

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE UnB GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA

ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA PÁ EÓLICA DO
AEROGERADOR MODELO VERNE 555

ADRIANO ÁTIMA DE MORAIS

ORIENTADOR(A): Dra. Suzana Moreira Avila

CO-ORIENTADOR(A): Dra. Maura Angélica Milfont Shzu

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA

PUBLICAÇÃO: 53A/2017

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO – 2017

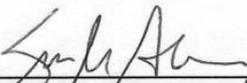
UnB - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE UnB GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA

ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA PÁ EÓLICA DO
AEROGERADOR MODELO VERNE 555

ADRIANO ÁTIMA DE MORAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA DA FACULDADE UnB GAMA E DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA.

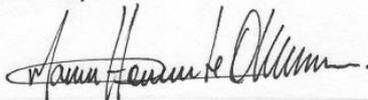
APROVADA POR:



Prof.^a Dr.^a SUZANA MOREIRA ÁVILA
(Orientador)



Prof. Dr. MARCUS VINÍCIUS GIRÃO DE MORAIS
(Examinador Interno)



Prof. Dr. MARCOS HONORATO DE OLIVEIRA
(Examinador Externo)

FICHA CATALOGRÁFICA

ADRIANO ÁTIMA DE MORAIS

ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA PÁ EÓLICA DO AEROGERADOR MODELO VERNE 555, [Distrito Federal] 2017.

No.p., 210 x 297 mm (FGA/FT/UnB, Mestre, Integridade de Materiais da Engenharia, 2017).
Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade UnB Gama. Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia.

- | | |
|---------------------------|-------------------------|
| 1. ANÁLISE NUMÉRICA | 2. ANÁLISE EXPERIMENTAL |
| 3. PÁ EÓLICA | 4. AEROGERADOR |
| 5. COMPORTAMENTO ESTÁTICO | |
| I. FGA UnB Gama/ UnB. | II. FGA-53A/2017 |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MORAIS, A. Á. (2017). ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA PÁ EÓLICA DO AEROGERADOR MODELO VERNE 555. Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Integridade da Engenharia, Publicação 54A/2017, Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF, 149p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Adriano Átima de Moraes

TÍTULO: Análise Numérico-Experimental da Pá Eólica do Aerogerador Modelo Verne 555

GRAU: Mestre ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Adriano Átima de Moraes
Campus Universitário Darcy Ribeiro – Asa Norte
CEP 71907-000 Brasília, DF – Brasil.

adriano.atima@gmail.com

DEDICATÓRIA

À minha noiva Jéssica, aos meus pais Antônio e Maria Auxiliadora e, em especial, ao meu avô Pedro (*in memoriam*).

Não se deve o avanço da ciência ao fato de que se acumulam experiências perceptivas em número crescente no decorrer do tempo. Nem se deve o avanço da ciência ao fato de cada vez mais faríamos melhor o uso de nossos sentidos. Não se pode destilar a ciência a partir das experiências dos sentidos não interpretadas, por mais industrioso que seja o modelo pelo qual as escolhamos e selecionamos. Nosso único meio de interpretar a natureza são as ideias audazes, as antecipações injustificadas e o pensamento especulativo: estes são nosso único *organon*, nosso único instrumento para captá-la. E devemos arriscá-los para conseguir o prêmio. Aqueles de nós que não estão dispostos a expor suas ideias ao risco da refutação não tomam parte no jogo da ciência.

Karl Raimund Popper

AGRADECIMENTOS

À minha noiva Jéssica, por toda cumplicidade e incentivo em momentos particulares. Compreensão, lealdade e paciência em tempos de ausência. Obrigado pelos conselhos, carinho e amor.

Aos meus pais Antônio e Maria Auxiliadora, pelo apoio incondicional no decurso desta pós-graduação. Obrigado por todo sacrifício.

Às minhas orientadoras Suzana e Maura, pela importante orientação acadêmica, confiança e amizade. A elas expressei minha profunda gratidão pelos demasiados ensinamentos e empatia nas etapas mais difíceis do trabalho, sobretudo, pela oportunidade de ser integrante de um projeto tão grandioso que esta Universidade investe.

Ao professor Girão pelas fundamentais contribuições em momentos importantes ao longo do curso. A quem me espelho pela conduta, humildade e conhecimento. Obrigado pela oportunidade de ser seu aluno.

Ao professor Honorato, pelo empenho e disponibilidade nas instruções para a realização dos ensaios estáticos, por dedicar seu tempo para compartilhar elementos significativos que engrandeceram a pesquisa. Tive o privilégio de ter o senhor como professor, ensinamentos dos quais levarei como exemplo para o resto da vida.

Ao Laboratório de Estruturas – LABEST/UnB, coordenado pelo professor Honorato, por ceder espaço e equipamentos para a realização dos ensaios experimentais estáticos. Ao servidor Magno e aluna Patrícia (GETEC/UnB) por dispender tempo para a montagem da bancada experimental em alguns ensaios.

Ao Laboratório de Vibrações – ENM/FT, por ceder espaço para a composição desta pesquisa. Sobretudo, ao “Seu” Filipe, que tanto se entusiasmou com a evolução deste trabalho.

Aos colegas que tive oportunidade de conhecer e conviver: professora Sandra, professora Paula, professor Barcelos, professor Emmanuel, professora Luíza, Bruna, Mariana, Sizelízio, Agnaldo, Guilherme, Alejandro, Pedro, Diego, Magno, Hebert, Beber, Hugo, William, Eduardo, Luiz, Mansour, Maycol, Rangel, Tássio, Paulo, Saieny, Údine e Rafel, pela contribuição direta e indireta e pela amizade. Alguns se tornaram grandes amigos.

Ao Danilo pelo apoio incondicional na elaboração dos códigos utilizados para a modelagem da pá e na disponibilização dos mesmos, bem como na montagem e execução dos ensaios estáticos. Serei eternamente grato por todo auxílio dispensado, estimado parceiro.

À secretaria e coordenação do Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia, pela presteza nos atendimentos.

À FAP/DF, pelo apoio financeiro.

À Universidade de Brasília, pela oportunidade concedida.

RESUMO

ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA PÁ EÓLICA DO AEROGERADOR MODELO VERNE 555

Autor: ADRIANO ÁTIMA DE MORAIS

Orientador: Dra. Suzana Moreira Avila

Co-orientador: Dra Maura Angélica Milfont Shzu

Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia

Brasília, dezembro de 2017.

O aumento do comprimento das torres eólicas e do diâmetro do rotor, ao longo dos anos, tornaram também as pás eólicas uma estrutura flexível e sujeita a níveis de vibração importantes de serem avaliados. A maioria dos acidentes com turbinas eólicas são ocasionadas por falhas ocorridas nas pás. A causa dessas falhas advém de diversos fatores, como a atuação de rajadas de vento, relâmpagos, fadiga, entre outros. Cerca de 30 falhas de pás eólicas estão ocorrendo por ano em parques eólicos operados comercialmente em todo o mundo. Uma das demandas e desafios do setor eólico tem como linha prioritária garantir a integridade estrutural de aerogeradores enquanto sujeitas às complexas cargas estáticas e dinâmicas. O colapso de pás eólicas devido a danos excessivos de carga ou de fadiga, pode levar à destruição de toda a turbina. Segundo a norma IEC 61400/23:2001, a pá deve ser submetida a ensaios com carregamento estático de distribuição normalizada da carga de projeto, produzindo uma margem entre essa carga e a resistência à ruptura da pá na sua posição mais fraca. Desta forma, este trabalho se propôs avaliar a resistência de um conjunto de pás da turbina Verne 555 sob o ponto de vista estático, através de procedimentos experimentais e simulações numérico-computacionais por meio do Método dos Elementos Finitos, utilizando o *software* ANSYS. Teve-se como objetivo calibrar o modelo numérico do objeto de estudo deste trabalho previamente elaborado por Araújo *et al.* (2016) através de ensaios experimentais estáticos, realizados de acordo com a norma IEC 61400/23:2001, ensaios de tração para a verificação do módulo de elasticidade e tensão de ruptura do material, de acordo com a norma ASTM D3039:2014, bem como ensaios térmicos para a caracterização do tipo de material interno utilizado na fabricação da pá por meio da análise termogravimétrica. As cargas impostas nos testes estáticos e no modelo numérico foram extraídas da modelagem aerodinâmica pela teoria do elemento de pá via *software* QBlade. O comportamento da pá quanto à deformação apontou a necessidade de uma análise numérica que contemplasse a não-linearidade geométrica. Esta evolução técnica permitiu compreender melhor a realidade que rege o problema. As pás não apresentaram um comportamento padrão quanto à ruptura, exceto na formação das fissuras que foi sempre transversal à seção. Em dois ensaios estáticos os efeitos *brazier*, *buckling* e delaminação foram identificados. O ensaio de tração em amostras retiradas da pá nos forneceu parâmetros mecânicos importantes para a calibração do modelo numérico, bem como na identificação dos materiais internos através do método de termogravimetria, já que nenhuma informação a respeito da pá foi fornecida pelo fabricante.

Palavras-chaves: Análise numérica, análise experimental, pá eólica, aerogerador, comportamento estático.

ABSTRACT

NUMERICAL EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A WIND BLADE FROM VERNE 555 WIND TURBINE MODEL

Author: Adriano Átíma de Moraes

Supervisor: Dra. Suzana Moreira Avila

Co-supervisor: Dra. Maura Angélica Milfont Shzu

Post-Graduation Program in Engineering Materials Integrity

Brasília, december of 2017.

Increasing the length of wind towers and rotor diameter over the years have also made wind turbines a flexible structure subject to significant levels of vibration to be evaluated. Most accidents with wind turbines are caused by failures in blades. The cause of these failures comes from several factors, such as the action of wind gusts, lightning, fatigue, among others. About 30 failures of wind turbines are occurring annually in commercially operated wind farms around the world. One of the demands and challenges of the wind sector has as a priority line to guarantee the structural integrity of wind turbines while subject to complex static and dynamic loads. The collapse of wind turbines due to excessive load or fatigue damage can lead to the destruction of the entire turbine. According to IEC 61400/23: 2001, the blade must be subjected to tests with static loading of standard design load distribution, producing a margin between this load and the blade rupture strength at its weakest position. In this way, this work intends to evaluate the resistance of a Verne 555 turbine blade set from a static point of view, through experimental procedures and numerical-computational simulations using the Finite Element Method using the ANSYS software. The aim of this study was to calibrate the numerical model of the study object of this work previously elaborated by Araújo et al. (2016) by means of static experimental tests carried out in accordance with IEC 61400/23: 2001, traction tests for the modulus of elasticity and traction strength of the material in accordance with ASTM D3039: 2014 as well as thermal tests for the characterization of the type of internal material used in the manufacture of the blade by thermogravimetric analysis. The loads imposed on the static tests and the numerical model were obtained through aerodynamic modeling by QBlade software blade theory. The behavior of the blade on the deformation indicated the need for a numerical analysis that contemplated the geometric non-linearity. This technical evolution allowed a better understanding of the reality that governs the problem. The blades did not present a standard behavior regarding the rupture, except in the formation of the fissures that was always transversal to the section. In two static tests the brazier, buckling and delamination effects were identified. The traction test on samples taken from the spade gave us important mechanical parameters for the calibration of the numerical model as well as the identification of the internal materials by means of the thermogravimetry method, since no information about the spade was provided by the manufacturer.

Key-words: Numerical analysis, experimental analysis, wind blade, wind turbine, static behavior.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	3
1.2.1 Objetivo geral.....	7
1.2.2 Objetivos específicos.....	7
1.3 METODOLOGIA	8
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL	11
2.2 PÁS DE TURBINAS EÓLICAS	14
2.3 ENSAIO ESTÁTICO DE PÁS EÓLICAS	16
2.3.1 Revisão da Literatura sobre Ensaio Estáticos em Pás	17
2.3.2 Metodologias Laboratoriais para Ensaio Estáticos.....	19
2.3.3 Procedimentos Normativos para Carga de Teste	22
2.4 MATERIAL COMPÓSITO DE PÁS EÓLICAS.....	25
2.4.1 Propriedades Mecânicas.....	25
2.4.2 Metodologias Laboratoriais para Ensaio de Tração	26
2.4.4 Procedimentos Normativos.....	28
3. ANÁLISE NUMÉRICA DO CARREGAMENTO AERODINÂMICO NO ROTOR EÓLICO 32	
3.1 ASPECTOS GERAIS	32
3.2 AERODINÂMICA DE ROTORES EÓLICOS DE EIXO HORIZONTAL.....	34
3.2.1 Carregamento Aerodinâmico	34
3.2.1 Teoria do Momento do Elemento de Pá.....	37
3.3 QBLADE.....	41
3.3.1 Modelagem Geométrica da Pá	42
4. ANÁLISE NUMÉRICA ESTRUTURAL.....	49
4.1 DESCRIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO: PÁ DO AEROGERADOR VERNE 555	52
4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA PRELIMINAR	54
4.2.1 Análise de Convergência	58
4.2.2 Linearidade e Não Linearidade Geométrica	58

