



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS**  
**NATURAIS DA AMAZÔNIA - PRODERNA**

**ROBSON LUIS BALEEIRO CARDOSO**

**O USO DE FIBRAS DE JUTA (*Corchorus Capsularis*) NO DESENVOLVIMENTO  
DE PÁS DE TURBINA EÓLICA DE PEQUENA ESCALA PARA VENTOS DE  
BAIXA INTENSIDADE**

**BELÉM-PARÁ**

**2023**



O USO DE FIBRAS DE JUTA (*Corchorus capsularis*) NO DESENVOLVIMENTO DE PÁS DE TURBINA EÓLICA DE PEQUENA ESCALA PARA VENTOS DE BAIXA INTENSIDADE

Robson Luis Baleeiro Cardoso

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como requisito necessário à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama

Belém-PA


2023

“O USO DE FIBRAS DE JUTA (*Corchorus Capsularis*) NO DESENVOLVIMENTO DE PÁS DE TURBINA EÓLICA DE PEQUENA ESCALA PARA VENTOS DE BAIXA INTENSIDADE”

ROBSON LUIS BALEEIRO CARDOSO


TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA (PRODERNA/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA.

Aprovada por:

Documento assinado digitalmente  
 **ROBERTO TETSUO FUJIYAMA**  
Data: 28/11/2023 16:49:53-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama  
PRODERNA/UFPA (Orientador)

Documento assinado digitalmente  
 **WANDERLEY FERREIRA DE AMORIM JUNIOR**  
Data: 23/11/2023 10:06:06-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Junior  
PPGEM/UFPA (Membro)

Documento assinado digitalmente  
 **THIAGO ANTONIO PAIXAO DE SOUSA COSTA**  
Data: 21/11/2023 09:00:59-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dr. Thiago Antônio Paixão de Sousa Costa  
PPGEMAT/UFPA (Membro)

Documento assinado digitalmente  
 **JERSON ROGERIO PINHEIRO VAZ**  
Data: 23/11/2023 12:02:31-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Jerson Rogério Pinheiro Vaz  
PRODERNA/UFPA (Membro)

Documento assinado digitalmente  
 **MARCOS ALLAN LEITE DOS REIS**  
Data: 24/11/2023 10:41:57-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Marcos Allan Leite dos Reis  
PRODERNA/UFPA (Membro)

Belém-PA - Brasil

Outubro de 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com  
ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo (a) autor(a)

---

C268u CARDOSO, ROBSON LUIS BALEEIRO.

USO DE FIBRAS DE JUTA (*Corchorus capsularis*)  
NO DESENVOLVIMENTO DE PÁS DE TURBINA  
EÓLICA DE PEQUENA ESCALA PARA VENTOS  
DE BAIXA INTENSIDADE / Robson Luis Baleeiro  
Cardoso. – 2023.

xxi, 78 f. : il. color.

Orientador (a): Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Recursos Naturais na Amazônia, Belém,  
2023.

1. Fibra natural. 2. Compósito. 3. Pá eólica. 4.  
Teoria clássica dos laminados. 5. Momento do  
elemento de pá. I. Título.

CDD 620.1

---

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a beleza libertadora do intelecto para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer”.

Albert Einstein

## **DEDICATÓRIA**

Este trabalho é dedicado à memória de meus pais,  
Juscelino e Adelaide, que me ensinaram a não  
desistir de um sonho, a minha esposa Elza e meu  
filho Robson pelo apoio e compreensão em dias  
intempestivos.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que com sua infinita bondade, compreendeu meus anseios, concedendo-me a vida e a necessária coragem para atingir mais um objetivo. Agradeço a minha família, minha esposa Elza Leão e meu filho Robson, meus pais Juscelino e Adelaide (in memoriam); A vocês, pilares de minha existência, todo o meu amor e admiração.

Ao meu orientador, Professor Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama, UFPA-PRODERNA, pela oportunidade dispensada para realização deste trabalho, pois sem isso este não poderia ser concluído;

Ao professor Dr. Jean da Silva Rodrigues, do Instituto Federal do Pará - IFPA, campus Belém, devo um agradecimento especial por sua postura amigável e competente, pelo seu incansável esforço, colaborando e contribuindo categoricamente na realização deste trabalho, fatores que constituíram um incentivo permanente e decisivo para a elaboração dessa tese de doutoramento.

A CAPES, pela bolsa de pesquisa que muito contribuiu para o desenvolvimento desse grande desafio;

A Universidade Federal do Pará e em particular ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA);

Aos professores do PRODERNA pela prontidão e confiança com que tratam seus alunos;

A Professora Dra. Elza Monteiro Leão Filha do Instituto Federal do Pará-IFPA, Campus Belém, pelo seu incentivo e apoio em abraçar este desafio de forma absoluta;

A Professora Dra. Verônica Scarpini Candido, da Universidade Federal do Pará-UFPA, Campus Ananindeua, pelo seu incomensurável esforço para a conclusão deste trabalho;

Aos Professores Dr. Roberto Paulo e Dr. Alessandro Correa, do Instituto Federal do Pará-IFPA, Campus Belém, pelas importantes orientações nas análises de resultado, coleta e tratamento de dados;

Ao Professor Valério Lima coordenador do curso de Mecânica do Instituto Federal do Pará - IFPA- Campus Belém em permitir os acessos dos laboratórios para o desenvolvimento deste trabalho;

Ao Professor Henrique Bitencourt, Coordenador do curso de Mecânica do Instituto Federal do Pará-IFPA, Campus Abaetetuba, em permitir os acessos aos laboratórios de mecânica;

Aos Professores Thompson Reis, Fernando Antônio Sousa, Reuel Rocha, do Instituto Federal do Pará-IFPA, pelo apoio e instrução para o uso de equipamentos e máquinas dos seus laboratórios, colaborando para a conclusão deste trabalho de forma contundente.

Ao Servidor Rogério Bentes da Costa do Instituto Federal do Pará-IFPA, pelo apoio e profissionalismo na execução dos ensaios mecânicos e microestruturais;

Aos amigos e amigas, Silmara, Jaciléa, Gabriele, Prof. Maurício Maia, Prof. Marcelo e Prof. Miro Negreiros, pela colaboração para execução da fabricação dos compósitos laminados e da Pá eólica e por permearem de forma harmoniosa o convívio no grupo de pesquisa em Materiais Compósitos do Instituto Federal do Pará - IFPA.



Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFGA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

O USO DE FIBRAS DE JUTA (*Corchorus capsularis*) NO DESENVOLVIMENTO DE PÁS DE TURBINA EÓLICA DE PEQUENA ESCALA PARA VENTOS DE BAIXA INTENSIDADE

**Robson Luis Baleeiro Cardoso**

Outubro/2023

Orientador: Roberto Tetsuo Fujiyama.

Área de concentração: Uso e Transformação de Recursos Naturais.

Linha de pesquisa: Materiais e processos de Fabricação

Fibras naturais apresentam um potencial crescente no reforço de compósitos poliméricos, representando um promissor concorrente das fibras de vidro, extensamente usadas na construção de pás de aerogeradores, cuja reciclabilidade/descartabilidade e alto custo energético de produção já têm sido discutidos nos principais centros produtores de turbinas. Além disso, o desenvolvimento de turbinas eólicas para áreas com ventos de 2 a 6 m/s, considerados de baixa velocidade, utilizando perfil aerofólio S1210, pode incrementar o potencial energético de geração de regiões não originalmente elegíveis para a instalação de turbinas de grande porte. Este estudo propõe a avaliação do uso da fibra de juta (*Corchorus capsularis*) no projeto de pás de uma turbina eólica de pequena escala, considerando os parâmetros aerodinâmicos e estruturais. O presente projeto foi desenvolvido incorporando a Teoria da Quantidade de Movimento Angular do elemento de Pá (BEM), a Teoria Clássica dos Laminados (TCL) e a Teoria de Fluxo de Cisalhamento de Bredt-Batho Extendida (EBSFT), de forma a levantar as propriedades elásticas e possibilitar o uso dos critérios de falha. As lâminas do compósito foram caracterizadas segundo a ASTM D 3039, ASTM D 638 e ASTM D 5379. As propriedades mecânicas levantadas, aliadas aos parâmetros elásticos da seção transversal, rigidez torsional, rigidez axial e rigidez flexural de  $EI_y 4,97 \times 10^4 \text{ Nm}^2$ ,  $EI_z 1,45 \times 10^6 \text{ Nm}^2$ ,  $EI 9,47 \times 10^4 \text{ Nm}^2$  e  $GJ 1873,6 \times 10^6 \text{ Nm}^2$ , respectivamente, demonstraram a viabilidade do

uso da fibra de juta aplicadas ao laminado estrutural na construção da pá, definido segundo o critério de falha de tensão máxima, se apresentando para concorrer com as fibras de vidro hoje utilizadas.

**Palavras chave:** Fibra natural, Compósito, Pá eólica; Teoria clássica do laminado (TCL) Momento do elemento de pá.

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFPA in partial full fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D.Eng.)

**Robson Luis Baleeiro Cardoso**

THE UTILIZATION OF JUTE FIBERS (*Corchorus capsularis*) IN THE  
DEVELOPMENT OF SMALL-SCALE WIND TURBINE BLADES FOR LOW  
INTENSITY WINDS

Outubro/2023

Advisor: Roberto Tetsuo Fujiyama

Concentration area: Use and Transformation of Natural Resources

Research line: Materials and Manufacturing Processes

Natural fibers have growing potential for reinforcing polymer composites, representing a promising competitor to the glass and carbon fibres widely used in the construction of wind turbine blades, whose recyclability/disposability and high energy production costs have already been discussed in the main turbine production centres. On the other hand, the development of wind turbines for areas with winds of between 2 and 6 m/s, considered low speed, using the S1210 aerofoil profile could increase the energy generation potential of regions not originally eligible for the installation of large turbines.

This study proposes evaluating the use of jute fiber (*Corchorus capsularis*) in the blade design of a small-scale wind turbine, considering aerodynamic and structural parameters. This project was developed incorporating Blade Element Momentum Theory (BEM), Classical Laminate Theory (TCL) and Extended Bredt-Batho Shear Flow Theory (EBSFT), in order to survey the elastic properties and enable the use of failure criteria. The composite blades were characterised in accordance with ASTM D 3039, ASTM D 638 and ASTM D 5379. The mechanical properties obtained, together with the elastic parameters of the cross-section, torsional stiffness, axial stiffness and flexural stiffness, of  $EI_y 4.97 \times 10^4 \text{ Nm}^2$ ,  $EI_z 1.45 \times 10^6 \text{ Nm}^2$ ,  $EI 9.47 \times 10^4 \text{ Nm}^2$  and  $GJ 1873.6 \times 10^6 \text{ Nm}^2$ , respectively, demonstrated the feasibility of using jute fibre applied to the structural

laminate in the construction of the blade, defined in accordance with the maximum stress failure criterion, presenting itself to compete with the glass fibres used today.

**Keywords:** Natural fibre; Wind blade; Classical Laminate Theory (CLT); Blade element moment.

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.2 - JUSTIFICATIVA.....	3
1.3 - OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS .....	4
1.4 - ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	5
CAPÍTULO 2 .....	7
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
2.1 - TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL.....	7
2.1.1 - Características do perfil de pá .....	10
2.2 - MATERIAIS COMPÓSITOS.....	13
2.3 - MATERIAIS POLIMÉRICOS .....	16
2.3.1 - Resina Epóxi .....	16
2.4 - FIBRAS NATURAIS.....	17
2.4.1 - Fibra De Juta .....	19
2.5 - MODELAMENTO APLICADO A CONSTRUÇÃO DA PÁ EÓLICA.....	20
2.5.1 - Modelo da teoria do momento da Pá (BEM) .....	20
2.5.2 - Modelo da Teoria Clássica dos Laminados (TCL) .....	24
2.5.3 - Modelo da Teoria do Fluxo de Cisalhamento de Bradt Batho Extendido (EBSFT) .....	26
2.6 - MATERIAIS MODELADOS APLICADOS EM PÁS EÓLICAS .....	27
2.7 - PROCESSO DE INFUSÃO A VÁCUO.....	30
CAPÍTULO 3 .....	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 - MÉTODO CONSTRUTIVO DO PROTÓTIPO DE PÁ .....	35
3.1.1 - Construção da longarina de reforço na pá.....	37
3.1.2 - Segmentação da pá e incorporação da haste de sustentação na longarina da pá eólica.....	39

3.1.3 - Inserção do laminado na pá eólica de juta.....	40
3.2 - ANÁLISE FÍSICA DA FIBRA NATURAL DE JUTA .....	41
3.2.1 - Caracterização Dimensional do Fio de Juta (FJ) e da Fibra Cardada (FBC). .....	42
3.2.2 - Cálculo de Densidade dos Fios de juta e das Fibras Cardadas.....	43
3.2.3 - Cálculo da densidade do compósito laminado (CL), dos fios de juta (FJ) e das fibras cardadas de juta (FBC) .....	45
3.2.4 - Caracterização da resina Epóxi .....	46
3.2.5 - Definição da Geometria da Pá Eólica .....	46
3.3 - ENSAIOS MECÂNICOS .....	47
3.3.1 - Ensaio de Tração da Resina .....	48
3.3.2 - Ensaio de tração no compósito.....	49
3.3.3 - Ensaio de cisalhamento na resina epóxi.....	52
3.3.4 - Ensaio de cisalhamento no compósito .....	53
3.3.5 - Ensaio de flexão na pá.....	54
CAPÍTULO 4 .....	59
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	59
4.1 - IMPLEMENTAÇÃO DO LAMINADO.....	59
4.2 – ENSAIOS MECÂNICOS.....	60
4.2.1 - Ensaio de tração matriz epóxi.....	60
4.2.2 - Ensaio de tração no material compósito .....	61
4.2.3 - Ensaio de cisalhamento no material compósito.....	63
4.2.4 - Propriedades físicas do material compósito .....	64
4.2.5 - Validação do modelo de BRADT BATHO.....	65
4.2.6 - Tensões Globais e Locais na Seção Transversal da Pá .....	65
CAPÍTULO 5 .....	69
CONCLUSÕES .....	69

5.1 - CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS .....	70
5.2 – PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	71

## LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SIMBOLOS

### Lista de símbolos

$\alpha$	Ângulo de Ataque
C	Corda do Perfil
$dt$	Variação de Tempo
$E_c$	Energia Cinética
E	Modulo de elasticidade
$\epsilon$	Deformação Linear
m	Massa de fluido
M	Momento de uma força
$\mu$	Viscosidade Dinâmica
$\rho$	Massa Específica
$\delta$	Tensão linear
U	velocidade de vento a jusante do rotor
$U_1$	Velocidade de vento na esteira
$\nu_{12}$	coeficiente de Poisson Maior
$\nu_{21}$	coeficiente de Poisson Menor
$\nu$	Viscosidade Cinemática
V	Velocidade de Vento;

### Lista de Abreviações

ASTM	American Society for Testing and Materials
Ar	Área do Disco Rotor;
BEM	Momento do Elemento de Pá
CAD	Desenho Auxiliado por Computador
CAM	Manufatura Auxiliado por Computador
CP	Corpo de prova
HAWT	Turbina eólica de eixo horizontal
TCL	Teoria clássica do laminado
TEEH	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
VARTM	Moldagem por transferência de resina a vácuo assistido



## LISTA DE FIGURAS

### CAPITULO 2

Figura 2.1 - Classificação das turbinas eólicas.....	8
Figura 2. 2- Perfil aerodinâmico S1210 de alta sustentação e baixo número de Reynolds. .....	10
Figura 2. 3 - Perfil NACA 653618 obtido por iteração utilizando ferramenta matemática MATLAB. ....	11
Figura 2. 4 - Mapa de vento do Potencial eólico Brasileiro. Fonte: Adaptado de <a href="http://www.cresesb.cepel.br">http://www.cresesb.cepel.br</a> . ....	12
Figura 2. 5 - Local escolhido (agosto de 2023). ....	13
Figura 2. 6 - Fases de um material compósito.....	14
Figura 2. 7 - Curvas de tensão/deformação observadas dos materiais estudados. ....	15
Figura 2. 8 - Reticulação simulada da resina epóxi.....	16
Figura 2. 9 - Estrutura natural da fibra. ....	17
Figura 2. 10 - (a) Fibra de juta, (b) fibra de sisal e (c) fibra de algodão. ....	18
Figura 2. 11 - a) Fibra de juta in natura; b) fibra de juta após cardeamento. ....	19
Figura 2.12 - Tubo formado pela passagem de através do rotor de turbina. ....	21
Figura 2. 13 - Forças atuantes no perfil de pá eólica 2D.....	22
Figura 2. 14 - Seção transversal de uma lâmina em compósito. ....	28
Figura 2. 15 - Mostra o perfil de pá na estação 22 m. ....	28
Figura 2. 16 - Posicionamento de transdutores na sua extensão e câmeras para registrar o comportamento da pá eólica. ....	29
Figura 2. 17 - Delaminações encontradas dentro da longarina principal da lâmina.....	30
Figura 2. 18 - Processo de infusão a vácuo. ....	31

### CAPITULO 3

Figura 3. 1 - Fluxograma do modelo matemático para obtenção das propriedades do laminado .....	34
Figura 3. 2 - Confecção das estações de perfil aerofólio S1210, (a) as estações coladas e (b) em fase de recorte na madeira.....	35
Figura 3. 3 - Alinhamento de 30 estações de pá eólica. ....	36

Figura 3.4 - Confeção de preenchimento da pá, (a) recorte no perfil da estação, (b) cortador.....	36
Figura 3. 5 - Cobertura da pá com gel-coat (a) após a aplicação (b) em fase de cura....	37
Figura 3. 6 – Montagem da estrutura de sustentação, (a) alinhamento das camadas de fibra, (b) Camadas de materiais do processo de infusão. ....	38
Figura 3. 7 - Haste de sustentação (a) em ambiente de vácuo, (b) após a cura. ....	39
Figura 3. 8 - Segmentação da pá eólica. ....	40
Figura 3. 9 - Acomodação da longarina e da haste de sustentação na pá eólica. ....	40
Figura 3. 10 - (a) Fios de juta alinhados manualmente a $-15^{\circ}$ (b) Prepreg de fio de juta com matriz epóxi alinhados a $0^{\circ}$ c) Prepreg de fios de juta alinhados a $15^{\circ}$ .....	41
Figura 3. 11 - Montagem da câmara de vácuo para inserção de resina epóxi na pá .....	41
Figura 3.12 - (a) Fio de Juta, (b) fibra cardada e (c) tecido de juta. ....	42
Figura 3.13 - Estereoscópio utilizado para medir o diâmetro das fibras e dos filamentos de juta. Fonte: Próprio autor.....	43
Figura 3. 14 - Fibra de Juta medido seu diâmetro em Microns. ....	43
Figura 3.15 - Forno de Mufla utilizado para secagem do fio de juta e da fibra cardada	44
Figura 3.16 - Sequência de pesagem utilizando Picnômetro (a) fio de juta; (b) álcool metílico PA e (c) balança de precisão com picnômetro no interior.....	44
Figura 3. 17 - Resina epóxi e isoforonadiamina e álcool benzílico.....	46
Figura 3. 18 - Perfil aerodinâmico da pá eólica em AutoCAD. ....	47
Figura 3. 19 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração da matriz. ....	48
Figura 3. 20 - Molde de silicone.....	48
Figura 3. 21 - (a) Corpos de prova de matriz epóxi fraturados, (b) sob ensaio de tração. ....	49
Figura 3. 22 - Fabricação do compósito, (a) Bomba de vácuo e conexões, (b) Bolsa de vácuo e vedações. ....	50
Figura 3. 23 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração,.....	50
Figura 3. 24 - Corpos de prova de Juta/Epóxi sob ensaio de tração.....	51
Figura 3. 25 - (a) Corpos de prova de Juta/Epóxi (b) Strain gauge utilizado nos testes. 52	
Figura 3. 26 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de cisalhamento.....	52
Figura 3. 27 - (a) Corpos de prova de matriz Epóxi e (b) sob ensaio de cisalhamento.. 53	

Figura 3. 28 - Corpos de prova testados em cisalhamento (a) fio de juta 0°, (b) fio de juta 90°, (c) juta cardada 0°, (d) juta cardada 90 ° de matriz Epóxi e (b) sob ensaio de cisalhamento .....	54
Figura 3. 29 - Estrutura fabricada para ensaio de flexão em engaste .....	55
Figura 3. 30 - Suporte base para ensaio de flexão com engaste da pá.....	56
Figura 3. 31 -Em (a) Estabilização da base, (b) fixação de engaste c) estabilização no teto. ....	56
Figura 3. 32 – Sensor de deslocamento axial (a) sensor instalado na lateral da estrutura (b) sensor tipo haste.....	57
Figura 3. 33 - (a) Pá eólica posicionada, b) extremidade posterior. ....	57
Figura 3. 34 – Arquitetura de Ensaio em Flexão da pá eólica, onde 01) Pá eólica, 02) Apoio de Carga, 03) Base de Engaste, 04) Sensor de deslocamento Axial, 05) Dispositivos de Rigidez estrutural, 06) Monitoramento de deformação, 07) Fixação de engastamento .....	58

#### CAPITULO 4

Figura 4. 1 - Pá eólica construída em autoCAD.....	59
Figura 4. 3 - Resultados de ensaios de tração em corpos de prova de Matriz epóxi. ....	61
Figura 4. 4 – Comportamento tensão-deformação em Tração de corpo de prova representativo da Série (a) Fio de Juta Longitudinal e (b) Fio de juta Transversal.....	62
Figura 4. 5 - Comportamento tensão-deformação em Tração de corpo de prova representativo da Série (a) Juta Cardada Longitudinal e (b) Juta Cardada Transversal. 62	
Figura 4. 6 - - Comportamento tensão-deformação em Cisalhamento de Corpo de Prova Representativo da Série (a) Fio de Juta Longitudinal e (b) Juta Transversal.....	63
Figura 4. 7 - Comportamento tensão-deformação em Cisalhamento de Corpo de Prova Representativo da Série (a) Juta Cardada Longitudinal e (b) Juta Cardada Transversal.64	
Figura 4. 8 - Seção transversal de pá eólica com uma alma de cisalhamento. ....	66
Figura 4. 9 - Distribuição das tensões globais $\{\sigma^x\}$ ao longo da camada 7, das estações 12(a) e 19(b) do Perfil S1210, sob ação de $M_{yy}$ . ....	66
Figura 4. 10 - Tensões máximas locais $\{\sigma^x\}$ na direção 1 das sete camadas das estações 12 e 19 do laminado do Perfil S1210, sob ação de $M_{yy}$ . ....	67

Figura 4. 11 - Gráfico comparativo dos resultados de simulação com as deformações máximas locais na direção 1 das sete camadas das estações 12 e 19 do laminado do Perfil S1210, sob ação de  $M_{yy}$ ..... 68

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1- Classificação das turbinas eólicas de eixo horizontal. ....	8
Tabela 2 - Localidade com potencial de vento escolhida.....	12
Tabela 3 - Matérias prima para construção do compósito fibra de juta e epóxi.....	33
Tabela 4 - Matérias prima para construção da pá eólica. ....	33
Tabela 5 - Camadas, material e alinhamento das mantas de fios de juta e fibra cardada	38
Tabela 6 - Características das estações de pá desenvolvidas.....	60
Tabela 7 - Propriedades em tração de matriz epóxi.....	60
Tabela 8 - Propriedades obtidas em tração da lâmina epóxi/fibra de juta. ....	61
Tabela 9 - Propriedades obtidas em cisalhamento da lâmina epóxi/fibra de juta.....	63
Tabela 10 - Resultados de propriedades físicas dos compósitos .....	64
Tabela 11 - Propriedades elásticas calculadas para a seção transversal com o perfil NACA 0012. ....	65

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Materiais compósitos utilizando fibras naturais como reforço é uma tendência mundial na atualidade. Neste contexto, a fibra de juta, uma matéria prima de grande abundância na região amazônica, possui boas características mecânicas e principalmente ser cultivada pelos ribeirinhos amazônicos agregando valor social a mão-de-obra local e sendo uma fibra já consolidada no mercado Internacional, tornou-se o objeto de estudo nesta tese de doutoramento para reforço do compósito fabricado. Produzir um compósito com reforço de fibra natural que seja passível para aplicação em pás eólica deu-se a partir do continuo aumento da demanda por eletricidade fomentada pela expansão da indústria eólica global, que eleva a produção de componentes e peças, o que levará a um provável nível acumulado de resíduos de aproximadamente 43,4 milhões de toneladas ao fim de vida das pás, até 2050 [1].

As pás de turbinas eólicas são produzidas a partir de laminados formados por várias camadas de fibra de vidro ou de carbono e a maioria dos seus componentes, como fundação, torre, partes da caixa de engrenagens e gerador são recicláveis no final de sua vida útil [2]; no entanto, as pás dos aerogeradores representam um maior desafio devido aos materiais utilizados e sua complexa composição, são materiais sintéticos que chegam ao final de sua vida útil em aproximadamente 25 anos de funcionamento.

As turbinas eólicas de grande porte (3 MW), são geradores montados com rotor de 3 pás, 40% em peso de cada pá, são constituídos de materiais compósitos. Além disso, 10% do compósito resulta em desperdício na fase de fabricação, chegando a atingir 1 milhão de toneladas de resíduos no final da vida útil [3].

Durante a última década, a turbina eólica de eixo horizontal tornou-se um componente crítico na geração de energia em muitos países do mundo, por essa razão, os esforços nos projetos passaram a se concentrar na otimização aerodinâmica do desempenho do rotor da turbina em particular a lâmina e sua geometria [4].

Nesta perspectiva observa-se uma dualidade específica de aplicação da seguinte forma: As turbinas de vento de grande porte são prioritariamente instaladas em locais onde há ventos de grande intensidade, deixando espaço para que as turbinas de pequenos diâmetros, possam gerar energia onde os ventos são de baixa intensidade, uma das características da região amazônica, cenário de aplicação do estudo.

Assim o desenvolvimento de materiais compósitos com reforço de origem vegetal alinha-se aos objetivos das pesquisas científicas e tecnológicas nos últimos anos. Na atualidade, há uma convergência mundial em desenvolver e valorizar materiais ambientalmente corretos, e com baixo custo. As condições de material ambientalmente correto referem-se aos aspectos de que possam ser apresentados como renováveis, biodegradáveis e recicláveis. Ainda em relação aos compósitos, as tecnologias modernas exigem materiais com combinações das mais variadas propriedades, e geralmente não são características atendidas pelos materiais convencionais, sendo necessário produzir as melhores propriedades de cada material [5].

Os compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras vegetais surgiram nas últimas décadas, de acordo com Filho *et al.* [6], com um grande potencial de aplicação na área de engenharia dos materiais e constituindo, na atualidade, uma das maiores áreas de interesse na pesquisa de materiais compósitos. Acrescenta-se a esta descoberta o fato das fibras vegetais serem fontes renováveis, biodegradáveis, não tóxicas, de baixo custo, mais resistentes e rígidas, além de possuírem melhores propriedades à fadiga [7].

As fibras vegetais têm sido estudadas ao longo de décadas, no que se referem à sua constituição, propriedades mecânicas e aos seus possíveis usos, sendo muito utilizadas durante um longo período de tempo, deixando de ter maior uso com o surgimento de novas tecnologias [8]. Contudo, recentemente, tem-se buscado retomar o uso de técnicas consagradas e, também, desenvolver novos compósitos utilizando recursos naturais renováveis, com grande incremento no uso das fibras naturais de açaí, curauá, de coco, de sisal, de linho, de rami, de juta e de cânhamo, entre outras.[9]

Considerando que as fibras naturais apresentam inúmeras vantagens que contribuem para a sua utilização como reforço de compósitos, destacando-se o seu custo e sua importância ambiental de acordo AWAIS *et al.*[10], convém mencionar que os compósitos se sobressaem diante outras classes de materiais pela possibilidade de aproveitar as fibras vegetais como simples carga na matriz ou até mesmo como reforçadores. Outra vantagem dos compósitos é que permitem que durante a sua fabricação podem ser utilizados resíduos de outros materiais[8]. Os rejeitos de fibras vegetais, resultantes de processos agroindustriais, vêm mostrando uma grande perspectiva para fabricação de compósitos [11]. As fibras celulósicas possuem muitas características que tornam seu uso vantajoso, como baixo custo, baixa densidade, resistência específica e módulo elevados; não são abrasivas e, portanto, não desgastam os equipamentos de processo, não são tóxicas, podem ser facilmente modificadas por agentes químicos, são abundantes e provém de fontes renováveis [12].

De acordo com [13], as fibras naturais mais utilizadas na produção de compósitos são: juta, rami, linho e sisal. Madeira, sob a forma de serragem, também tem sido empregada na fabricação desses materiais. Fibras de juta, da família Palma vêm sendo bastante empregadas na fabricação de produtos simples, tais como tecidos, cordas, entre outros, e possuem alto teor de lignina, merecendo destaque especial para o desenvolvimento deste projeto.

