GPa}. \quad (\text{A.11})$$

A.2.3 Módulo de Elasticidade Transversal do CPRFB

Devido a escassez de dados relacionados ao módulo de elasticidade transversal da fibra e do epóxi, considerou-se os como materiais isotrópicos. Desta forma assumiu-se o módulo de elasticidade transversal da fibra como $E_2^f = 18,8 \text{ GPa}$ e módulo de elasticidade longitudinal do epóxi como $E_2^m=3,15 \text{ GPa}$. O módulo de elasticidade

dade do compósito transversal, E_2 , foi obtido por

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_2^f} + \frac{V_m}{E_m}. \quad (\text{A.12})$$

Substituindo os valores, encontrou-se

$$E_2 = 4,19 \text{ GPa}. \quad (\text{A.13})$$

A.2.4 Módulo de Cisalhamento do CPRFB

Mantendo a consideração de propriedades isotrópicas, obteve-se o módulo de cisalhamento da fibra por

$$G = \frac{E}{2(1 - \nu)} \quad (\text{A.14})$$

onde ν é coeficiente de Poisson da fibra de bambu. Como este valor não foi encontrado na literatura, utilizou-se o valor de coeficiente de Poisson da fibra de Henequén do estudo de Trujillo (2014), igual a $\nu=0,33$. Substituindo o valor na Equação A.14, obtêm-se

$$G_f = 7,07 \text{ GPa}. \quad (\text{A.15})$$

O valor do módulo de cisalhamento do epóxi (G_m) adotado baseou-se no valor de Kaw (2005), igual a $1,30 \text{ GPa}$. Substituindo os respectivos valores dos módulos de cisalhamento, obtêm-se o módulo de cisalhamento do compósito por

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_{12}^f} + \frac{V_m}{G_m} = 1,73 \text{ GPa}. \quad (\text{A.16})$$

A.2.5 Coeficiente de Poisson do CPRFB

O coeficiente de Poisson do epóxi igual a $\nu_m=0,3$ foi retirado de Kaw (2005). Substituindo este valor de ν_m e o encontrado em A.14, na equação A.17, o coeficiente de Poisson do compósito é igual a

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m = 0,309. \quad (\text{A.17})$$

A.2.6 Resistência à Tração Máxima do CPRFB

Considerando as propriedades dispostas na seção A.1.2, deste Apêndice e as respectivas frações volumétricas, obtêm-se a resistência máxima do laminado por

$$(\sigma_1^T) = \rho_f V_f + \rho_m V_m = 164,28 \text{ MPa}. \quad (\text{A.18})$$

A.3 Halphin-Tsai

Por meio da abordagem de Halphin-Tsai, a qual foi descrita na seção 2.2.2 do capítulo 2, calculou-se os módulos de elasticidade transversal e módulo de cisalhamento.

A.3.1 Módulo de Elasticidade Transversal do CPRFB

Para determinar o módulo de elasticidade transversal do CPRFB utiliza-se as Equações

$$\frac{E_2}{E_m} = \frac{\eta \cdot \xi \cdot V_f + 1}{1 - \eta \cdot V_f}, \quad (\text{A.19})$$

e

$$\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi}, \quad (\text{A.20})$$

onde ξ é um fator de reforço cujo valor depende da geometria da fibra e das condições de carregamento. Adotando ξ a 2 e as demais propriedades já apresentadas, obtêm-se

$$E_2 = 5,32 \text{ GPa}. \quad (\text{A.21})$$

A.3.2 Módulo de Cisalhamento do CPRFB

Para determinar o módulo de cisalhamento utiliza-se as Equações

$$\frac{G_{12}}{G_m} = \frac{\eta \cdot \xi \cdot V_f + 1}{1 - \eta \cdot V_f}, \quad (\text{A.22})$$

e

$$\eta = \frac{\frac{G_f}{G_m} + 1}{\frac{G_f}{G_m} + \xi}, \quad (\text{A.23})$$

onde ξ o fator de reforço que depende da geometria e das condições de carregamento. Adotando ξ igual a 1 e considerando as demais propriedades já mencionadas, obtêm-se

$$G_{12} = 1,98 \text{ GPa}. \quad (\text{A.24})$$

A.4 Módulo de Cisalhamento do CPRFB no Plano 2-3

Conforme descrito por Mallick (2007) pode-se estimar o módulo de cisalhamento no plano 2-3 por meio de algumas relações como

$$\nu_{21} = (E_2/E_1) * \nu_{12} \quad (\text{A.25})$$

$$\nu_{23} = \nu_{12}((1 - \nu_{21})/(1 - \nu_{12})) \quad (\text{A.26})$$

$$G_{23} = \frac{E_2}{(2(1 + \nu_{23}))} \quad (\text{A.27})$$

onde ν_{21} é o coeficiente de Poisson 21 e ν_{23} é o coeficiente de Poisson 23. Ao utilizar as propriedades determinadas experimentalmente como $E_1 = 8,98 \text{ GPa}$, $E_2 = 2,74 \text{ GPa}$ e $\nu_{12} = 0,36$, obteve-se

$$G_{23} = 0,912 \text{ GPa}. \quad (\text{A.28})$$

Apêndice B

Propriedades Físicas e Mecânicas das Fibras de Bambu

B.1 Propriedades Físicas e Mecânicas das Fibras de Bambu

Tabela B.1 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras de bambu - amostras do topo.