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	60
5.1 PROJETO DA BANCADA DE TESTES PARA ENSAIO ESTÁTICO	60
5.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO E COLETA DE DADOS.....	62
5.2.1 Ensaio Estático.....	62
5.2.2 Ensaio de Tração.....	65
5.3 METODOLOGIA DE ENSAIO	65
5.3.1 Ensaio Estático.....	65
5.3.2 Ensaio de Tração.....	68
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	70
6.1 ENSAIO ESTÁTICO	70
6.1.1 Ensaio 1.....	70
6.1.2 Ensaio 2.....	76
6.1.3 Ensaio 3.....	82
6.2 ENSAIO DE TRAÇÃO	87
6.3 ANÁLISE DO MODELO NUMÉRICO PRELIMINAR	90
6.4 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....	93
6.4.1 Modelo Numérico Calibrado	95
7. CONCLUSÕES.....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXOS.....	114
ANEXO 1: DESENHO GEOMÉTRICO DA PÁ EM CAD E RESPECTIVAS SEÇÕES TRANSVERSAIS.	115
ANEXO 2: POSIÇÃO DAS SEÇÕES EXPORTADAS PARA ANSYS.....	117
ANEXO 3: TRANSFORMAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS DAS SEÇÕES PARA AS COORDENADAS DO QBLADE.....	118
ANEXO 4: CORREÇÕES PARA A TEORIA <i>BEM</i>	119
ANEXO 5: VISTAS DA BANCADA PARA TESTE EXPERIMENTAL.	121
ANEXO 6: CARGAS APLICADAS NOS ENSAIOS	123
ANEXO 7: ÂNGULOS DE ROTAÇÃO NO ENGASTE OCORRIDOS NO ENSAIO 1.....	125
ANEXO 8: SCRIPT ANSYS DA MODELAGEM DA PÁ LINEAR E NÃO-LINEAR.	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – As quatro classes de turbinas eólicas, de acordo com a IEC. (Fonte: IEC 61400/1:2014).	13
Tabela 2.2 – Coeficientes de segurança parciais para análise de carga de projeto e de testes estáticos. (Fonte: IEC 61400/1:2014 e IEC 61400/23:2001).	24
Tabela 2.3 – Requisitos geométricos da amostra para ensaios de tração. (Fonte: ASTM D3039:2014 – adaptado).	28
Tabela 2.4 – Recomendações geométricas da amostra para ensaios de tração. (Fonte: ASTM D3039:2014 – adaptado).	29
Tabela 2.5 – Tipo de fratura – primeira letra. (Fonte: ASTM D3039:2014 – adaptado).	29
Tabela 2.6 – Área de fratura – segunda letra. (Fonte: ASTM D3039:2014 – adaptado).	30
Tabela 2.7 – Local de fratura – terceira letra. (Fonte: ASTM D3039:2014 – adaptado).	30
Tabela 3.1 – Área de fratura – segunda letra. (Fonte: ASTM D3039:2014 – adaptado).	46
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados na análise. (Fonte: Callister Jr., 2007).	53
Tabela 4.2 – Valores das cargas para testes numéricos e experimentais.....	56
Tabela 4.3 – Deflexões, momentos e tensões na pá.	57
Tabela 5.1 – Características dos extensômetros usados nos ensaios.....	63
Tabela 5.2 – Características da célula de carga tipo S. (Fonte: HBM, 2017).	64
Tabela 5.3 – Dados do módulo <i>Spider8</i> para aquisição de dados. (Fonte: HBM, 2017).	64
Tabela 5.4 – Características técnicas da talha elétrica. (Fonte: Nagano, 2017).	66
Tabela 6.1 – Estágios de carregamento para os estados limites utilizados nos ensaios.	70
Tabela 6.2 – Modos de fratura dos CP's analisados de acordo com ASTM D3039:2014.	88
Tabela 6.3 – Propriedades mecânicas do material compósito.	89
Tabela 6.4 – Itens ajustados para a configuração do novo modelo numérico.	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Escala de turbinas eólicas. (Fonte: Da Silva Júnior, 2014, <i>apud</i> IEA, 2013).	1
Figura 1.2 – Torre eólica em colapso integral no parque eólico Lemnhukt, Suécia. (Fonte: portal-energia.com).....	4
Figura 1.3 – Destroços em fibra proveniente de uma das pás do aerogerador. (Fonte: portal-energia.com).....	5
Figura 1.4 – Torre eólica caída no Complexo do Chato. (Fonte: Ribeiro, 2014).....	6
Figura 2.1 – Turbina eólica de eixo horizontal modelo V112-3. (Fonte: Vestas, 2017).....	11
Figura 2.2 – Configuração típica de uma moderna TEEH. (Fonte: Schubel e Crossley, 2012).....	12
Figura 2.3 – Pequena turbina eólica instalada em residência unifamiliar. (Fonte: https://www.energy.gov/energysaver/articles/want-tax-credit-small-wind-system-be-sure-its-certified . Acesso em 02 de fevereiro de 2017).....	13
Figura 2.4 – Modelo de pá de uma TEEH. (Fonte: Stiesdal, 1999 – modificado).....	14
Figura 2.5 – Representação dos aerofólios em seção transversal. (Fonte: Manwell <i>et al.</i> , 2009 - modificado).....	14
Figura 2.6 – Sistema estrutural interno de uma pá de turbina eólica em seção transversal. (Fonte: Tong, 2010 – modificado).....	15
Figura 2.7 – Teste estático de uma pá eólica. (Fonte: Sandia National Laboratories, 2007).	19
Figura 2.8 – Teste estático de uma pá eólica. (Fonte: Sandia National Laboratories, 2007).	20
Figura 2.9 – Método adotado por Vogt (2010) na simulação de cargas aerodinâmicas. (Fonte: Vogt, 2010).	20
Figura 2.10 – Bancada experimental para ensaios de fadiga. (Fonte: Alé <i>et al.</i> , 2011).	21
Figura 2.11 – Dispositivo para ensaios estáticos de pás de aerogeradores. (Fonte: Campos, 2013).21	21
Figura 2.12 – Ensaio de flexão da pá adotado por Campos (2013). (Fonte: Campos, 2013).....	22
Figura 2.13 – Camadas e suas respectivas escalas na estruturação de uma pá eólica. (Fonte: Tong, 2010 – modificado).	25
Figura 2.14 – Representação esquemática do ensaio de tração em um CP. (Fonte: Garcia <i>et al.</i> , 1999).	27
Figura 2.15 – Padrões de falha em materiais compósitos de matriz polimérica. (Fonte: ASTM D3039:2014).	31
Figura 3.1 - A energia extraída de uma turbina eólica. (Fonte: Burton <i>et al.</i> , 2001).	32
Figura 3.2 – Vista esquemática das linhas de corrente de um fluxo instável considerando a rotação da turbina. (Fonte: Manwell <i>et al.</i> , 2009 – modificado).....	33
Figura 3.3 – Geometria de uma seção transversal da pá de uma TEEH. (Fonte: Manwell <i>et al.</i> , 2009 – modificado).	35
Figura 3.4 – Modelo de fluxo retilíneo de Betz. (Fonte: Pinto, 2013 – adaptado).....	36
Figura 3.5 – Modelo atual de escoamento de um fluido através de uma turbina. (Fonte: Pinto, 2013 – modificado).	37
Figura 3.6 – Seções transversais da pá exportadas para o <i>software</i> QBlade.....	44
Figura 3.7 – Gráfico $Cl \times Cd$ das seções da pá.....	44
Figura 3.8 – Extrapolação dos perfis aerodinâmicos.	45
Figura 3.9 – Projeção da pá eólica através das informações geométricas de cada perfil.	45
Figura 3.10 – (a) $C_{p,max}$ versus TSR máximo e (b) $P_{mec,max}$ versus TSR máximo.	46
Figura 3.11 – Força do vento aplicada ao longo da pá.....	47
Figura 3.12 – Impulso aplicado no rotor da turbina.....	47
Figura 3.13 – Torque aplicado no eixo de rotação.....	47

Figura 4.1 – (a) Curva de potência e (b) TEEH do modelo VERNE555. (Fonte: Enersud, 2016).	52
Figura 4.2 – Pá eólica da empresa Enersud.	53
Figura 4.3 – Materiais e detalhe da estrutura interna da pá.	53
Figura 4.4 – Materiais e detalhe da estrutura interna da pá.	54
Figura 4.5 – Exemplo da quarta seção após aplicado o MESH200 configurada no ANSYS.	54
Figura 4.6 – Malha das primeiras seções agrupadas no ANSYS.	55
Figura 4.7 – Modelo em elementos finitos adotado.	55
Figura 4.8 – Representação da pá eólica submetida a carga pontual.	56
Figura 4.9 – Diagrama de momento fletor para a carga de projeto. (Fonte: Próprio autor).	57
Figura 4.10 – Tensão para a carga de projeto. (Fonte: Próprio autor).	57
Figura 4.11 – Análise de convergência da malha. (Fonte: Próprio autor).	58
Figura 5.1 – Representação da bancada de ensaio para testes estáticos de pás eólicas.	60
Figura 5.2 – Detalhe do suporte da pá.	61
Figura 5.3 – Posicionamento dos extensômetros (em milímetros).	63
Figura 5.4 – Sistema de montagem para aquisição de sinais.	63
Figura 5.5 – Configuração do pré-ensaio de tração.	65
Figura 5.6 – Configuração da bancada de testes.	66
Figura 5.7 – (a) Local e (b) posicionamento das trenas à laser (em milímetros).	67
Figura 5.8 – (a) Posicionamento do laser de mão, (b) anteparo para medir a distância das miras à laser para determinar a rotação do engaste.	67
Figura 5.9 – Corpos de prova utilizados no ensaio de tração.	68
Figura 5.10 – Dimensão do corpo de prova. (Fonte: Pacheco, 2016).	69
Figura 5.11 – Máquina de tração marca Instron 8801.	69
Figura 6.1 – Ensaio de flexão 1 da pá eólica com 100% da carga de projeto.	71
Figura 6.2 – Detalhe dos ajustes no local onde ocorreu o deslizamento do cabo.	71
Figura 6.3 – Local das fissuras no ensaio 1.	72
Figura 6.4 – Ângulo de inclinação produzido entre o cabo de aço e o local de aplicação da carga durante o ensaio 1.	73
Figura 6.5 – Diagrama de Força vs Deflexão do Ensaio 1 considerando decomposição da força.	73
Figura 6.6 – Gráfico comparativo de Força vs Deflexão com e sem a folga do engaste no Ensaio 1.	74
Figura 6.7 – Diagrama Força vs Deformação correspondente aos extensômetros na região E1 do Ensaio 1.	75
Figura 6.8 – Diagrama Força vs Deformação correspondente aos extensômetros na região E2 do Ensaio 1.	75
Figura 6.9 – Diagrama Força vs Deformação correspondente aos extensômetros na região E3 do Ensaio 1.	76
Figura 6.10 – Ligação da polia de aplicação da força na pá.	77
Figura 6.11 – Detalhe do dano ocorrido durante o Ensaio Estático 2.	78
Figura 6.12 – Instabilidade da membrana da superfície comprimida da pá no Ensaio 2.	78
Figura 6.13 – Colapso da pá.	79
Figura 6.14 – Diagrama Força vs Deflexão do Ensaio 2.	79
Figura 6.15 – Diagrama Força vs Deformação correspondente aos extensômetros na região E1 do Ensaio 2.	80
Figura 6.16 – Diagrama Força vs Deformação correspondente aos extensômetros na região E2 do Ensaio 2.	80
Figura 6.17 – Diagrama Força vs Deformação correspondente aos extensômetros na região E3 do Ensaio 2.	81

Figura 6.18 – Detalhe da inserção dos grampos no suporte.....	82
Figura 6.19 – Surgimento das primeiras fissuras superficiais no Ensaio 3.....	83
Figura 6.20 – Detalhe da fissura na borda de ataque no Ensaio 3.....	83
Figura 6.21 – Detalhe da fissura na borda de fuga no Ensaio 3.....	84
Figura 6.22 – Diagrama Força vs Deflexão do Ensaio 3.....	84
Figura 6.23 – Deformação dos extensômetros na região E1 do Ensaio 3.....	85
Figura 6.24 – Deformação dos extensômetros na região E2 do Ensaio 3.....	85
Figura 6.25 – Deformação dos extensômetros na região E3 do Ensaio 3.....	86
Figura 6.26 – Correlação entre os resultados estáticos experimentais.....	87
Figura 6.27 – Região de ruptura dos CP's.....	88
Figura 6.28 – Curvas Tensão-Deformação.....	89
Figura 6.29 – Diagrama Força-Deflexão Numérico vs Ensaio 1 da deflexão no ponto 1.....	91
Figura 6.30 – Diagrama Força-Deflexão Numérico vs Ensaio 1 da deflexão no ponto 2.....	91
Figura 6.31 – Diagrama Força-Deflexão Numérico vs Ensaio 1 da deflexão no ponto 3.....	92
Figura 6.32 - Diagrama Força-Deflexão Numérico vs Ensaio 1 da deflexão no ponto 4.....	92
Figura 6.33 – Detalhe da estrutura interna da pá.....	93
Figura 6.34 – Analisador térmico modelo SDT Q600.....	94
Figura 6.35 – Resultados de DTG/TGA da amostra de polímero componente da pá eólica.....	94
Figura 6.36 – Comparação dos diagramas força-deflexão Numéricos Calibrados vs Ensaio Estático 1.....	96
Figura 6.37 – Comparação dos diagramas força-deflexão Numéricos Calibrados vs Ensaio Estático 2.....	96
Figura 6.38 – Comparação dos diagramas força-deflexão Numéricos Calibrados vs Ensaio Estático 3.....	97

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

- ABDI – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
- ABEE – Associação Brasileira de Energia Eólica
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- ASTM – *American Society of Testing and Materials*
- AWEA – *American Wind Energy Association*
- BEM – *Blade Element Momentum*
- BIG – Banco de Informações de Geração
- CAE – *Computer Aided Engineering*
- CERNE – Centro de Estratégias em Recursos Naturais e Energia
- CFD – *Computational Fluid Dynamics*
- CHESF – *Companhia Hidroelétrica de São Francisco*
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética
- IEC – *International Electrotechnical Commission*
- GWCE – *Global Wind Council Energy*
- ISO – *Institute Standard Organization*
- MEF – Método dos Elementos Finitos
- NREL – *National Renewable Energy Laboratory*
- PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia
- SIN – Sistema Interligado Nacional
- SWT – *Small Wind Turbine*
- TEEH – Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal
- TSR – *Tip Speed Ratio*
- UnB – *Universidade de Brasília*
- VARTM – *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Process*

A – área da seção transversal
a – fator de indução axial
a' – fator de indução tangencial
b – largura da seção da pá
c – corda
Cd – coeficiente de arrasto
Cl – coeficiente de sustentação
Cp – coeficiente de potência
CP – corpo de prova
Ct – coeficiente de impulso
C θ – velocidade tangencial
D – arrasto
E – módulo de elasticidade
f_d – valor da propriedade do material
F – força
Fd – força simulada
f_k – valor característico do material
Fk – valor característico da carga
Fp – força projetada
F_x – força na direção x
F_y – força na direção y
F_z – força na direção z
GW – gigawatts
L – sustentação
l – comprimento final
l_o – comprimento inicial
M_x – momento na direção x

MW – megawatts

M_y – momento na direção y

M_z – momento na direção z

P – potência

Pa – pascal

P_{design} – potência de projeto

P_{extr} – potência extraída de projeto

r – distância do centro de giro até a ponta da pá

Re – número de Reynolds

T – impulso

ton – toneladas

U – velocidade do escoamento (vento)

U_{rel} – velocidade relativa do vento

ε – deformação

Ω – velocidade de rotação ou angular

ρ – densidade do ar em 15° C

λ – razão de velocidade de ponta

σ – resistência à tração

Δl – alongamento

η_{global} – eficiência global da turbina

η_{mec} – eficiência mecânica

α – ângulo de ataque

θ – ângulo de passo

φ – ângulo relativo do vento

γ_m – fator de segurança parcial do material

γ_f – fator de segurança parcial de carga de teste

γ_n – fator de segurança parcial de consequência de falha

γ_s – fator de segurança para testes estáticos

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

Uma das demandas e desafios do setor eólico tem como linha prioritária garantir a integridade estrutural de aerogeradores dentro da área de desenvolvimento de tecnologia. Estima-se que as pás eólicas, componentes importantes de uma turbina, atinge de 15 a 20% do custo total do aerogerador. É importante ressaltar que as condições de desempenho de uma turbina eólica dependem da eficiência das pás em captar a ação dos ventos. Todavia, é necessária uma análise de sua performance quando submetidas a carregamentos externos. A integridade estrutural é um importante tópico de análise em pás eólicas e vem ganhando importância nos últimos anos. Sua avaliação permite adequar a estrutura para suportar as condições de serviço com segurança e confiabilidade ao longo de sua vida prevista em projeto.

As pás têm atingido comprimentos cada vez maiores, conforme observado na Figura 1.1. Tem-se, por exemplo, a pá das empresas Adwen e LM Wind, da Dinamarca, considerada, em 2016, como a maior do mundo, com 88,4 m de comprimento. Concomitantemente, essas pás estão se deparando com condições de serviço severas e complexas, responsáveis pelo aparecimento de problemas em relação a segurança estrutural.

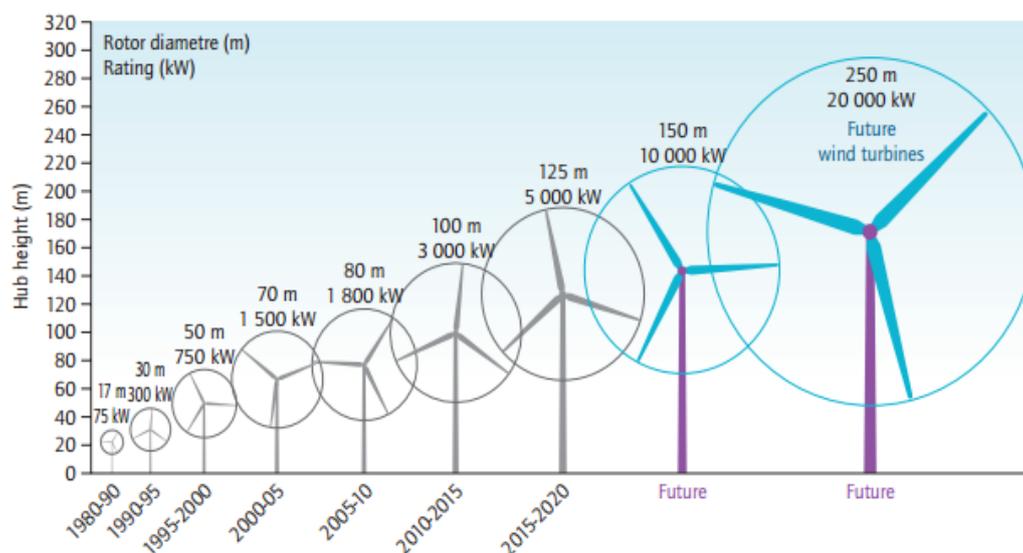


Figura 1.1 – Escala de turbinas eólicas. (Fonte: Da Silva Júnior, 2014, *apud* IEA, 2013).

Segundo Pinto (2013), a maioria dos acidentes com turbinas eólicas são ocasionadas por falhas ocorridas nas pás. A causa dessas falhas advém de fatores como a atuação de rajadas de vento, relâmpagos, fadiga, entre outros. Uma falha desse tipo pode resultar na ruptura parcial ou total da pá, danificando as outras pás, a torre e outras turbinas próximas, além de outros elementos nas proximidades. Existem registros de pedaços de pás encontrados a 1,3 km do local do acidente estrutural (Pinto, 2013).