O aspecto que se destaca na fibra de juta da espécie *Corchorus Capsularis*, é a sua boa resistência como reforço e comparativamente com as outras fibras lignocelulósicas, a juta é relativamente maleável e se amolda com facilidade a uma solicitação mecânica. Assim é possível trançar fibras de juta para fazer fios, tecidos ou cordas. Esta vantagem de acordo é associada pelo comprimento que estas fibras podem atingir na natureza de até 4 metros e diâmetros superiores a 2 mm [14]. Atualmente, é possível reforçar peças de compósitos, como placas e painéis para construção civil e mobiliário entre outros, utilizando de maneira contínua e alinhada ao comprimento total das fibras e fios de juta. Isto se deve ao fato do comprimento crítico medido para as fibras de juta ser de 15 cm [15].

Nesse contexto, esta tese de doutorado tem como objetivo o desenvolvimento de compósitos reforçados por fibras contínuas e alinhadas a  $0^\circ$ ,  $+15^\circ$  e  $-15^\circ$ , destacando a fibra de juta da espécie *Corchorus Capsularis* como reforço para uma matriz de resina epóxi com modelamento dimensional para a construção de uma pá eólica, produzida através da técnica de infusão de resina, sendo previsto aspectos do comportamento do material laminado de casca utilizando as teorias de Kirchhoff [16].

## 1.2 - JUSTIFICATIVA

A tese de doutorado proposta apresenta relevância científica, ambiental, tecnológica, e econômica para a região Norte. Justifica-se o estudo pela necessidade de contribuir para o meio científico e tecnológico com a aplicação de novos materiais que ainda não estejam sendo explorados em suas potencialidades em determinados campos da engenharia, como é o caso da juta. Considerando sua disponibilidade, uma vez que as fibras de juta utilizadas são provenientes de resíduos e subprodutos de outros usos comerciais. Do ponto de vista ambiental justifica-se pelo aproveitamento integral das fibras. Já do ponto de vista científico justifica-se pela compreensão dos mecanismos deste compósito fibra natural e resina epóxi e por tratar-se de tópico em destaque atual no campo de materiais avançados. Como a tecnologia nesta área vem crescendo com rapidez, pretende-se com este estudo “desenhar” um material com determinadas



disposições, visando o menor custo e alto padrão e em contrapartida ser passíveis de aplicação em pá eólica, competindo assim com outros produtos convencionais, sobretudo aqueles a base de fibras não renováveis como as de vidro e fibras de carbono. A escolha do uso de fibras naturais de juta oriunda da região Amazônica, como reforço do material compósito no estudo, surgiu como uma fonte alternativa na aplicação em pás de turbina para aerogeradores, pois estas fibras são de fácil acessibilidade e de grande abundância, podem ser aplicadas em conjunto ou individualmente, compondo materiais de moderada produção e utilização como os laminados com aglomerantes resinados. Espera-se que este estudo possa atrair investimentos em tecnologias que envolvam materiais compósitos com fibras naturais, o que teria como uma das consequências a continuação das pesquisas em materiais compósitos laminados. O sucesso econômico do estudo, do ponto de vista holístico, se daria pelo custo relativamente baixo, com tecnologia de fácil absorção pelos setores de produção e consumo, constituindo-se em um grande atrativo para implantação de centros de pesquisa e produção de juta na Região Norte, visando os mercados dos grandes centros e até mesmo a exportação da tecnologia.

Esta tese vem corroborar com o crescente aumento da demanda de energia elétrica na cidade e no campo, e sob este horizonte se observa a necessidade de buscar alternativas de materiais que possam ser utilizados em pás de turbinas eólicas, aproveitando a força de vento existente no entorno das grandes redes que ainda são inexploradas, embora esses ventos sejam de baixa intensidade característica da Região Norte, podem ser aproveitados com a instalação de turbinas para esta modalidade específica. Como os projetos existentes para pá eólica empregam materiais sintéticos consolidados, o uso de materiais compósitos reforçados com fibras de Juta (*Corchorus Capsularis*) se revela uma grande alternativa para o desenvolvimento regional, social e tecnológico como aplicação pioneira desta fibra na construção de pás.

### 1.3 - OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

Esta tese tem como objetivo geral modelar e construir uma pá eólica, de perfil aerofólio S1210, em materiais compósitos laminados com tecido e fio de fibra natural de juta e resina epóxi, para aplicação em turbinas eólicas para locais de baixa intensidade de vento, utilizando como base teórica a Teoria da Quantidade de Movimento Angular do Elemento de Pá (BEM), a Teoria Clássica dos Laminados (TCL) e a Teoria de Fluxo de Cisalhamento de Bredt-Batho Extendida (EBSFT).

#### Objetivos Específicos:

- a) Estimar teoricamente a carga de vento através da pá e prever as cargas que serão impostas no laminado;
- b) Apresentar um modelo numérico prévio do laminado estrutural do perfil de eólico;
- c) Avaliar, por meio de ensaio experimental de flexão, a capacidade de suporte da pá previstos na simulação aerodinâmica;
- d) Determinar as propriedades por meio de ensaios de tração, compressão e cisalhamento em amostras produzidas similarmente a pá eólica, a fim de se obter as propriedades mecânicas do compósito laminado;
- e) Propor ajustes do modelo de perfil de pá após os resultados experimentais.

#### 1.4 - ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Com o objetivo de mostrar os resultados obtidos através desse desenho metodológico, buscou-se organizar e dispor o trabalho da tese em cinco capítulos. No primeiro capítulo, denominado “Introdução” apresenta-se, em um primeiro momento, um panorama geral acerca da contextualização científico/tecnológica que envolve o desenvolvimento dos materiais, das suas interpretações e seus efeitos sobre a busca por novos materiais que atendam às novas necessidades. Em seguida, mostra-se os aspectos relevantes inerentes ao trabalho, como justificativa, os objetivos a serem atingidos e sua motivação. No segundo capítulo, intitulado “Revisão Bibliográfica”, procura-se descrever as publicações que subsidiaram a construção da pesquisa de forma sucinta, como materiais compósitos, materiais poliméricos, fibras naturais, fibra de juta e compósitos poliméricos. Ainda neste capítulo será evidenciada uma abordagem sobre trabalhos de turbinas eólicas e pás de turbinas de eixo horizontal, enfatizando suas características aerodinâmicas com a utilização de materiais compósitos e reforçados com de fibra de origem natural. No terceiro capítulo, cujo título é “Materiais e Métodos”, descreve-se os procedimentos experimentais empregados, assim como os materiais e métodos utilizados no preparo de corpos de prova. Este capítulo discorre sobre os métodos construtivos, a modelagem matemática utilizada a partir da implementação computacional, contendo as formulações para a simulação, e a implementação do comportamento estrutural no perfil aerodinâmico escolhido para a construção da pá. Descreve também o estudo desenvolvido para análise de uma estrutura compósita passível de aplicação em pás eólicas. No capítulo 4, encontram-se os resultados e discussões decorrentes do trabalho, e o capítulo 5 dedica-se às conclusões, onde destacam-se as

principais contribuições da pesquisa além de indicar propostas para futuras pesquisas e desenvolvimento de novos estudos sobre o desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras de juta.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 - TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL

A inclusão de fonte renovável na cadeia eólica, pode contribuir para tornar essa indústria mais favorável do ponto de vista ambiental, utilizando a inserção de matéria prima de fonte natural, na possibilidade de serem comparados aos materiais sintéticos utilizados nas pás de turbinas de eixo horizontal.

A energia necessária para a fabricação das fibras de carbono, de acordo RANI *et al.* [17] atinge de 183 MJ/kg a 704 MJ/kg, e para a fibra de vidro de 13 MJ/kg a 54 MJ/kg. Esses dois materiais são os mais comumente utilizados para a fabricação de pás de turbinas eólicas no mundo, além do alto consumo de energia, essas fibras são pouco atraentes para a conservação ambiental.

Globalmente a energia eólica, de acordo BYRNE *et al.* [18], cresceu substancialmente nas últimas décadas com a capacidade instalada no final de 2016 de 486,8 GW, e alcançaram nos Estados Unidos no ano de 2018, aproximadamente 96 GW e 591 GW em todo o mundo, onde as lâminas de pás são descartadas em aterros sanitário em seu final de vida útil de acordo MURRAY *et al.* [19], logo, a Comissão Europeia de Energia (CEE) determinou como meta, até 2050, uma porcentagem de geração de energia eólica entre 31% e 48% do total de todos os modais de energia produzida na União Europeia. Com o crescimento da demanda de energia eólica estão sendo requeridos novos materiais de construção com propriedades mecânicas predefinidas, proporcionando alta resistência mecânica com peso relativamente baixo, quando comparados aos materiais metálicos [20].

Consequentemente, no trabalho de KALAGI *et al.* [21], observam-se que os materiais como fibras de vidro e de carbono usados para componentes das turbinas eólicas não são ambientalmente atraentes, são materiais largamente utilizados no reforço dos compósitos aplicados na construção de grandes turbinas eólicas.

A demanda mundial de energia traz uma tendência de crescimento na geração de energia eólica e vem sendo explorada com a instalação de pás cada vez maiores. A figura 2.1 mostra a classificação das turbinas eólicas de eixo horizontal instaladas de acordo com SIDDIQUI *et al.*[22], apresentando um crescimento na geração de energia eólica como turbinas de grande porte.

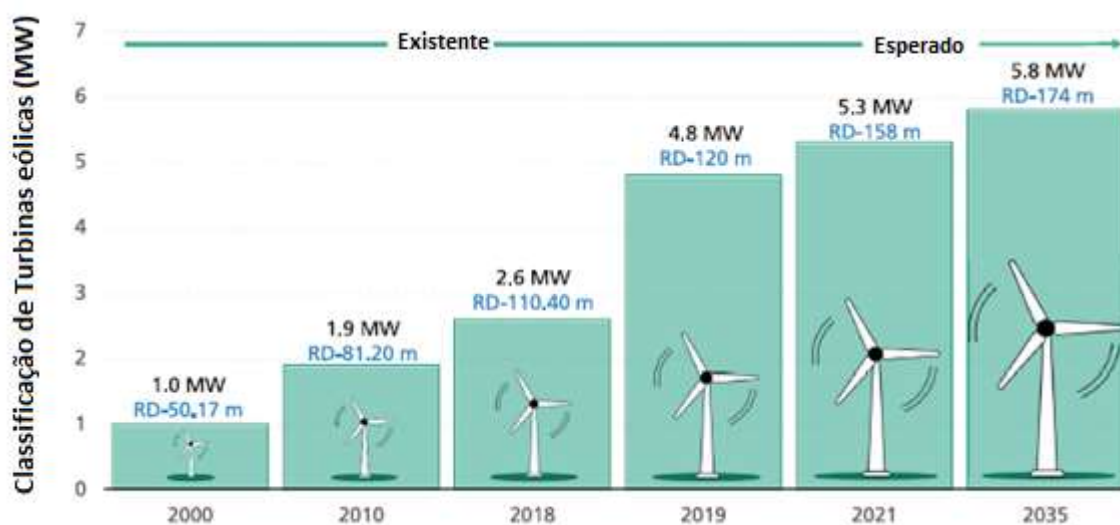


Figura 2.1 - Classificação das turbinas eólicas

Fonte: Adaptado de SIDDIQUI *et al.* [22]

Por outro lado, turbinas eólicas para ventos de baixa intensidade, de acordo TUMMALA *et al.*, [23], como as turbinas de média escala têm o diâmetro do rotor e potência variando entre 3 e 10 metros, 1,4 e 20 kW e as turbinas de pequena escala, com rotor de diâmetro até 3m e potência de geração até 100 W, podendo ser instaladas em locais de baixa intensidade de vento e que favorecem a produção de energia autônoma e de alta confiabilidade.

De acordo com IKEDA *et al.*, [24], as turbinas de baixa intensidade de vento de eixo horizontal são classificadas como Microturbinas, Mini turbinas e turbinas domésticas. A tabela 1 mostra a classificação das turbinas de vento de eixo horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine* - HAWT), com base no diâmetro do rotor e na potência nominal.

Tabela 1- Classificação das turbinas eólicas de eixo horizontal.

Classificação		Diâmetro do rotor	Área varrida	Classificação de Potência Padrão
		m	m <sup>2</sup>	kW
Pequena Escala	Micro	0,5-1,25	0,2-1,2	0,004-0,25
	Mini	1,25-3	1,2-7,1	0,25-1,4
	Doméstica	3,0-10	7,1-79	1,4 -16
Escala Comercial	Pequena	10-20	79-314	25-100
	Média	20-50	314-1963	100-1000
	Grande	50-100	1963-7854	1000-3000

Fonte: adaptado IKEDA *et al.*, [24].

As turbinas eólicas com potência e diâmetros de rotor inferiores a 20 kW e 5 m, classificadas como pequenas turbinas eólicas, são utilizadas em redes de geração de energia para comunidades remotas, dentre estas, são classificadas como Mini, para casas, Média e Micro para telecomunicações remotas, ou para geração de energia de equipamentos em náuticos, com potência de geração e diâmetro de rotor com 20 kW e 5 m, 5 kW e 2,5 m e 1 kW e 1,5 m, respectivamente [24].

O processo de desenho para pequenas turbinas eólicas é geralmente baseado em métodos e ferramentas padrão, os mesmos usados para turbinas de grande escala. As pequenas turbinas eólicas apresentam, no entanto, características peculiares devido ao seu campo de aplicação, e em uma abordagem de laboratório do projeto de pás para turbinas eólicas de pequeno porte, a escolha dos perfis tem como base a otimização do comportamento aerodinâmico e estrutural. Onde as pás são confeccionadas em polímeros reforçados com fibra de vidro, e por sua vez utilizando o processo de moldagem por infusão de resina [25].

Neste cenário, a inclusão de materiais de fonte renovável na cadeia eólica pode contribuir para que essa indústria se torne mais ambientalmente favorável, do ponto de vista da renovabilidade de sua matéria prima, do consumo de energia necessário para a fabricação das pás, e da sua descartabilidade e reciclabilidade. Os compósitos reforçados com fibras naturais se apresentam como um candidato em potencial para substituir os sistemas de materiais convencionais da indústria eólica. Esses materiais podem ser introduzidos para a fabricação de várias seções de uma pá eólica [21].

Vários trabalhos têm conduzido a comparações entre materiais compósitos reforçados por fibras naturais e fibras sintéticas. Assim, a fibra natural de juta (*Corchorus Capsularis*) se destaca como importante alternativa para o uso nestes compósitos, pois possui manufatura industrial já consolidada, produção tradicional no bioma amazônico brasileiro, por exemplo, e propriedades mecânicas consistentes com as necessidades dos componentes mecânicos demandados na área de geração de energia eólica [26].

Aliada à maior renovabilidade dos insumos da indústria eólica, a recente expansão tem demandado a abertura de novas fronteiras para a instalação de turbinas em condições muitas vezes não ideais de geração elétrica, como os locais de baixa intensidade de vento. Estes locais são mais comuns do que locais de alta velocidade de vento, logo, comparando com os recursos eólicos de alta qualidade, as áreas de baixa velocidade do vento apresentam algumas vantagens, pois, estão mais próximas da rede elétrica urbana e mais fáceis de transportar e de instalar. Esses fatores, de acordo BARNES, *et al.*, [27], têm o potencial de reduzir os custos de desenvolvimento e compensar algumas desvantagens econômicas inerentes ao recurso eólico de menor qualidade,

comparando com recursos eólicos de alta qualidade. Os projetos de turbinas de pequena escala têm sido impulsionados nos últimos anos, de acordo YANG, *et al.*, [28], assim as quantidades de novas instalações de turbinas de grande geração de energia diminuíram, direcionando a atenção para as microturbinas com capacidade de até 20 kW de geração de energia [28].

### 2.1.1 - Características do perfil de pá

Os perfis de aerofólio FX 63-137, S1210 e S1223 [29], foram projetados para a competição de cargas pesadas de aviões; nos testes em túneis de vento, utilizado como um dos favoritos para competição, o perfil Selic 1210 alcançou 15% maior sustentação comparando com o perfil FX 63-137. Logo, o perfil eólico Selic 1210 é o escolhido para turbina eólica de três pás, desenvolvido inicialmente para aeronaves de manobras rápidas, onde as superfícies que sustentam a aeronave por meio de reação dinâmica no ar, e suas características aerodinâmicas são fortemente afetadas pelo formato da sua seção transversal, sendo muito equivalentes as características das pás de vento utilizadas. A figura 2.2, apresenta o perfil S1210, para competição de aeronaves.

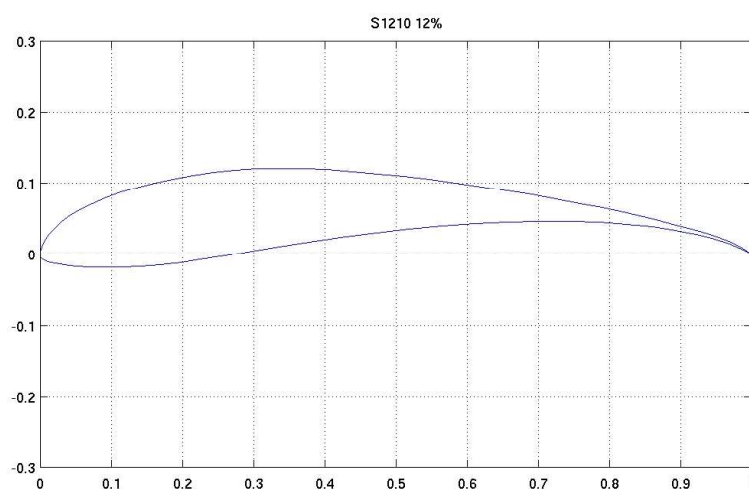


Figura 2. 2- Perfil aerodinâmico S1210 de alta sustentação e baixo número de Reynolds.

Fonte: adaptado do <http://airfoiloolls.com> [29].

O perfil aerodinâmico S 1210, utilizado em aeronaves de testes, tem boa sustentação e arrasto para ventos de baixa intensidade, utiliza perfil aerodinâmico complexo variando sua angulação a cada estação obtendo um comprimento aproximado de 1800 mm e espaçamento entre estações de 60 mm; sendo modelado pelo método BEM, (*Blade Element Moment*).

A figura 2.3 mostra uma pá eólica, de Perfil aerodinâmico NACA 653618 modelada pelo método BEM e plotada por RUEDA &, VAZ [30].

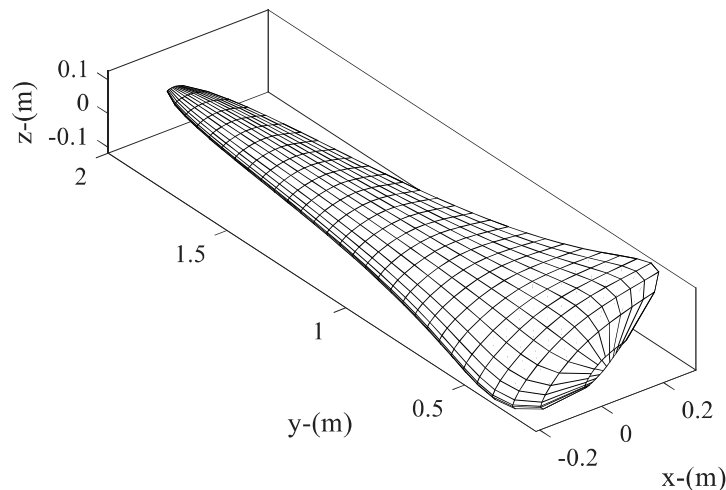


Figura 2. 3 - Perfil NACA 653618 obtido por iteração utilizando ferramenta matemática MATLAB.

Fonte: adaptado RUEDA, VAZ [30]

De acordo RUEDA &VAZ, [30], a vantagem de utilizar o método BEM é a de que características de partes como rotor eólico, e de sustentação, arrasto, número de pás, diâmetro do cubo, diâmetro da turbina e aerofólio são informações realistas.

De acordo SWISHER *et al.* [31], a turbina de vento transforma a energia cinética do vento em energia mecânica no eixo da turbina; a potência no eixo do rotor aumenta em função da velocidade de vento local.

O modelo de perfil é validado com o uso do código BEM, os dados de projeto aerodinâmico da turbina são inseridos de acordo a relação da taxa de velocidade na ponta da pá (TIP) e a faixa de velocidade de vento do local definido [28]. No modelo é também inserida a densidade do ar e calculado o número de Reynolds específico correspondente às suas localizações. Assim obtém-se as características da pá calculada pelo código BEM implementado em MATLAB. A curva de potência calculada pelo código BEM mostra que a potência nominal é alcançada com velocidade do vento de 9 m/s, o que está de acordo com as características dos aerogeradores. Portanto, a predição pelo código BEM para este estudo pode ser considerada aceitável.

A velocidade anual média de vento utilizada é obtida no mapa de ventos da região Amazônica, utilizando o site [www.cresesb.cepel.gov.br](http://www.cresesb.cepel.gov.br), em que são encontrados os dados de entrada para utilizados na implementação matemática. A Figura 2.4 mostra o mapa de vento, publicado no site [cresesb.cepel.gov.br](http://cresesb.cepel.gov.br), que situa o local de instalação da turbina eólica.



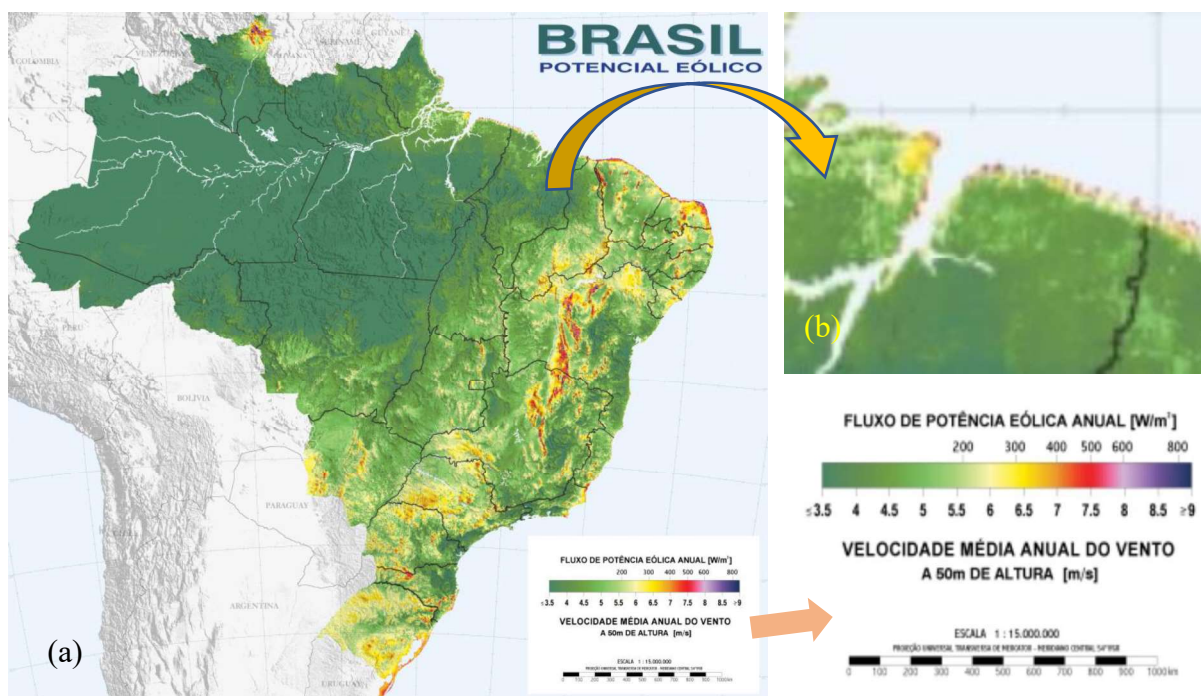


Figura 2. 4 - Mapa de vento do Potencial eólico Brasileiro. Fonte: Adaptado de <http://www.cresesb.cepel.br>.

O mapa mostra as velocidades de vento anual média, onde as menores médias de velocidade se encontram na região amazônica, de acordo o gráfico de cores apresentado na figura 2.1a, podendo ser melhor visto com ampliação na figura 2.1b e analisados na figura 2.1c, que mostra a escala de ventos em m/s a 50 metros de altura, com ventos médios anuais entre 2.5 e 9 m/s.

A tabela 2 mostra as características de vento médio local anual, obtidas das medições de energia fontes naturais [32].

**Tabela 2 - Localidade com potencial de vento escolhida**

Localidade Coordenada	Potencial de vento	Velocidade de vento (média anual)	Densidade do ar	Viscosidade cinemática	Número de Reynolds	Temp. Local.
<b>Benfica (PA)</b>	$W/m^2$	m/s	$Kg/m^3$	$N.s/m^2$	Re	$^{\circ}C$
1°18'55.6"S 48°17'18.1"W	123,4	4,71	1,1883	184,6 e-6	72320,95	27

A localidade escolhida como potencial de vento local a nível de 50 metros de altura, ventos de 4,71 m/s para instalação de uma turbina eólica de baixa intensidade de vento.

A Figura 2 mostra a localidade elegível para instalação de uma turbina eólica de baixa intensidade de vento

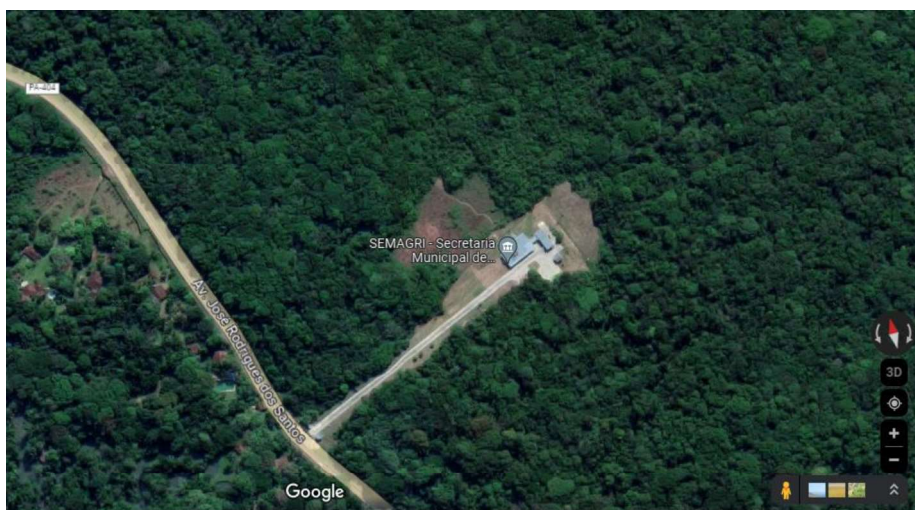


Figura 2. 5 - Local escolhido (agosto de 2023).

Fonte: adaptado de [www.google.maps.br](http://www.google.maps.br)

A localidade se encontra próximo da área urbana, coordenadas  $1^{\circ}18'55.6''S$ ,  $48^{\circ}17'18.1''W$ , onde está instalada uma unidade da Secretaria de Agricultura -SEMAGRO, município de Benevides-PA-Brasil. [33]

## 2.2 - MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos podem ser constituídos de combinações entre materiais de diversas características, de acordo RODRIGUES *et al.*, [34], utilizando uma matriz polimérica como material de base e como reforço destes compósitos, fibras de origem natural ou de origem sintética. A compatibilidade e o processo são condicionantes para uma melhor resposta do material e suas propriedades estão associadas às de seus constituintes, como as propriedades da fibra, as frações volumétricas, disposição das camadas, a geometria dos fios dispersos ou contínuos. A figura 2.6 apresenta de forma esquemática a estrutura do material compósito e seus constituintes.

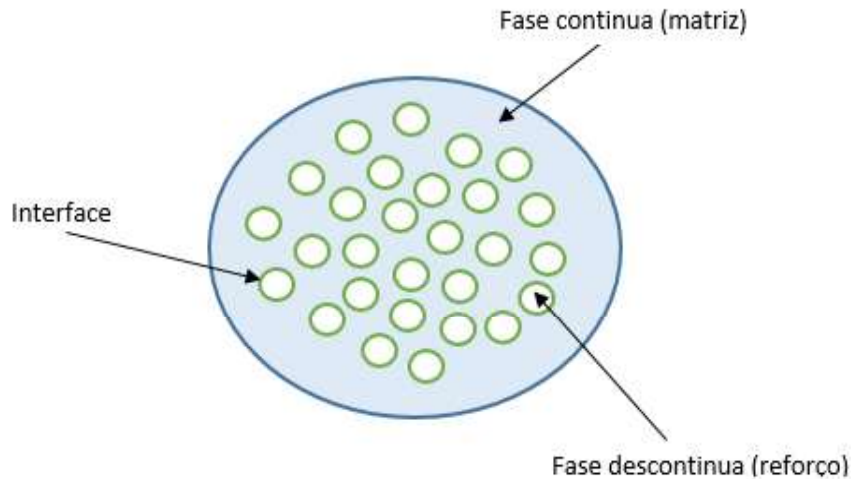


Figura 2. 6 - Fases de um material compósito.

Fonte: Próprio autor, adaptado AWAIS et al. [10]

A matriz de um material compósito pode ser classificada como cerâmica, orgânica ou metálica, sendo a matriz uma fase que preenche todos os espaços em que a fibra não se apresenta, formando a estrutura do compósito. Protege as fibras do meio externo podendo ser manuseado sem que haja prejuízo a sua estrutura, distribui o carregamento transferindo para a fibra em caso de ruptura [35].