	Amostras do topo				
	$m^{(1)}$	$\phi^{(2)}$	$\sigma_T^{(3)}$	$\varepsilon^{(4)}$	$E^{(5)}$
CDP1	0,004	0,182	378,52	2,43	15,58
CDP2	0,005	0,199	492,16	3,48	14,14
CDP3	0,005	0,186	557,20	2,96	18,82
CDP4	0,005	0,167	620,89	2,35	26,42
CDP5	0,011	0,298	834,78	3,35	24,92
CDP6	0,005	0,248	702,62	2,9	24,23
CDP9	0,01	0,256	440,63	3,21	13,73
CDP10	0,004	0,229	556,96	3,22	17,30
Média	0,006	0,221	572,97	2,99	19,39

⁽¹⁾ Massa (g), ⁽²⁾ Diâmetro (mm), ⁽³⁾ Resistência à Tração (MPa), ⁽⁴⁾ Deformação(%), ⁽⁵⁾ Módulo de Elasticidade (MPa), CDP = Corpo de prova.

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela B.2 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras de bambu - amostras do meio.

	Amostras do meio				
	$m^{(1)}$	$\phi^{(2)}$	$\sigma_T^{(3)}$	$\epsilon^{(4)}$	$E^{(5)}$
CDP2	0,016	0,302	387,26	2,22	17,42
CDP3	0,012	0,316	400,12	3,21	12,48
CDP4	0,02	0,377	494,79	3,74	13,23
CDP5	0,016	0,307	818,37	2,84	28,81
CDP6	0,038	0,551	442,42	4,77	9,27
CDP9	0,013	0,285	458,64	1,52	30,22
Média	0,019	0,356	500,27	3,05	18,57

(1) Massa (g), (2) Diâmetro (mm), (3) Resistência à Tração (MPa), (4) Deformação(%), (5) Módulo de Elasticidade (MPa), CDP = Corpo de prova.

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela B.3 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras de bambu - amostras da base.

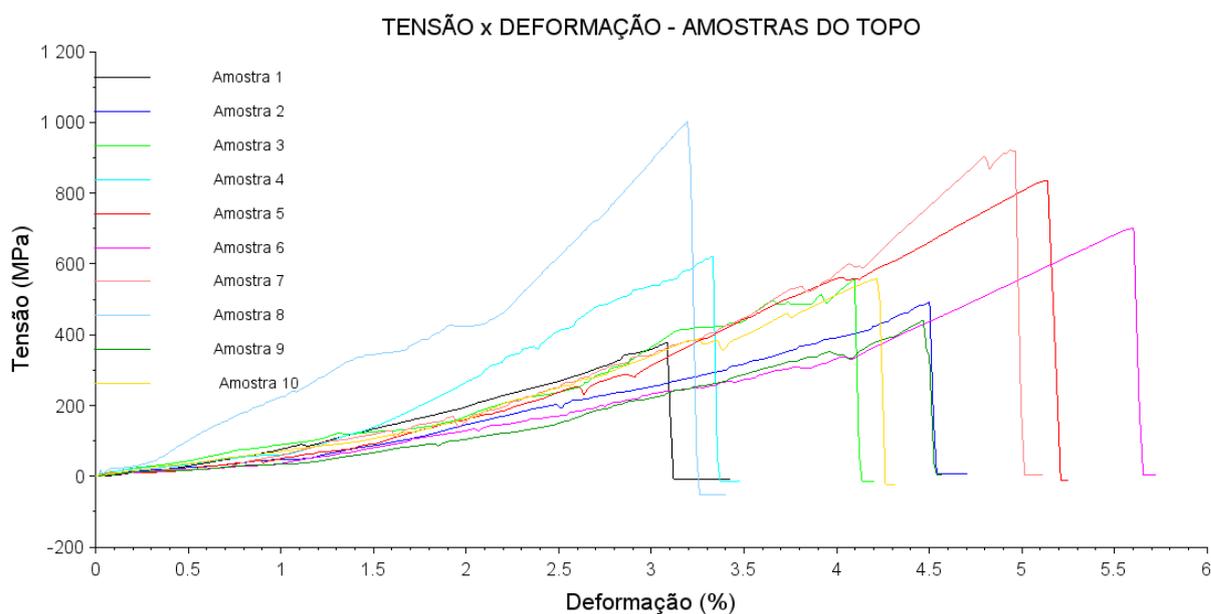
	Amostras da base				
	$m^{(1)}$	$\phi^{(2)}$	$\sigma_T^{(3)}$	$\epsilon^{(4)}$	$E^{(5)}$
CDP1	0,013	0,288	507,80	2,13	23,82
CDP2	0,012	0,227	692,99	2,08	33,25
CDP3	0,012	0,308	349,65	2,22	15,74
CDP4	0,006	0,293	556,20	3,25	17,14
CDP5	0,026	0,396	754,28	4,74	15,91
CDP6	0,015	0,277	412,40	3,17	12,99
CDP8	0,022	0,403	666,12	4,91	13,57
CDP9	0,017	0,365	612,23	3,80	16,12
Média	0,015	0,320	568,96	3,29	18,57