As pás de maiores dimensões são mais flexíveis e quanto maior a altura de fixação mais sujeitas estão às velocidades elevadas do vento. Para Hau (2006), as turbinas eólicas são tidas como perfeitas máquinas de fadiga. Isso se dá pela assimetria do fluxo de vento onde se tem a relação do aumento da velocidade proporcional à altura, pois estão sujeitas a velocidades de vento maiores no campo de rotação do que próximo ao solo. Hau (2006) ainda explica que, de forma semelhante, uma assimetria é causada por ventos laterais decorrentes de mudanças rápidas na direção do vento. Isso contribui consideravelmente na vida útil das pás. Não obstante, o desenvolvimento e manutenção de pás eólicas de grande porte, altura das turbinas e o transporte preocupam os investidores.

Diversas pesquisas têm sido realizadas nos últimos anos com a finalidade de buscar tecnologias que permitem o uso de grandes pás eólicas, atendendo uma demanda cada vez maior de potência energética. Devido a essa competição os fabricantes se veem obrigados a aumentarem a eficiência das pás paralelamente a redução de custos. A otimização do projeto e a necessidade de novos materiais e processos de manufatura conduz os fabricantes de pás eólicas a assimilarem conhecimentos da indústria aeronáutica que tem utilizado cada vez mais materiais compósitos renovando seus processos de fabricação (Daniel e Ishai, 2006).

Projetos de estruturas modernas frequentemente exigem combinações de características físicas dos materiais difíceis de serem obtidas com materiais convencionais. Essas exigências podem incluir, por exemplo, uma combinação elevada de resistência mecânica, baixa densidade, alta capacidade de absorver energia no impacto, alto módulo de elasticidade e elevada resistência química. Os materiais compósitos possuem componentes com propriedades físicas e químicas distintas em sua combinação. De fato, esse tipo de material trouxe ao mercado a possibilidade de suprir as demandas futuras de turbinas eólicas, podendo ser projetadas sob medida para atenderem às exigências de projeto e, com isso, proporcionarem recursos atrativos aos projetistas.

Para determinar algumas propriedades e características das pás de aerogeradores, os projetistas utilizam *softwares* que possibilitam simulações estruturais e interações fluido-estrutura. Levando-se em consideração a inviabilidade de se realizar ensaios em escala real e dificuldade de se realizar em escala reduzida, o uso desses instrumentos torna-se bastante vantajoso. Além disso, Love e Bohlmann (1989) mencionam que no projeto de pás de rotores eólicos, a rigidez e a resistência são propriedades que devem ser consideradas para a melhoria das qualidades aeroelásticas.

A aeroelasticidade tem relação direta entre aerodinâmica e a estrutura, bem como entre a flexibilidade e controle – também conhecida como aeroservoelasticidade. Esse conceito pode ser utilizado desde estruturas de asas (Hertz *et al.*, 1981; Roberts, 2006) a estruturas de automóveis de Fórmula 1 (Thuwis *et al.*, 2009), abrangendo pás de rotores eólicos. O emprego de materiais compósitos e suas propriedades mecânicas ortotrópicas permite que um *designer* se adeque a estrutura para atender suas metas de projeto. Essa adaptação permite concretizar a rigidez direcional num desenho a fim de controlar a deformação aeroelástica, estática e dinâmica, de maneira a afetar beneficentemente o desempenho aerodinâmico e estrutural.

A projeto e a fabricação de pás eólicas são normalmente realizados em níveis genérico e específico pelo fabricante (Det Norske Veritas, 2010). Enquanto o genérico envolve a qualificação de procedimentos de projeto, materiais, métodos de fabricação e teste, a parte específica envolve a concepção, fabricação e ensaios dinâmicos e estáticos individuais de pás eólicas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Durante sua vida útil, as pás de turbina eólica estão sujeitas a diferentes tipos de cargas: aerodinâmica, inercial e gravitacional (Hansen, 2008). A resistência das pás ganha maior atenção à medida que os comprimentos das pás aumentam. Com a tendência recente para grandes pás eólicas, segundo Lee e Park (2015), o número de falhas em pás dobrou nos últimos 10 anos. Cerca de 30 falhas de pás eólicas estão ocorrendo por ano em parques eólicos operados comercialmente em todo o mundo (Caithness, 2015).

Os projetistas buscam aumentar a vida útil das pás de uma turbina eólica para exceder o ciclo de vida de 20 anos, prescrito pela maioria dos padrões e regulamentos internacionais, enquanto sujeitas às complexas cargas estáticas e dinâmicas (Abdulaziz *et al.*, 2015). Não somente pelo custo inicial considerável, mas também pelo fato do tempo de repartição e dos custos de reinstalação que, às vezes, são ainda mais financeiramente significativos. Isso coloca uma demanda de precisão maior nas ferramentas necessárias para realizar os testes de caracterização de desempenho das pás de turbina eólica antes das instalações, como testes mecânicos, conforme detalhado pela norma IEC 61400/23:2001 – Sistemas Geradores de Turbinas Eólicas: Ensaio Estruturais em Grande Escala de Pás de Rotores.

Existem vários tipos de casos em que turbinas eólicas entram em colapso. Na véspera do natal de 2015 um dos 32 aerogeradores Vestas modelo V112 de 3MW, vista na Figura 1.2, – do parque eólico Lemnhult, em Vetlanda, Suécia – entrou colapso integral ainda sem verdadeiras causas pelo ocorrido. Casos também como o do parque eólico próximo de Corme, município de Coruña de Ponteceso, Espanha, ocasionou a perda de duas pás de um aerogerador que foram lançadas sobre uma casa habitada, conforme Figura 1.3. Segundo o site Portal Energia (2016), a habitação atingida localiza-se a mais de 200 m de distância do aerogerador, onde um destroço de dimensões consideráveis colidiu com a fachada em pedra de uma casa.



Figura 1.2 – Torre eólica em colapso integral no parque eólico Lemnhult, Suécia. (Fonte: portal-energia.com).



Figura 1.3 – Destroços em fibra proveniente de uma das pás do aerogerador. (Fonte: portal-energia.com).

Um resumo feito pelo site Portal Energia (2016) mostra outros acidentes com prejuízos mais significativos. Um deles aconteceu entre a Escócia e norte da Inglaterra em 2011. Moradores que vivem próximo a um parque eólico relataram ter visto uma pá de turbina eólica caída ao chão próximo a uma estrada quando ventos de aproximadamente 240 km/h atingiam a região. Um dos responsáveis da fabricante *Proven Energy Ltda*, com sede na Escócia, admitiu que um dos seus modelos apresentavam um sistema de fixação defeituoso. Várias turbinas foram então condenadas em setembro daquele ano pela *Health and Security Executive*, levando a empresa a entrar em concordata pouco tempo depois.

No Brasil o caso mais famoso e de repercussões altas foi o do Complexo Eólico Cerro Chato, no Rio Grande do Sul, vista na Figura 1.4. Segundo a empresa Eletrosul, uma tempestade que atingiu a região com ventos de aproximadamente 250 km/h derrubou oito turbinas eólicas de 136 m de altura e de peso aproximado em 600 ton.



Figura 1.4 – Torre eólica caída no Complexo do Chato. (Fonte: Ribeiro, 2014).

A análise das forças e tensões nas pás tem sido objeto de grande interesse nos últimos anos. Com isso tem-se desenvolvido ferramentas analíticas e numéricas adequadas para a concepção e avaliação do vento em rotores de turbinas eólicas. A maior parte de falha estrutural em pás de turbinas eólicas ocorre na raiz (Chazly, 1993), surgindo a premente necessidade de utilizar um modelo capaz de diagnosticar deflexões e tensões resultantes das forças de arrasto e sustentação atuantes. Segundo o site *Wind Power Monthly* (2015), empresas de consultoria de energias renováveis afirmam que as falhas de pás eólicas são as principais causas de reivindicações de seguros no mercado *onshore* nos Estados Unidos, representando cerca de 40% das reclamações à frente de caixas de câmbio (35%) e geradores (10%).

O colapso de pás eólicas, devido a danos excessivos de carga ou de fadiga, pode levar à destruição de toda a turbina. Além de promover perda econômica, leva também a um risco inerente à segurança das áreas circundantes. Segundo a norma IEC 61400/23:2001, a pá deve ser submetida a ensaios com carregamento estático de distribuição normalizada da carga de projeto, produzindo uma margem entre essa carga e a resistência à ruptura da pá na sua posição mais fraca.

Analisar a resistência da pá é uma etapa importante do projeto de turbinas eólicas. Desta forma, este trabalho se propõe a avaliar a resistência de um conjunto de pás da turbina Verne 555 sob a abordagem estática, através de procedimentos experimentais e simulações numérica-computacional via Método dos Elementos Finitos (MEF).

1.2.1 Objetivo geral

Calibrar o modelo numérico da pá do aerogerador Verne 555 previamente apresentado por Araújo *et al.* (2016), com base em ensaios experimentais estáticos de acordo com a norma IEC 61400/23:2001, ensaios de tração para a verificação do módulo de elasticidade e tensão de ruptura de acordo com a norma ASTM D3039:2014, bem como ensaios térmicos para a caracterização da espuma interna na fabricação da pá por meio da análise termogravimétrica. Avaliar, ainda, os parâmetros geométricos dos elementos internos da pá após os ensaios estáticos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estimar a carga de vento teórica da pá e, através dela, prever as cargas que serão impostas no ensaio experimental;
- Apresentar um modelo numérico prévio da pá eólica do aerogerador modelo Verne 555;
- Verificar, por meio do ensaio experimental, a capacidade de suporte da pá previstos da simulação aerodinâmica, considerando os coeficientes de segurança;
- Realizar ensaios de tração em amostras retiradas da pá eólica a fim de se obter propriedades mecânicas do material compósito;
- Propor ajustes de forma aproximada do modelo numérico após os resultados experimentais.

1.3 METODOLOGIA

Os ensaios experimentais certificam que o desempenho real das pás seja consistente com suas especificações de projeto. Em geral, apenas uma amostra de pá eólica é testada em ensaios experimentais que, via de regra, podem ser estáticos ou dinâmicos. Isso pode não ser estatisticamente significativo uma vez que nenhuma informação é obtida sobre uma possível dispersão da resistência real na pá. Não há como identificar que parte da produção representa a pá testada. Uma amostra de pá mais resistente do que a média tirada de um conjunto de amostras com resistência abaixo da resistência de projeto poderia ser enganosa se se acreditasse que a resistência da pá testada estivesse mais próxima da média (IEC, 2001).

Para obter um modelo numérico correspondente é necessário obter parâmetros geométricos da pá. Por ser propriedade industrial algumas informações não foram fornecidas pelo fabricante, tais como as dimensões internas e externas ao longo da pá e as propriedades dos materiais que a compõe. Dessa forma, as dimensões externas da pá foram obtidas por meio de leituras digitalizadas usando a tecnologia de medição por coordenadas no Laboratório de Metrologia pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica/Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB). As medições foram reproduzidas em plataforma CAD e depois exportadas para os *softwares* QBlade e ANSYS.

Num projeto aerodinâmico é de fundamental importância conhecer o comportamento da estrutura diante das solicitações a ela impostas. Existem várias ferramentas computacionais que podem ser usadas nos complementos dessas investigações. O método *Blade Element Momentum* (BEM) tem sido amplamente utilizado por indústrias de pás eólicas. Ela une o conceito de momentos linear e angular e foi utilizada nesse trabalho por meio do *software* QBlade para a obtenção das propriedades aerodinâmicas. O QBlade é um *software* livre desenvolvido pelo Departamento de Mecânica dos Fluidos Experimental da Universidade Técnica de Berlim, Alemanha, com o intuito de simular rotores eólicos, fornecendo uma visão profunda de todas as variáveis relevantes da pá, e pode ser encontrado através do endereço: <http://www.q-blade.org/> (QBblade, 2013).

O ANSYS é um *software* comercial que utiliza como base o MEF para cálculos em simulações de problemas relacionados a engenharia, permitindo a resolução de estruturas complexas em vários cenários e, ao longo dos últimos anos, tem ganhado espaço no mercado. A UnB disponibiliza, para fins didáticos, a versão universitária ANSYS R13 à comunidade acadêmica. No presente trabalho modela-se a pá como elemento de viga de aproximação

linear com dois nós, cada um com 6 graus de liberdade analisada anteriormente por Araújo *et al.* (2016).

Diante do exposto, será realizado um ensaio experimental numa bancada fabricada para testes estáticos, onde a pá é submetida a carregamentos de serviço (F_k), de projeto (F_d) e carga para teste estático (F_p). O método adotado é fundamentado nas especificações da norma britânica *International Electrotechnical Commission* (IEC) 61400 – Sistemas Geradores de Turbinas Eólicas – Parte 23: Teste Estrutural em Escala Completa de Pás de Rotores. Por conseguinte, retiram-se amostras das pás eólicas testadas com o intuito de se realizar ensaios de tração. Com os resultados deste ensaio, pode-se determinar as propriedades mecânicas do material compósito da pá. Dessa forma, busca-se aplicar na calibração do primeiro modelo numérico.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho está organizado em sete capítulos e sete Anexos.

O capítulo um apresenta uma contextualização da temática, a justificativa para o estudo proposto, os objetivos gerais e específicos, a metodologia empregada e a configuração da estrutura do trabalho.

O capítulo dois estabelece conceitos relativos a turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) percorrendo tópicos sobre a estrutura aerodinâmica de pás eólicas, procedimento de ensaios estáticos e de tração e propriedades materiais compósitos utilizados na fabricação de pás eólicas, apresentando em cada uma delas resultados de pesquisas realizadas por alguns autores.

No capítulo três a abordagem é sobre a aerodinâmica de rotores eólicos, expondo conceitos físicos relacionados ao funcionamento da turbina, delineando, principalmente, sobre o carregamento aerodinâmico por meio do método BEM comumente utilizado por projetistas na concepção de pás eólicas.

O capítulo quarto descreve o objeto de análise, bem como a apresentação do modelo numérico preliminar da pá simulado pelo *software* ANSYS.

O capítulo cinco apresenta o programa experimental. Nele é apresentado o projeto de bancada utilizado nos ensaios estáticos, a metodologia dos ensaios estáticos e de tração, bem como o sistema de medição e coleta de dados dos ensaios abordados neste trabalho. Foi fabricado um modelo de bancada para o ensaio experimental a fim de se obter as deflexões em F_d e F_p , observando o comportamento da pá até o colapso total.

O capítulo seis consiste na apresentação dos resultados dos ensaios estáticos e de tração. Nele é mostrado, em pormenores, a execução de cada ensaio estático e as observações de seus resultados. É feita uma comparação dos resultados obtidos nos modelos experimentais e numéricos.

Por fim, o capítulo sete apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL

Turbinas eólicas são máquinas de fluxo que absorvem parte da energia cinética disponível no vento, convertem em energia mecânica, e em seguida, em energia elétrica. A maioria das turbinas comerciais operacionais são de eixo horizontal, como a observada na Figura 2.1. A partir dos princípios básicos, a potência nominal e o tamanho de uma turbina crescem com a área varrida pelo rotor. O tamanho mais comum de grandes turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) se insere dentro da escala de produção de energia de 2 até 5 MW, operando numa faixa de aproximadamente 300 a 500 W/m² de área varrida.



Figura 2.1 – Turbina eólica de eixo horizontal modelo V112-3. (Fonte: Vestas, 2017).

Aerogeradores de grande porte são um desafio para a engenharia moderna. São estruturas flexíveis demandando o uso de materiais leves e de baixo custo. Elas devem suportar alguns dos maiores carregamentos cíclicos para estruturas e simultaneamente atenderem às limitações de dimensão e custo (Tong, 2010).

Essas estruturas possuem diversos componentes. Alguns deles são mostrados na Figura 2.2, tais como a pá (1), o controle de ângulo de passo (2) que reduz a força de sustentação na pá, a nacele (3), o freio (4), o eixo de baixa velocidade (5), a caixa de transmissão (6), eixo de alta velocidade (7), o gerador (8), o permutador de calor (9), o controlador (10) para

autodiagnósticos, o anemômetro (11), o cata-vento (12) que detecta a direção do vento, o controle do mecanismo de guinada (13) e a torre (14).