No estudo de BAMBACH [26], foram utilizados cinco diferentes tecidos para a fabricação de compósitos: linho, juta, cânhamo, vidro e carbono. Os tecidos de linho e juta tinham densidades de  $400 \text{ g/m}^2$ , tramados a  $0^\circ/90^\circ$  do tipo sarja. Esses tecidos de linho e de juta foram produzidos comercialmente com um fio de baixa torção com suas propriedades de densidade nominal,  $1,5 \text{ g/cm}^3$  e  $1,46 \text{ g/cm}^3$ , resistência à tração  $500 \text{ MPa}$  e  $400 \text{ MPa}$  módulo de Elasticidade, e  $50 \text{ GPa}$  e  $40 \text{ GPa}$ , respectivamente. O tecido de cânhamo puro não branqueado de  $287 \text{ g/m}^2$   $[0,90]$  com uma densidade nominal de  $1,48 \text{ g/cm}^3$ .

A figura 2.7 mostra uma comparação entre fibras de reforço em compósito com matriz epóxi em tensão/deformação sob ensaio de compressão.

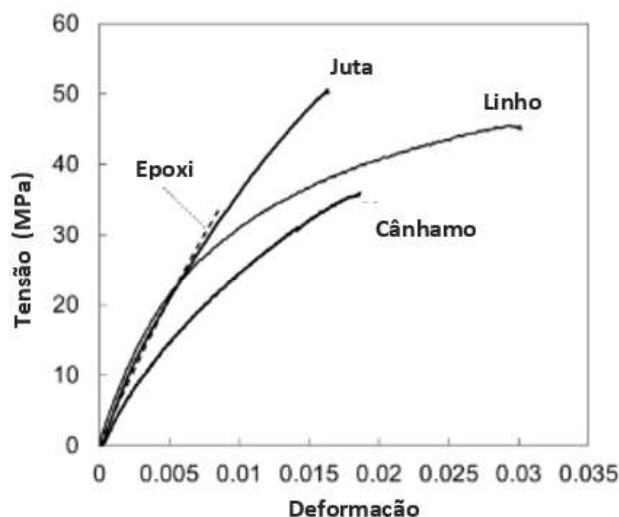


Figura 2. 7 - Curvas de tensão/deformação observadas dos materiais estudados.

Fonte: adaptado de BAMBACH, [26].

Um material compósito, consiste na combinação de dois ou mais materiais diferentes, a fim de aprimorar ou até mesmo incluir uma propriedade no material final, em que separados não teriam as mesmas vantagens [36]. São materiais projetados para alcançar propriedades mecânicas com características de desempenho superiores ao desempenho individual dos seus componentes, podendo surgir de combinações entre materiais de diversas características [37].

No trabalho de RODRIGUES *et al* [34], a matriz de base sintética é utilizada e o reforço de origem natural ou de origem sintética, a compatibilidade entre os materiais utilizados e o processo de produção destes compósitos, são as condicionantes para uma melhor resposta do material e suas propriedades associadas aos seus constituintes sendo as propriedades da fibra de reforço, fração volumétrica, disposição das camadas, geometria dos fios, podendo ser na forma de particulados ou de forma contínua. Enfim, compósitos poliméricos são estruturas em que uma matriz polimérica é reforçada por fibras, fios, e ou tecidos, onde frequentemente as fibras sintéticas mais utilizadas são as de vidro, carbono ou de aramida [38].

A interação das fibras com a matriz, influencia nas características finais do material, onde a disposição, o tamanho, a orientação e a concentração das fibras na matriz, fazem uma significativa diferença nas propriedades e na aplicação do compósito [39]. As fibras longas ou curtas podem ser dispostas na matriz de forma unidirecional ou bidirecional, podendo também ser trançadas como malha ou aleatoriamente. As disposições aleatórias dessas fibras configuram um material com tendências isotrópicas, ou seja, com independentes características da direção considerada diferente de um compósito com fibra unidirecional que, quando ensaiado com forças paralelas à fibra, terá resultados completamente diferentes se ensaiado com forças

perpendiculares à fibra [40]. A resistência em um compósito com fibras dispersas aleatoriamente é menor se comparado com a resistência na direção longitudinal da fibra de um compósito com fibras alinhadas. Por conseguinte, no material compósito, o parâmetro fração volumétrica desempenha um papel importante na caracterização de suas propriedades mecânicas, térmicas e elétricas.

Os estudos em compósitos eco sustentáveis utilizando fibra curta com orientação aleatória no plano 2D e unidirecionais de fibra longa feitos de matriz epóxi, reforçados por diferentes tipos de fibras de Sisal, mostraram que os materiais têm alta resistência mecânica, adequados para uso estrutural [41].

## 2.3 - MATERIAIS POLIMÉRICOS

### 2.3.1 - Resina Epóxi

Os polímeros epóxi são materiais muito utilizados nas aplicações industriais bem como amplamente utilizados em projetos de turbinas eólicas de grande escala reforçadas com fibra de vidro ou carbono [42]. Esta resina representa uma das classes mais versáteis, apresentando uma combinação singular de propriedades, como resistência à tração e tenacidade, resistência química, à umidade e à corrosão, boas propriedades térmicas, adesivas e elétricas além de boa usinabilidade [43]. Isto geralmente não é encontrado em outros materiais poliméricos [44]. O polímero epóxi, apresenta efetiva sensibilidade à temperatura, sendo sua aplicação atrativa e eficiente quando se deseja produzir materiais de engenharia [45]. A figura 2.8 mostra o esquema de reticulação da resina epóxi de maneira simulada, utilizada neste trabalho.

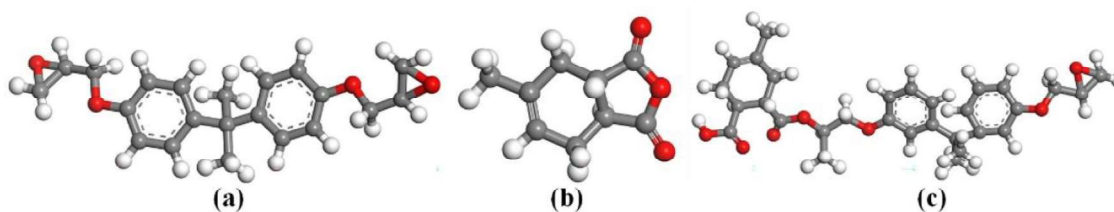


Figura 2. 8 - Reticulação simulada da resina epóxi.

Fonte: Adaptado de XIE *et al.* [46].

Além disso, as resinas epóxi podem reagir com as hidroxilas presentes nas fibras de planta, resultando em uma adesão adequada entre fibra/matriz, e conseqüentemente contribuir para o aumento das propriedades mecânicas do compósito [46].

## 2.4 - FIBRAS NATURAIS

As fibras naturais oriundas de vegetais são obtidas de várias partes de plantas de acordo AWAIS, et al. [10], e classificadas com base na parte em que foi extraída como sementes, fibras de caules, folhas e frutos, onde os constituintes básicos da fibra natural são a celulose, a hemicelulose e a lignina, de acordo com YAN e CHOUW, [47], e determinam as propriedades físicas das fibras, a celulose é a parte mais dura e mais forte da fibra, a hemicelulose está ligada a fibrilas de celulose por pontes de hidrogênio, são ramificadas, amorfas e de peso molecular menor do que a celulose. Sua estrutura aberta contendo muitos grupos hidroxila e acetila, é solúvel em água e é higroscópica. A lignina é formada por ligações complexas aromáticas, são também higroscópicas e amorfas, mas tem a menor absorção de água dos componentes da fibra natural, a lignina e a pectina atuam principalmente como agentes de ligação.

As disposições dos componentes químicos de cada fibra são alinhadas ao longo da parede celular constituída por camadas, que são denominadas de primárias e secundárias.

A Figura 2.9 mostra esquematicamente, a estrutura da parede de uma fibrila a partir da fibra natural.

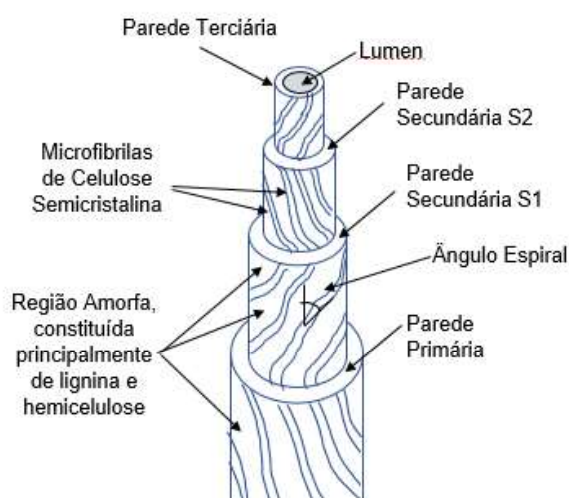


Figura 2. 9 - Estrutura natural da fibra.

Fonte: adaptado SREENIVAS, *et al.*[48]

Uma variedade de fibras naturais está disponível na natureza como linho, cânhamo, juta, sisal, quiabo, coco entre outras [48]. As fibras naturais apresentam suas estruturas de comprimento alongado de seção transversal vazada e arredondada, podem estar distribuídas por todo o vegetal, podendo ser classificadas de acordo com a origem anatômica como: fibras de talo, fibras de folha, fibras de lenho e fibras de superfície e podem ser utilizadas como reforço na matriz polimérica [49].



Fibras naturais podem ser oriundas de fontes animais, minerais e vegetais. Porém, somente as fibras vegetais se mostram de fato sustentáveis e renováveis em abundância, sem causar danos ao meio ambiente, como a exploração de minério e sem o desequilíbrio e sofrimento da fauna com a retirada da fibra de peles de animais. As fibras baseadas em plantas como mostrada na Figura 2.9, são obtidas através da retirada à mão associada a outro processo, como secagem ou maceração, após a extração. Isso já se torna em uma substancial vantagem comparada com as etapas industriais que existem na fabricação de fibras sintéticas[50].

A Figura 2.10 mostra algumas fibras naturais de plantas que são obtidas de forma manual, como a fibra de juta.

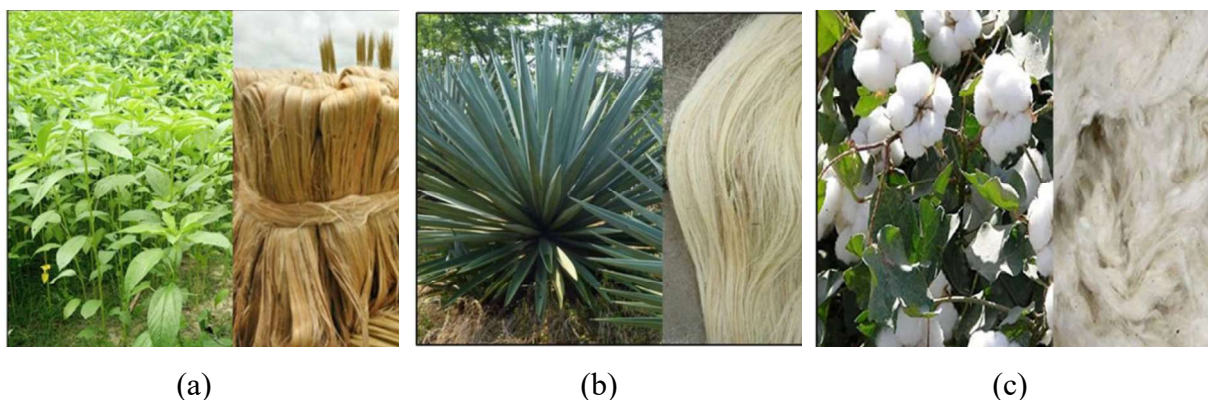


Figura 2. 10 - (a) Fibra de juta, (b) fibra de sisal e (c) fibra de algodão.

Fonte: adaptado, [50]

As fibras são compostas principalmente de três constituintes: celulose, hemicelulose e lignina. Outros componentes frequentemente encontrados, mas em menores concentrações que são ceras, pectina, óleos, amidos e substâncias solúveis em água, entre outros [50];. Devido à sua estrutura interna complexa e muitos componentes, as fibras naturais são consideradas um composto por si mesmas, e cada espécie de planta possuem diferentes arranjos e concentrações desses constituintes [51]. A combinação desses constituintes em uma fibra elementar ou parede da célula vegetal é complexa e em camadas. A parede primária (externa) é composta por uma rede de microfibrilas de celulose dispostas aleatoriamente ligado a uma fase amorfa de hemicelulose e lignina, que atuam como matriz para os feixes de celulose. Na parede secundária interna, três camadas estão geralmente presentes e em cada uma as microfibrilas de celulose são dispostas de forma helicoidal em relação ao eixo da fibra elementar [52].

### 2.4.1 - Fibra De Juta

Dentre as fibras naturais com potencial de aplicação, de acordo RODRIGUES *et al.*, [34], destaca-se a Juta, *Corchorus Capsularis*, mostrada na Figura 2.6, fibra originária da Índia e cultivada intensamente na região amazônica juntamente com a malva, onde é semeada as margens dos rios amazônicos. Em seu processo de cultivo se emprega vários tipos de mão de obra, inclusive na sustentabilidade do ribeirinho [34]. A figura 2.11 mostra a fibra de juta fornecida pela Industria Têxtil de Castanhal-PA, na fase antes do processo de limpeza e cardeamento e a fibra de juta após o processo de cardeamento.



Figura 2. 11 - a) Fibra de juta in natura; b) fibra de juta após cardeamento.

Fonte: Próprio autor.

A fibra de juta, *Corchorus Capsularis*, tem como seu componente principal a celulose, que possui boa afinidade a corantes, é higroscópica, regulando a umidade em 12%, o que a torna a matéria prima ideal para a sacaria, evitando tanto o ressecamento quanto a fermentação do produto acondicionado [34]. Esta fibra se distingue pela robustez e pela cor branca, sendo amplamente cultivada no Norte do Brasil em virtude do clima quente e úmido da região amazônica. A fibra é um feixe entre 50-100  $\mu\text{m}$  de fibras elementares da ordem de 10-20  $\mu\text{m}$ , chamadas de macrofibrilas unidas em uma matriz de lignina e hemicelulose. Essas macrofibrilas são materiais compósitos feitas de diversas camadas de microfibrilas de celulose, que são responsáveis pelas propriedades mecânicas da fibra [53]. Esta fibra tem uma alta relação resistência/peso, alta relação de aspecto e boas propriedades mecânicas e térmicas [54]. Portanto, de acordo RODRIGUES *et al.* [34], é uma fibra natural lignocelulósica que vem sendo muito



investigada e utilizada em reforços de materiais compósitos poliméricos; e muito utilizada em forma de tecido com vários tipos de tramados. [55]

## 2.5 - MODELAMENTO APLICADO A CONSTRUÇÃO DA PÁ EÓLICA

### 2.5.1 - Modelo da teoria do momento da Pá (BEM)

A teoria do momento de elemento de pá (BEM) compila a Teoria do momento com a Teoria do elemento de pá, utilizada para prever a eficiência ideal e determinação das forças que atuam no rotor para produção de movimento do fluido, determinando as forças que atuam na lâmina de acordo a sua geometria [56].

O modelo matemático da pá aplicado neste trabalho tem como base a Teoria da quantidade de movimento angular do elemento de pá de acordo VAZ *et al* [57], onde fluxo de ar que passa através do rotor de uma turbina eólica, atua na superfície da pá determinando através das equações de fluxo de Bernoulli, largamente utilizado para obtenção das propriedades das pás de turbinas eólicas desenvolvidas atualmente.[58].

Como um rotor de turbina eólica extrai energia do vento, de acordo BUCK *et al.*, [59], as características do fluxo de ar a jusante do rotor são modificadas; a energia média cinética média do fluxo de ar é reduzida e a energia cinética turbulenta é aumentada. Observando que através da teoria do momento axial que relaciona as velocidades a montante e a jusante do disco rotor, com o desempenho da turbina; obtém-se uma formação da esteira imediatamente a jusante do rotor.

O processo pelo qual isso ocorre, pode ser observado a partir do volume de controle, para tratamento inicial, são aplicadas as seguintes suposições:

- Não há resistência de atrito nas lâminas.
- Um tubo de fluxo bem definido separa o fluxo através do disco de fora do disco.
- As pressões estáticas a frente e atrás do rotor, são iguais a pressão estática de fluxo livre.
- A carga axial é uniforme no disco rotor.
- Nenhuma rotação é transmitida ao fluxo pelo disco.

A medida que o fluxo de ar passa pela área real onde entra em contato com o disco rotor, a altura manométrica total diminui; a diminuição total da carga é devida a uma combinação de mudanças de pressão,  $P$ , e a pressão dinâmica.

$$P = 0,5 * \rho * U^2$$

Onde  $\rho$  é a massa específica do fluido e  $U$  a velocidade média de vento.

A Figura 2.11 mostra uma massa de ar, que forma uma superfície limite, pode ser desenhada se estendendo a montante e a jusante do disco rotor.

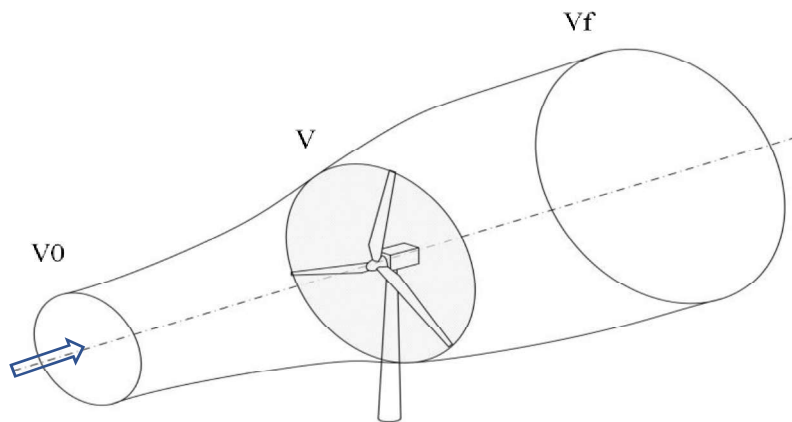


Figura 2.12 - Tubo formado pela passagem de ar através do rotor de turbina.

Fonte: adaptado de MENON, *et al* [58].; THUMTHAE, [60].

O tubo formado pelo deslocamento do ar que passa pelas pás da turbina, observado como um volume de controle, teoricamente, com as velocidades  $U=V_0$ ,  $V$  e  $V_f$ , identificadas respectivamente, velocidade do vento a montante do disco rotor ( $V_0$ ), velocidade do vento no disco rotor ( $V$ ) e a jusante do disco rotor ( $V_f$ ). [61]

De acordo com VAZ *et al.* [62], as turbinas operam com velocidades variáveis, e para manter a eficiência elevada por uma larga faixa de velocidade de vento, se faz necessário melhoramentos aerodinâmicos do rotor eólico com a implementação de dispositivos de controle de passo e orientação, que dependendo da localidade, permitem que as turbinas operem com pequenas variações na velocidade de eixo, como as turbinas de grande porte. As lâminas mais longas adicionam peso, criando uma maior necessidade de materiais mais leves para compensar isso [43]. Os materiais compósitos reforçados com fibra tendem a ficar por cima, e vários tipos de compósitos são usados para os principais componentes estruturais em turbinas eólicas modernas como as pás [63].

O trabalho de MUHSEN *et al.* [64] projeta e otimiza o desempenho de uma turbina eólica de eixo horizontal para obter um coeficiente de potência (CP) superior a 40% a uma velocidade de vento baixa de 5 m/s. são utilizados dois perfis simétrico otimizando os parâmetros da pá que influenciam no desenho. Os perfis utilizados foram os aerofólios S1210 e S1223.

Ainda de acordo com MUHSEN, *et al.*, [64], as pequenas turbinas tendem a apresentar baixo desempenho, devido ao baixo número de Reynolds em função do tamanho do rotor e baixa velocidade do vento. Portanto, o processo de otimização selecionará diferentes aerofólios e

extrairá seu desempenho nas condições de projeto para encontrar as melhores seções que formam o projeto ideal da lâmina. O processo de otimização permite investigar o desempenho do projeto final e emprega a teoria do momento do elemento da pá, com três pás e diâmetro de 4 m, um cubo de raio de 20 cm, uma relação velocidade de ponta de 6,5 m/s e podendo produzir 650 W com um coeficiente de potência de 0,445 e vento com velocidade de 5,5 m/s, e também uma potência de 1,18 kW de coeficiente de potência de 0,40 a uma velocidade do vento de 7 m / s. A Figura 2.13 mostra o diagrama de forças atuantes no perfil de pá [65].

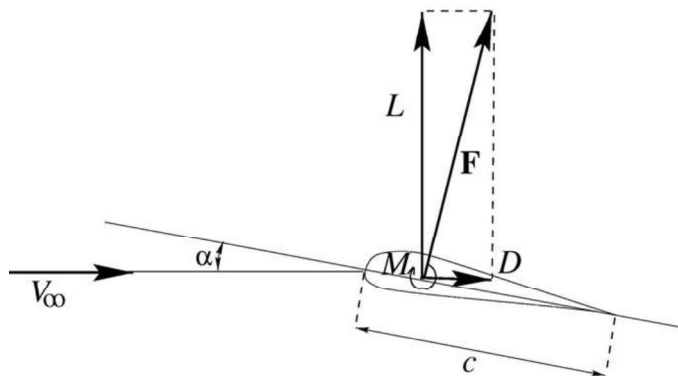


Figura 2. 13 - Forças atuantes no perfil de pá eólica 2D.

Fonte: adaptado de SANG *et al.* [65].

Sendo assim, a velocidade do vento  $V_0$ , entra em contato direto com o perfil no bordo de ataque, o nariz do perfil, e incide em toda sua extensão até o bordo de fuga, sua extremidade posterior; a distância entre o bordo de ataque e o bordo de fuga é conhecido pelo comprimento da corda do perfil,  $c$ ; o ângulo de ataque  $\alpha$ , e' o ângulo de inclinação do perfil em relação a direção de vento incidente.

A abordagem mais comumente usada para descrever a aerodinâmica das pás de turbinas eólicas é o método BEM (*Blade Element Moment*); que entre os perfis S1210 e S1223, constata todos os critérios em termos de alta relação  $C_l/C_d$  em números de Reynolds baixos e fornece um desempenho relativamente alto, dadas as limitações [64].

No estudo de MUHSEN, *et al.*, [64], a força tangencial que resulta na lâmina é dada pela equação (1). A força tangencial depende da corda do aerofólio, da densidade do ar, da velocidade relativa do vento, do ângulo de inclinação global, do ângulo de torção local, do coeficiente de sustentação e do coeficiente de arrasto. Além disso, a força tangencial é obtida por uma combinação das forças de arrasto e sustentação utilizando a expressão

$$dfT = 0,5\rho c V^2_{rel}(C_L\cos(\beta) + C_D\sin(\beta))dr \quad (2.1)$$

Onde  $\rho$  é a densidade do ar,  $c$  é o comprimento da corda,  $V_{rel}$  é a velocidade relativa de vento entre a seção da pá,  $CL$  é o coeficiente de sustentação,  $CD$  é o coeficiente de arrasto e  $\beta$  é o ângulo relativo entre os coeficientes de sustentação e arrasto.

A força tangencial é o produto da força pela distância radial entre o eixo de rotação e o raio interno do rotor. Portanto, para encontrar o torque mecânico no perfil da pá, pode-se utilizar a expressão

$$d\tau T = dfT r = 0,5\rho c r V^2_{rel}(CL\cos(\beta) - CD\sin(\beta))dr \quad (2.2)$$

O coeficiente de torque pode ser expresso:

$$Cq(\lambda, \beta) = CL\cos(\beta) - CD\sin(\beta) \quad (2.3)$$

Assim, o torque mecânico atuando em um perfil de lâmina infinitesimal pode ser dado por

$$d\tau T = 0,5\rho c r V^2_{rel} Cq(\lambda, \beta)dr \quad (2.4)$$

Onde  $c$  representa a área da seção transversal no raio  $r$ . a relação entre o coeficiente de potência  $C_p$  e o coeficiente de torque  $C_Q$  satisfaz

$$C_Q = C_p/\lambda \quad (2.5)$$

As equações anteriores foram escritas em termos do ângulo de inclinação  $\beta$  e da razão de velocidade de ponta  $\lambda$ , que é definida como

$$\lambda = \omega R/V_{rel} \quad (2.6)$$

A potência mecânica do HAWT em watts pode ser obtida integrando o torque mecânico da lâmina multiplicado pela velocidade de rotação das lâminas e o número de lâminas  $N$ :

$$P = N \omega \int_{r_{Hub}}^R d\tau T dr \quad (2.7)$$

Onde  $R$  é o raio do rotor,  $N$  é o número de pás e  $\omega$  é a velocidade de rotação. A velocidade relativa pode ser encontrada da seguinte forma:

$$V_{rel} = V\sqrt{(1-a)^2 + (r\omega(1+a')/V)^2} \quad (2.8)$$

Onde  $a$  é o fator de indução axial,  $a'$  é o fator de indução radial e  $V$  representa a velocidade do vento a montante da linha do rotor. Consequentemente, o ângulo da velocidade relativa do vento pode ser expresso como:

$$\tan(\theta) = V(1-a)/(r\omega(1+a')) \quad (2.9)$$

### 2.5.2 - Modelo da Teoria Clássica dos Laminados (TCL)

Projetar laminados compósitos leves é desafiador, devido ao grande número de variáveis discretas envolvidas, por exemplo, número de camadas e orientações de fibra, que geralmente são restritos a um conjunto de valores pré-definidos [66].

A Teoria Clássica do Laminado é aplicada na análise de desempenho do laminado avaliando a rigidez estrutural. Para os estudos de placas as hipóteses de Kirchhoff e os estudos de cascas de Kirchhoff-love usam-se como hipóteses as seguintes questões:

O laminado consiste em lâminas perfeitamente coladas, sem deslizamento;

A camada de resina que é usada para unir as lâminas é infinitesimalmente fina;

O laminado é considerado delgado, uma placa ou casca tem sua espessura fina em relação às demais dimensões;

a) Uma linha originalmente reta tende a permanecer reta e perpendicular à superfície de referência quando o laminado for estendido ou flexionado;

b) Os segmentos normais às superfícies de referência são consideradas inextensíveis, ou seja, têm comprimentos constantes.

As suposições indicam que o deslocamento transversal é independente da espessura e a deformação normal transversal é zero, de forma que as deformações de cisalhamento transversal também são zero.

A partir do conhecimento das propriedades elásticas da lâmina, a matriz que expressa a relação entre as tensões normais e cisalhantes e as deformações, no estado plano de tensões (EPT), denota-se matriz de flexibilidade e é representada pela letra  $[S]$ , que para materiais ortotrópicos, se apresenta conforme Equação 2.10:

$$[S] = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Dessa forma, a relação tensão-deformação, em EPT, para materiais ortotrópicos, pode ser expressa, nas direções principais, como mostra a Equação 2.11.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [S] \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

De posse da matriz de flexibilidade  $[S]$ , a matriz reduzida de rigidez denominada  $[Q]$  pode ser calculada com a sua inversa. Conforme mostra a Equação 2.12.

$$[Q] = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & -\frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{-\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Dessa forma, pode-se estabelecer a relação tensão-deformação calculada a partir do conhecimento das deformações no plano, em EPT, como mostra a Equação 2.13.

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = [Q] \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

A Equação 2.4, relaciona a matriz de rigidez  $[Q]$  e as deformações  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}$  nas direções principais, obtendo assim as tensões normais e de cisalhamento no plano.

De acordo WANG, L, [67], os materiais considerados ortotrópicos, na Teoria Clássica do Laminado (TCL), tem como propriedades a relação de tensão entre as coordenadas principal e coordenadas global, que para alguns materiais são encontrados através do modulo de elasticidade ou módulo de Young utilizando a equação 2.14.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad 2.14$$

Onde seus componentes são:

$$Q_{11} = S_{22} / (S_{11}S_{22} - S_{12}^2) \quad 2.15$$

$$Q_{12} = -S_{12} / (S_{11}S_{22} - S_{12}^2) \quad 2.16$$

$$Q_{21} = S_{11} / (S_{11}S_{22} - S_{12}^2) \quad 2.17$$

$$Q_{66} = 1 / S_{66} \quad 2.18$$

As relações Tensão-deformação para as coordenadas principais do material podem ser transformadas em um sistema de coordenadas global

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q][R][T][R]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad 2.19$$

Onde  $[T]$  é a matriz de transformação,  $[Q]$  é a matriz de rigidez e  $[R]$  é a matriz de Reuters., de forma que:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2(\alpha) & \sin^2(\alpha) & -2\sin(\alpha)\cos(\alpha) \\ \sin^2(\alpha) & \cos^2(\alpha) & \sin(\alpha)\cos(\alpha) \\ \sin(\alpha)\cos(\alpha) & -\sin(\alpha)\cos(\alpha) & \cos^2(\alpha) - \sin^2(\alpha) \end{bmatrix} \quad 2.20$$

e,

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad 2.21$$

E finalmente tem-se a relação da tensão em coordenadas de material principal para um material ortotrópico sob condição de tensão plana que pode ser expressa com as equações 2.22 e 2.23.

$$E_x^{Lam} = \left( \frac{1}{E_1} \cos^4(\alpha) + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \sin^2(\alpha) \cos^2(\alpha) + \frac{1}{E_2} \sin^4(\alpha) \right)^{-1} \quad 2.22$$

$$G_{xy}^{lam} = \left( \left[ \frac{4}{E_2} + \frac{4+8\nu_{12}}{E_1} - \frac{2}{G_{12}} \right] \sin^2(\alpha) \cos^2(\alpha) + \frac{\sin^4(\alpha) + \cos^4(\alpha)}{G_{12}} \right)^{-1} \quad 2.23$$

### 2.5.3 - Modelo da Teoria do Fluxo de Cisalhamento de Bradt Batho Extendido (EBSFT)

Para avaliar as tensões e deformações em estruturas de paredes finas fechadas com seção transversal sob torção como no caso da pá eólica, a Teoria do Fluxo de Cisalhamento de Bradt-Batho Extendida (*Extended Bradt-Batho Shear Flow Theory – EBSFT*) é comumente utilizada. Para tal supõe-se que a tensão de torção seja distribuída de maneira uniforme pela espessura da seção transversal como sugere Kirchoff-love.