(1) Massa (g), (2) Diâmetro (mm), (3) Resistência à Tração (MPa), (4) Deformação(%), (5) Módulo de Elasticidade (MPa), CDP = Corpo de prova.

Fonte: produção do próprio autor.

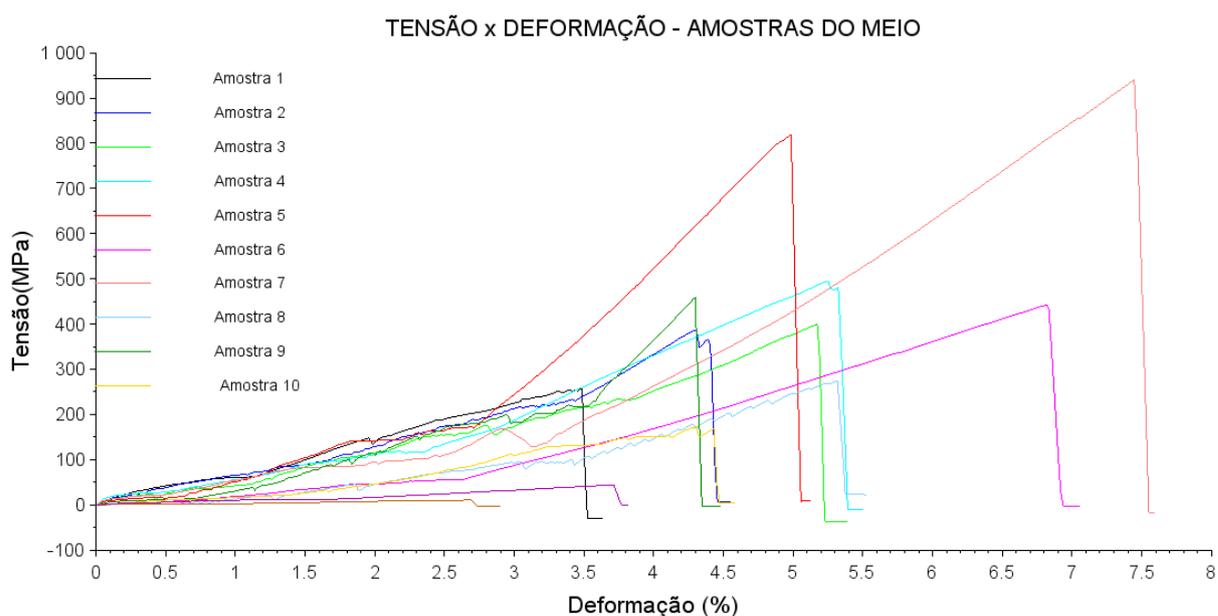
B.2 Gráficos Tensão x Deformação das fibras de bambu

Figura B.1 – Gráfico Tensão vs. Deformação da fibra de bambu extraída do topo do colmo.