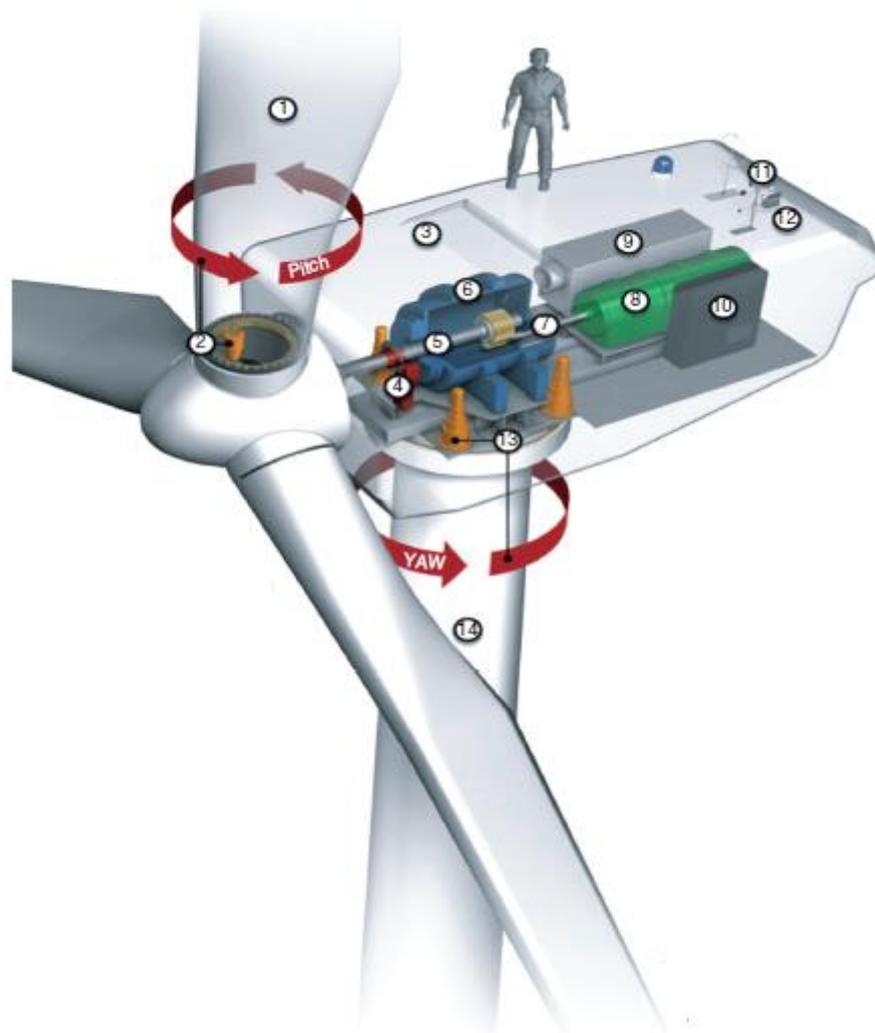


Figura 2.2 – Configuração típica de uma moderna TEEH. (Fonte: Schubel e Crossley, 2012).

Existem quatro classes de turbinas eólicas em relação ao projeto das mesmas e condições de vento. As classes são definidas levando-se em consideração basicamente quatro pontos: velocidade média anual do vento (U_m), a velocidade extrema do vento – também conhecida como velocidade de referência do vento num período de 10 minutos – (U_{ref}), o percentual de turbulência (I_{15}) que existe no local em questão e seu desvio-padrão (a). As classes são padronizadas pela norma IEC 61400/1:2014 – Turbinas Eólicas: Requisitos de Projeto, e são mostradas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – As quatro classes de turbinas eólicas, de acordo com a IEC. (Fonte: IEC 61400/1:2014).

Classe da turbina eólica	I	II	III	IV	S
U_{ref} (m/s)	50	42,5	37,5	30	
U_m (m/s)	10	8,5	7,5	6	Valores especificados pelo projetista
I_{15} (%)	18	18	18	18	
a	2	2	2	2	

Há também pequenas turbinas eólicas para utilização industrial ou doméstica como mostrado na Figura 2.3, capazes de fornecer energia para casas situadas em locais remotos – onde não há fornecimento de eletricidade por uma concessionária. A norma IEC 61400/2:2006 define uma pequena turbina eólica como tendo uma área de varredura do rotor menor que 200 m², correspondendo aproximadamente até 50 kW de potência nominal.



Figura 2.3 – Pequena turbina eólica instalada em residência unifamiliar. (Fonte: <https://www.energy.gov/energysaver/articles/want-tax-credit-small-wind-system-be-sure-its-certified>. Acesso em 02 de fevereiro de 2017).

Pequenas turbinas eólicas existem desde o início do século XX. As abordagens tecnológicas tomadas para os vários componentes de uma pequena turbina eólica bem como os princípios básicos de funcionamento são examinadas igualmente em grandes turbinas eólicas. Em geral, pequenas turbinas eólicas devem também ser projetadas de acordo com as especificações contidas na norma IEC 61400/2:2006.

2.2 PÁS DE TURBINAS EÓLICAS

A pá é o elemento da turbina eólica que apresenta superfícies curvas com influência às propriedades aerodinâmicas, favorecendo sua funcionalidade. Nessas superfícies, também conhecida como aerofólios (Pinto, 2013), identificam-se pontos importantes denominados: bordo de ataque, onde o vento incide ao encontro dele e bordo de fuga, onde o fluxo de ar escapa quando tangencia a superfície. A distância entre estes dois pontos denomina-se “corda”. Um modelo típico de pá eólica é representado na Figura 2.4 bem como a representação dos perfis aerodinâmicos através da Figura 2.5.

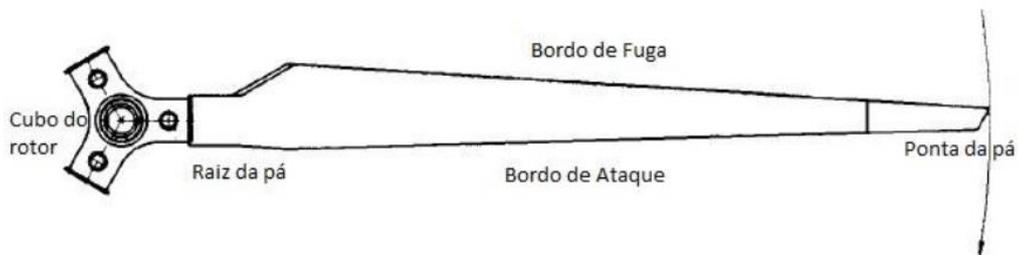


Figura 2.4 – Modelo de pá de uma TEEH. (Fonte: Stiesdal, 1999 – modificado).

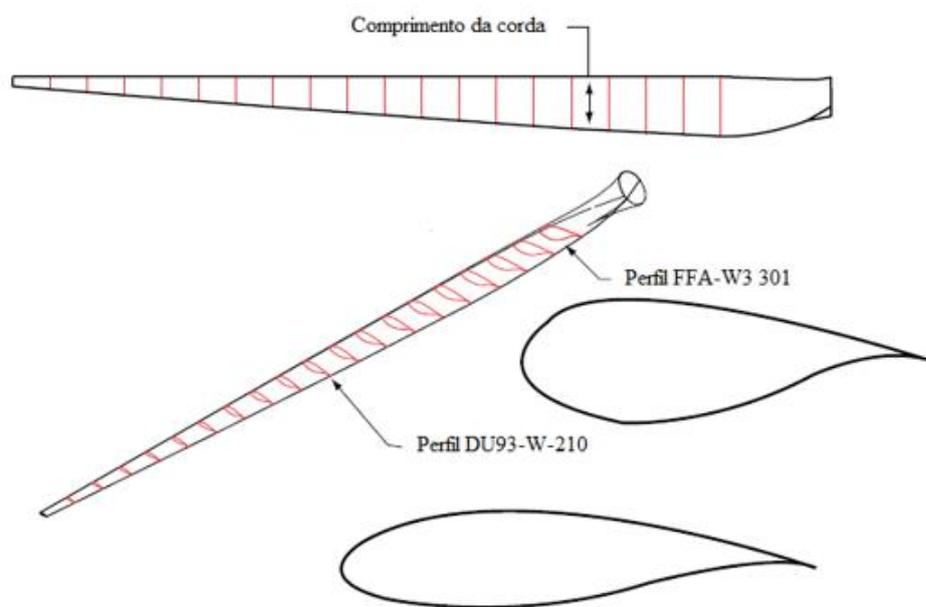


Figura 2.5 – Representação dos aerofólios em seção transversal. (Fonte: Manwell *et al.*, 2009 - modificado).

Existem diferentes tipos de aerofólios, como os Göttingen, desenvolvidos entre as décadas de 1920 e 1930 pelo Instituto de Pesquisa em Aerodinâmica, na Alemanha.

Atualmente os mais populares utilizados em pás eólicas são os aerofólios NACA, uma série americana classificada por meio de códigos contendo informações a respeito da geometria do perfil.

A parte externa da pá (casca) pode resistir a cargas de torção, mas não é resistente o suficiente para suportar a cargas fora do plano (Hau, 2006). Por esta razão, as pás do rotor incorporam uma viga de transmissão de carga ao longo de seu comprimento, transmitindo ao cubo do rotor as forças aerodinâmicas impostas à pá. A Figura 2.6 mostra o sistema estrutural interno de uma pá eólica em seção transversal.

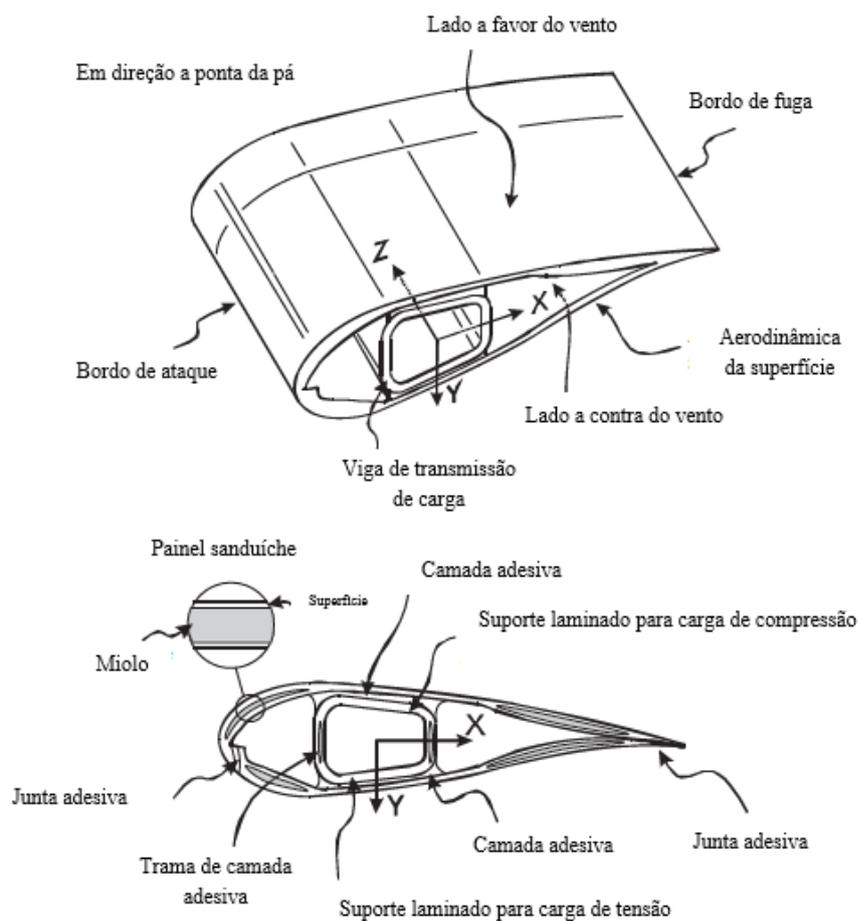


Figura 2.6 – Sistema estrutural interno de uma pá de turbina eólica em seção transversal. (Fonte: Tong, 2010 – modificado).

Projetar um rotor e prever a confiabilidade de seu desempenho são etapas necessárias num projeto de turbinas eólicas. A dinâmica de fluidos computacional (*CFD*) está sendo usada com maior regularidade para prever o desempenho aerodinâmico de turbinas eólicas. Ela fornece uma compreensão mais detalhada da distribuição de fluxo, analisando várias regiões de interesse, mas dependendo da complexidade da pesquisa o custo computacional

continua sendo barreira especialmente para pequenas turbinas eólicas. Além disso, Rosa *et al.* (2011) mencionam que numa certa análise a representação do escoamento pode envolver fenômenos que ainda não são perfeitamente representados pelas atuais teorias científicas, como a turbulência, fornecendo resultados não realistas.

O método BEM é um processamento matemático utilizado para determinar o comportamento das hélices (em helicópteros), das asas (em aviões) e das pás (em turbinas eólicas). O processo consiste em obter, para várias seções, as forças e coeficientes de arrasto e sustentação inerentes. É amplamente aplicado na projeção e avaliação de pequenas pás de turbinas eólicas. Embora existam alguns métodos para previsão do desempenho de cargas em turbinas eólicas, o BEM, desenvolvido por Glauert (1935) é, provavelmente, a contribuição mais importante para a aerodinâmica de turbinas eólicas (Sørensen, 2016). O carregamento é calculado usando dois métodos independentes, uma combinação do elemento de pá local com o teorema de momento unidimensional com o pressuposto de que o fluxo ocorre através de um tubo de corrente. O modelo é de fácil implementação, contendo a maior parte da física de aerodinâmica rotativa.

2.3 ENSAIO ESTÁTICO DE PÁS EÓLICAS

As pás eólicas são frequentemente consideradas como um dos componentes mais críticos do sistema de turbinas eólicas. A norma IEC 61400/23:2001 exige o teste experimental de pás como requisito para a certificação. Ela fornece diretrizes técnicas para testes estáticos estrutural, tendo a avaliação dos resultados como parte de verificação de projeto da integridade da pá. As cargas de projeto e os dados dos materiais da pá são considerados pontos iniciais para estabelecer e avaliar as cargas de teste, norteando na ponderação em relação às cargas reais.

A empresa Det Norske Veritas (2010), especialista em fabricação de turbinas eólicas, menciona que a confiabilidade prescrita em projeto deve satisfazer as cargas de serviço, de projeto, de teste estático e estado limite de fadiga (ELF) – sendo este a degradação do material decorrente do carregamento cíclico, causando fissuras, quebra progressiva de fibra e delaminação. Existem vários trabalhos na literatura que apresentam resultados de análises estáticas de pás eólicas, tanto experimental quanto numérico.

2.3.1 Revisão da Literatura sobre Ensaio Estático em Pás

Stemple e Lee (1988) desenvolveram uma formulação por meio do MEF para estudar o comportamento combinado de curvatura, torção e extensão de pás fabricadas em material compósito de um rotor de helicóptero e, posteriormente, atualizaram o elemento de viga para incluir grandes deflexões. Overgaard e Lund (2005) fizeram uma análise semelhante, porém, observando o colapso da pá eólica. Os autores realizaram análise de pré-flambagem geometricamente linear e não linear para prever a falha da pá devido ao encurvamento local na borda de fuga da seção aerodinâmica. Isso só foi capaz pela sensibilidade de medição do extensômetro no experimento. Concluíram ao final que o modo de colapso estrutural da pá eólica está ligado a deformação local linearmente dependente da imperfeição geométrica desse local.

Outra finalidade do teste estático é o de obter uma visão macro sobre os mecanismos de falha de uma pá eólica. Sørensen *et al.* (2004), Debel (2004) e Jørgensen *et al.* (2004) realizaram um projeto denominado “Projeto Aperfeiçoado para Pás de Turbinas Eólicas de Grande Porte” com base nos estudos de efeitos de escala da Fase 1 – Instabilidade Aerodinâmica – do Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL). O objetivo foi classificar os modos de falha em pás eólicas testadas ao colapso, a fim de melhorar a compreensão desses tipos de falhas em estruturas submetidas a cargas de compressão além de desenvolverem abordagens que caracterizam experimentalmente modelagens de juntas adesivas em modo misto. Durante todo o teste, o comportamento estrutural da pá foi assistido por vários sensores instalados ao longo da pá.

Jensen *et al.* (2006) analisaram uma pá eólica compósita de 34 m via análise experimental e numérica (MEF). A pá foi submetida a um carregamento na direção *flapwise*. Foram empregadas diferentes malhas por meio do MEF considerando análise não-linear a fim de capturar o efeito de ovalização. Esse efeito (também conhecido como efeito *brazier*) se dá pela pressão por compressão devido à perda de resistência à flexão. O objetivo foi conhecer o mecanismo de falha inicial, calibrando os resultados numéricos com os experimentais. Resultante de outras pesquisas, surgiu um novo equipamento capaz de gravar as deflexões locais da membrana resultantes do efeito *brazier*. São sensores capazes de detectar de forma independente deflexões dentro e fora da pá, captando também deformações de outros tipos. Uma de suas conclusões foi a de que as deformações das membranas externas

ocorreram em todas as seções, mas vistas principalmente no lado da compressão da pá. A seção crítica foi identificada a partir da seção de 9 m, onde ocorreu a ruptura.