O momento torsor  $M$  é expresso conforme Equação 2.24.

$$M = 2(q_1 A_1^* + q_2 A_2^*) \quad 2.24$$

Na equação de momento torsor,  $q_1$  e  $q_2$  representam o fluxo de cisalhamento da célula 1 e da célula 2, respectivamente e  $A_1^*$  e  $A_2^*$  são as áreas delimitadas pela linha média da parede da célula, respectivamente.

Os ângulos de torção ( $\theta_1$  e  $\theta_2$ ) das células 1 e 2 respectivamente são expressos através das equações 2.25 e 2.26.

$$\theta_1 = \frac{1}{2GA_1^*} (q_1 \oint_1 ds/t - q_2 \int_{12} ds/t) \quad 2.25$$

$$\theta_2 = \frac{1}{2GA_2^*} (q_2 \oint_2 ds/t - q_1 \int_{21} ds/t) \quad 2.26$$

Considerando que os ângulos de torção das duas células são iguais, obtém-se que:

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta \quad 2.27$$

Reformulando as equações 2.24 e 2.25, obtemos as equações 2.28 e 2.29

$$\delta_{11} q_1 + \delta_{12} q_2 - 2A_1^* \theta = 0 \quad 2.28$$

$$\delta_{12} q_1 + \delta_{22} q_2 - 2A_2^* \theta = 0 \quad 2.29$$

Onde  $\delta$  representa a flexibilidade de empenamento.

$$\delta_{11} = \oint_1 \frac{ds}{Gt} \quad 2.30$$

$$\delta_{22} = \oint_2 \frac{ds}{Gt} \quad 2.31$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = - \int_{12} \frac{ds}{Gt} \quad 2.32$$

A partir da utilização do produto matricial as equações (2.28), (2.29) e (2.32) podem ser descritas em formato de matriz nas Equações (2.33), (2.34), (2.35) e (2.36), onde  $M$  o momento

torsor,  $A^*$  a áreas delimitada pela linha média da parede da célula,  $q$  o fluxo de cisalhamento da parede da célula e  $\delta$  a flexibilidade de empenamento respectivamente.

$$M = 2[A^*]^T [q] \quad 2.33$$

$$[A^*] = \begin{bmatrix} A_1^* \\ A_2^* \end{bmatrix} \quad 2.34$$

$$[q] = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} \quad 2.35$$

$$[\delta] = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{bmatrix} \quad 2.36$$

Desta forma a rigidez torsional é dada pela Equação 2.37.

$$GJ = \frac{M}{\theta} \quad 2.37$$

Substituindo as equações (2.34) e (2.36) na Eq. (2.37) obtém-se a rigidez torsional para uma seção transversal de pá eólica com cisalhamento em qualquer ponto, através da Equação (2.38)

$$GJ = 4[A^*]^T [\delta]^{-1} [A^*] \quad 2.38$$

## 2.6 - MATERIAIS MODELADOS APLICADOS EM PÁS EÓLICAS

No trabalho de BAGHERPOOR, *et al.*[20], a pá do rotor é modelada pelo método dos elementos finitos (FEM) e sua implementação baseada na combinação da TCL com a teoria do cisalhamento de Euler-Bernoulli, aplicada em vigas mistas, a lâmina é representada como uma viga em balanço sob a influência de dobra sem flexão lateral, deflexão axial e torção elástica, onde o acoplamento adicional entre flexão, extensão e torção é considerado, devido aos deslocamentos entre o centro de cisalhamento da viga, o centro de tensão e o centro de massa do eixo de passo da lâmina. As seções transversais da viga são assumidas com paredes finas, fechadas e simples ou multicelulares e a periferia de cada seção transversal da viga é como uma conexão de laminados compostos planos [20]. A Figura 2.14 mostra a seção transversal do laminado compósito.



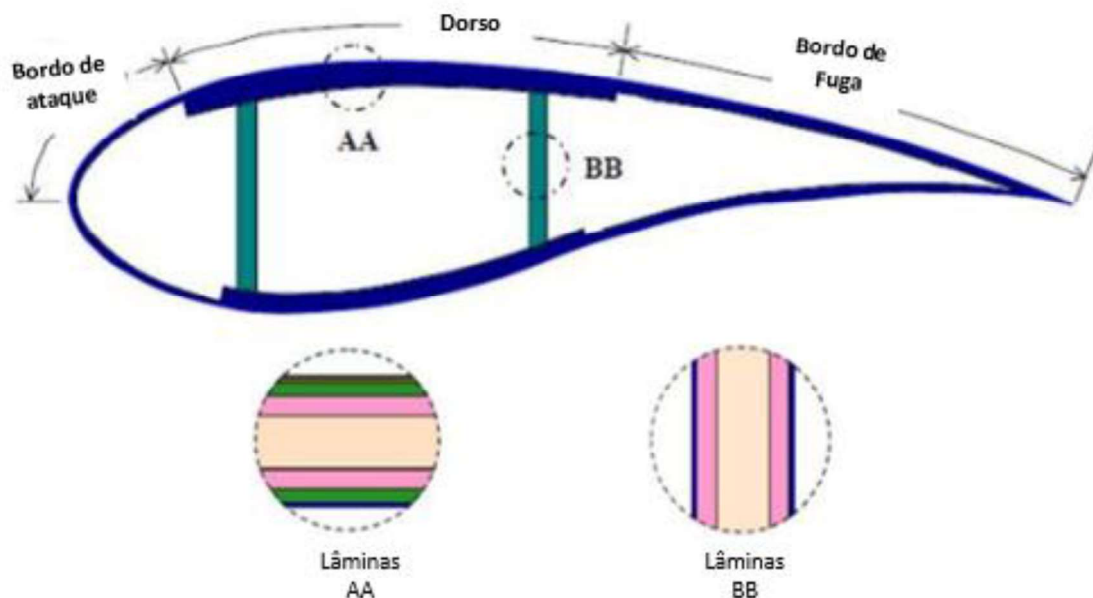


Figura 2. 14 - Seção transversal de uma lâmina em compósito.

Fonte: adaptado de BAGHERPOOR, *et al.*[20].

No estudo de X. CHEN [68], é observada uma degradação estrutural do compósito numa pá de 47 m de extensão, os testes foram acompanhados utilizando sensores de carga do tipo extensômetros eletrônicos, *strain gauges*, com vários materiais envolvidos no corpo da pá eólica, sendo observada uma seção transversal típica e em destaque um ponto a 22 metros da base utilizando materiais como madeira balsa, espuma de PVC aplicados de forma multidirecionais como mostra a Figura 2.9.

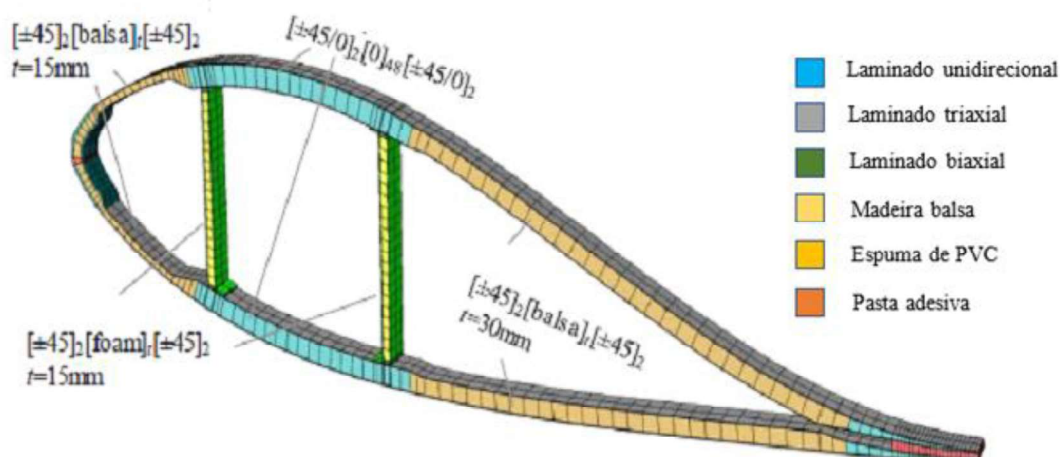


Figura 2. 15 - Mostra o perfil de pá na estação 22 m.

Fonte: adaptado de CHEN *et al* [68]

CHEN *et al.*[68], , aplicou uma carga estática para rotacionar em eixo próprio a lâmina com 10 (dez) camadas de laminado, reforçados com fibras de vidro tri axial, aplicados por infusão de resina, seguindo aos requisitos de teste o padrão internacional de teste IEC 64100-23; A configuração do carregamento resulta no lado superior em compressão e o lado inferior da pá em tensão, onde são obtidas e registradas por células de carga montadas em cabos de aço que transferem as cargas puxando por guinchos para os lados de compressão e de tração implantados na superfície externa ao longo da extensão da lâmina registrando assim a tensão local. Três câmeras de vídeo são colocadas em pontos diferentes para capturar o processo de colapso da lâmina, como mostra a Figura 2.9.

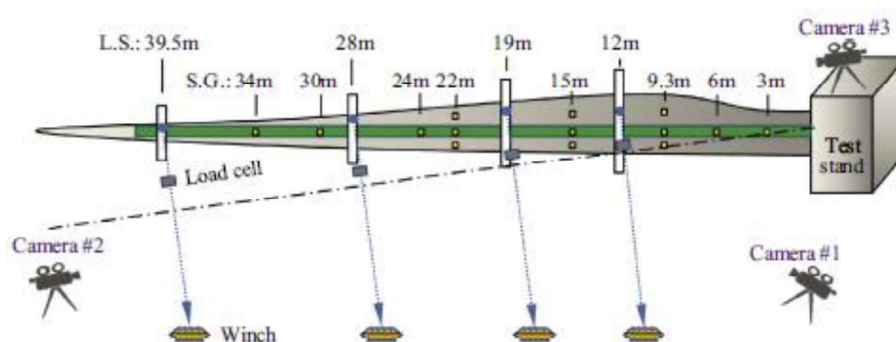


Figura 2. 16 - Posicionamento de transdutores na sua extensão e câmeras para registrar o comportamento da pá eólica.

Fonte: adaptado de CHEN, *et al.*, [68]

A combinação do carregamento se aproxima de uma condição realista de carga extrema, prevista na vida útil da estrutura e observa que o momento de torção é menor do que o momento fletor e que os momentos torsor (7648 kN.m) e fletor (137 kN.m) máximos, respectivamente ocorrem na raiz da lâmina.

Outro estudo CHEN, *et al.* [68], mediu-se a rigidez de flexão da lâmina, onde foram instalados sensores de carga nas seções de 19m, 28m e 39,5m,

A figura 2.10 mostra o posicionamento dos transdutores e ao mesmo tempo foi aplicada uma força  $P$  de tração, na seção 39,5m. para medir as deflexões  $\delta$  durante os testes utilizando transdutores de deslocamento. No estudo de falha de BENDER, *et al* [69], o foco foi quantificar o efeito de enrugamento de uma peça cônica inserida no laminado de matriz polimérica reforçada com fibra de vidro, sendo confeccionada pelo processo de moldagem por transferência de resina assistida a vácuo (VARTM), onde verificou-se uma viga I e outra viga C combinadas. A avaliação do estado de tensão na junta entre as longarinas e a alma de cisalhamento, nas vigas I, foram feitos por testes de flexão de 4 pontos e a viga tipo C por flexão assimétrica de 3 pontos [70].

O trabalho de HASELBACH, *et al* [45] mostra falhas de nas áreas de interface, ao simular uma pá de turbina eólica do tipo DTU 10 MW, estas delaminações incorporam uma separação local das estruturas compostas laminadas e conseqüentemente, podem levar a uma redução da rigidez e resistência estrutural devido a isso, essas falhas em estruturas compostas laminadas são consideradas o tipo mais crítico de dano em que estruturas compostas sob compressão podem experimentar. A Figura 2.16 mostra as delaminações encontradas na longarina da lâmina

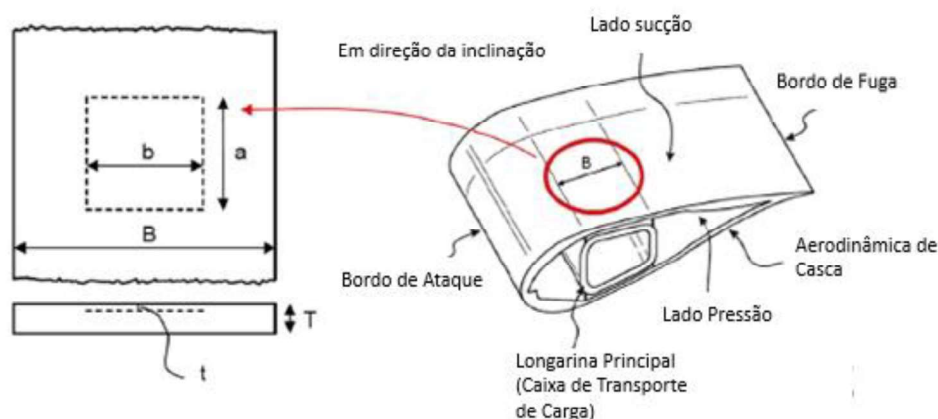


Figura 2. 17 - Delaminações encontradas dentro da longarina principal da lâmina.

Fonte: adaptado de HASELBACH, *et al* [45]

As delaminações encontradas nas pás com fibras dispostas unidirecionais a  $0^\circ$ , tiveram forma retangular, onde as áreas da região central foram observadas na pá e tiveram variação de tamanho e posição ao longo da espessura, [45].

## 2.7 - PROCESSO DE INFUSÃO A VÁCUO

O processo de infusão a vácuo (VIP) é utilizado para a fabricação de grandes estruturas compósitas e sua popularidade se deve ao seu baixo custo relacionado ao conjunto ferramental e a segurança ambiental (o processo elimina mais do que 90% dos compostos orgânicos voláteis emitidos por resinas de poliéster insaturadas). Além disso, o baixo envolvimento do operador aumenta a reprodutibilidade do processo em comparação com as técnicas de molde aberto como hand lay-up ou spray-up e os componentes são de alto teor de fibras, com até 60% em volume [5].

A técnica VIP utiliza uma técnica onde o polímero é inserido através da câmara com a utilização de uma bomba de vácuo, acoplada em condutos flexíveis, e inicialmente afixados por adesivo no entorno do molde, de modo a fazer saturar as fibras depositadas no molde, pela resina líquida em solução

A estrutura do processo de infusão a vácuo é montada em diversas superfícies, tem estrutura disposta em partes como (01) molde, (02) entrada de resina, (03) câmara de vácuo, (04) saída de resina, (05) sistema de controle de pressão e excesso de resina, (06) bomba de vácuo. A figura 2.19 mostra as partes de identificadas do processo de infusão de resina

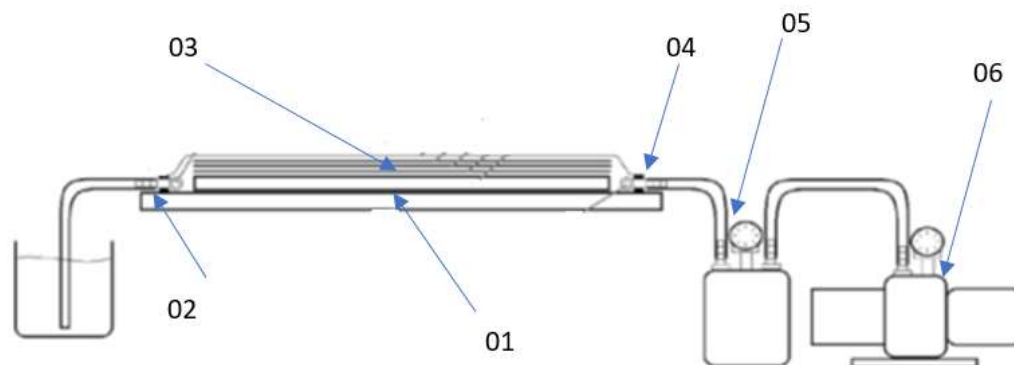


Figura 2. 18 - Processo de infusão a vácuo.

Fonte: adaptado de RODRIGUES, *et al* [34].

Os condutos são afixados na borda do molde, um na entrada de resina e o outro retirando o excesso de resina do sistema [34]. Para a inserção de resina é utilizado um recipiente conectado a mangueira de entrada de resina na bolsa de vácuo, o vácuo produzido pela bomba transfere a resina em estado líquido para o interior da câmara e que é absorvida pela fibra de reforço. A bomba de vácuo utilizada pode alcançar a 760 mmHg equivalente a 1 atm de vácuo, após a bolsa de vácuo é acoplado um recipiente que se refere a uma armadilha para a resina, de forma que não permita entrar em contato com a bomba de vácuo chegando a causar danos [34].

Pressupondo que no modelo tecno-econômico as lâminas sejam fabricadas usando moldagem por transferência de resina assistida a vácuo, pois isso, juntamente com a laminação pré-impregnada, é responsável por mais de 90% da fabricação de lâminas em todo o mundo [71].

A laminação de pré-impregnação, é uma técnica utilizada para afixar as fibras antes de acomodá-las em sua posição definitiva, utilizando a mesma resina envolvida no compósito, e logo é deixado na posição de aplicação do compósito. São calculadas as frações volumétricas de resina utilizando a teoria micromecânica dos laminados. A fração de fibras e de resina são calculadas com base na quantidade de fibras que estiverem envolvidas na peça, definidas pela fração volumétrica de fibras do compósito.

A quantidade de resina utilizada durante o processo de infusão, é estimada do volume total da fibra composta com base nos cronogramas do laminado e usa as densidades específicas dos materiais constituintes (fibra de vidro e resina. Estes valores são utilizados no modelo para

calcular a espessura geral do compósito e o uso do material. Para tratamento inicial, num regime sob tensão são observados os resultados a partir do comportamento da lâmina e do laminado.

## CAPÍTULO 3

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo tem como objetivo apresentar os materiais e procedimentos experimentais utilizados para associar fibras de juta à resina epóxi. Para tal, ele será dividido em três seções: inicialmente discorre sobre os materiais utilizados na pesquisa e logo a estrutura processual de modelamento utilizado, na seção 3.1 será abordada a matéria-prima e sua caracterização, na seção 3.2 aborda-se a matriz polimérica destacando a resina utilizada para a confecção do binômio fibra natural de juta e resina epóxi, também realizada uma análise física das fibras da juta, em sequência, na seção 3.3 são abordados os ensaios mecânicos realizados. As Tabelas 3 e 4 apresentam os materiais para a produção do compósito e da pá eólica.

Tabela 3 - Matérias prima para construção do compósito fibra de juta e epóxi.

PRODUTOS PRIMÁRIOS	FUNÇÃO
Juta: Espécie <i>Corchorus capsularis</i>	Reforço
Resina Epóxi: tipo éter diglicidílico do bisfenol	Matriz
Isoforonadiamina e álcool benzílico	Catalisador

Tabela 4 - Matérias prima para construção da pá eólica.

PRODUTOS PRIMÁRIOS	FUNÇÃO
Dióxido de Titânio	Preparação do gel coat
Carbosil	Preparação do gel coat
Talco	Preparação do gel coat
Álcool Polivinílico (PVA)	Limpeza da superfície de vácuo na produção de CPs
Peel ply A30/900	Manta desmoldante no processo de infusão
Filme perfurado	Filme de absorção e distribuição de resina no processo de infusão
Tela Air Flow	Tela de controle de fluxo no processo de infusão
Manta de feltro	Freio de fluxo de resina
Mangueiras de 12,7mm x 2mm	Condução do fluxo de resina para a bolsa de vácuo
Filme de vácuo	Formação da bolsa de vácuo
Resina epóxi: tipo éter diglicidílico de bisfenol	Aglomerante da fibra de reforço no compósito
Endurecedor: Isoforonadiamina e álcool benzílico	Promoção de endurecimento da resina, Incitador de cura
Folha de Compensado	Formação do perfil aerofólio da pá
Folha de PVC	Prancha desmoldante da pá
Folha de Poliestireno Expandido (PS)	Preenchimento dos espaços vazios da pá
Lâmpada de 150 Watt	Cortador
Corda de violão	Cortador

Os materiais apresentados na Tabela 4 foram utilizados em etapas, que discorre no texto do trabalho mostrando em cada etapa a sua aplicação. Para obter uma visão geral das alternativas de produção do material compósito e da pá eólica, é mostrado o fluxo de processamento no diagrama. A Figura 3.1, apresenta o fluxograma do processo para fabricação do material compósito aplicado na pá eólica construída.

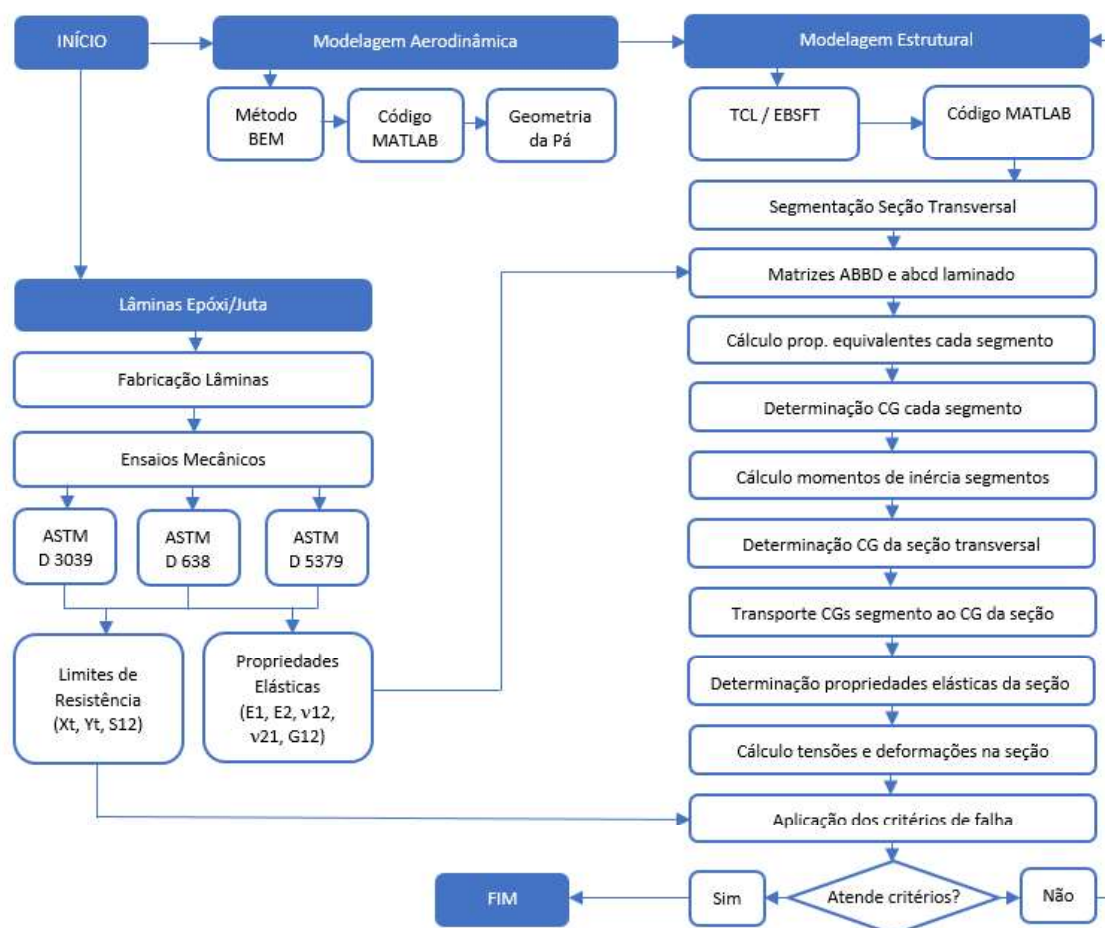


Figura 3. 1 - Fluxograma do modelo matemático para obtenção das propriedades do laminado

Fonte: Próprio autor

O fluxograma da Figura 3.1, apresenta o processo de fabricação da pá eólica com revestimento em material compósito, e obedece a sequência de atividades. Inicialmente foram feitos os desenhos de perfil aerofólio, obtido da plataforma [www.airfoiltolls](http://www.airfoiltolls), na sequência, utilizando o método BEM, através de modelamento matemático foram encontradas as forças atuantes na estrutura da pá, próprios do perfil aerofólio. As propriedades do material compósito, necessárias para a análise do laminado foram inseridos utilizando as propriedades da fibra de reforço e da matriz, obtidas nos ensaios mecânicos executados anteriormente, assim, foram inseridos no modelamento estrutural do laminado, obtidos o número de camadas e a orientação da fibra de reforço no compósito. Utilizando a Teoria Clássica do laminado juntamente com a

Teoria de Bradt Batho Extendida, onde foram encontrados os momentos de inércia e momentos fletores e torsões do laminado aplicado no perfil de pá.

### 3.1 - MÉTODO CONSTRUTIVO DO PROTÓTIPO DE PÁ

A construção da alma da pá iniciou-se a partir da confecção de peças de isopor, denominadas estações do perfil. Estas foram plotadas em papel de formato A3, coladas em uma chapa de 2,1 x 1,20 m, em madeira de compensado. A Figura 3.2 mostra a etapa de confecção das estações em madeira de compensado, observando a sua posição na extensão da pá eólica.

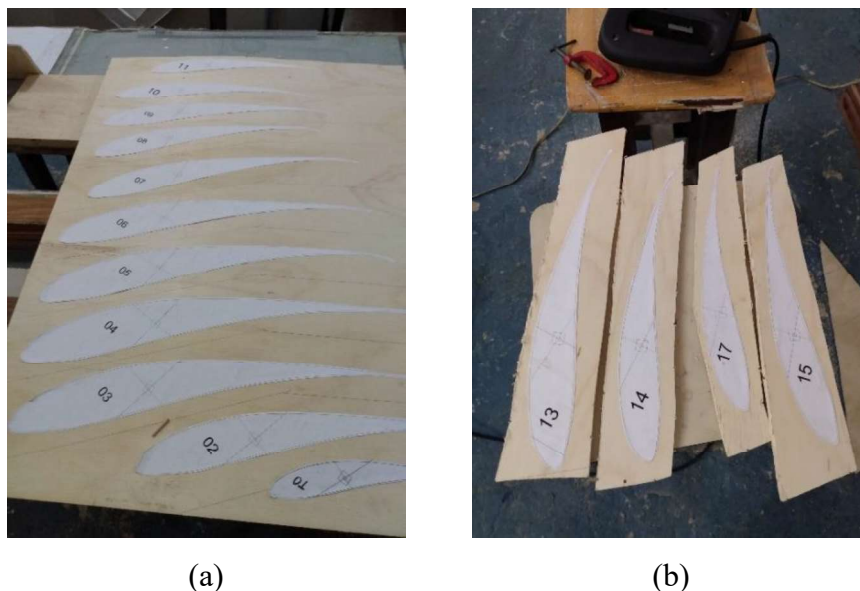


Figura 3. 2 - Confecção das estações de perfil aerofólio S1210, (a) as estações coladas e (b) em fase de recorte na madeira

Fonte: Próprio autor

As estações impressas em papel de tamanho A2 foram coladas na chapa de madeira nesta etapa separadas da chapa utilizando uma serra manual para madeira, e utilizando uma esmerilhadeira com disco de lixa, assim, foi-se obtendo o contorno do perfil de interesse, as peças foram identificadas numericamente e posicionadas na sequência de montagem. A Figura 3.3 mostra a sequência do posicionamento de cada estação na extensão, da pá eólica.





Figura 3. 3 - Alinhamento de 30 estações de pá eólica.