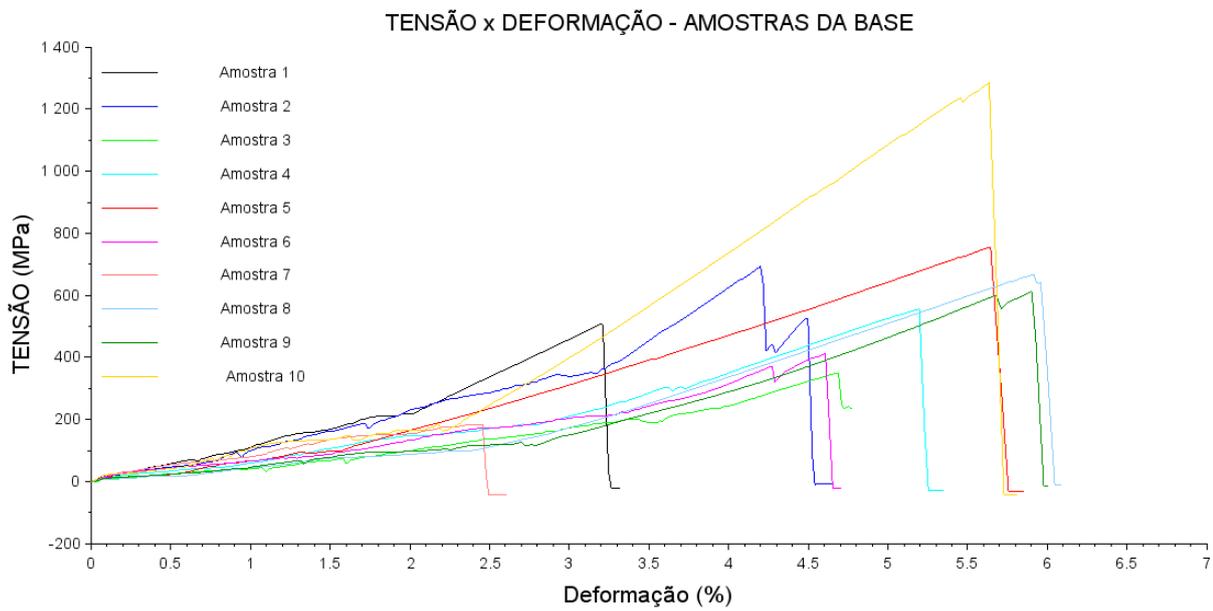
Fonte: produção do próprio autor.

Figura B.2 – Gráfico Tensão vs. Deformação da fibra de bambu extraída do meio do colmo.



Fonte: produção do próprio autor.

Figura B.3 – Gráfico Tensão vs. Deformação da fibra de bambu extraída da base do colmo.



Fonte: produção do próprio autor.

Apêndice C

Cálculo da Quantidade de Resina

Este apêndice C apresenta os cálculos realizados para determinar a quantidade de matriz (resina), a partir da massa conhecida das fibras. Este exemplo, apresenta a predição da quantidade de resina do CPRFB fabricado com fibras do topo.

Tabela C.1 – Propriedades físicas do CPRFB $[0^\circ]_3$ - Fibras do topo.

Descrição	Quantidade	Unidade
Número de camadas (n)	3	-
Área (A)	0,09	m^2
Espessura da camada (e)	0,003	m
Volume do compósito (V)	0,00081	m^3

Com estes parâmetros da Tabela C.1, determina-se o volume do compósito considerando os números de camadas, área da placa e espessura de cada camada

$$V_c = nAe. \quad (C.1)$$

Tabela C.2 – Volume e frações volumétricas de cada fase (fibra e matriz) do CPRFB.

Descrição	Quantidade	Unidade
Fração volumétrica da matriz (V_m)	0.7	%
Volume da matriz (vo_m)	0,000567	m^3
Fração volumétrica da fibra (V_f)	0.3	%
Volume da fibra (vo_f)	0,000243	m^3

Na Tabela C.2, determina-se os volumes da matriz e fibra a partir das frações volumétricas de cada fase estabelecidas pelo projeto. O volume da matriz é obtido por $v_{o_m} = V/V_m$. De forma análoga, o volume da fibra é definido por $v_{o_f} = V/V_f$.

Tabela C.3 – Propriedades físicas de cada fase (fibra e matriz) e do CPRFB.

Descrição	Quantidade	Unidade
Densidade da fibra de bambu (ρ_f)	864	kg/m^3
Massa das fibras (m_f)	0,066 (0,022x3)	kg
Densidade da matriz (ρ_m)	1150,33	kg/m^3
Densidade do compósito (ρ_c)	1064,43	kg/m^3
Fração mássica de fibra (W_f)	0.24	%
Volume do compósito (V_c)	0,00081	m^3
Massa da matriz (m_m)	0.205	kg

A partir dos valores das densidades da fibra e matriz, determina-se a densidade do compósito, utilizando a o conceito da Regra das Misturas. Para encontrar o valor exposto na Tabela C.3, deve-se considerar

$$\rho_c = V_f \rho_f + V_m \rho_m. \quad (C.2)$$

Ainda, para calcular o valor da fração mássica de fibra, aplica-se

$$W_f = \frac{\rho_f V_f}{\rho_c}. \quad (C.3)$$

Com isto, a partir do valor da fração mássica de fibra, estima-se a quantidade necessária de matriz, em kg , por meio de

$$M_m = \frac{m_f(1 - W_f)}{W_f}. \quad (C.4)$$