Overgaard *et al.* (2010) realizaram um estudo mais detalhado quanto à instabilidade estrutural. Observou-se todo o processo de teste estático durante seu carregamento até após o colapso, correlacionando os resultados experimentais com previsões de modelos numéricos. O teste foi realizado em uma pá de 25 m dividida em três regiões. O carregamento estático foi aplicado na direção *flapwise* com a ideia de mapear a sequência de eventos. Os valores previstos e os resultados experimentais são apresentados de tal forma que o método pode ser usado em uma pá genérica.

Lee e Park (2015) analisaram uma pá eólica de 48,3 m de acordo com o procedimento da norma IEC 61400/23:2001. Foram realizados testes estático e fadiga. No teste estático os carregamentos impostos foram nas direções *flapwise* positivo, *edgewise* e *flapwise* negativo. Além desta, outras pesquisas mostram que os fenômenos predominantes que levam ao colapso das pás são a delaminação, deslocagem e encurvamento. O efeito *brazier* também surge nessas estruturas. As considerações finais mostraram que quando analisado na direção *flapwise* negativo, a pá entra em colapso com 70% da força projetada na direção *flapwise* positivo.

Wingerde *et al.* (2015) fizeram um ensaio estático pós-fadiga com base nas normas da série IEC. Foram conduzidos testes em quatro direções a cada 90°. Dessa forma, foi possível carregar o elemento estrutural nas principais direções, *flapwise* e *edgewise*. Nessa pesquisa eles descrevem os métodos atuais para testes de pás eólicas para certificação, além de apresentarem vantagens e desvantagens da norma. Essencialmente, os testes estáticos pós-fadiga representam uma relação de carregamento bastante direta com a realidade. A eficácia desses testes cumpre uma série de critérios, abrangendo detalhes mais críticos permitindo modificar a estrutura de uma pá. Eles enfatizam que é importante ter um certo “padrão” de ensaios para fabricantes no que se refere a nível material, comparando os testes laboratoriais com os testes experimentais das pás. É pertinente essa observação, dessa forma os projetistas podem produzir peças representativas de modo que as tensões residuais e as concentrações de tensão possam ocorrer de forma similar à da estrutura testada.

Kale e Hugar (2015) investigaram a influência da força estática em uma pá de turbina eólica de pequeno porte utilizando o MEF. O objetivo do trabalho foi, além de investigar por

meio da realização de teste experimental a resistência estática de uma pá eólica de 1,5 m comparando com os resultados da análise computacional, foi o de projetar e desenvolver uma pá eólica para pequenas turbinas eólicas para fins comerciais. As diferentes cargas foram calculadas com base na norma IEC 61400/23:2001. A pá foi fabricada de material compósito em fibra de vidro e poliestireno. Nos ensaios, os autores utilizaram extensômetros em pontos estratégicos e carga pontual para a representação da força do vento. A partir de ambas as análises, verifica-se que a pá desenvolvida foi capaz de suportar a carga de vento projetada.

Para a obtenção de bons resultados na realização do ensaio estático, deve-se ter o cuidado em fixar a pá de forma a reproduzir satisfatoriamente as condições de contorno reais da estrutura. Normalmente, se é construído uma bancada para receber a pá em estudo.

2.3.2 Metodologias Laboratoriais para Ensaio Estáticos

São várias as sugestões metodológicas. Na literatura são apresentados alguns modelos de bancada que prevê a fixação da pá e a aplicação da carga. O Laboratório Nacional Sandia (2007) do Departamento de Energia dos Estados Unidos, por exemplo, realizou um ensaio estático de uma pá eólica de 27,1 metros utilizando tambores para aplicação do incremento da carga. A fixação da raiz da pá foi feita num engaste que reproduz condições de contorno mais condizentes com a realidade. A concepção do ensaio de resistência da pá pode ser vista na Figura 2.7.



Figura 2.7 – Teste estático de uma pá eólica. (Fonte: Sandia National Laboratories, 2007).

Vogt (2010) analisou a viabilidade do uso de fibras vegetais reforçadas com polímeros na composição de pás de aerogeradores de pequeno porte. Foram confeccionadas amostras de pás eólicas para execução de ensaios estáticos. Um dispositivo foi proposto para o ensaio em que se permite a fixação e ajustes do ângulo de passo bem como o controle de estolamento. Os incrementos de carga foram feitos utilizando água em baldes, como visto nas Figura 2.8 e 2.9.



Figura 2.8 – Teste estático de uma pá eólica. (Fonte: Sandia National Laboratories, 2007).



Figura 2.9 – Método adotado por Vogt (2010) na simulação de cargas aerodinâmicas. (Fonte: Vogt, 2010).

Alé *et al.* (2011) apresentaram procedimentos laboratoriais para análise de tensões cíclicas em pás de turbina eólica de pequeno porte. Propuseram um modelo de bancada feita em estrutura metálica na qual é fixada uma pá de aerogerador submetida a esforços cíclicos, possibilitando adequar diferentes comprimentos de pás eólicas conforme visto na Figura 2.10. Entretanto, observa-se que este modelo pode ser facilmente estendido para a utilização em ensaios estáticos.



Figura 2.10 – Bancada experimental para ensaios de fadiga. (Fonte: Alé *et al.*, 2011).

Campos (2013) investigou o comportamento estático de pás eólicas fabricadas em materiais compósitos reforçadas com fibras de vidro e fibras de carbono. No estudo comparativo foram obtidos resultados numéricos em CFD e resultados experimentais nos ensaios de flexão, seguindo a proposta da norma IEC 61400/23:2001. O modelo de bancada adotado pode ser visto na Figura 2.11, composta por um cilindro metálico fixado junto a um dispositivo previamente montado para suportar toda a força prevista. Para simular a força do vento foram colocados ao longo de todo comprimento da pá sacos de areia em locais previamente demarcados, conforme Figura 2.12.



Figura 2.11 – Dispositivo para ensaios estáticos de pás de aerogeradores. (Fonte: Campos, 2013).



Figura 2.12 – Ensaio de flexão da pá adotado por Campos (2013). (Fonte: Campos, 2013).

2.3.3 Procedimentos Normativos para Carga de Teste

Normalmente as pás são concebidas de acordo com algum padrão ou prática estabelecida em norma, tal como apresenta a IEC 61400/1:2014, que utiliza princípios baseados no ISO 2394:1998, definindo estados limites e coeficientes de segurança aplicados nos cálculos estruturais.

Segundo a norma IEC 61400/23:2001, a execução prática dos testes está sujeita a muitas restrições de caráter técnico e econômico. Existem algumas dificuldades reconhecidas, tais como:

- A carga distribuída sobre a pá, dada a sua complexidade, pode ser proporcionada apenas de maneira aproximada;
- Apenas uma ou algumas pás podem estar disponíveis para serem testadas;
- Certas falhas são difíceis de detectar, como, por exemplo, a delaminação.

Essas restrições precisam ser tratadas com mais atenção de tal forma que o resultado final do teste possa ser utilizado para a avaliação das cargas definidas. Não obstante, deve-se levar em conta que a pá eólica utilizada para ensaio será normalmente uma das primeiras pás fabricadas em série, estando sujeita a modificações evolutivas mesmo em pequena escala, podendo influenciar em seus resultados.

No projeto de pás de aerogeradores três coeficientes de carga adicionais são levados em consideração prevendo o carregamento para os testes estáticos. Normalmente, os coeficientes de segurança são um dos artifícios utilizados para minimizar ou gerenciar as incertezas em várias etapas de projeto. Dessa forma, visa-se garantir projetos seguros dentro dos desvios desfavoráveis das cargas e materiais. Os coeficientes (ou fatores) de segurança incluem:

- Coeficiente de segurança parcial de material – γ_m ;
- Coeficiente de segurança parcial de carga de teste – γ_f ;
- Coeficiente de segurança parcial de consequência de falha – γ_n .

Enquanto γ_n refere-se sobre a importância da estrutura e as consequências de falha, incluindo o tipo de falha, γ_f por sua vez leva em consideração as incertezas e variabilidades nas cargas. O fator γ_m , entretanto, considera a possibilidade de desvios desfavoráveis à resistência do material e às incertezas na geometria.

De acordo com a IEC 61400/1:2014, as equações 2.1 e 2.2 definem, respectivamente, as cargas de projeto e as propriedades do material de projeto:

$$F_d = F_k \cdot \gamma_f \quad (2.1)$$

onde F_d é o valor da carga de projeto e F_k é o valor característico da carga (obtida a partir dos resultados da simulação aerodinâmica pelo método BEM), e

$$f_d = \frac{1}{\gamma_m} f_k \quad (2.2)$$

onde f_d é o valor das propriedades do material de projeto e f_k é o valor característico (resistência) das propriedades do material.

Desse modo, a equação que rege a não-ultrapassagem do estado limite é dada por:

$$\gamma_n \cdot S(F_d) \leq R_d(f_d) \quad (2.3)$$

Os símbolos S e R são funções, respectivamente, de solicitação e resistência e cada tipo de análise requer uma formulação diferente para ambas. Elas tratam de diferentes fontes de incertezas por meio do uso dos coeficientes de segurança. É importante ressaltar que γ_n é dependente da classe que a compõe. A IEC 61400/1:2014 classifica em três tipos, onde as

pás eólicas tipicamente se enquadram na classe 2, destinadas, conforme descreve a norma, à componentes estruturais “não seguros” cujas falhas podem levar ao dano de uma grande parte da turbina eólica.

Para o cálculo da carga de ensaio estático apenas os fatores γ_f e γ_n são considerados, a norma julga desnecessário o γ_m no cálculo final. Segundo Musial e Butterfield (1997), γ_m é ignorada porque o material da pá eólica que está sendo testada incorpora a maioria das propriedades específicas de material da pá fabricada. Por γ_m representar a degradação devido a efeitos ambientais, esse coeficiente torna-se geralmente inadequado para representar condições laboratoriais. No entanto, a fim de estabelecer uma carga de ensaio significativa, esse elemento de segurança deve ser aplicado como coeficiente de carga para testes estáticos (γ_s), como descreve a norma IEC 61400/23:2001. Dessa forma, a Tabela 2.2 mostra os respectivos valores dos coeficientes de segurança.

Tabela 2.2 – Coeficientes de segurança parciais para análise de carga de projeto e de testes estáticos. (Fonte: IEC 61400/1:2014 e IEC 61400/23:2001).

Coeficientes de Segurança Parciais	IEC 61400/1:2014	IEC 61400/23:2001 (valores mínimos)
Carga de teste (γ_f)	1,35	1,25
Consequência de falha (γ_n)	1,0	1,1
Teste estático (γ_s)	1,1	1,1
Total	1,485	1,375

Portanto, para calcularmos a carga projetada para o teste estático usamos a Equação 2.4:

$$F_p = F_d \cdot \gamma_n \cdot \gamma_s \quad (2.4)$$

A pá eólica pode ser carregada com cargas em múltiplos pontos ou apenas uma carga concentrada, além de cargas distribuídas. O carregamento do teste estático geralmente envolve a aplicação de uma sequência de cargas crescentes em etapas parciais, ou aumentada de forma constante numa velocidade controlada. Em geral, o carregamento deve ser lento o suficiente para evitar flutuações de carga e, conseqüentemente, alterações no ensaio.

2.4 MATERIAL COMPÓSITO DE PÁS EÓLICAS

2.4.1 Propriedades Mecânicas

As pás são projetadas para ter uma expectativa de vida de 20 a 30 anos (Shokrieh e Rafiee, 2006). A tecnologia utilizada na concepção de pás eólicas evoluiu nas últimas duas décadas e atualmente sua fabricação consiste em processos que reduzem o custo e a probabilidade de defeitos, como, por exemplo, o processo *Vacuum Assisted Transfer Molding* (VARTM). A infusão a vácuo levou a tecnologia de fabricação a um nível mais elevado, com melhorias na consistência e desempenho (Watson e Serrano, 2010).

Segundo Tong (2010), as camadas que definem o perfil da pá são geralmente produzidas em material composto de matriz polimérica e estruturas sanduíche, como vista na Figura 2.13. Todavia, são fabricadas em matriz polimérica e reforços em fibras de vidro ou aramídica, esta última comercialmente conhecida como *kevlar*. Esses materiais podem ser encontrados em diferentes aplicações, como no setor aeroespacial, onde partes significativas de aviões comerciais são feitas de materiais compostos avançados.

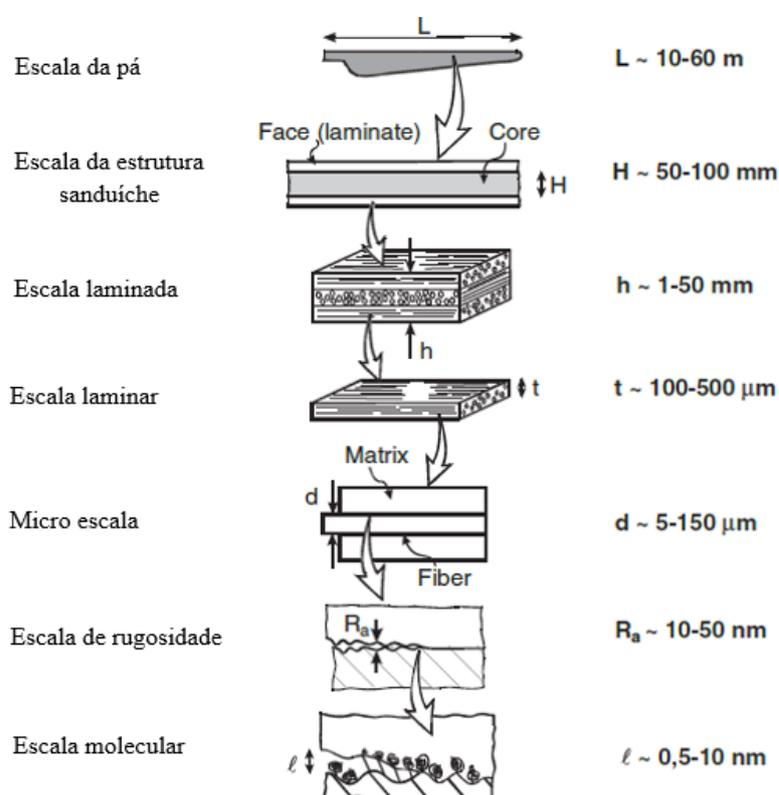


Figura 2.13 – Camadas e suas respectivas escalas na estruturação de uma pá eólica. (Fonte: Tong, 2010 – modificado).

As pás eólicas são estruturas complexas cujo *design* envolve geralmente a seleção do perfil aerodinâmico, a configuração estrutural e a seleção de materiais para garantir o tempo de vida útil esperado. Adotam-se diferentes tipos de materiais utilizando várias soluções de ligação entre diferentes subestruturas, o que inclui muitas transições materiais ou geométricas (Aymerich, 2012). As cargas de vento induzidas na pá possuem componentes estáticos e dinâmicos que induzem à fadiga do material. Por isso devem ser constituídas de material com baixa densidade, alta resistência e com alta tolerância à fadiga.

Para um projeto adequado de pá eólica é necessário compreender o comportamento dos materiais em todas as camadas que a estruturam. Segundo Tong (2010), alterações em camadas que possam surgir em qualquer proporção afetarão a confiabilidade da pá. Ferramentas computacionais, como *Computer Aided Engineering* (CAE), podem ser usadas para aperfeiçoar o desempenho de componentes auxiliando na validação e otimização de produtos.

O efeito da ligação de materiais ainda é uma área de grande interesse para engenheiros envolvidos no segmento de pás de rotores eólicos. Necessitou-se o extenso estudo dos efeitos combinados de carga axial, de geometrias complexas, de flexão e torção para se obter a máxima eficiência estrutural e aeroelástica (Chortis, 2013).

2.4.2 Metodologias Laboratoriais para Ensaio de Tração

O ensaio de tração de materiais poliméricos reforçados são procedimento padronizados em conformidade com normas técnicas, das quais as mais difundidas são a ISO 527/1:2012 e ASTM D3039/D 3039M:2014. Realizar este tipo de ensaio consiste em submeter uma peça já fabricada ou um material com processamento industrial iminente a situações que simulam os esforços a que serão submetidos nas condições reais de uso, podendo chegar a limites extremos de solitação.

Neste ensaio, um grande número de propriedades pode ser estimado. O método, portanto, consiste na aplicação de carga uniaxial crescente em um corpo de prova (CP) específico que se deforma até romper, conforme Figura 2.14. Em outras palavras, o teste de tração consiste em fixar os extremos de um CP a uma máquina de teste. Por conseguinte, aplica-se uma força de tração resultando numa deformação gradual e eventual ruptura do

CP. Com as medidas realizadas da força e do alongamento a cada instante, gera-se uma curva Tensão-Deformação. Os resultados fornecidos pelo ensaio de tração são fortemente influenciados pela temperatura, pela velocidade de deformação, pela anisotropia do material, bem como pelas condições ambientais (Garcia, *et al.*, 1999).