Fonte: Próprio autor

As estações da pá foram utilizadas como peça modelo para dar forma ao poliestireno expandido (PS), assim promovendo o formato da pá de perfil aerodinâmico S1210. Os formatos das estações referente em PS, foram colados entre si preenchendo os espaços vazios e se tornando por sua vez o contorno do laminado de fibra de juta aplicado posteriormente. Este polímero foi escolhido pela sua baixa densidade, fácil modelagem e principalmente por possuir boa interação com a resina epóxi, que é por sua vez comumente utilizada na construção de pás eólicas. O PS foi adquirido no comércio local em barras com dimensões 210 x 40 x 10 cm, e cortado acompanhando o contorno de cada estação, utilizando um cortador de isopor artesanal, fabricado em madeira, e corda de violão adaptado para o corte das peças de perfil complexo. A Figura 3.4 mostra uma estação confeccionada utilizando o cortador de isopor para possibilitar o contorno do perfil de pá.



(a)



(b)

Figura 3.4 - Confeção de preenchimento da pá, (a) recorte no perfil da estação, (b) cortador.

Fonte: Próprio autor

Foram confeccionados 30 perfis de isopor, e colados na sequencia construtiva da pá sendo da estação 1 a estação 30. A Figura 3.5 mostra a pá construída em isopor, pronta para o receber a cobertura de *gel coat*.

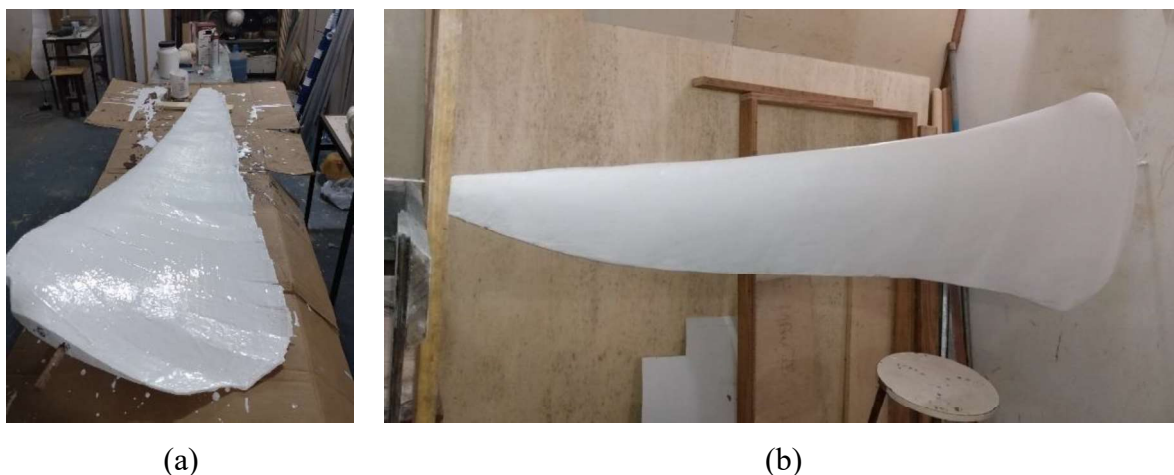


Figura 3. 5 - Cobertura da pá com gel-coat (a) após a aplicação (b) em fase de cura.

Fonte: Próprio autor

Após a montagem da pá eólica, foi aplicado em sua superfície cinco (05) camadas de gel-coat mostrado na Figura 3.5, utilizando talco, carbosil e dióxido de titânio, com proporções referentes à massa de resina de 20%, 10% e 3,5%, respectivamente, esta técnica se faz necessária para recebimento do laminado de casca que será aplicado por infusão de resina.

A aplicação do modelo matemático vem a colaborar para o desenvolvimento do laminado construído, utilizando os modelos BEM, TCL e EBSFT, para avaliar as propriedades e estruturais para cada seção transversal. Cada seção transversal será otimizada separadamente [28]. Por fim será implementado o perfil de pá S1210, a partir do trabalho de RUEDA, &, VAZ, [30], que mostra 30 (trinta) planos com distanciamento de 54,6 mm entre si obtendo um comprimento de pá de 1638 mm, para a construção adaptada do aerofólio de perfil S1210, em pá de turbina eólica de resina epóxi com reforço de juta foi implementado 30 partes desta com largura de 54,6 mm, com ventos de 4,71m/s e densidade de ar de 1,12.

### 3.1.1 - Construção da longarina de reforço na pá.

A longarina de material compósito foi confeccionada em 05 (cinco) sucessivas camadas de fibra de juta, na formação das camadas 1, 2, 4 e 5 foram utilizados tecido de juta com fios longitudinais e transversais, que configura duas camadas, e a camada 3 no centro do laminado,

foi utilizada uma manta de fibra de juta cardada alinhada longitudinalmente. A Figura 3.6, mostra a arquitetura de infusão de resina utilizada na confecção da longarina de sustentação.

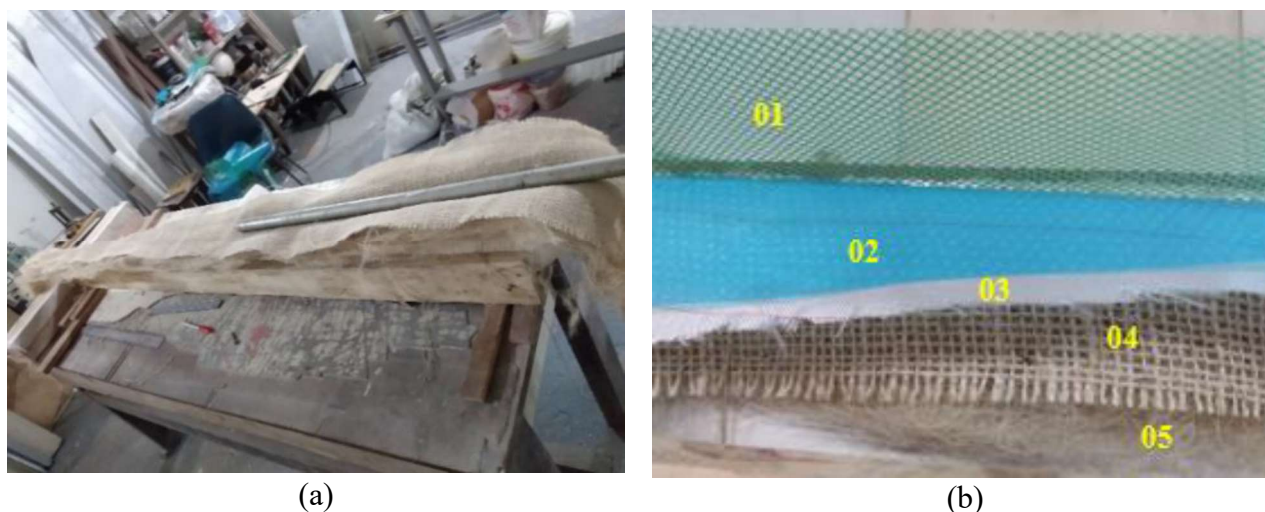


Figura 3. 6 – Montagem da estrutura de sustentação, (a) alinhamento das camadas de fibra, (b) Camadas de materiais do processo de infusão.

Fonte: Próprio autor

A Figura 3.6(a) mostra a estrutura montada para a inserção da haste de sustentação da pá e na Figura 3.6(b) mostra os materiais utilizados para aplicação da técnica de infusão em (01) tela equalizadora, (02) tecido retentor, (03) desmoldante *Peel ply*, (04) tecido de Juta 0/90, (05) fibra de juta cardada.

A Tabela 5, mostra a arquitetura do material compósito utilizado para formação da haste de sustentação, onde os materiais sobrepostos foram inseridos manualmente e submetidos a infusão de resina para a formação do compósito.

Tabela 5 - Camadas, material e alinhamento das mantas de fios de juta e fibra cardada

Camadas	Material	Alinhamento
1 <sup>a</sup>	Fios de juta	0°
2 <sup>a</sup>	Fios de juta	90°
3 <sup>a</sup>	Juta cardada	0°
4 <sup>a</sup>	Fios de Juta	90°
5 <sup>a</sup>	Fios de Juta	0°

Fonte: Próprio autor

As camadas de fibra e de fios de juta foram inseridas manualmente, formando uma haste com 70 mm de diâmetro e 1,0 metro de comprimento. A Figura 3.7 mostra a haste envolvida no saco de vácuo e logo retirada após a cura de 24 horas.

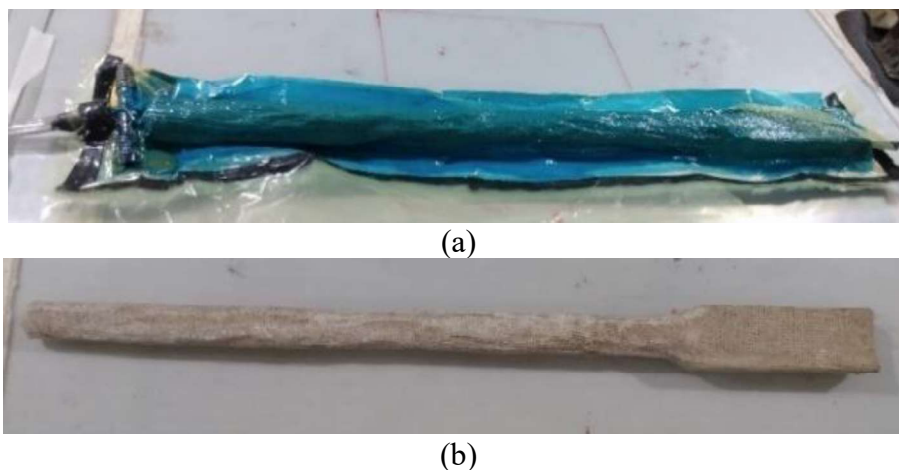


Figura 3. 7 - Haste de sustentação (a) em ambiente de vácuo, (b) após a cura.

Fonte: Próprio autor

Após o processo de infusão, a haste permaneceu em ambiente de vácuo por 24 horas para cura do compósito, a haste de sustentação foi incorporada ao compósito em fibras de juta formado na superfície segmentada da pá.

### 3.1.2 - Segmentação da pá e incorporação da haste de sustentação na longarina da pá eólica

Após a cura do revestimento em *gel-coat*, a pá foi segmentada no eixo longitudinal para a inserção da longarina de sustentação. Posteriormente foi construída uma calha de acomodação para o encaixe da longarina, de modo a proporcionar a conservação da superfície externa da pá. Logo após o corte da calha longitudinal, a haste de sustentação foi inserida no interior da longarina e integrada a pá pelo processo de infusão de resina, utilizando a mesma arquitetura e materiais da haste de sustentação formando um só corpo na pá eólica. A Figura 3.8, mostra a pá eólica segmentada em duas partes para receber a longarina de material compósito.



Figura 3. 8 - Segmentação da pá eólica.

Fonte: Próprio autor

Após a segmentação da pá, foi inserido a haste de sustentação para melhor fixação da pá, matriz epóxi com reforço de fibras de juta em forma de tecido para distribuição de cargas solicitadas, foram montados nas faces das partes individualmente e camadas de fibra de juta em tecido e camada de juta cardada, em matriz epóxi, obtendo assim o formato de pá eólica para aplicação do material compósito laminado. A Figura 3.9 mostra a pá eólica construída em polímero com cobertura de gel-coat.



Figura 3. 9 - Acomodação da longarina e da haste de sustentação na pá eólica.

Fonte: Próprio autor

A longarina de material laminado utiliza tecido de juta 0/90 com uma camada de juta cardada, para obtenção estrutural da pá eólica.

### 3.1.3 - Inserção do laminado na pá eólica de juta

A montagem do laminado que recobre a pá construída iniciou-se com a fabricação de laminados pré-impregnados com resina epóxi utilizando o fio de juta alinhado e angulado com relação ao eixo da pá, utilizando o script em MATLAB, definindo assim a melhor arquitetura. A Figura 3.10 mostra o alinhamento dos fios de juta antes de serem umedecidos com a resina epóxi. Foram impregnados com fios unidirecionais alinhados em  $0^\circ$  e  $15^\circ$  aplicado na superfície da pá.



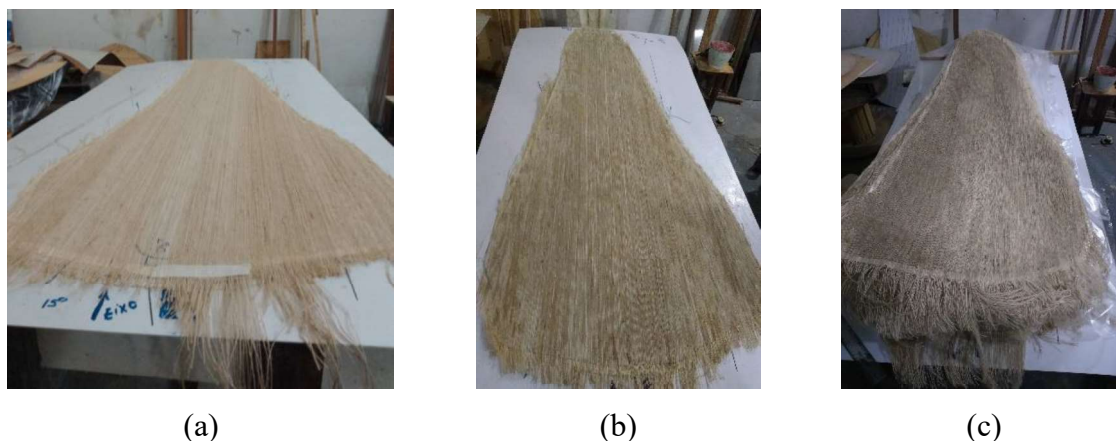


Figura 3. 10 - (a) Fios de juta alinhados manualmente a  $-15^\circ$  (b) Prepreg de fio de juta com matriz epóxi alinhados a  $0^\circ$  c) Prepreg de fios de juta alinhados a  $15^\circ$ .

Fonte: Próprio autor

Os fios de fibra de juta foram aplicados alinhados a  $0^\circ$  e  $15^\circ$ , montados manualmente, observando o ângulo de desvio com relação ao eixo principal da peça. Foi demarcado o espaço através da área ocupada e o seu contorno utilizando fita dupla face para fixar a posição da fibra. A Figura 3.11 mostra a montagem da câmara de vácuo aplicada a pá eólica de fios de juta.

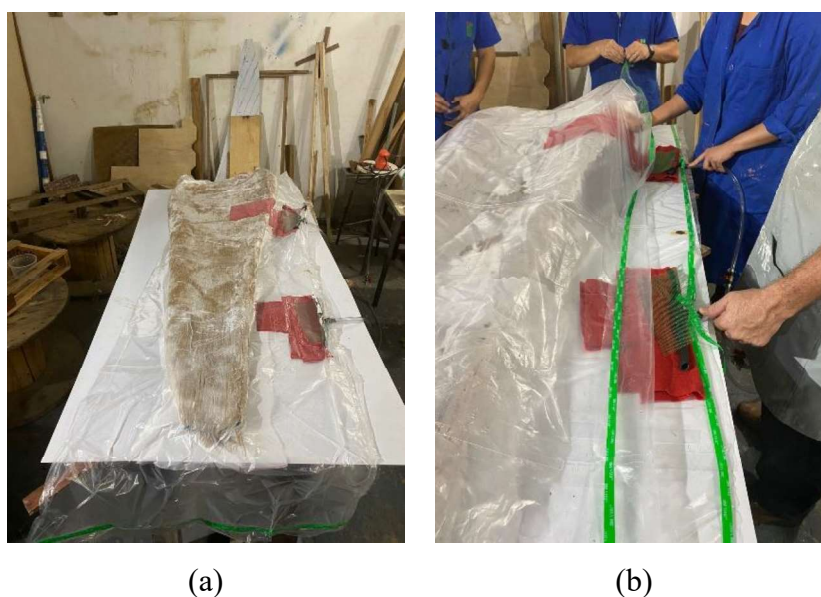


Figura 3. 11 - Montagem da câmara de vácuo para inserção de resina epóxi na pá

Fonte: Próprio autor

### 3.2 - ANÁLISE FÍSICA DA FIBRA NATURAL DE JUTA

A juta do estudo in natura foi doada pela Companhia Têxtil de Castanhal se apresentando em duas configurações distintas, a primeira na forma de tecido de onde foram retirados os fios

de juta, com diâmetro médio de 1,07 mm e ângulo superficial de torção de  $18,9^\circ$  e a segunda em fibras de juta cardadas, produto de fase intermediária da fabricação do fio.

### 3.2.1 - Caracterização Dimensional do Fio de Juta (FJ) e da Fibra Cardada (FBC).

A Figura 3.12 mostra as formas de fibra de juta utilizadas neste trabalho, observando as disposições e características próprias.



Figura 3.12 - (a) Fio de Juta, (b) fibra cardada e (c) tecido de juta.

Fonte: Próprio autor

Na caracterização dimensional dos fios de juta e das fibras cardadas utilizou-se um estereoscópio Carl Zeiss modelo Stemi 508 acoplado a uma câmera Axiocam, do laboratório de Inspeção do Instituto Federal do Pará (IFPA) – Campus Belém. A Figura 3.13 mostra a tomada de diâmetro em cada fibra utilizada no ensaio de tração unifilar

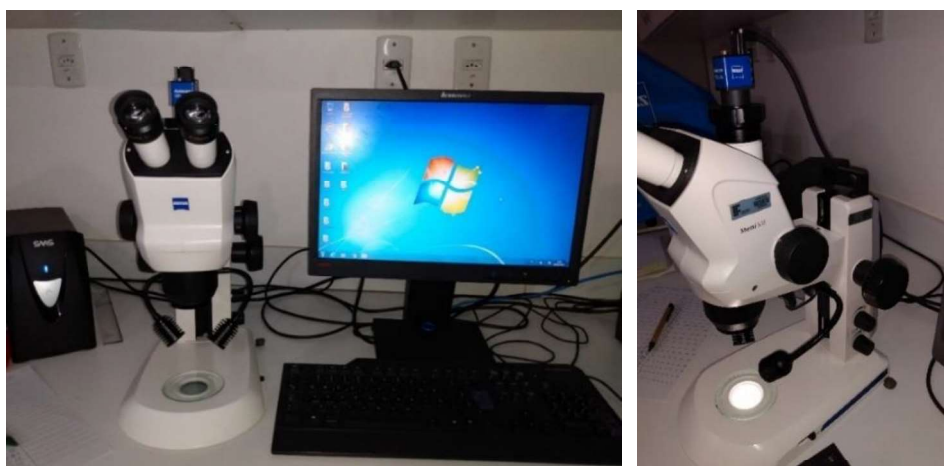


Figura 3.13 - Estereoscópio utilizado para medir o diâmetro das fibras e dos filamentos de juta.

Fonte: Próprio autor

Para a caracterização das fibras foram utilizadas 44 amostras para o ensaio de tração seguindo a norma ASTM D3822/3822M. A Figura 3.14 A Figura 3.14 mostra as medidas executadas na fibra de juta para sua caracterização.



Figura 3. 14 - Fibra de Juta medido seu diâmetro em Microns.

Fonte: Próprio autor

Para a caracterização do fio retirou-se aleatoriamente 30 fibras e efetuaram-se medidas de diâmetro, essas medidas foram realizadas em 4 (quatro) posições ao longo da fibra, em cada posição obteve-se uma segunda medida rotacionando a fibra em 90°, considerando a média das duas medidas nesta posição. Este procedimento foi realizado devido ao fato da seção reta da fibra não ser perfeitamente circular, ou seja, como toda fibra lignocelulósica existe uma excentricidade no diâmetro. Com base nestas medidas de diâmetro e comprimento, realizou-se uma análise dimensional da média, para o cálculo do ângulo de torção do fio. O comprimento do fio para o recobrimento da pá longitudinalmente foi medido com uma trena milimetrada.

### 3.2.2 - Cálculo de Densidade dos Fios de juta e das Fibras Cardadas

Para o cálculo da densidade da fibra foi utilizada a técnica experimental utilizando um picnômetro de acordo a ASTM D792[72]. Para a determinação da densidade, os fios e as fibras de juta foram secos em um forno do tipo Mufla de marca JUNG com máximo de 1200°C do laboratório de inspeção do Instituto Federal de Educação do Pará (IFPA). O material foi exposto



a 70°C por 40 minutos. A Figura 3.15 mostra o forno utilizado na secagem das fibras para obtenção da densidade.



Figura 3.15 - Forno de Mufla utilizado para secagem do fio de juta e da fibra cardada

Fonte: Próprio autor

Após a secagem os materiais foram acondicionados em um recipiente hermético, para o teste de densidade. Foram pesados fios e fibras secas, também um picnômetro com capacidade de 100 ml, vazio e cheio de álcool metílico. Para isso foi utilizada uma balança de precisão modelo Marte AY2020, com capacidade 0,0001g e carga máxima de 220g do laboratório de inspeção do Instituto federal do Pará (IFPA).

A Figura 3.16 mostra a o processo da metodologia de pesagem, (a) fio de juta, (b) álcool metílico PA e (c) balança de precisão com picnômetro contendo fio de juta e álcool metílico.



Figura 3.16 - Sequência de pesagem utilizando Picnômetro (a) fio de juta; (b) álcool metílico PA e (c) balança de precisão com picnômetro no interior.

Fonte: Próprio autor

O procedimento da pesagem das massas se deu com a seguinte metodologia: Massa do picnômetro vazio ( $A_1$ ); Somatória da massa do picnômetro mais a massa da fibra ( $A_2$ ); Somatória da massa do conjunto (picnômetro, fibra e álcool metílico)  $A_3$ ; Somatória da massa do

picnômetro e do álcool metílico até completar todo o volume da tampa do capilar ( $A_4$ ). De posse dos valores de  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ , e  $A_4$  e observando a inexistência de vazios no interior do picnômetro, se pode finalmente determinar por meio de operações algébricas a densidade relativa, em relação à massa específica do álcool metílico aplicando-se a equação 3.1. Desta forma têm-se que:

$$ds = A_2 - A_1(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3) \quad (3.1)$$

O cálculo da massa específica relativa do sólido  $ds$  é encontrado através da equação 3.1, onde  $A_1$  é a massa do picnômetro,  $A_2$  a soma entre massa do picnômetro e a massa da fibra,  $A_3$  a soma do conjunto e  $A_4$  a soma entre a massa do picnômetro e a massa do álcool etílico.

### 3.2.3 - Cálculo da densidade do compósito laminado (CL), dos fios de juta (FJ) e das fibras cardadas de juta (FBC)

O ensaio de densidade foi realizado utilizando o método B da norma ASTM D 792, que utiliza o princípio de Arquimedes (empuxo) e é indicado para plásticos sólidos com densidade inferior à da água. Para os materiais deste trabalho como o compósito laminado, o fio de juta e a fibra cardada, foram realizados os testes de densidade e de quantidade de vazios.

O método do ensaio consta em confeccionar discos com diâmetro de 50 mm, para a aplicação do princípio de Arquimedes ZHAO *et al*, RAJAWAT *et al.*, NOVAIS *et al.*, SHAH *et al*; e a metodologia para os materiais utilizados segue como: Pesar os materiais ao ar livre; pesar os materiais submersos em um líquido de densidade conhecida (por ex.: água destilada); e aplicar as equações 3.2 e 3.3, a partir das pesagens para obter a densidade em  $\text{g/cm}^3$ .

A fração volumétrica de vazios  $V_v$  e as frações mássicas de reforço de juta  $w_f$  no compósito, foram calculadas para as amostras de fio de juta/epóxi (FJ/EP) e fibra cardada e epóxi (FBC/EP), através da equação 3.2.

$$V_v = 1 - \rho_c \left( \frac{w_f}{\rho_f} + \frac{w_m}{\rho_m} \right) \quad (3.2)$$

Onde  $V_v$  é fração volumétrica de vazios;  $\rho_c$  a massa específica do compósito ( $\text{g/cm}^3$ );  $w_f$  a fração mássica da fibra (%);  $w_m$  a fração mássica da matriz (%);  $\rho_f$  a massa específica da fibra ( $\text{g/cm}^3$ ) e  $\rho_m$  a massa específica da matriz ( $\text{g/cm}^3$ ). Para o cálculo da fração volumétrica da fibra  $V_f$  utiliza-se a equação 3.3.

$$Vf = \left( \frac{\rho_c}{\rho_f} \right) wf \quad (3.3)$$

Por fim utilizando o princípio de Arquimedes e seguindo os mesmos procedimentos de Pinheiro et al. [40], foram obtidas as densidades dos materiais.

### 3.2.4 - Caracterização da resina Epóxi

Utilizou-se para a matriz a resina epoxidílica do tipo éter diglicidílico do bisfenol, a (DGEBA) fabricada pela Ara-Química, sob a denominação comercial Center Epóxi GY 250, devidamente misturada ao endurecedor Isoforonadamina e álcool benzílico, nome comercial ARADUR® 3066 BR, na proporção estequiométrica correspondente ao phr = 1 (1 parte de endurecedor por 2 partes de resina). Esta proporção estequiométrica em princípio equivale à abertura de todos os anéis epóxi por ligação com as moléculas de amina. A Figura 3.17 mostra o material polimérico utilizado na formação do compósito.



Figura 3. 17 - Resina epóxi e Isoforonadamina e álcool benzílico.

Fonte: Próprio autor

### 3.2.5 - Definição da Geometria da Pá Eólica

Inicialmente, foi definido o modelo de pá a partir do estudo de [57]. Os dados para o projeto da pá foram obtidos do modelo e escolhido o aerofólio S1210 para ventos de baixa intensidade entre 2 e 6 m/s, para ser utilizado em turbina de pequeno porte. Os dados de entrada foram inseridos no modelamento aerodinâmico, utilizando a ferramenta matemática MATLAB

e através da implementação, foram obtidas as coordenadas do perfil de pá. Com este perfil de pá eólica, verificou-se uma variação dimensional que se estende no eixo principal, na rotação e a cada estação observando-se as variações de sustentação e arrasto em toda sua extensão.

Para a construção da pá foi dividida em 30 estações aerodinâmicas de acordo com a posição ao longo do seu comprimento e todas as estações possuem uma determinada torção geométrica, cujo valor pode ser observado na Tabela 6. A Figura 3.18 mostra o perfil aerodinâmico da pá S1210.

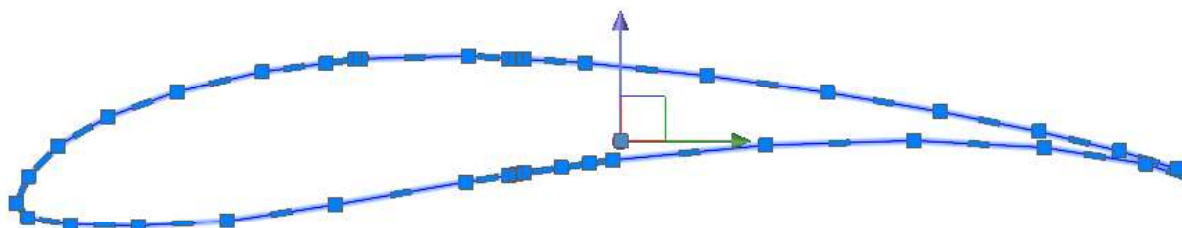


Figura 3. 18 - Perfil aerodinâmico da pá eólica em AutoCAD.

Fonte: Próprio autor

A partir do perfil aerofólio, o protótipo da pá eólica foi construído para a realização dos ensaios mecânicos em laboratório. Com dimensões de comprimento total de 1,68 metro, considerando a haste de fixação de 0,2 metro. Os perfis aerodinâmicos colocados numa sequência posicional, foram o ponto de partida para a confecção da pá, observando que as estações têm posição rotacional variável entre  $64^\circ$  e  $10^\circ$ , sequencialmente.

### 3.3 - ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos realizados nos materiais como a matriz epóxi, as fibras de juta e os compósitos foram executados no Laboratório de Metalurgia do Instituto Federal do Pará – IFPA, Campus Belém-PA, utilizando uma máquina universal modelo AROTEC WDW-100E com célula de carga de 10kN. Utilizando extensômetros do tipo ‘*strain gauges*’ de 120 Ohms, foram instrumentados nas direções longitudinal e transversal, e também com extensômetro de lâmina do tipo clip-on.

### 3.3.1 - Ensaio de Tração da Resina

Utilizando a norma ASTM 638[73], os corpos de prova de matriz epóxi, para análise da matriz do material compósito. A Figura 3.19 mostra o formato do corpo de prova e suas dimensões para sua fabricação.

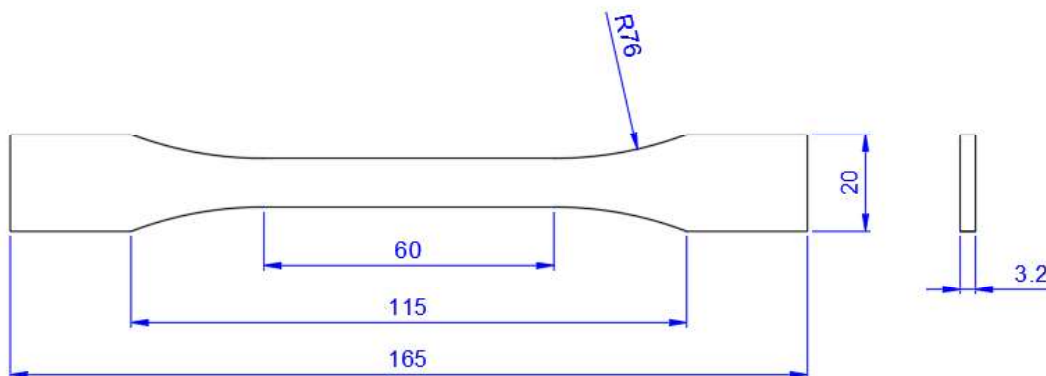


Figura 3. 19 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração da matriz.