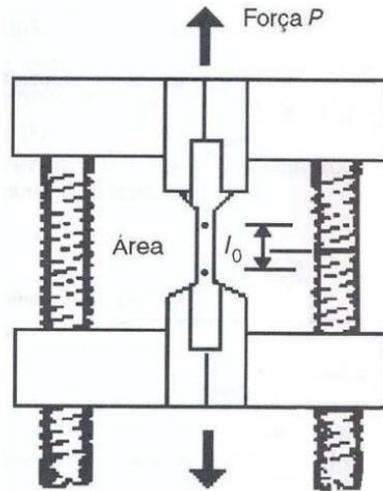


Figura 2.14 – Representação esquemática do ensaio de tração em um CP. (Fonte: Garcia *et al.*, 1999).

Admite-se que, com a aplicação da carga, as deformações que ocorrem no CP são uniformemente distribuídas até atingir a carga máxima. Isso permite medir apropriadamente a resistência do material. No cálculo da tensão (σ) utiliza-se a Equação 2.5:

$$\sigma = \frac{F}{A_{st}} \quad (2.5)$$

onde σ é a resistência à tração (em MPa), F é a força (em N) e A_{st} é a área da seção transversal (em mm^2). Para o cálculo da deformação (ε) tem-se a Equação 2.6:

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.6)$$

onde Δl é o alongamento e l_0 é o comprimento inicial da amostra (em mm). Outra propriedade que pode ser obtida é o módulo de elasticidade (E), que fornece uma indicação da rigidez do material. Determina-se E através da Equação 2.7:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \cdot l_0}{A_0 \cdot \Delta l} \quad (2.7)$$

onde E é dado em GPa.

2.4.4 Procedimentos Normativos

A norma ASTM D3039:2014 tem influência sobre as formas do material compósito em fibras contínuas ou descontínuas, e laminado simétrico ou assimétrico à direção do teste. Alguns fatores podem intervir na resposta do teste, como o tipo de material, condicionamento da amostra, ambiente de teste, alinhamento e fixação da amostra às garras da máquina de teste, velocidade de teste, temperatura, conteúdo vazios, dentre outros. As amostras de compósitos submetidas a testes de tração são instrumentadas com, no mínimo, dois extensômetros localizados no meio da seção de preferência com resistência de 350 ohms.

A preparação da superfície da amostra do material compósito deve ser feita de modo a não expor ou danificar a mesma durante seu processo de preparação. O *design* das amostras, de acordo com a ASTM D3039:2014, permanece em grande parte como uma arte e não como ciência. Cada laboratório de testes de compósitos desenvolveu métodos de fixação para os materiais específicos – principalmente aqueles que usam *tabs* para proteger e auxiliar a fixação da amostra – e ambientes comumente encontrados dentro desses laboratórios. A comparação desses métodos mostra que eles são bastante diversos, tornando difícil recomendar um conjunto de abordagens universalmente útil. A norma ASTM D3039:2014 lista os requisitos para a geometria e tolerâncias da amostra, conforme Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Requisitos geométricos da amostra para ensaios de tração. (Fonte: ASTM D3039:2014 – adaptado).

Parâmetros	Requisitos
Forma	Seção transversal constante
Largura	Conforme necessário
Espessura	Conforme necessário
Orientação das Fibras	Conforme necessário

Os requisitos para as amostras de material compósito listadas na Tabela 2.3, por si só, são insuficientes para criar uma geometria adequadamente dimensionada e tolerada. O comprimento da amostra, por exemplo, deve ser substancialmente maior do que o requisito mínimo mencionado na Tabela 2.3 a fim de minimizar os esforços de flexão causados por

pequenas excentricidades de aderência. Portanto, recomendações para outras geometrias são fornecidas na Tabela 2.4, utilizadas por diversos laboratórios de teste para produzir modos de falhas aceitáveis em uma grande variedade de materiais (ASTM D3039, 2014).

Tabela 2.4 – Recomendações geométricas da amostra para ensaios de tração. (Fonte: ASTM D3039:2014 – adaptado).

Orientação da Fibra	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)
0° unidirecional	15	250	1,0
90° unidirecional	25	175	2,0
Balanceada e Simétrica	25	250	2,5
Aleatória-descontínua	25	250	2,5

A norma identifica diversas formas de ruptura em ensaios de tração com as respectivas localizações (Leitão, 2007). Por meio de códigos, ela identifica os tipos característicos de fratura que podem ser encontrados em CP de material compósito. As Tabelas 2.5 a 2.7 identificam as características de cada fratur e a Figura 2.15 mostra os padrões de falhas.

Tabela 2.5 – Tipo de fratura – primeira letra. (Fonte: ASTM D3039:2014 – adaptado).

Tipo de Fratura	Código
Em ângulo	A
Delaminação na borda	D
Garra / <i>Tab</i>	G
Lateral	L
Múltiplos tipos	M
Corte longitudinal	S
Explosiva	X
Outros	O

Tabela 2.6 – Área de fratura – segunda letra. (Fonte: ASTM D3039:2014 – adaptado).

Área de Fratura	Código
Embaixo da garra	I
Garra / <i>Tab</i>	A
Distante do <i>tab</i> menor que a largura do CP	W
Extensômetro	G
Múltiplas áreas	M
Vários	V
Outros	O

Tabela 2.7 – Local de fratura – terceira letra. (Fonte: ASTM D3039:2014 – adaptado).

Local de Fratura	Código
Inferior	B
Topo	T
Esquerda	L
Direita	R
Meio	M
Várias	V
Desconhecido	U

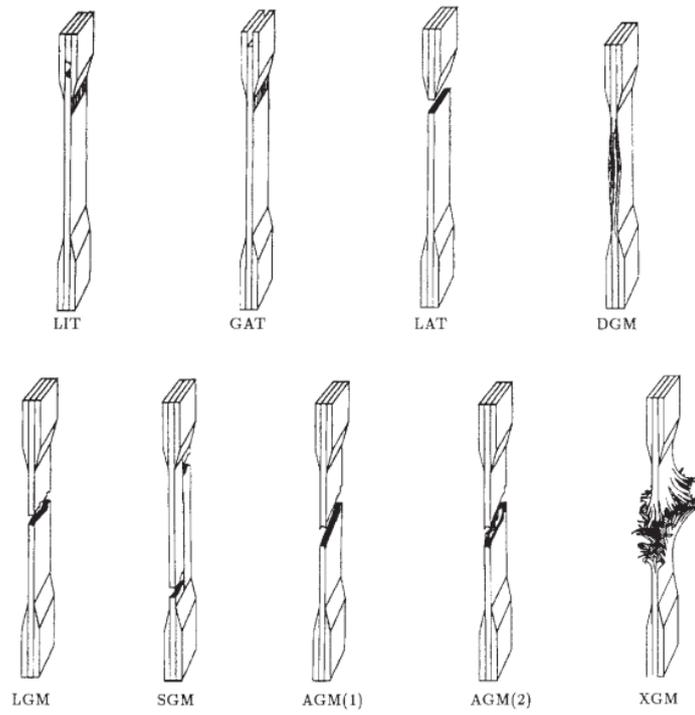


Figura 2.15 – Padrões de falha em materiais compósitos de matriz polimérica. (Fonte: ASTM D3039:2014).

3. ANÁLISE NUMÉRICA DO CARREGAMENTO AERODINÂMICO NO ROTOR EÓLICO

3.1 ASPECTOS GERAIS

O crédito por ter aplicado o princípio de extração de energia cinética de um fluxo de ar em movimento com o auxílio do conversor em forma de disco rotativo é dado ao físico Albert Betz (1920). Além dessa possibilidade, ele descobriu que existe um limite de desempenho da turbina numa determinada relação entre velocidade a jusante e a montante do disco. A Figura 3.1 mostra um modelo de disco atuador conversor de energia.

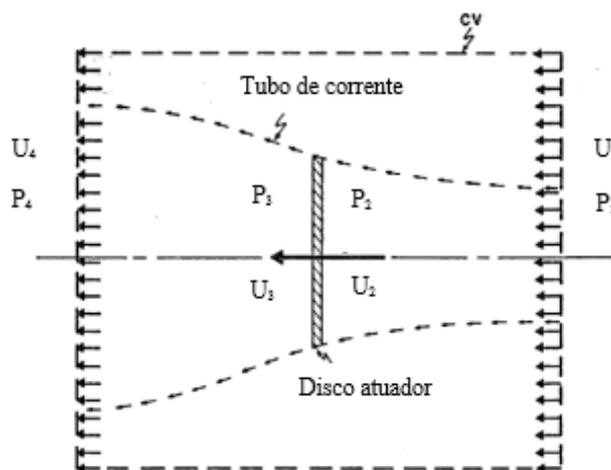


Figura 3.1 - A energia extraída de uma turbina eólica. (Fonte: Burton *et al.*, 2001).

onde p_i e U_i são pressões e velocidade do vento, respectivamente. Sob condições de força externa nula, a equação de Bernoulli é válida a montante e a jusante do rotor. Essa simplificação introduz conceitos importantes sobre o comportamento geral das turbinas e o escoamento sobre elas, com equações básicas de conservação de massa, momento linear e momento angular através do método de controle de volume. A análise, portanto, assume que a turbina está sob condições estacionárias de fluxo de vento estáveis, uniformes e sem atrito, o que raramente ocorre em condições reais de vento.

Quando se considera o comportamento real da turbina, ou seja, observando a rotação das pás, as linhas do tubo de corrente sob a pá mostradas na Figura 3.1 giram em direção oposta ao rotor num trajeto helicoidal em reação ao torque exercido pelo fluxo no rotor, conforme visto na Figura 3.2. Segundo Burton *et al.* (2001), esse comportamento é descrito pela teoria de vórtice que induz na turbina eólica uma variação de velocidade gerando

componentes com velocidades opostas à direção do vento e opostas à rotação das pás, denominados, respectivamente, fator de indução axial (a) dado e fator de indução tangencial (a'). Esse fluxo a jusante da turbina é conhecido como esteira e isso acontece, portanto, quando há uma diminuição fracionária da velocidade do vento entre o fluxo livre e o plano do rotor (Wilson *et al.*, 1976). Nesse local o campo de velocidade precisa ter uma componente tangencial para que a conservação do momento angular ocorra (Mendes, 2015).

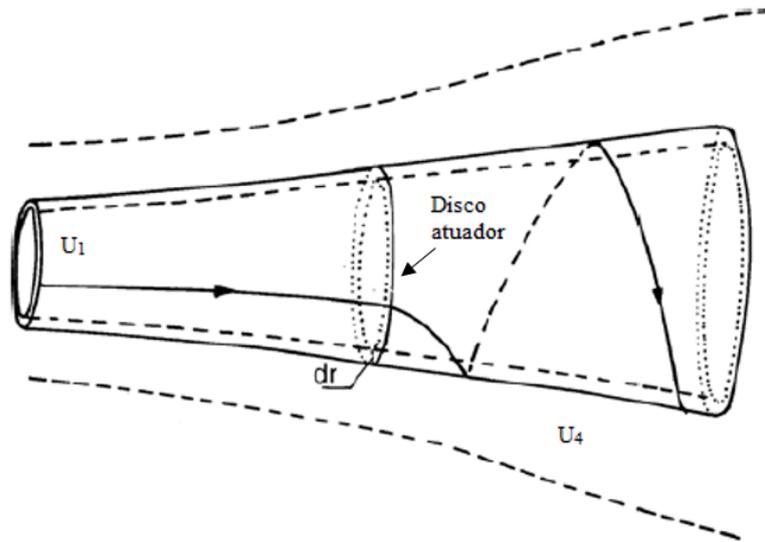


Figura 3.2 – Vista esquemática das linhas de corrente de um fluxo instável considerando a rotação da turbina. (Fonte: Manwell *et al.*, 2009 – modificado).

A performance de uma TEEH é caracterizada pelo coeficiente de potência, C_p , que é a razão entre a potência extraída do rotor (P_{ext}) e a potência do vento:

$$C_p = \frac{P_{ext}}{\frac{1}{2}\rho AU^3} = \frac{Pot. \text{ do rotor}}{Pot. \text{ do vento}} \quad (3.1)$$

onde A é a área varrida pelo rotor, U é velocidade do vento e ρ é a densidade do ar. Existe um valor máximo de C_p que é conhecido como limite de Betz (1920). O valor máximo da função C_p é dado por:

$$C_{p,m\acute{a}x} = \frac{16}{27} \approx 0,593 \quad (3.2)$$

O limite de C_p é tão somente uma parte do processo. Os 59,3% argumentados são os limites aerodinâmicos, ou seja, tem-se o limite não por alguma deficiência na concepção – pois, ainda, não foi inserido nenhum tipo de *design* – mas porque o tubo de corrente tem de se expandir a montante do disco e que, portanto, na seção transversal do tubo onde o ar está

no extremo, a velocidade de fluxo livre é menor que a área do disco (Burton *et al.*, 2001). A segunda parte do regime é a conversão para energia elétrica, que também passará por perdas e conseqüentemente redução de potência final. O interesse que se tem durante a fase de concepção de uma turbina eólica é quão próximo desse limite de 59,3% as turbinas estão.

Por fim, a eficiência global de uma turbina está em função de C_p e da eficiência mecânica (η_{mec}). Logo:

$$\eta_{global} = \frac{P_{ext}}{\frac{1}{2}\rho AU^3} = \eta_{mec} \cdot C_p \quad (3.3)$$

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \cdot \eta_{mec} \cdot C_p \quad (3.4)$$

3.2 AERODINÂMICA DE ROTORES EÓLICOS DE EIXO HORIZONTAL

No item anterior as equações de conservação da mecânica dos fluidos foram utilizadas para derivar equações de saída de potência e impulso de uma turbina eólica modelada pela teoria do momento linear e angular. Essa teoria supõe que não há dependência radial no desempenho da turbina, conduzindo-o ao popularmente conhecido limite de Betz. Porém, a principal análise de desempenho e da resistência de uma turbina eólica necessárias em um projeto aerodinâmico e estrutural, é quando consideramos as forças que atuam individualmente sobre as pás. Essas forças são características de sustentação e arrasto do perfil de um elemento de pá. Determinando as forças atuantes podemos obter analiticamente, sob hipóteses simplificadas, o torque e carga de impulso, a potência e a força do vento ao longo da pá.

3.2.1 Carregamento Aerodinâmico

As três fontes mais importantes de carga de uma turbina eólica são os carregamentos aerodinâmico, inercial e gravitacional (Hansen, 2008). O fluxo do vento é assimétrico e as pás estão sujeitas a velocidades do vento mais elevadas no setor de rotação superior do que no setor mais próximo ao solo (Oliveira, 2015). Os

parâmetros geométricos que desempenham maiores efeitos aerodinâmicos são a borda de ataque, linha de curvatura, espessura do perfil e o ângulo de ataque. De acordo com Pinto (2013), as forças sobre as pás podem ser calculadas por meio dessas características e o ângulo de ataque pode melhorar a sustentação até num determinado ponto.

Os aerofólios de pás eólicas possuem variações nas dimensões da corda e ângulo de torção ao longo de seu comprimento. A resultante das forças de pressão e atrito é resolvida por duas forças, F_L (*lift force*) como força de sustentação e F_D (*drag force*) como força de arrasto, e um momento de passo, que é definido aproximadamente no eixo perpendicular da seção transversal do perfil, todos a uma distância de $\frac{c}{4}$ da borda de ataque da pá. A Figura 3.3 ilustra as cargas aerodinâmicas inerentes que podem ser calculadas por meio das características de aerofólio de duas dimensões – desconsiderando os efeitos tridimensionais (Burton *et al.*, 2001) – onde α é o ângulo de ataque, θ é o ângulo de passo, φ é o ângulo relativo do vento e c é a corda.