Fonte: Próprio autor, adaptado [73].

As dimensões do corpo de prova foram obtidas através da ASTM D638 [73], e sua projeção em desenho CAD, após confeccionados por prototipagem, foram envolvidos em material polimérico de silicone, concluindo assim a confecção do molde após a cura de 24 horas.

Os corpos de prova de matriz epóxi, por sua vez, confeccionados na composição 66% de resina epóxi para 33% de endurecedor, em moldes de silicone com dimensões 165 x 19 x 3,2 mm. A Figura 3.20 mostra o molde em silicone utilizado para a confecção dos corpos de prova, com dimensões de acordo a norma ASTM D638 [73].



Figura 3. 20 - Molde de silicone.

Fonte: Próprio autor, adaptado [73]

Os ensaios de tração no matriz epóxi, foram realizados nas dependências do Laboratório de Metalurgia do Instituto Federal do Pará – IFPA, Campus Belém-PA em 8 replicatas, utilizando uma máquina universal modelo AROTEC WDW-100E. A velocidade de ensaio utilizada foi de 2 mm/min, e a célula de carga de 10 kN. Os ensaios foram instrumentados por *strain gauges* de 120 Ohms, nas direções longitudinal e transversal, com extensômetro de lâmina. A Figura 3.21 mostra os corpos de prova com a instalação dos strain gauges, para o ensaio de tração.

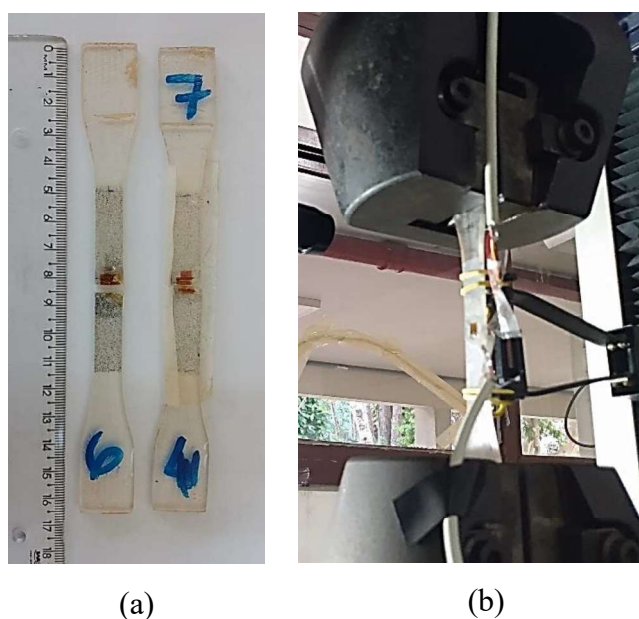


Figura 3. 21 - (a) Corpos de prova de matriz epóxi fraturados, (b) sob ensaio de tração.

Fonte: Próprio autor

Nos corpos de prova para ensaio de tração na matriz, foram utilizados medidores de tensão, do tipo '*strain gauges*', de resistência 120 Ohms, instalados na direção longitudinal (x) e transversalmente (y) a direção da carga de ensaio, obtendo assim, as deformações nas direções principais x e y.

### 3.3.2 - Ensaio de tração no compósito

O compósito proposto no estudo epóxi/fibras de juta, foram confeccionados no Laboratório de Compósito do Instituto Federal do Pará – IFPA, Campus Belém-PA em forma de placas pelo processo de infusão de resina [34]. Utilizando uma bomba de vácuo com capacidade de 1 atm, e mantas de desmoldagem com controle de fluxo no interior da câmara de vácuo. A

figura 3.22 mostra a técnica utilizada para fabricação dos corpos de prova a fim de obter as propriedades do material estudado.

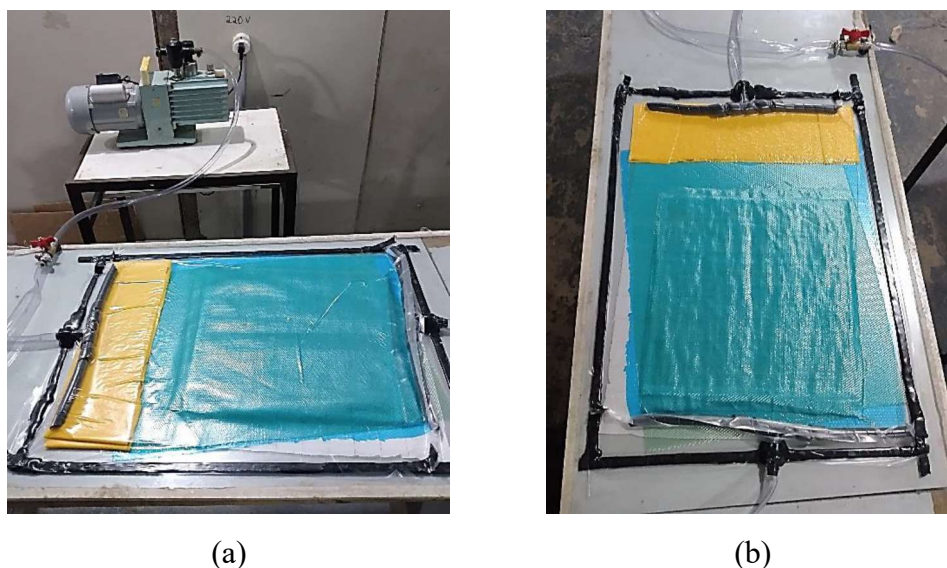


Figura 3. 22 - Fabricação do compósito, (a) Bomba de vácuo e conexões, (b) Bolsa de vácuo e vedações.

Fonte: Próprio autor

Os corpos de prova foram fabricados a partir dessas placas com fibras longas e alinhadas, sem tratamento alcalino, com fração mássica de 30%, tanto para os fios de juta quanto para as fibras cardadas. Após a cura do compósito estes foram retirados e seccionados por disco de corte rotativo.

Utilizando a norma ASTM D3039[74], foram confeccionados os corpos de prova para o ensaio de tração nos compósitos de fio de juta (FJ), fibra cardada (JC) e no compósito laminado (CL). A Figura 3.23 mostra as dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração dos materiais compósitos [74].

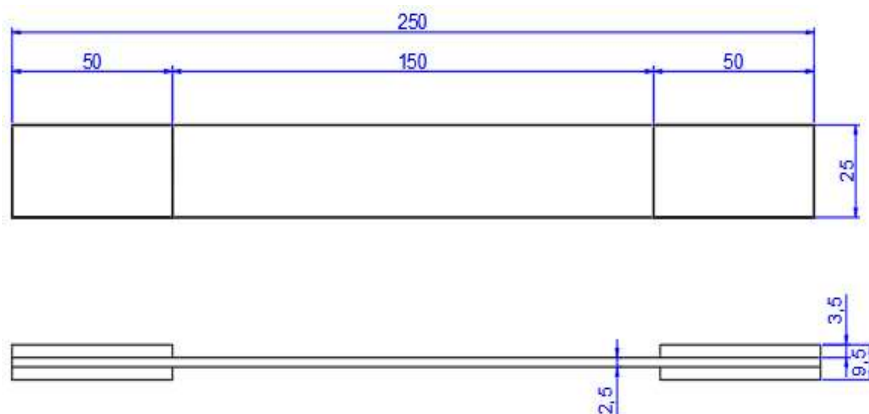


Figura 3. 23 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração,



Fonte: Próprio autor, adaptado[74]

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Metalurgia do Instituto Federal do Pará – IFPA, Campus Belém-PA, utilizando uma máquina universal modelo AROTEC WDW-100E, com célula de carga de 10 kN e velocidade de ensaio de 2 mm/min. Foram utilizadas 07 replicatas de corpos de prova do material compósito (FJ, JC e CL), com fibras de reforço alinhadas a 0° e 90°, todos com 30% de fração mássica de fibra (30%wt), em ambiente de 23 °C. As replicatas com dimensões de 250 x 25 x 2,5 mm (Figura 3.23) como preconiza a norma ASTM 3039 [74]. A Figura 3.24 mostra os corpos de prova a serem testados sob ensaio de tração.



Figura 3. 24 - Corpos de prova de Juta/Epóxi sob ensaio de tração.

Fonte: Próprio autor

Os ensaios foram instrumentados com *strain gauges* de 120 Ohms e com extensômetro de lâmina tipo Clip-On. Os *Strain gauges* acoplados diretamente ao corpo de prova e interfaceados a um módulo de aquisição de dados modelo DIDAC através de cabos conectores. Os corpos de prova foram fabricados a partir dessas placas com fibras longas e alinhadas, sem tratamento alcalino, tanto para os fios de juta quanto para as fibras cardadas. Após a cura do compósito estes foram retirados e seccionados por disco de corte rotativo. A Figura 3.25 mostra a utilização de *strain gauges* para captura das deformações longitudinal e transversalmente a aplicação das cargas [74].



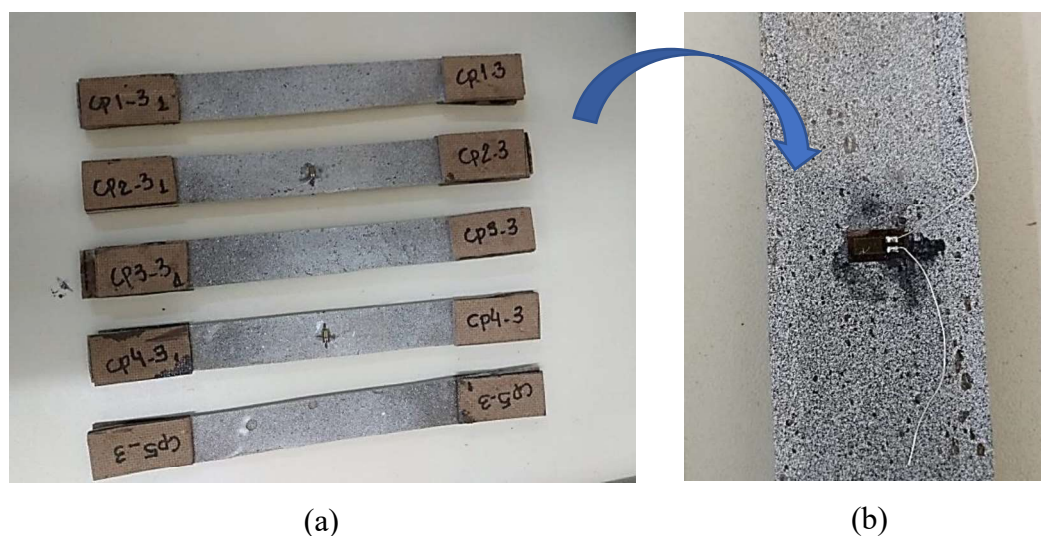


Figura 3. 25 - (a) Corpos de prova de Juta/Epóxi (b) *Strain gauges* utilizado nos testes.

Fonte: Próprio autor

Para o ensaio de tração dos corpos de prova do material compósito, foram instalados medidores de tensão eletrônicos, do tipo “Strain gauges”, com resistência de 120 Ohms, nas direções longitudinal e transversal do corpo de prova, tendo como orientação a direção da carga aplicada no corpo de prova.

### 3.3.3 - Ensaio de cisalhamento na resina epóxi

Os corpos de prova foram confeccionados de acordo a ASTM D5379, [75] ,para o ensaio de cisalhamento nos compósitos de fio de juta (FJ), fibra cardada (JC) e no compósito laminado (CL). A Figura 3.26 mostra as dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento dos materiais utilizados neste trabalho.

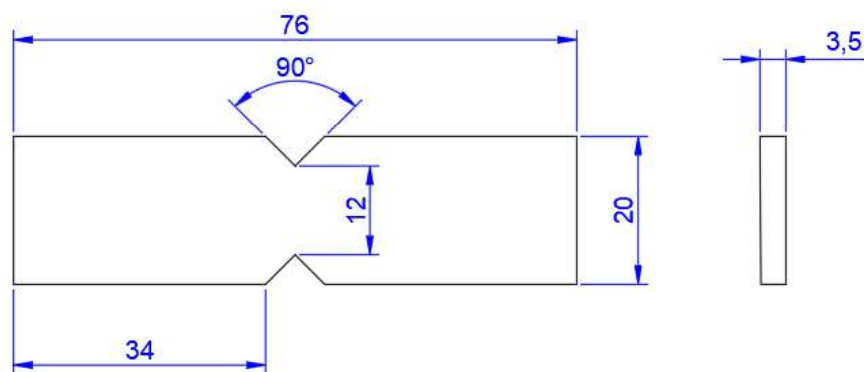


Figura 3. 26 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de cisalhamento

Fonte: Próprio autor, adaptado [75]

Os ensaios de cisalhamento na matriz (resina epóxi) realizados no Laboratório de Metalurgia do Instituto Federal do Pará – IFPA - Campus Belém-PA, utilizando uma máquina universal modelo AROTEC WDW-100E, com velocidade de 1,5 mm/min, e célula de carga de 10 kN, instrumentados por extensômetros, posicionados a 45° com relação a carga e 90° entre si. A Figura 3.27 mostra os corpos de prova de matriz epóxi utilizados para o ensaio de cisalhamento.

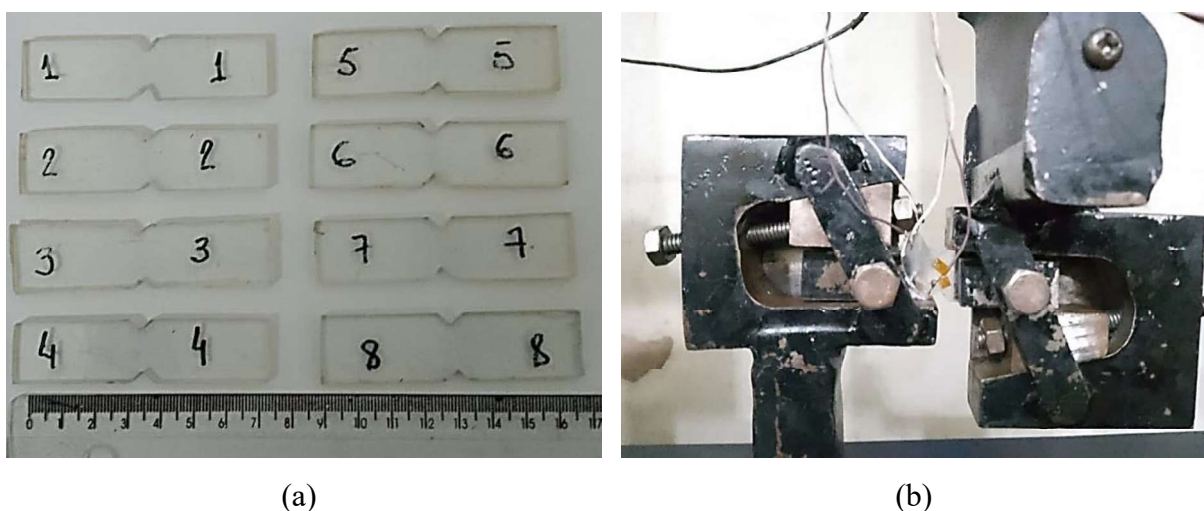


Figura 3. 27 - (a) Corpos de prova de matriz Epóxi e (b) sob ensaio de cisalhamento.

Fonte: Próprio autor

Foram fabricadas 08 replicatas do corpo de prova para ensaios de cisalhamento com dimensões de  $75 \times 20 \times 3,2$  mm instrumentados por *Strain gauges* de 120 Ohms posicionados de acordo ASTM D5379[75].

### 3.3.4 - Ensaio de cisalhamento no compósito

A Figura 3.28 mostra os corpos de prova ensaiados em cisalhamento de acordo a ASTM D5379, utilizados na análise do laminado construído.

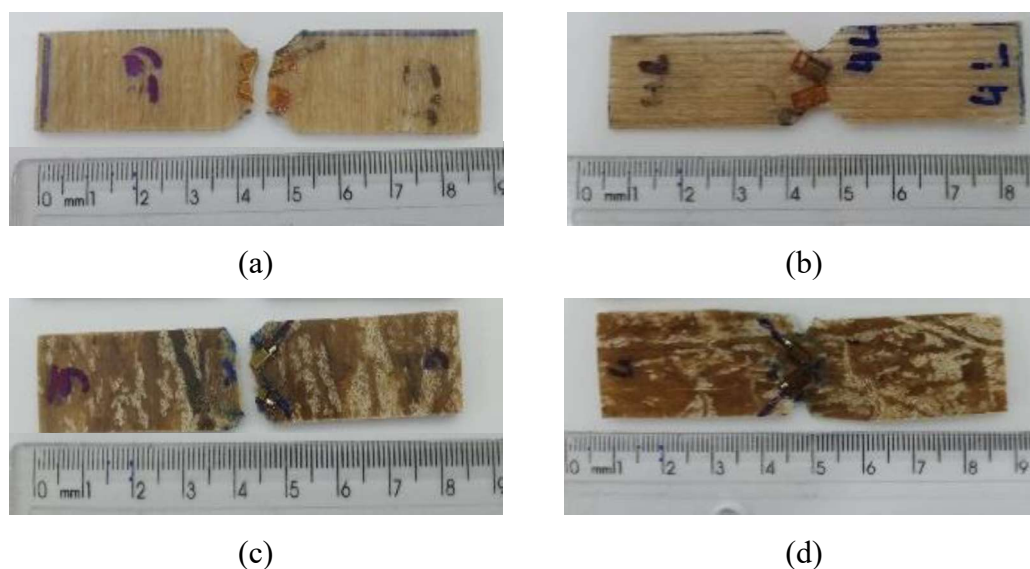


Figura 3. 28 - Corpos de prova testados em cisalhamento (a) fio de juta 0°, (b) fio de juta 90°, (c) juta cardada 0°, (d) juta cardada 90 ° de matriz Epóxi e (b) sob ensaio de cisalhamento

Fonte: Próprio autor

Os corpos de prova submetidos aos testes de cisalhamento sofreram rompimento e também esmagamento como mostram as figuras 3.28a, 3.28b, 3.28c e 3.28d. Os resultados indicaram que os compósitos atingiram boa resistência mecânica nos testes de cisalhamento, o que é fundamental para aplicações de reparo estrutural.

### 3.3.5 - Ensaio de flexão na pá

O ensaio em flexão engastada na pá segue a norma IEC 61400-23[76], utilizada para testes e fabricação de perfis e pás de aerofólios comerciais. Para o ensaio de flexão utilizou-se uma estrutura metálica de tubo ‘Metalon’ de perfil retangular 32 x 19 x 1,6 mm. e confeccionada por soldagem com eletrodo revestido. Foi instalado também um dispositivo de estabilidade da estrutura de engaste, utilizando um macaco hidráulico de 10 ton., sob um tubo de aço galvanizado de diâmetro e comprimento de 3 pol. e 2,8 m, respectivamente, em suas extremidades instalado placas de madeira, assim pressionando a estrutura contra o piso e o teto em laje de concreto do local. Para a estabilidade estrutural foi instalado um sensor de deslocamento lateral, monitorando este evento. A Figura 3.29 mostra as dimensões da estrutura metálica para o ensaio de flexão em engaste da pá fabricada em laminado de fios de juta.

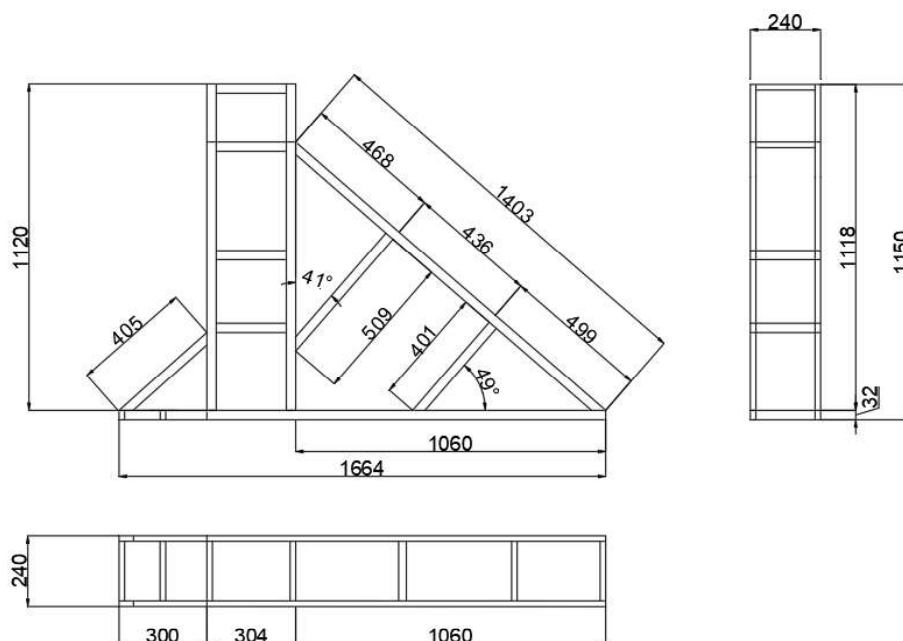


Figura 3. 29 - Estrutura fabricada para ensaio de flexão em engaste

Fonte: Próprio autor

A estrutura metálica foi construída utilizando tubo de aço com perfil retangular de dimensões 32x19x1,6mm, material destinado ao reuso, nas dependências do IFPA. Foram montadas as peças com união por soldagem com eletrodo revestido AWS E6013.

A estabilidade da carga de apoio para fixação da estrutura de engaste foi montado um dispositivo para distribuição das cargas estabilizadoras na base e no topo do tubo. A peça construída com dimensões de 240 x 240 mm e 15 mm de espessura, em madeira prensada (compensado), e uma cinta em chapa de aço galvanizado, com as dimensões de 50 mm de altura e diâmetro de 89 mm internamente e 0,8 mm de espessura, para envolver o tubo de fixação. A figura 3.30 mostra as peças utilizadas para o ensaio da pá em engaste.

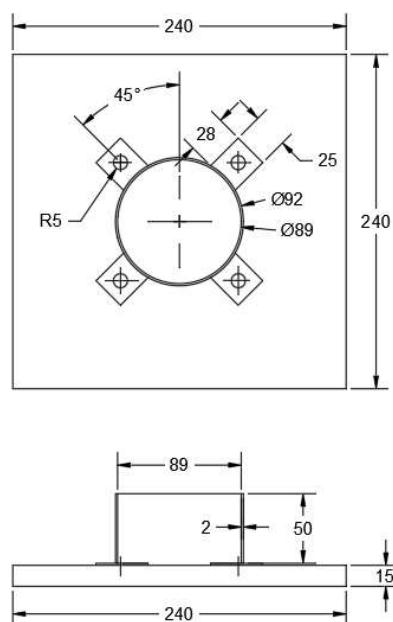


Figura 3. 30 - Suporte base para ensaio de flexão com engaste da pá.

Fonte: Próprio autor

Os suportes base foram utilizados para distribuição da carga sobre a laje de concreto proporcionando um aumento de rigidez do conjunto para realização do ensaio de flexão. A figura 3.31 mostra o sistema de rigidez estrutural montado para o ensaio de flexão.

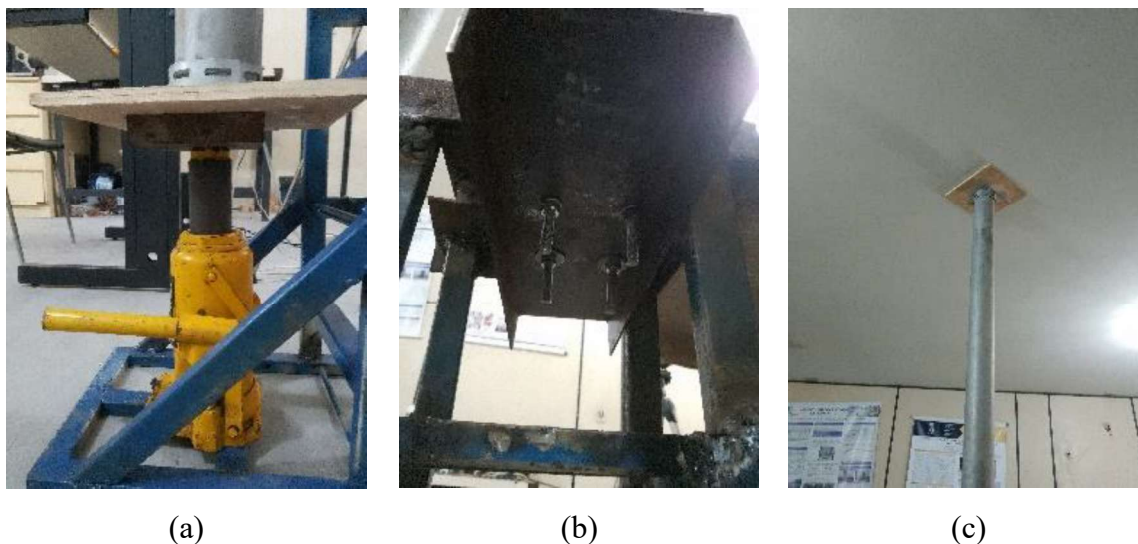


Figura 3. 31 -Em (a) Estabilização da base, (b) fixação de engaste c) estabilização no teto.

Fonte: Próprio autor

O engaste da estrutura da pá foram utilizados 2 perfis em chapa de aço carbono dobrado tipo 'U' 400x150x50, de espessura 2,5 mm., para fixação foram utilizados 4 parafusos M10 x 150mm, porcas e arruelas em aço carbono.



Para garantir a ausência de deslocamento lateral foi aplicado um sensor de deslocamento axial com precisão de 0,001 mm. A Figura 3.32 mostra o sensor de estabilidade estrutural utilizado no ensaio de flexão.

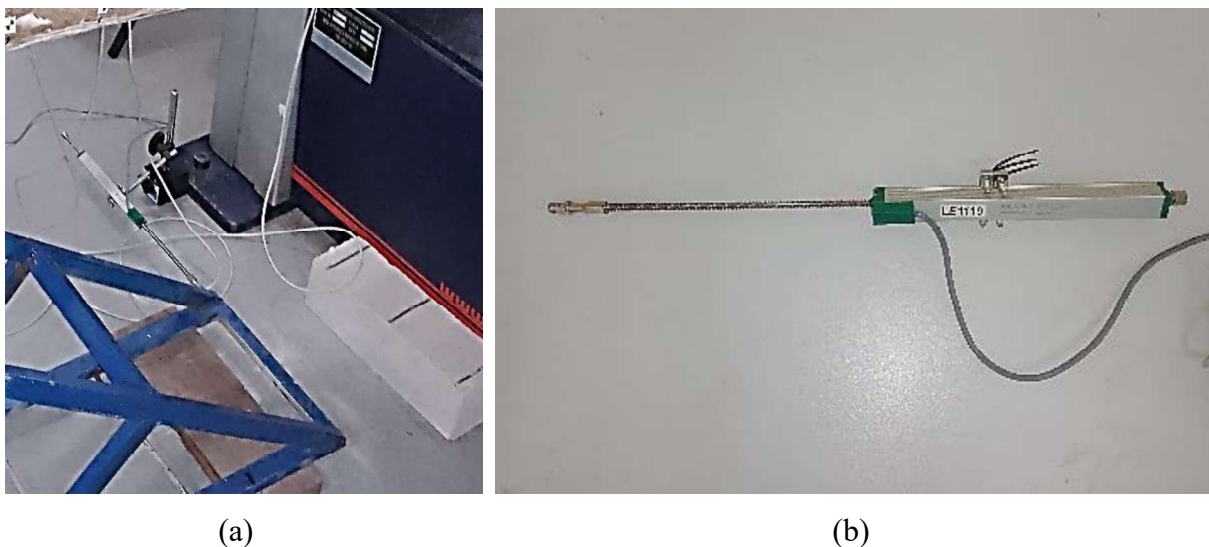


Figura 3. 32 – Sensor de deslocamento axial (a) sensor instalado (b) sensor tipo haste.

Fonte: Próprio autor

Sensor de deslocamento utilizado, é fixado utilizando uma base magnética conectada a máquina de ensaio e instalado na estrutura de engaste para verificação de deslocamento lateral no instante do ensaio. A carga é aplicada a 2/3 do comprimento total estabelecido a 1460 mm do engaste, e com velocidade de 5 mm/min [76]. A Figura 3.33 mostra o posicionamento de aplicação da carga de ensaio.