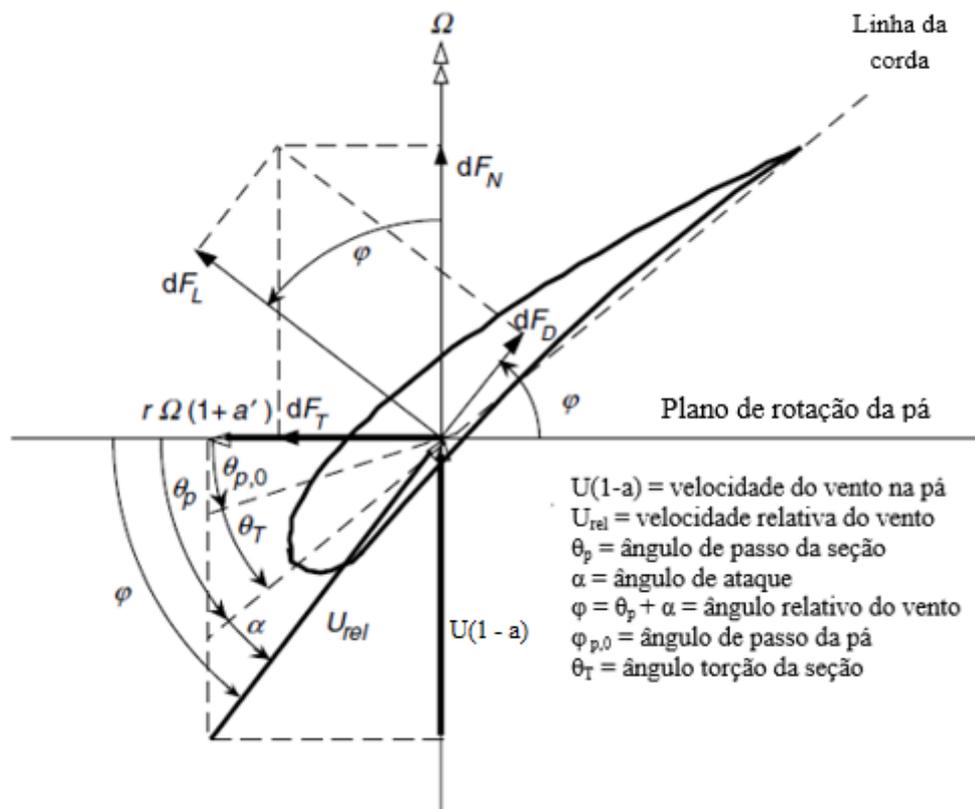


Figura 3.3 – Geometria de uma seção transversal da pá de uma TEEH. (Fonte: Manwell *et al.*, 2009 – modificado).

As forças F_D e F_L para um determinado ângulo de ataque podem ser expressas da seguinte forma:

$$F_L = C_l \cdot \alpha \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot \frac{c}{4} \cdot b \quad (3.5)$$

$$F_D = C_d \cdot \alpha \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot \frac{c}{4} \cdot b \quad (3.6)$$

onde C_d e C_l são os coeficientes de arrasto e sustentação, respectivamente, e b é a largura da seção da pá. Os coeficientes são propriedades do perfil da pá dependentes do ângulo de ataque e número de Reynolds (Re). O momento de flexão em *flapwise* é um resultado das cargas aerodinâmicas que podem ser calculadas pelo método BEM. Estas cargas são consideradas como uma carga crítica de projeto durante as extremas condições operacionais em que a turbina está sujeita, observando um período de 50 anos.

O carregamento em uma pá é assimétrico e inconstante. Considerando este tipo de operação, Schreck e Robinson (2007) afirmam que um provável aumento de rotação a que está sujeita retarda a sua paralisação e amplifica significativamente as cargas aerodinâmicas. Essas afluências impõem tensões excessivas nas pás reduzindo consideravelmente sua vida útil. A aerodinâmica instável de uma pá de turbina eólica é altamente complexa, fortemente dependente do seu movimento e do campo de fluxo.

Segundo Pinto (2013), os resultados encontrados por Betz (1920) são subestimados, pois o autor negligencia a curvatura do escoamento do vento. Isto significa que Betz assumiu que a pressão era uniformemente distribuída nas pás, conforme Figura 3.4, onde R é o raio da turbina. Ou seja, considerou-se que o escoamento do fluido permanecia retilíneo ao passar através da turbina e conservasse nesta uma distribuição uniforme da pressão do fluido. Logo, tais cargas distribuídas levariam a uma superestimação das forças e torques nas pás.

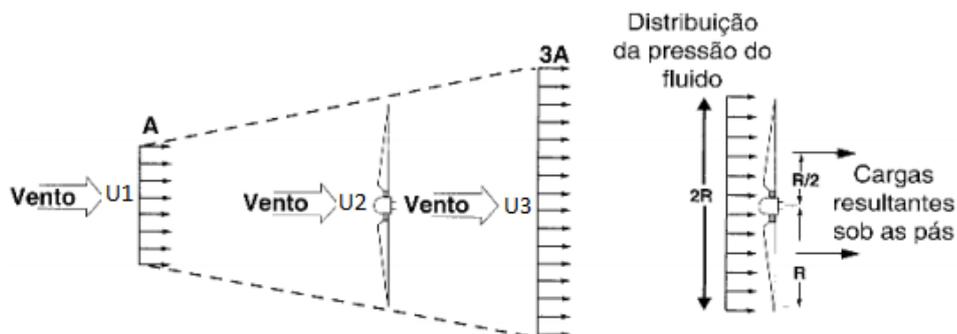


Figura 3.4 – Modelo de fluxo retilíneo de Betz. (Fonte: Pinto, 2013 – adaptado).

Com efeito, o escoamento do fluido é defletido da direção retilínea, alterando seu movimento para trajetórias curvilíneas e, conseqüentemente, reduzindo a pressão nas pás, conforme se vê na Figura 3.5.

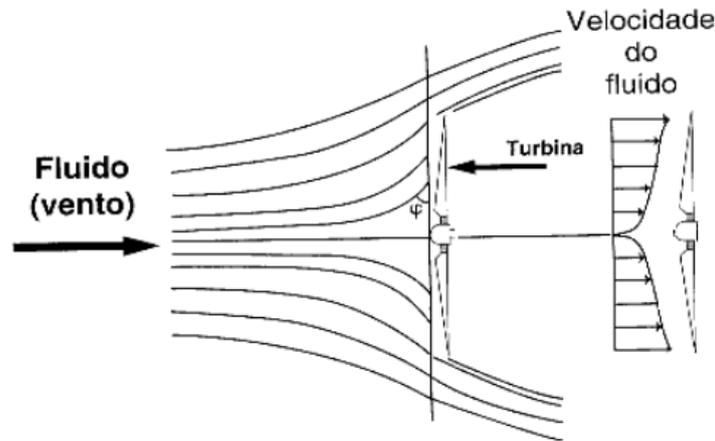


Figura 3.5 – Modelo atual de escoamento de um fluido através de uma turbina. (Fonte: Pinto, 2013 – modificado).

Simplificando a incidência do vento sobre a pá pela a representação de um carregamento triangular, a intensidade máxima desta carga pode ser calculada através da Equação 3.7:

$$Q = \frac{4}{9} \cdot \rho \cdot U_{rel}^2 \cdot \pi \cdot R^2 \quad (3.7)$$

A carga Q é distribuída nas três pás e, para atingir as cargas previstas para os ensaios, a sua distribuição será quando uma função linear venha da carga zero na raiz até uma certa intensidade de carga na ponta da pá. Assim, se fizermos $\frac{Q}{3}$ temos o valor da carga em cada uma das pás. A força resultante pontual é aplicada ao centro de pressão em aproximadamente $0,33R$ do eixo da turbina.

3.2.1 Teoria do Momento do Elemento de Pá

O clássico modelo de Glauert (1935) é uma combinação das teorias do momento linear e angular e do elemento de pá. A combinação desses métodos gera a teoria do momento do elemento de pá (*BEM method*). Esta abordagem usa a relação da geometria da pá com a capacidade do rotor de extrair energia do vento (Manwell *et al.*, 2009).

O BEM assume que as pás eólicas podem ser discretizadas em n elementos operando de forma independente, cujas forças aerodinâmicas são calculadas com base nas condições de fluxo local. Com esse modelo é possível calcular as cargas estáveis e, portanto, o impulso e potência para diferentes configurações de velocidade do vento, velocidade de rotação e ângulo de ataque (Hansen, 2008). Seus resultados são obtidos através da integração de todos os elementos ao longo das pás. Contudo, para obter bons resultados é necessário ter uma boa qualidade de informações do aerofólio da pá.

Segue, portanto, a abordagem feita por Burton *et al.* (2001), onde-se supõe que não há interação radial entre os fluxos através de anéis contíguos, vistos na Figura 3.2. Na prática, o fator de indução axial é esporadicamente uniforme, porém, testes de fluxos através de discos de hélice por Lock (1924) mostraram que a hipótese de independência radial é aceitável (Burton *et al.*, 2001).

A hipótese básica do método BEM é que a força de um elemento de pá é responsável pela mudança do momento do ar que passa através do disco atuador varrido por esse elemento. O fluxo nos anéis causa uma variação do momento axial do ar reduzindo a pressão na esteira. Considerando um caso simples de U_{rel} constante atuando num α local, o tipo de aerofólio, número de Re , as características adimensionais do aerofólio (C_l e C_d), são obtidas localmente a partir dos dados do aerofólio. Com esses dados, é possível obter expressões do carregamento ao longo da pá do rotor, que, combinado com expressões da teoria do momento, torna finalmente possível obter um sistema fechado de equações para determinar as velocidades induzidas (Sørensen, 2016).

Empregando a teoria do elemento de pá, a componente do impulso e torque derivados em relação a r são descritos, respectivamente, como:

$$dT = N \cdot F_N = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot N \cdot U_{rel}^2 \cdot C_N \quad (3.8)$$

$$dM = N \cdot r \cdot F_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot N \cdot r \cdot U_{rel}^2 \cdot C_T \quad (3.9)$$

onde N é o número de pás, F_N e F_T são, respectivamente, força de normal e tangencial, r é o raio da pá e C_N e C_T são coeficientes normal e tangencial da força, nesta ordem, definidos como:

$$C_N = \frac{F_N}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot U_{rel}^2} \quad (3.10)$$

$$C_T = \frac{F_T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot U_{rel}^2} \quad (3.11)$$

Uma vez que estamos interessados somente em F_N e F_T ao plano do rotor, temos:

$$F_N = F_l \cdot \cos(\varphi) + F_d \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (3.12)$$

$$F_T = F_l \cdot \text{sen}(\varphi) - F_d \cdot \cos(\varphi) \quad (3.13)$$

Os coeficientes C_N e C_T são formados por projeção dos coeficientes C_l e C_d , observadas na Figura 3.6. Podemos reescrever as equações (3.35) e (3.36):

$$C_N = C_l \cdot \cos(\varphi) + C_d \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (3.14)$$

$$C_T = C_l \cdot \text{sen}(\varphi) - C_d \cdot \cos(\varphi) \quad (3.15)$$

A partir do triângulo de velocidades da Figura 3.6, deduz-se que:

$$\text{sen}(\varphi) = \frac{U \cdot (1-a')}{U_{rel}} \quad (3.16)$$

e

$$\cos(\varphi) = \frac{\Omega \cdot r \cdot (1+a'')}{U_{rel}} \quad (3.17)$$

Com as relações acima, tem-se que:

$$U_{rel}^2 = \frac{U^2 \cdot (1-a')^2}{\text{sen}^2(\varphi)} = \frac{U \cdot (1-a') \cdot \Omega \cdot r \cdot (1+a'')}{\text{sen}(\varphi) \cdot \cos(\varphi)} \quad (3.18)$$

Inserindo (3.40) a (3.42) em (3.33) e (3.34), obtém-se:

$$dT = \frac{\rho \cdot N \cdot c \cdot U^2 \cdot (1-a')^2}{2 \cdot \text{sen}^2(\varphi)} \cdot C_N \quad (3.19)$$

e

$$dM = \frac{\rho \cdot N \cdot c \cdot U \cdot (1-a')^2 \cdot \Omega \cdot r^2 \cdot (1+a'')}{2 \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \cos(\varphi)} \cdot C_T \quad (3.20)$$

Aplicando a teoria do momento linear, temos para T (impulso) no rotor:

$$T = 4. \pi. \rho. r. U^2. a. (1 - a') \quad (3.21)$$

e para M (momento) quando da aplicação da teoria do momento angular:

$$M = 4. \pi. \rho. r^3. \Omega. U. a'. (1 - a') \quad (3.22)$$

Combinando as Equações (3.19) e (3.20) em (3.21) e (3.22), temos as seguintes expressões:

$$a' = \left(\frac{4. \text{sen}^2(\varphi)}{\sigma. C_N} + 1 \right)^{-1} \quad (3.23)$$

$$a'' = \left(\frac{4. \text{sen}(\varphi). \cos(\varphi)}{\sigma. C_T} - 1 \right)^{-1} \quad (3.24)$$

onde $\sigma' = \frac{N.c}{2.\pi.r}$ é a solidez local. Esse é um parâmetro bem conhecido da tecnologia aeronáutica que caracteriza o formato geométrico da pá, definido como a razão entre a área total da pá e a área varrida pela pá. A força que o vento exerce sobre as pás e, consequentemente, sobre o torque da turbina, é proporcional à solidez (Pinto, 2013). A potência, para certa velocidade, é dependente da área varrida, o que significa que, aumentando σ , aumenta-se o torque, porém, diminui a taxa de rotação.

Essas duas expressões formam a base da teoria BEM. Segundo Sørensen (2016), a solução para o sistema de equações é resolvida empregando-se uma técnica iterativa de solução não-linear. Esse método é bastante preciso e frequentemente usado por projetistas nos cálculos de desempenho de rotores eólicos, pois descreve com mais realidade o desempenho aerodinâmico bem como critérios para projetos de pás eólicas.

Uma condição para uma conversão eficiente da energia eólica em energia mecânica com turbinas eólicas é a ótima concepção das pás do rotor (Marten e Wendler, 2013). As simulações das condições de fluxo em torno de uma pá de rotor são essenciais para qualquer projeto. O *software* QBlade reproduz modelos aerodinâmicos com base no método BEM, com previsões confiáveis e robustas das características aerodinâmicas, e foi usado nesse trabalho na simulação aerodinâmica do modelo de turbina adotado.

3.3 QBLADE

Criado em 2010 pelo grupo de energia eólica do Departamento de Mecânica dos Fluidos da Universidade Técnica de Berlim, Alemanha, liderado pelo professor Dr. Christian Oliver Paschereit, o QBlade é um *software* comercial livre que inclui toda a funcionalidade necessária para a concepção e simulação aerodinâmica de aerogeradores em código aberto perfeitamente integrado ao *software XFOIL*. Usando o método BEM, o *software* é capaz de avaliar o comportamento da turbina eólica, em geral, as forças geradas pelos coeficientes C_l e C_d do aerofólio em várias seções ao longo da pá. Esse método gera uma série de equações que são resolvidas iterativamente.

O *software* serve como um pós-processador para simulações de turbinas eólicas, dando uma visão profunda de todas as variáveis de pá e rotor mais importantes para análise. Frequentemente avaliado por universidades e empresas, permite ao usuário projetar aerofólios personalizados, incluindo algumas funcionalidades como:

- Projeto e otimização avançados de pás eólicas de perfis gerados ou importados, contendo visualização 3D;
- Definição da turbina eólica (pás do rotor, tipo de gerador, perdas, etc.);
- Desempenho do rotor.

Isto posto, Ceyhan (2008) mostra o poder da ferramenta BEM. Foram obtidos os dados aerodinâmicos da pá de uma turbina que foi testada experimentalmente e depois validada pelo método numérico. Projetando uma turbina eólica capaz de gerar até 100 kW de potência, utilizou algoritmo genético para otimizar a aerodinâmica da pá. Essa combinação pode gerar novas pás de uma turbina, melhorando entre 40 e 80% a sua produção. Essa metodologia foi empregada numa pá de 25 m de comprimento. Com a otimização, observou uma maior potência gerada reduzindo em 5 metros a pá.

Song e Lubitz (2013) fizeram uma abordagem pelo método BEM de uma pá eólica de 2,5 m de comprimento e seção transversal constante. O objetivo foi investigar o impacto da inclusão de fatores como perda de ponta e raiz e coeficiente de arrasto, em simulações BEM para pequenas turbinas eólicas. Os dados do desempenho do rotor foram coletados por um sistema de teste veicular. A pá estudada não tem torção ao longo de seu comprimento, operando em altos ângulos de ataque. Os autores concluíram que não se deve excluir nas

análises as perdas de ponta ou assumir como desprezível o arrasto aerodinâmico, pois ambos impactam significativamente nos resultados.