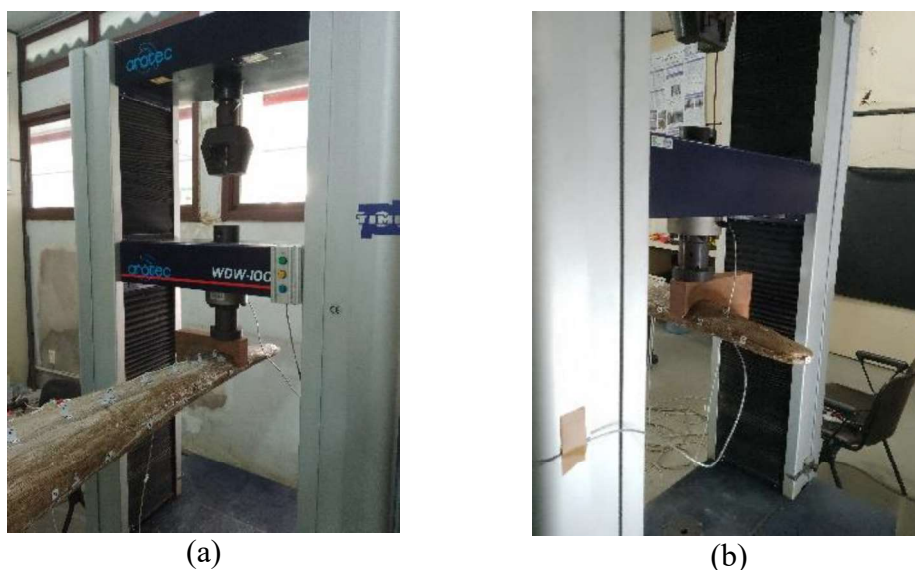


Figura 3. 33 - (a) Pá eólica posicionada, b) extremidade posterior.

Fonte: Próprio autor

Para aplicação da carga de ensaio sobre a superfície da pá construída, devido ao seu formato arredondado, foi necessário a utilização de um suporte de base na aplicação da carga de ensaio, construído em madeira e inserido como peça de apoio.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Metalurgia do Instituto Federal do Pará – IFPA, Campus Belém-PA, utilizando uma máquina universal de ensaios, modelo AROTEC WDW-100E, célula de carga 10 KN e instrumentados por *Strain gauges* de 120 Ohms, nas direções longitudinal e transversal. A Figura 3.34 mostra a arquitetura do ensaio de flexão regido pela IEC63400-23 [76].

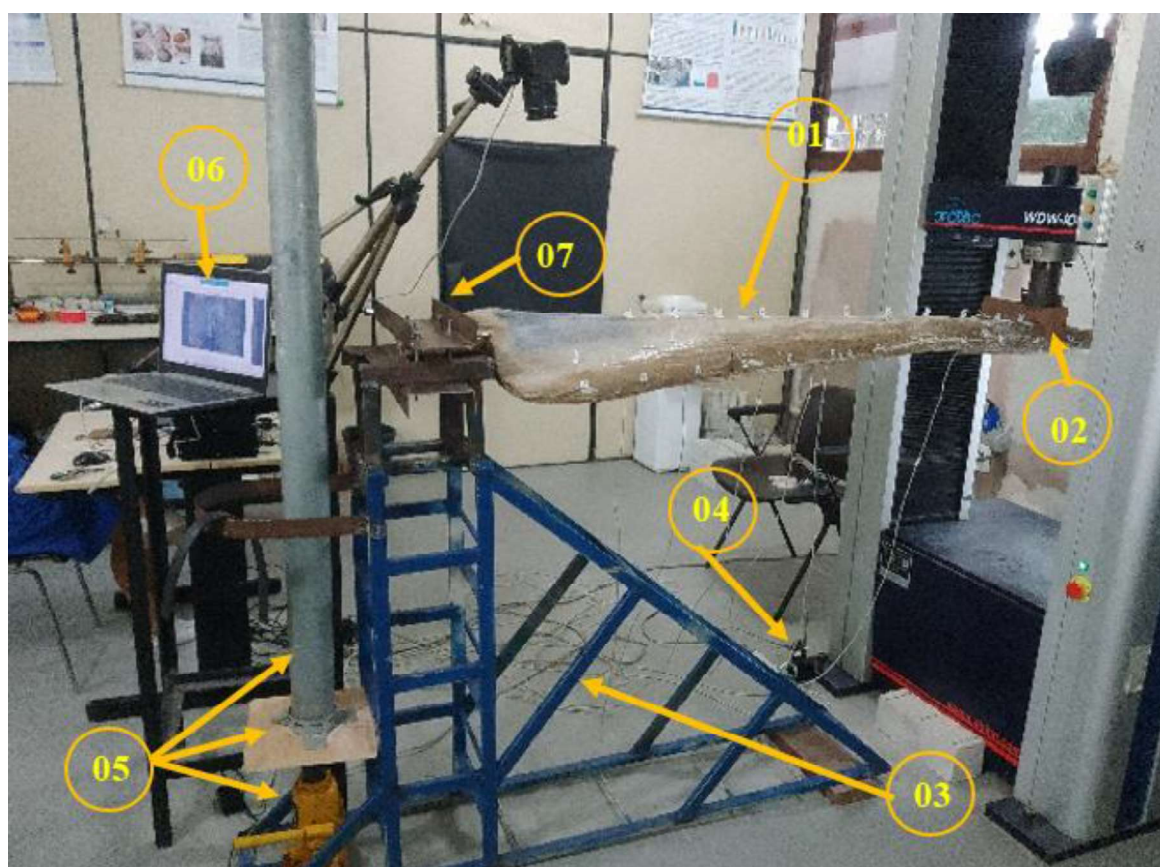


Figura 3. 344 – Arquitetura de Ensaio em Flexão da pá eólica, onde 01) Pá eólica, 02) Apoio de Carga, 03) Base de Engaste, 04) Sensor de deslocamento Axial, 05) Dispositivos de Rigidez estrutural, 06) Monitoramento de deformação, 07) Fixação de engastamento.

Fonte: Próprio autor

## CAPÍTULO 4

### 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 - IMPLEMENTAÇÃO DO LAMINADO

As coordenadas do perfil aerofólio S1210 foram inseridas na implementação matemática em ferramenta MATLAB, que deu origem ao perfil de pá, adaptado para ventos de baixa intensidade com faixa de vento entre  $v_1$  e  $v_2$  com velocidades de 1,5 e 16 m/s, respectivamente.

Utilizando este perfil de pá eólica, verificou-se uma variação dimensional que se estende no eixo principal, com rotação a cada estação referente e as variações de sustentação e arrasto em sua extensão. A Figura 4.1 mostra a disposição dos perfis aerofólio S1210 na extensão da pá

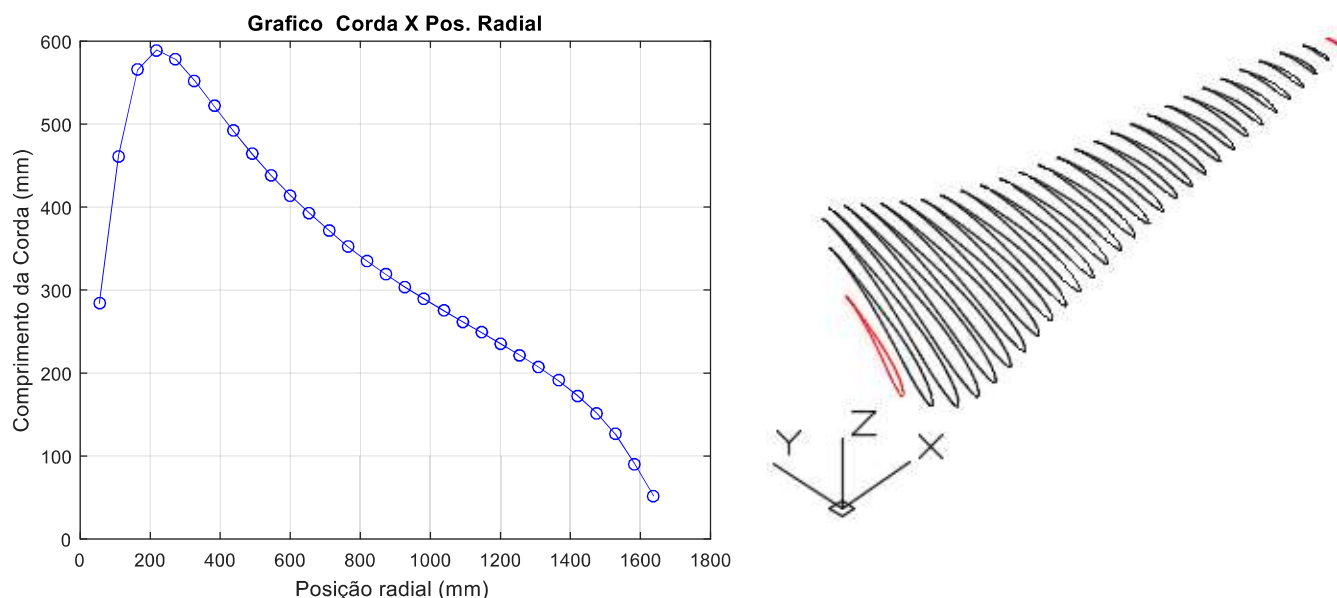


Figura 4. 1 - Pá eólica construída em autoCAD.

Fonte: Próprio autor

A Figura 4.1a, mostra curva da Posição radial, e o Comprimento de corda, observa-se que a pá inicia com 283,45 mm de corda na estação 01, tem um aumento acentuado até 589,45 mm na estação 04 e segue diminuindo a 51,6 mm na corda da estação 30. Mostra também, na Figura 4.1b, a torção de cada estação iniciando com ângulo de  $64^\circ$  de torção na estação 01 vai até  $47^\circ$ , na estação 04, e chegando até  $10^\circ$  na estação 30. A Tabela 6 mostra a distribuição do perfil ao longo pá, suas características e respectivas variações de ângulo de ataque e rotação da estação. Observa-se que a torção de pá, comprimento de corda e comprimento total da pá, obtida por modelamento é um modelo ideal para aplicação em ventos de baixa intensidade.



**Tabela 6 - Características das estações de pá desenvolvidas**

Estação	Raio (mm)	Ataque (°)	Corda (mm)	Estação	Raio (mm)	Ataque (°)	Corda (mm)
1	54,6	64	283,449	16	873,6	19	318,67
2	109,2	52	461,769	17	928,2	18	303,50
3	163,8	52	565,018	18	982,8	17	289,09
4	218,4	47	589,452	19	1037,4	17	275,31
5	273	43	577,936	20	1092	15	261,90
6	327,6	39	551,924	21	1146,6	15	248,64
7	382,2	33	521,739	22	1201,2	14	235,24
8	436,8	33	491,827	23	1255,8	14	221,47
9	491,4	31	463,71	24	1310,4	13	206,85
10	546	29	437,773	25	1365	13	190,96
11	600,6	27	413,971	26	1419,6	12	173,07
12	655,2	25	392,208	27	1474,2	12	152,10
13	709,8	23	372,294	28	1528,8	11	126,18
14	764,4	21	352,227	29	1583,4	11	90,72
15	819	19	334,846	30	1638	10	51,61

Verifica-se na Tabela 6, os elementos de sustentação e arrasto da pá eólica, com 30 estações, distante entre si de 54,6 mm, com o comprimento de corda variando entre a base e ponta de pá, obtidas através de implementação matemática, com algoritmo produzido de acordo a teoria do elemento de pá, de Glauert (1936) [77].

## 4.2 – ENSAIOS MECÂNICOS

### 4.2.1 - Ensaio de tração matriz epóxi.

Os ensaios de tração em 07 (sete) corpos de prova para tração de matriz epóxi seguiram a norma ASTM D638 com instrumentação longitudinal e transversal. A Tabela 7 mostra as propriedades médias dos resultados de teste em tração da resina epóxi utilizada como matriz do compósito.

Tabela 7 - Propriedades em tração de matriz epóxi.

Amostra	$\sigma_{rup}$ (MPa)	$\epsilon_{rup}$ (mm/mm)	E (GPa)
Matriz Epóxi	41,38	0,05071	1,5673

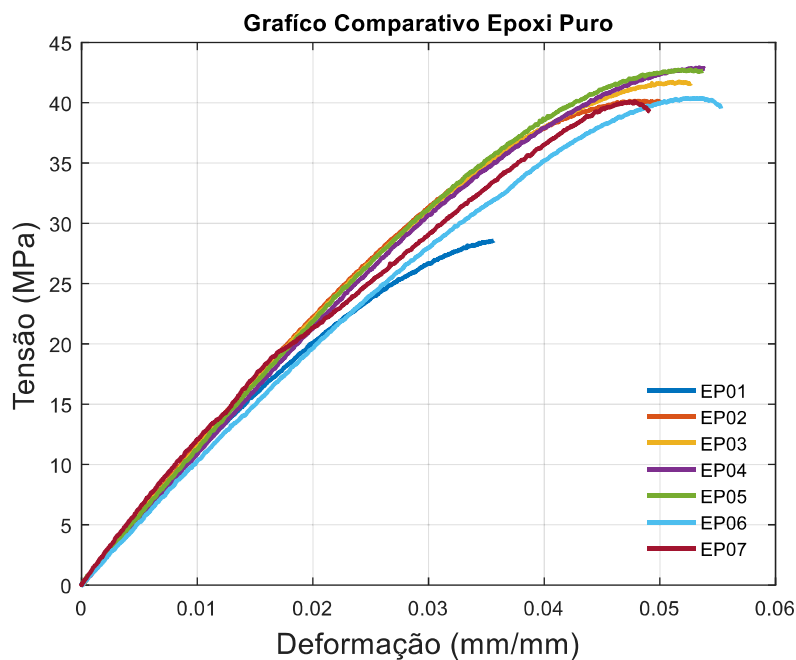


Figura 4. 2 - Resultados de ensaios de tração em corpos de prova de Matriz epóxi.

Fonte: Próprio autor

Os resultados de matriz epóxi, alcançaram bons números nos ensaios de tração obtendo em tensão de ruptura, deformação e Módulo de elasticidade, médias de 41,38 MPa, 0,05071 mm/mm e 1,5673 GPa, respectivamente.

#### 4.2.2 - Ensaios de tração no material compósito

Os ensaios de tração no material compósito feitos em 06 (seis) corpos de prova reforçados a 0° e a 90°, respectivamente, seguiram a norma ASTM D3039 instrumentados nas direções longitudinal e transversal. A Tabela 8 mostra as propriedades médias dos resultados de teste em tração do material compósito com 30% em massa de fibra.

Tabela 8 - Propriedades obtidas em tração da lâmina epóxi/fibra de juta.

Reforço	$V_f$ (%)	$X_t$ (MPa)	$Y_t$ (MPa)	$\epsilon_u^1$ (mm/mm)	$\epsilon_u^2$ (mm/mm)	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{21}$
Fio Juta	30	60,62	11,171	0,009871	0,0046	11,98	6,54	0,469	2,13
Juta Cardada	30	36,246	2,705	0,0086	0,0044	4,23	2,32	0,51	1,95

Fonte: Próprio autor

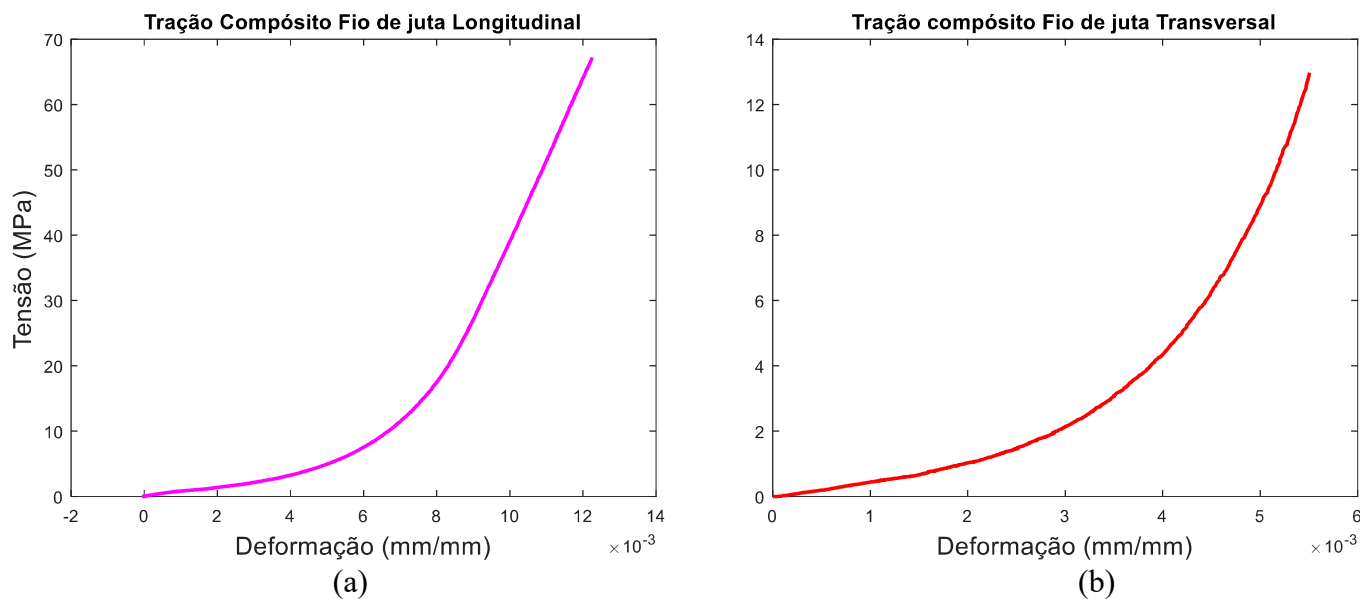


Figura 4. 3 – Comportamento tensão-deformação em Tração de corpo de prova representativo da Série (a) Fio de Juta Longitudinal e (b) Fio de juta Transversal.

Fonte: Próprio autor

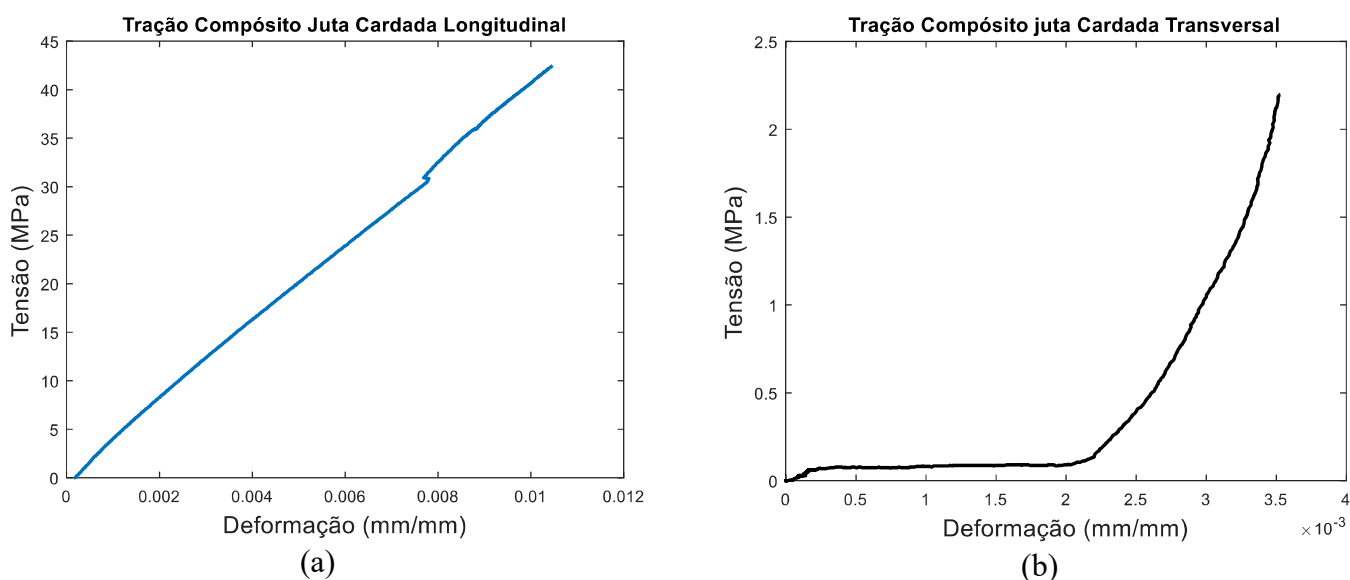


Figura 4. 4 - Comportamento tensão-deformação em Tração de corpo de prova representativo da Série (a) Juta Cardada Longitudinal e (b) Juta Cardada Transversal.

Fonte: Próprio autor

Os gráficos mostram o comportamento do material compósito e uma baixa rigidez para o compósito com fibra cardada dispostas longitudinalmente a carga, bem como os compósitos com fibras transversais, se observa baixa rigidez.

Os resultados das propriedades dos materiais utilizados na estrutura do laminado para aplicação na pá eólica (Tabela 8), foram tensão máxima de ruptura nas direções principais  $X_t$  e  $Y_t$ , em deformações  $\epsilon^1$  e  $\epsilon^2$ , bem como em Módulo de Elasticidade  $E_1$  e  $E_2$ , e se apresentaram equivalentes aos resultados do modelamento mostrados na Tabela 9.

#### 4.2.3 - Ensaio de cisalhamento no material compósito

Nos testes de cisalhamento do material compósito, utilizando extensores eletrônicos do tipo *strain gauges*, preconizados pela ASTM D5379 [75], foram determinadas as propriedades dos materiais utilizados no estudo. A Tabela 10 apresenta as propriedades obtidas a partir dos testes de cisalhamento do compósito.

Tabela 9 - Propriedades obtidas em cisalhamento da lâmina epóxi/fibra de juta.

Reforço	$V_f$ (%)	$S_{12}$ (MPa)	$G_{12}$ (GPa)	$G_{21}$ (GPa)
Fio Juta	30	9,7123	0,318	1,424
Juta Cardada	30	12,176	0,382	2,203

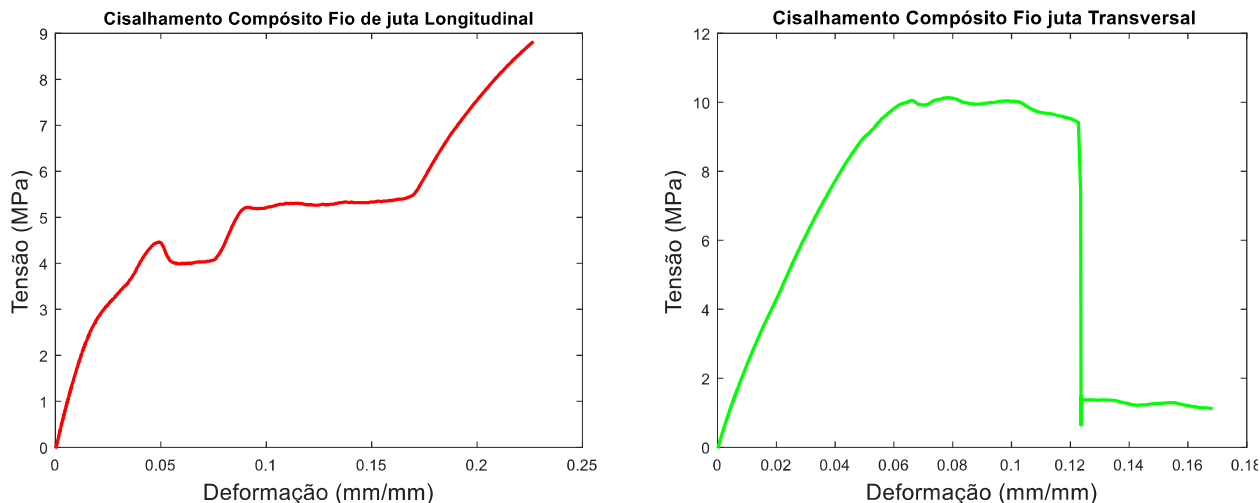


Figura 4. 5 - Comportamento tensão-deformação em Cisalhamento de Corpo de Prova Representativo da Série (a) Fio de Juta Longitudinal e (b) Juta Transversal.

Fonte: Próprio autor

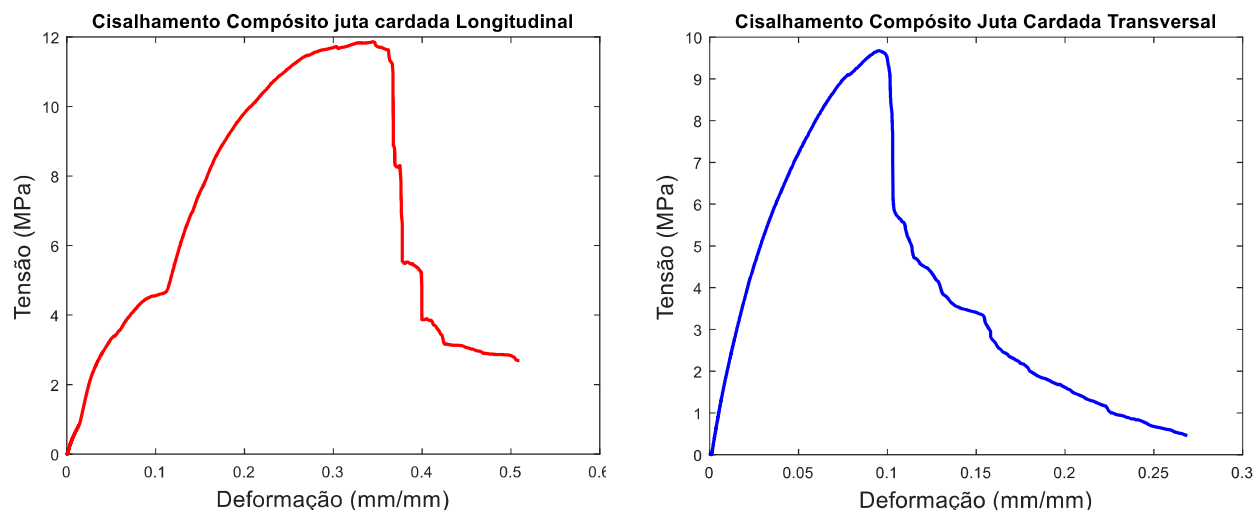


Figura 4. 6 - Comportamento tensão-deformação em Cisalhamento de Corpo de Prova Representativo da Série (a) Juta Cardada Longitudinal e (b) Juta Cardada Transversal.

Fonte: Próprio autor

Os resultados do teste de cisalhamento em valores médios são apresentados na Tabela 10 e os valores médios de resistência ao cisalhamento, módulo de cisalhamento e deformação na ruptura alcançaram na matriz epóxi 30,580 MPa, 3,142 GPa, 0,00530 mm/mm, e nos compósitos de fio de juta a  $0^\circ$  e fibra cardada a  $0^\circ$  foram 9,712 Mpa, 2,129 GPa, 0,00103 mm/mm, e 12,169 Mpa, 3,930 GPa, 0,00420 mm/mm, já nos compósitos de fio de juta a  $90^\circ$  e fibra cardada a  $90^\circ$  foram 9,602 Mpa, 6,897 GPa, 0,0355 mm/mm e 9,204 MPa, 1,130 GPa, 0,00411 mm/mm, respectivamente. Obtendo assim, uma melhor resposta nos compósitos fabricados utilizando fio de juta em comparação com reforço em fibra cardada.

#### 4.2.4 - Propriedades físicas do material compósito

As propriedades físicas do material compósito estudado como densidade e volume de vazios, foram obtidas seguindo a norma ASTM D792[72]

Tabela 10 - Resultados de propriedades físicas dos compósitos

Compósito 30wt.%	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Espessura (mm)	Vazios (%)
EP	1,31	3,89	0,044
30FJ-EP	1,25	3,10	0,050
30JC-EP	1,01	2,94	0,065
30FJ-JC-EP	1,32	4,87	0,120

Os resultados encontrados nos testes físicos foram próximos aos da literatura encontrada, uma vez que tais materiais têm estruturas semelhantes

A fibra de juta esse encontra entre as fibras naturais de menor densidade

#### 4.2.5 - Validação do modelo de BRADT BATHO

De forma a validar o modelo, o código desenvolvido foi aplicado no modelamento de uma pá de perfil NACA 0012 e as propriedades elásticas da seção, rigidez torsional e rigidez flexural em torno do eixo Y foram comparados com os resultados experimentais obtidos por CHANDRA e CHOPRA e os dados modelados [78] para o mesmo perfil, nas mesmas condições estabelecidas no trabalho experimental.

A tabela 11 ilustra o comparativo dos dados obtidos e as respectivas diferenças percentuais observadas neste trabalho em relação à cada referência.

Tabela 11 - Propriedades elásticas calculadas para a seção transversal com o perfil NACA 0012.

Propriedade da seção transversal	Este trabalho	CHANDRA e CHOPRA (1982)	Dif. (%)	WANG <i>et al.</i> (2014)	Dif. (%)
$EI_y$ (N.m <sup>2</sup> )	79,62	77,14	+3,21	81,45	- 2,25
GJ (N.m <sup>2</sup> )	26,30	25,43	+3,42	24,44	+ 7,61

#### 4.2.6 - Tensões Globais e Locais na Seção Transversal da Pá

O passo inicial para o cálculo das propriedades elásticas da seção transversal foi dividir a seção em segmentos, para os quais foram calculadas as propriedades elásticas equivalentes, bem como os momentos de inércia. Cada estação foi discretizada em ao menos 232 segmentos. A figura 4.1 ilustra uma estação referente da pá segmentada com alma de cisalhamento

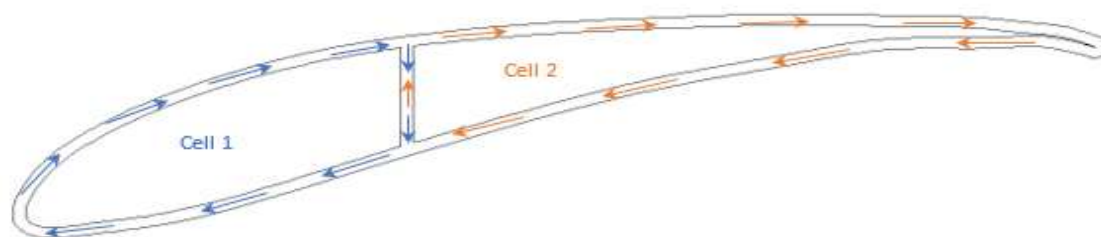


Figura 4. 7 - Seção transversal de pá eólica com uma alma de cisalhamento.

Fonte: Próprio autor

De acordo com as equações 49 e 51, a tensão normal decorrente da aplicação do momento  $M_{yy}$  varia de acordo com a cota  $z$  de cada segmento de área em relação ao eixo de inércia  $Y$  da seção. A figura 4.8 ilustra a distribuição de tensões globais, na direção  $x$ , perpendiculares à área dos segmentos ao longo da seção da camada 7, a mais externa, das estações 12 e 19, respectivamente. Na região sob tração, em azul na figura, verifica-se tensões máximas, e na região comprimida, em vermelho. As tensões normais foram calculadas a partir de um momento fletor de 181,99 N.m obtido do modelamento aerodinâmico.

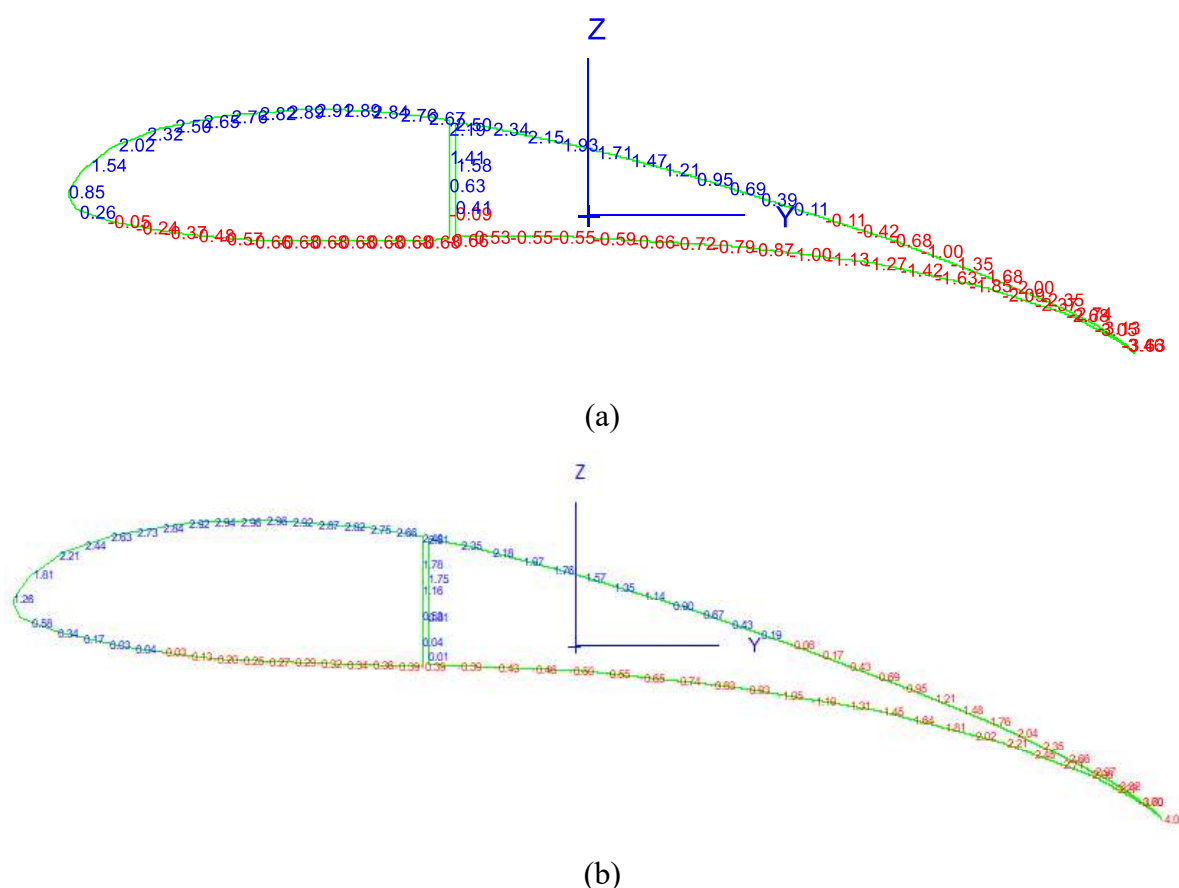


Figura 4. 8 - Distribuição das tensões globais  $\{\sigma^x\}$  ao longo da camada 7, das estações 12(a) e 19(b) do Perfil S1210, sob ação de  $M_{yy}$ .

Fonte: Próprio autor

A partir da distribuição de tensões de cada uma das sete camadas, obteve-se o gráfico ilustrado na figura 4.10, que demonstra as tensões máximas, em coordenadas locais, na direção  $1\{\sigma^{1lk}\}$ , das sete camadas, mostradas na região comprimida, parte superior do gráfico, e tracionada, inferior.

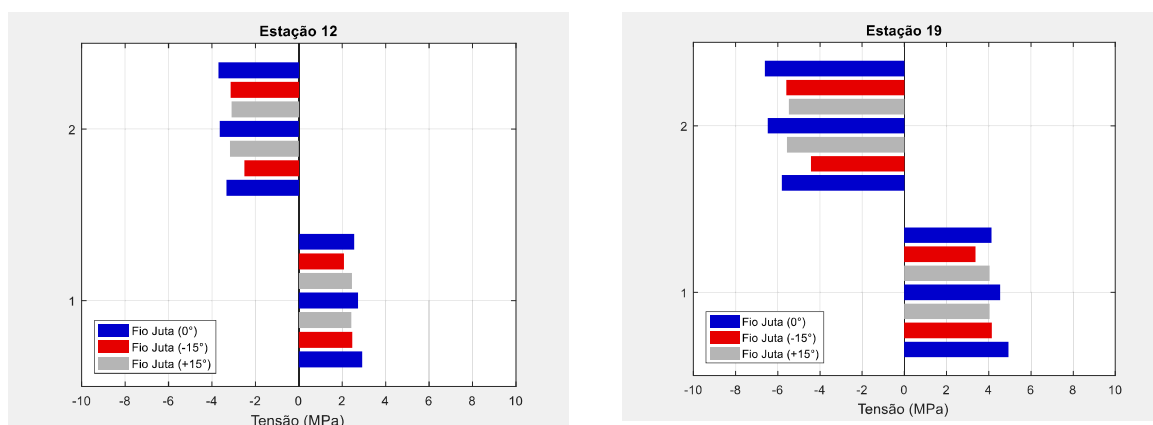


Figura 4. 9 - Tensões máximas locais  $\{\sigma^{1lk}\}$  na direção 1 das sete camadas das estações 12 e 19 do laminado do Perfil S1210, sob ação de  $M_{yy}$ .

Fonte: Próprio autor

A análise da figura 4.10 demonstra que as tensões normais locais na direção 1, da região tracionada, para as camadas com reforço de fio de juta, ficaram abaixo das tensões de ruptura em tração  $X_t$  respectivas, demonstrando, em análise preliminar, que em tração a fibra de juta atenderia as condições de solicitação impostas segundo os critérios estabelecidos no modelamento

A partir da obtenção de propriedades na simulação matemática e dos resultados de ensaio em flexão engastado, obtidos na superfície superior da pá, as propriedades de tração, compressão e cisalhamento foram confrontadas com os resultados de simulação.

A figura 4.11 apresenta resultados comparativos dos ensaios de flexão da pá com a simulação matemática.



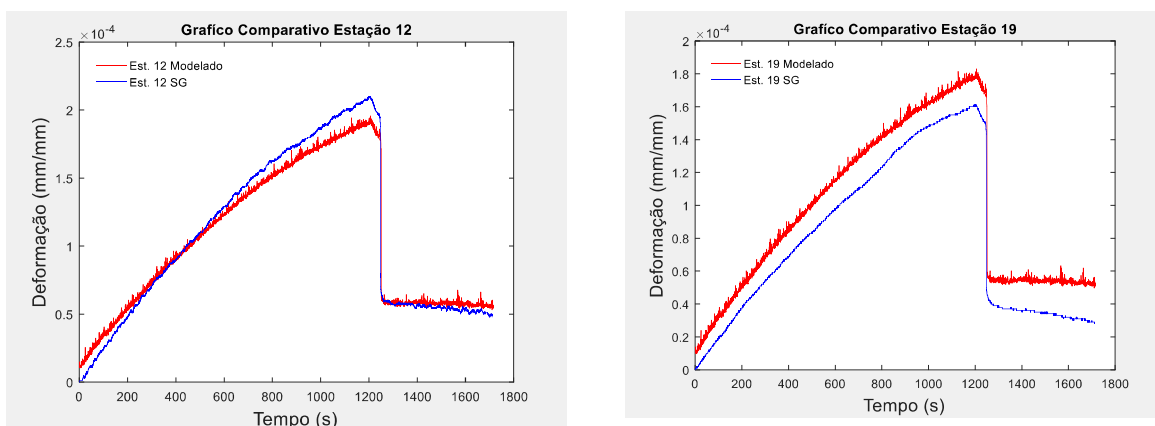


Figura 4. 10 - Gráfico comparativo dos resultados de simulação com as deformações máximas locais na direção 1 das sete camadas das estações 12 e 19 do laminado do Perfil S1210, sob ação de  $M_{yy}$ .

Fonte: Próprio autor

A análise da figura 4.11 demonstra que as deformações na direção 1, da região tracionada, para as 7 (sete) camadas com reforço de fio de juta, unidirecionalmente dispostos, que em análise preliminar, atenderia as condições de solicitação impostas segundo os critérios estabelecidos no modelamento, ainda que por margem estreita para a configuração testada.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Neste trabalho o uso de fibras de juta como reforço e matriz epóxi foi avaliado na construção de pás de uma turbina eólica de pequena escala para regiões de baixa velocidade de vento, baseado na Teoria do Momento do Elemento de Pá (BEM), na Teoria Clássica dos Laminados (TCL) e na Teoria de Fluxo de Cisalhamento de Bredt-Batho Extendida (EBSFT).

- 1) Os modelamentos aerodinâmico e estrutural foram eficientes na geração e análise da pá, permitindo a estimação das propriedades elásticas da seção transversal ao longo de todo o comprimento e a avaliação interativa da arquitetura do laminado;
- 2) O modelamento estrutural foi preciso em estimar a rigidez torsional da pá e a rigidez flexural em torno do eixo Y, quando comparado a valores experimentais da literatura;
- 3) Considerando o critério de falha de tensão máxima, a fibra de juta reforçando a matriz de epóxi atendeu aos níveis de tensão estimados na casca e na alma da seção da pá;

A técnica utilizada no trabalho de confecção da pá atende para esta aplicação, pois o compósito necessita de cura sob vácuo para melhor integração fibra /matriz.

Por fim, em análise preliminar, as fibras de juta se mostraram viáveis no reforçamento de compósitos de matriz epóxi para uso em pás de turbinas eólicas de pequena escala para regiões de baixa intensidade de vento, vindo a ser uma opção renovável de material de reforço, isolada ou em consórcio com fibras sintéticas, reduzindo o impacto ambiental do crescente volume de peças e componentes sob descarte da indústria eólica.

## 5.1 - CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

Acredita-se que a pesquisa elaborada, os métodos aplicados e o produto desenvolvido tenham sido bem-sucedidos, uma vez que se considera terem sido alcançados seus objetivos e obrigações no que tange ao cumprimento de todo o processo para obtenção do título de doutor. Salienta-se que mesmo acreditando ter-se cumprido os objetivos propostos por essa pesquisa, não se pretende caracterizá-la como uma obra acabada, cuja temática esgota-se nessas páginas. Muito pelo contrário, certifica-se ser essa obra apenas uma parcela de contribuição ao desenvolvimento científico e tecnológico, reconhecendo a limitação humana e evidenciando o paradigma de que existe algo mais a ser realizado, descoberto e explorado. Desta forma as conclusões sobre a associação de fibra de juta e resina epóxi para aplicação em pás eólicas não se apresentam em sua totalidade nessa pesquisa. O que ora é evidenciado constitui uma amostra inicial importante acerca dessa realidade, a qual se espera poder servir como um princípio e não como um fim em si mesma.

## 5.2 – PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Confeccionar pás eólicas utilizando matriz de origem vegetal, como por exemplo resina de mamona e ou resina de breu branco
- Confeccionar pás eólicas para turbinas eólicas de baixa intensidade utilizando outras fibras vegetais com matriz de origem vegetal como breu branco e ou mamona.
- Variar o tipo da fibra de reforço na fabricação do laminado para pás eólicas para ventos de baixa intensidade.
- Variar a orientação das fibras de reforço quanto a sua solicitação na estrutura da pá eólica.
- Ajustar o modelo do laminado para determinação das propriedades de forma, condicionando melhor a técnica de infusão de resina para uma melhor resposta.
- Determinar a porosidade dos compósitos fabricados em função da sua origem.
- Determinar a absorção de umidade na superfície da pá eólica em compósitos de fibra natural.
- Determinar a condutividade térmica e elétrica dos compósitos laminados

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WANG X, CAI C, CAI SG, et al. “A review of aerodynamic and wake characteristics of floating offshore wind turbines”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2023;175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113144>.
- [2] DOLIŃSKI Ł, KRAWCZUK M, ZAK A. “Detection of Delamination in Laminate Wind Turbine Blades Using One-Dimensional Wavelet Analysis of Modal Responses”. *Shock and Vibration* 2018;2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4507879>.
- [3] KALKANIS K, PSOMOPOULOS CS, KAMINARIS S, et al. “Wind turbine blade composite materials - End of life treatment methods”. *Energy Procedia* 2019; 157:1136–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.281>.
- [4] DAHMOUNI AW, OUESLATI MM, NASRALLAH S BEN. “Experimental Investigation of Tip Vortex Meandering in the Near Wake of a Horizontal-Axis Wind Turbine”, 2017; 10:1679–88. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jafm.73.243.27878>.
- [5] CHAUDHARY V, AHMAD F. “A review on plant fiber reinforced thermoset polymers for structural and frictional composites”. *Polym Test* 2020; 91:106792. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106792>.
- [6] FILHO EG DE O. FILHO, DA LUZ FS, et al. “Effect of Chemical Treatment and Length of Raffia Fiber (*Raphia vinifera*) on Mechanical Stiffening of Polyester Composites”. *Polymers Article* 2020.
- [7] BALLA VK, KATE KH, SATYAVOLU J, et al. “Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects”. *Compos B Eng.* 2019;174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106956>.
- [8] BORA M, SHARMA AV, KUMARI P, “Investigation of bamboo-based vertical axis wind turbine blade under static loading”. *Ocean Engineering* 2023;285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115317>.
- [9] SILVA G, KIM S, AGUILAR R, NAKAMATSU J. “Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers – A review of potential eco-friendly applications to the construction industry”. *Sustainable Materials and Technologies* 2020;23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00132>.
- [10] AWAIS H, NAWAB Y, AMJAD A, et al. “Open Access Environmental benign natural fibre reinforced thermoplastic composites: A review”. *Composites Part C: Open Access* 2021;4: 100082. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100082>.

- [11] MISHRA T, MANDAL P, ROUT AK. “A state-of-the-art review on potential applications of natural fiber-reinforced polymer composite filled with inorganic nanoparticle”. *Composites Part C: Open Access* 2022; 9:100298.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100298>.
- [12] CHATURVEDI R, PAPPU A, TYAGI P., et al. “Next-generation high-performance sustainable hybrid composite materials from silica-rich granite waste particulates and jute textile fibres in epoxy resin”. *Ind Crops Prod* 2022; 177:114527.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114527>.
- [13] THYAVIHALLI GIRIJAPPA YG, MAVINKERE RANGAPPA S, et al. Natural Fibers as Sustainable and Renewable Resource for Development of Eco-Friendly Composites: A Comprehensive Review. *Front Mater* 2019; 6:1–14.  
DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00226>.
- [14] BEN SMAIL Y, EL MOUMEN A, IMAD A, et al. “The effects of environmental conditions on the mechanical properties of jute yarns”. *Mater Today Proc* 2019; 30:860–4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.341>.
- [15] RAMAKRISHNAN S, KRISHNAMURTHY K, RAJESHKUMAR G. “Experimental Analysis of Tribological Behaviour of Jute Fiber-Reinforced Nanoclay Filled Epoxy Composites”. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-9809-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-15-9809-8_1).
- [16] HAYNES R, CLINE J, SHONKWILER B, et al. “On plane stress and plane strain in classical lamination theory”. *Compos Sci Technol* 2016; 127:20–7.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.02.010>.
- [17] RANI M, CHOUDHARY P, KRISHNAN, et al. “A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades”. *Compos B Eng* 2021;215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108768>.
- [18] BYRNE R, HEWITT NJ, GRIFFITHS P, et al. “Observed site obstacle impacts on the energy performance of a large scale urban wind turbine using an electrical energy rose”. *Energy for Sustainable Development* 2018; 43:23–37.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.12.002>.
- [19] MURRAY RE, BEACH R, BARNES D, et al. “Structural validation of a thermoplastic composite wind turbine blade with comparison to a thermoset composite blade”. *Renew Energy* 2021; 164:1100–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.040>.
- [20] BAGHERPOOR T, XUEMIN L. “Structural Optimization Design of 2MW Composite Wind Turbine Blade”. *Energy Procedia* 2017; 105:1226–33.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.420>.

- [21] KALAGI GR, PATIL R, NAYAK N. “Experimental Study on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composite Materials for Wind Turbine Blades”. *Mater Today Proc* 2018; 5:2588–96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.043>.
- [22] SIDDIQUI MO, FEJA PR, BOROWSKI P, et al, “Wind turbine nacelle testing: State-of-the-art and development trends”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2023;188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113767>.
- [23] TUMMALA A, VELAMATI RK, SINHA DK. et al. “A review on small scale wind turbines”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016; 56:1351–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>.
- [24] IKEDA T, TANAKA H, YOSHIMURA R, et al. “A robust biomimetic blade design for micro wind turbines”. *Renew Energy* 2018; 125:155–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.093>.
- [25] SCAPPATICI L, BARTOLINI N, CASTELLANI F, et al. “Optimizing the design of horizontal-axis small wind turbines: From the laboratory to market”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2016; 154:58–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.04.006>.
- [26] BAMBACH MR. “Direct comparison of the structural compression characteristics of natural and synthetic fiber-epoxy composites: Flax, jute, hemp, glass and carbon fibers”. *Fibers* 2020; 8:1–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/fib8100062>.
- [27] BARNES RH, MOROZOV E V., “Shankar K. Improved methodology for design of low wind speed specific wind turbine blades”. *Compos Struct* 2014; 119:677–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.034>.
- [28] YANG H, CHEN J, PANG X, et al. “A new aero-structural optimization method for wind turbine blades used in low wind speed areas”. *Compos Struct* 2019; 207:446–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.050>.
- [29] <http://airfoiltools.com/> n.d.
- [30] RUEDA SAJ, VAZ JRP. “An approach for the transient behavior of horizontal axis wind turbines using the blade element theory”. *Ciencia y Engenharia/ Science and Engineering Journal* 2015; 24:95–102. DOI: <https://doi.org/10.14393/19834071.2015.31498>.
- [31] SWISHER P, MURCIA LEON JP, GEA-BERMÚDEZ J, “Münster M. Competitiveness of a low specific power, low cut-out wind speed wind turbine in North and Central Europe towards 2050”. *Appl Energy* 2022;306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118043>.

- [32] [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas\\_eolico](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico) n.d.
- [33] <https://www.google.com.br/maps> n.d.
- [34] RODRIGUES J, FUJIYAMA RT, SOUZA JA. “Polimeric composites reinforced with natural fibers from Amazon manufactured by infusion”, *Materia*. 2015:946–960.  
DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620150004.0099>
- [35] KANDOLA BK, MISTIK SI, PORNWANNACHAI W, et al. “Natural fibre-reinforced thermoplastic composites from woven-nonwoven textile preforms: Mechanical and fire performance study”. *Compos B Eng* 2018; 153:456–64.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.013>.
- [36] ASTM D 3878 - 03a. ASTM D3878 Standard Terminology for Composite Materials. Measurement 2009; i:1–4.
- [37] GON D, DAS K, PAUL P. et al “Jute Composites as Wood Substitute 2012;1:84–93.  
DOI: <https://doi.org/10.5923/j.textile.20120106.05>.
- [38] KHALID MY, AL RASHID A, ARIF ZU, et al. “Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications”. *Results in Engineering* 2021;11.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100263>.
- [39] CORDIN M, BECHTOLD T, PHAM T. “Effect of fibre orientation on the mechanical properties of polypropylene–lyocell composites”. *Cellulose* 2018; 25:7197–210.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2079-6>.
- [40] Ribeiro MM, Pinheiro MA, Rodrigues J da S, Ramos RPB, Corrêa A de C, Monteiro SN, et al. Comparison of Young’s Modulus of Continuous and Aligned Lignocellulosic Jute and Mallow Fibers Reinforced Polyester Composites Determined Both Experimentally and from Theoretical Prediction Models. *Polymers (Basel)* 2022;14.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14030401>.
- [41] Mancino A, Marannano G, Zuccarello B. Implementation of eco-sustainable biocomposite materials reinforced by optimized agave fibers. *Procedia Structural Integrity* 2018 ;8:526–38. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.12.052>.
- [42] AL-FURJAN MSH, SHAN L, SHEN X, et al. “A review on fabrication techniques and tensile properties of glass, carbon, and Kevlar fiber reinforced polymeric composites”. *Journal of Materials Research and Technology* 2022; 19:2930–59.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.008>.
- [43] CONTI-RAMSDEN J, DYER K. “Materials innovations for more efficient wind turbines”. *Renewable Energy Focus* 2015; 16:132–3.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2015.10.013>.

- [44] ZHAO X, TU W, CHEN Q, WANG G. “Progressive modeling of transverse thermal conductivity of unidirectional natural fiber composites”. *International Journal of Thermal Sciences* 2021; 162:106782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106782>.
- [45] HASELBACH PU, BITSCHKE RD, BRANNER K. “The effect of delaminations on local buckling in wind turbine blades”. *Renew Energy* 2016; 85:295–305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.053>.
- [46] XIE J, LIU Z, TIAN H, et al. “Influence of water penetration on glass fiber-epoxy resin interface under electric field: A DFT and molecular dynamics study”. *J Mol Liq* 2023; 385:122346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122346>.
- [47] YAN L, CHOUW N, JAYARAMAN K. “Flax fibre and its composites - A review”. *Compos B Eng* 2014; 56:296–317. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.014>.
- [48] SREENIVAS HT, KRISHNAMURTHY N, ARPITHA GR. “A comprehensive review on light weight kenaf fiber for automobiles”. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* 2020; 3:328–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.05.003>.
- [49] SOOD M, DWIVEDI G. “Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites: A review”. *Egyptian Journal of Petroleum* 2018; 27:775–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.11.005>.
- [50] ABDALLA JA, HAWILEH RA, BAHURUDEEN A, et al. “A comprehensive review on the use of natural fibers in cement/geopolymer concrete: A step towards sustainability”. *Case Studies in Construction Materials* 2023;19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02244>.
- [51] SANJAY MR, MADHU P, JAWAID M, et al, “Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review”. *J Clean Prod* 2018; 172:566–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.101>.
- [52] KARTHIN, KUMARESAN K, SATHISH S, et al. “An overview: Natural fiber reinforced hybrid composites, chemical treatments and application areas”. *Mater Today Proc* 2019;27:2828–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.011>.
- [53] VERLANGER Á, GOMES R, CRISTINE F, et al. “Effect of Carnauba Wax and Coconut Fiber Contents on Tensile Properties of Corn 2019;22:1–7. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0053>
- [54] MEKONNEN BY, MAMO YJ. “Tensile and flexural analysis of a hybrid bamboo/jute fiber-reinforced composite with polyester matrix as a sustainable green material for wind



- turbine blades”. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications* 2020;33:314–9. DOI: <https://doi.org/10.5829/IJE.2020.33.02B.16>.
- [55] HAO J, ZONG G, LIU Y, et al. “Study on jute twine/polypropylene pre-preg tapes: The effects of surface modification and impregnation”. *Constr Build Mater* 2020; 247:118089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118089>.
- [56] MOUHSINE S EL, OUKASSOU K, ICHENIAL MM, et al. Aerodynamics and structural analysis of wind turbine blade. *Procedia Manuf*, vol. 22, Elsevier B.V.; 2018, p. 747–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.107>.
- [57] VAZ JRP, PINHO JT, MESQUITA ALA. “An extension of BEM method applied to horizontal-axis wind turbine design”. *Renew Energy* 2011; 36:1734–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.11.018>.
- [58] MENON M, PONTA FL. “Dynamic aeroelastic behavior of wind turbine rotors in rapid pitch-control actions”. *Renew Energy* 2017; 107:327–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.019>.
- [59] BUCK JW, RENNE DS. “Observations of Wake Characteristics at the Goodnoe”. Hills MOO-2 Array 1985.
- [60] THUMTHAE C, CHITSOMBOON T. “Optimal angle of attack for untwisted blade wind turbine”. *Renew Energy* 2009; 34:1279–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.09.017>.
- [61] MENON M, PONTA FL. “Dynamic aeroelastic behaviour of wind turbine rotors in rapid pitch-control actions”. *Renew Energy* 2017; 107:327–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.019>.
- [62] VAZ JRP, WOOD DH. “Performance analysis of wind turbines at low tip-speed ratio using the Betz-Goldstein model”. *Energy Convers Manag* 2016; 126:662–72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.030>.
- [63] THUMTHAE C. “Optimum Blade Profiles for a Variable-Speed Wind Turbine in Low Wind Area”. *Energy Procedia*, vol. 75, Elsevier Ltd; 2015, p. 651–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.478>.
- [64] MUHSEN H, AL-KOUZ W, KHAN W. “Small wind turbine blade design and optimization”. *Symmetry (Basel)* 2020;12. DOI: <https://doi.org/10.3390/SYM12010018>.
- [65] SANG S, WEN H, CAO AX, et al. “Dynamic modification method for BEM of wind turbine considering the joint action of installation angle and structural pendulum motion. *Ocean Engineering* 2020;215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107528>.

- [66] FEDON N, WEAVER PM, PIRRERA A, et al. “A method using beam search to design the lay-ups of composite laminates with many plies”. *Composites Part C: Open Access* 2021;4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100072>.
- [67] WANG L, LIU X, GUO L, et al. “A mathematical model for calculating cross-sectional properties of modern wind turbine composite blades”. *Renew Energy* 2014; 64:52–60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.046>.
- [68] CHEN X. “Experimental investigation on structural collapse of a large composite wind turbine blade under combined bending and torsion”. *Compos Struct* 2017; 160:435–45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.086>.
- [69] BENDER JJ, HALLETT SR, LINDGAARD E. “Parametric study of the effect of wrinkle features on the strength of a tapered wind turbine blade sub-structure”. *Compos Struct* 2019; 218:120–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.065>.
- [70] BENDER JJ, HALLETT SR, LINDGAARD E. “Investigation of the effect of wrinkle features on wind turbine blade sub-structure strength”. *Compos Struct* 2019; 218:39–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.026>.
- [71] MURRAY RE, ROADMAN J, BEACH R. “Fusion joining of thermoplastic composite wind turbine blades: Lap-shear bond characterization”. *Renew Energy* 2019; 140:501–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.085>.
- [72] ASTM D792 - 13. “Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement”. American Society for Testing and Materials 2008:6. DOI: <https://doi.org/10.1520/D0792-13.2>.
- [73] ASTM D 638-14. “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics” 1 n.d. DOI: <https://doi.org/10.1520/D0638-14>.
- [74] ASTM D3039/ D3039M-00. “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. n.d.
- [75] ASTM D5379 D5379M - 98. “Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method 1. n.d.. [https://doi.org/10.1520/D5379\\_D5379M-19E01](https://doi.org/10.1520/D5379_D5379M-19E01)
- [76] DS-information DS/IEC/TS 61400-23 “El producerende vindmøller-Del 23: Strukturprøvning i fuld skala af rotor blade Wind turbine generator systems-Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades. 2002.
- [77] TAVARES DIAS DO RIO VAZ DA, AMARANTE MESQUITA AL, PINHEIRO VAZ JR, et al. “An extension of the Blade Element Momentum method applied to Diffuser Augmented Wind Turbines”. *Energy Convers Manag* 2014; 87:1116–23.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.064>.

- [78] WANG L, LIU X, GUO L, *et al* “A mathematical model for calculating cross-sectional properties of modern wind turbine composite blades”. *Renew Energy* 2014; 64:52–60.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.046>.