Aguilar (2014) simula uma pequena turbina eólica capaz de gerar até 3 kW de potência via BEM. A análise numérica adotada foi utilizada na validação dos resultados obtidos pelo *software* QBlade obtendo mapas de pressão, força e torque mecânico, além de outros parâmetros aerodinâmicos. Num segundo momento, o autor desenvolve um modelo via MEF pelo ANSYS CFX para obter uma representação gráfica das linhas de fluxo e pressões formadas ao longo das pás. Comparando os resultados, concluiu que foram fisicamente admissíveis para o modelo adotado, capaz de representar bem os efeitos físicos do fluxo numa certa concordância com a teoria. O erro relativo máximo dos resultados entre os métodos foi de 11%.

Aryal *et al.* (2014) fizeram algo semelhante. Projetaram uma pequena turbina eólica em condições de vento arbitrárias analisando a integridade estrutural do modelo através do método BEM no *software* QBlade. Com o objetivo de prever o comportamento da pá de 2,5 m de comprimento em condições extremas de vento, foram obtidos parâmetros geométricos que foram exportados para simulação numérica no *software* ANSYS CFX. Assim, obteve-se a estrutura do fluxo e características aerodinâmicas. Os autores conferiram resultados satisfatórios, produzindo um desempenho aceitável em relação ao estresse e deflexão produzidos.

Singh *et al.* (2016) apresentaram uma pesquisa com o objetivo de melhorar a eficiência de turbinas eólicas a baixas velocidades de vento, incentivando o uso doméstico e comercial de pequenas turbinas eólicas. Adotando o *software* QBlade, pode obter os parâmetros aerodinâmicos adequados para a fabricação de um protótipo de pá em impressão 3D para validação em testes em túnel de vento. Com isso, os autores concluíram que os resultados finais estabeleceram uma estreita relação entre os valores teóricos e experimentais.

3.3.1 Modelagem Geométrica da Pá

Diante da inexistência de informações a respeito da geometria e estrutura interna da pá estudada no presente trabalho, foi necessário realizar leituras digitalizadas para, assim, obter um modelo numérico correspondente. Foi usado na digitalização da pá eólica a tecnologia

de medição por coordenadas com auxílio do software G-Pad, realizado no Laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB. O *software* cria uma “nuvem” de pontos das seções nas direções X , Y e Z que pode ser aberto em qualquer programa CAD. No total, foram realizadas leituras em 26 seções transversais das quais foram usadas no modelo do método BEM.

Os métodos de projeto da pá para turbinas eólicas são originários da indústria de projeto de aeronaves, mas não coincidem no quesito forças atuantes. A pá de uma turbina eólica não só percebe apenas o ar que chega a ela do vento em si, mas também do movimento relativo do vento devido à pá (Pinto, 2013). Segundo Marten e Wendler (2013), a aerodinâmica de uma turbina eólica é influenciada pelas condições distantes de campo muito acima e a jusante do rotor, dependentes das condições de fluxo turbulento de pequena escala em torno das pás. Isso implica a exigência de uma resolução espacial detalhada com um grande domínio de simulação. Uma análise completa feita por CFD trata-se de uma simulação computacionalmente cara e demorada. É por isso que os mecanismos de projeto e avaliação baseadas no método BEM são usadas pelas indústrias para prever a eficiência de TEEH. São várias as vantagens de se usar o método BEM, uma delas é a rentabilidade, um custo computacional significativamente menor.

Para criar e simular a turbina é exigida a inserção da geometria das seções da pá para concebê-lo em um modelo. A princípio, foi necessário converter a escala real das seções para a escala do *software* QBlade. Para isso, extraiu-se as coordenadas espaciais através do *software* AutoCAD 2014 e, por meio de uma rotina implementada em MATLAB (ver Anexo 3), transformadas em coordenadas do QBlade. As seções transversais dentro do *software* são criadas como *splines* e os 26 perfis utilizados como dados de entrada podem ser vistos na Figura 3.6 e suas respectivas posições no Anexo 1.

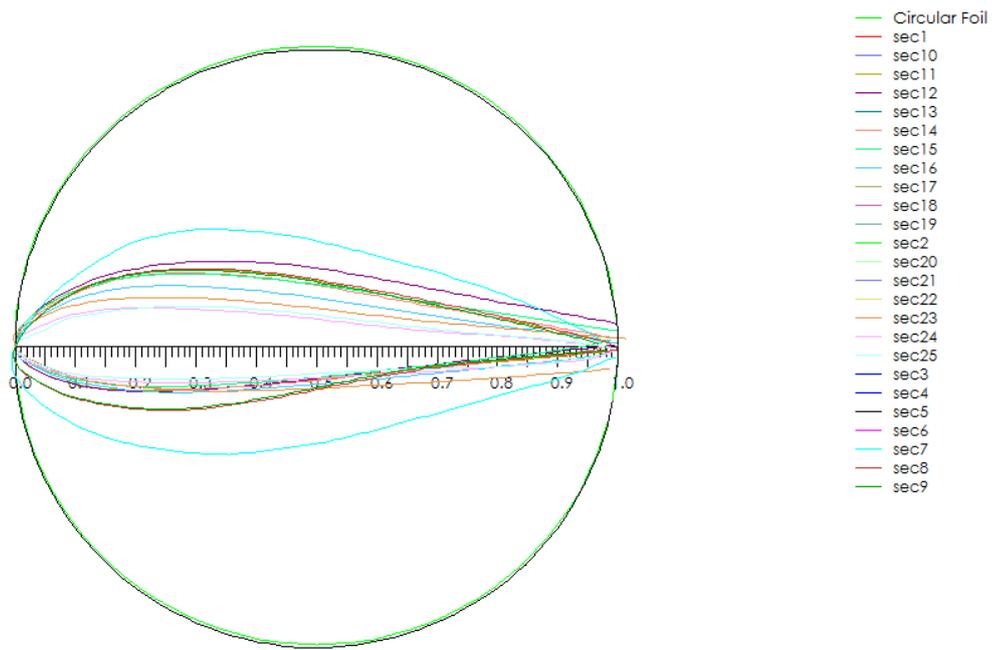


Figura 3.6 – Seções transversais da pá exportadas para o *software* QBlade.

No comando *XFOIL Direct Analysis* simula-se o fluxo em torno dos perfis entre os ângulos -10° e $+25^\circ$ com variação de 1° , criando, dessa forma, um polar. Dessa análise temos o gráfico C_l versus C_d de todas as seções, observadas na Figura 3.7.

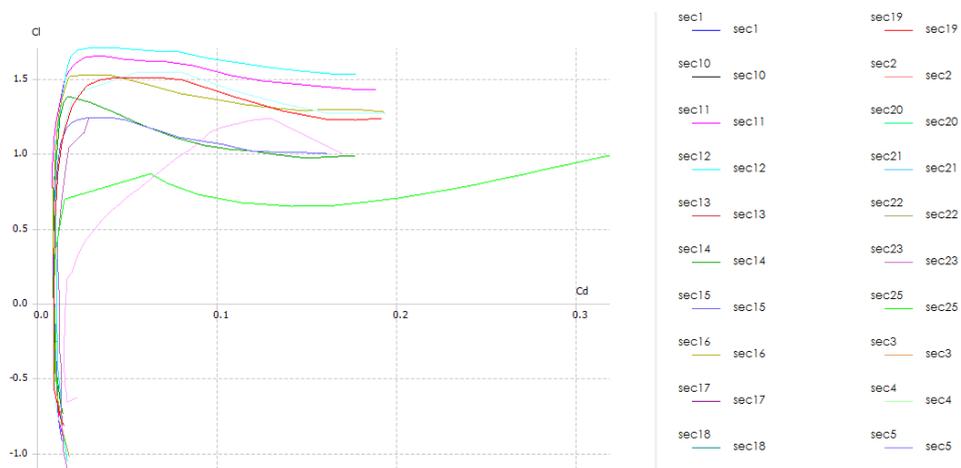


Figura 3.7 – Gráfico C_l x C_d das seções da pá.

Apenas os dados polares extrapolados em 360° podem ser utilizados para simular uma turbina. Portanto, através do comando *Polar Extrapolation to 360*, as seções foram extrapoladas gerando gráficos da relação entre C_l , C_d e α . O resultado pode ser observado na Figura 3.8.

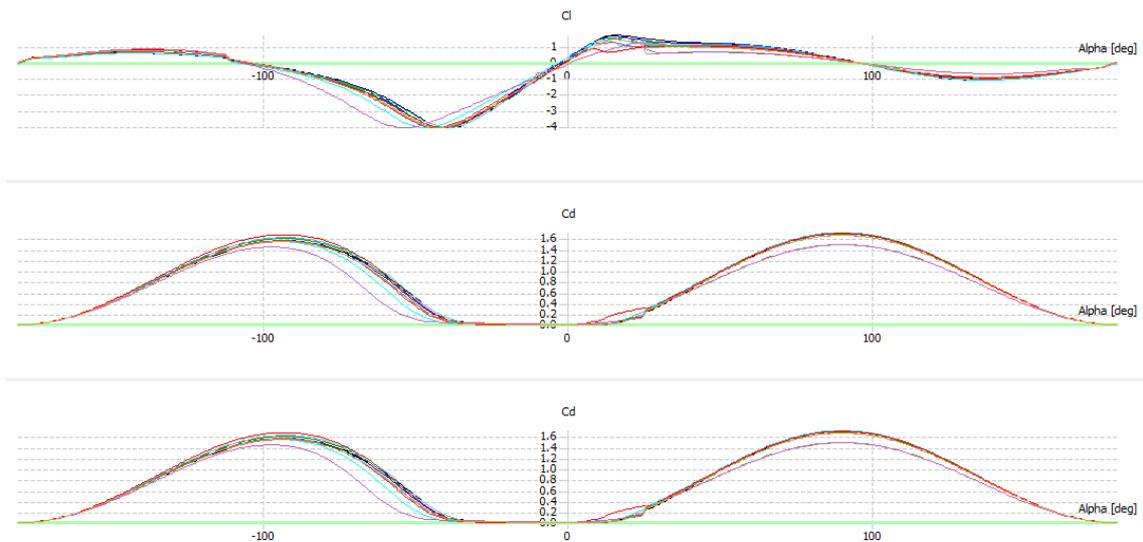


Figura 3.8 – Extrapolação dos perfis aerodinâmicos.

Com as seções já extrapoladas, o comando subsequente nos permite criar uma pá eólica para uma TEEH. Nesse processo entramos com os dados de cada seção, como: distância em relação a origem, tipo de perfil, tamanho das cordas e ângulos de torção. Dessa forma, temos a projeção da pá conforme ilustra a Figura 3.9.

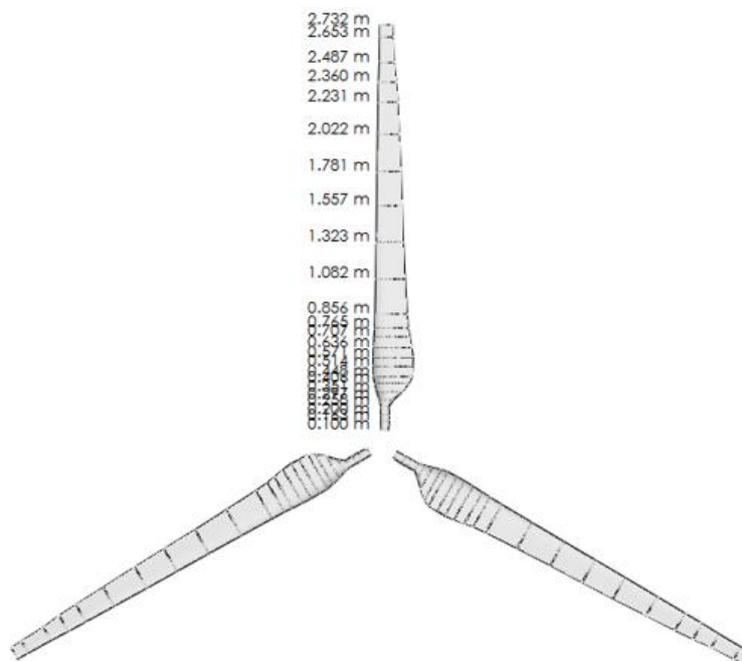


Figura 3.9 – Projeção da pá eólica através das informações geométricas de cada perfil.

Com a pá eólica presente na base de dados do *software*, pode-se simular a turbina numa gama de razões de velocidade de ponta. Na definição de uma simulação, é necessário

selecionar as correções desejadas para o algoritmo BEM e os parâmetros de simulação, conforme pode ser visto na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Área de fratura – segunda letra. (Fonte: ASTM D3039:2014 – adaptado).

Parâmetros	Valor
Velocidade de Projeto do Vento	12 m/s
Densidade do Ar	1,225 kg/m ³
Viscosidade Dinâmica do Ar	1,78 x 10 ⁻⁶ m ² /s

O QBlade fornece dois tipos diferentes de resultados de simulação para uma computação BEM: variáveis locais e globais. A Figura 3.10 mostra a curva $C_{p,max}$ e $P_{máx}$ em função da TSR (*Tip Speed Ratio*) máximo dado por 6,4.

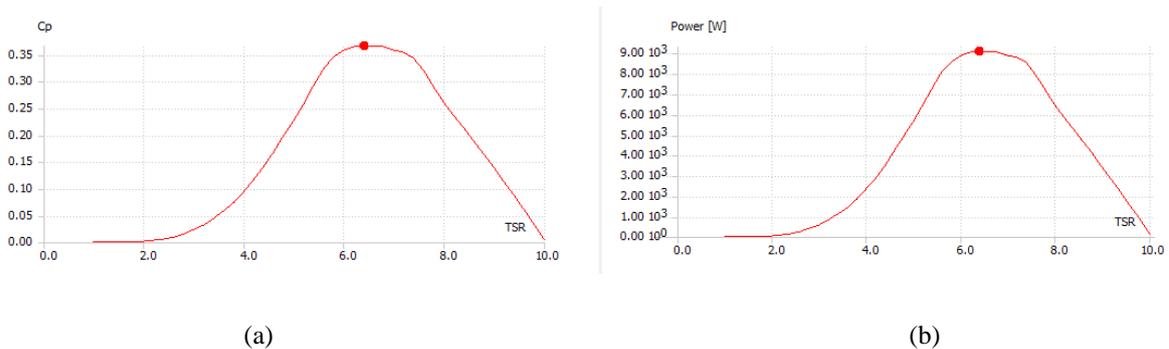


Figura 3.10 – (a) $C_{p,max}$ versus TSR máximo e (b) $P_{mec,máx}$ versus TSR máximo.

O valor de $C_{p,max}$ e P_{mec} é global, cada ponto da curva representa uma computação BEM para uma relação de TSR. Ele fornece apenas informações sobre o desempenho geral do rotor calculadas a partir das variáveis locais. A potência fornecida pelo *software* é a potência máxima extraída pela turbina. Dessa maneira, é necessário incluir nos cálculos a eficiência mecânica (η_{mec}), conforme mostrado na Equação 3.25. A norma IEC 61400/2:2006 assume a eficiência mecânica para pequenas turbinas eólicas como sendo:

$$\eta_{mec} = 0,6 + 0,005P_{design} \quad (3.25)$$

para P_{design} (potência de operação) menor que 20 kW.

A pá eólica passa boa parte do tempo em operação sendo flexionada e em uma simulação aerodinâmica é importante identificar a magnitude da força do vento projetada nas pás. A

procedência da verificação de rigidez dos elementos dimensionados, tanto flexão quanto torção, é de extrema importância em sistemas dinâmicos, pois tais parâmetros podem influenciar no desempenho e nas cargas atuantes no sistema. As Figuras 3.11 a 3.13 mostram, respectivamente, o carregamento do vento ao longo da pá, o impulso gerado na turbina e o torque no eixo de rotação em função da TSR.

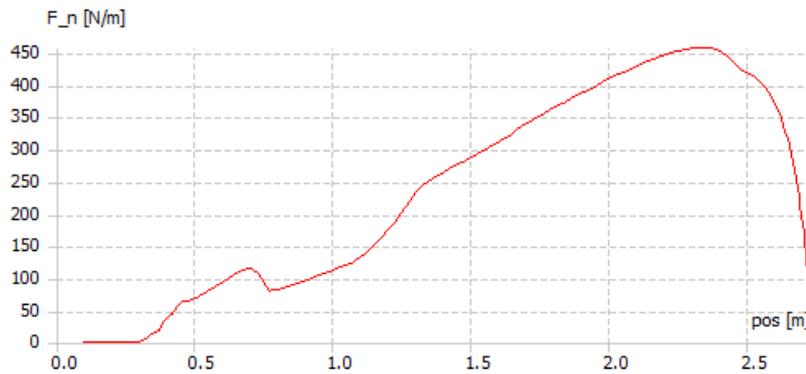


Figura 3.11 – Força do vento aplicada ao longo da pá.

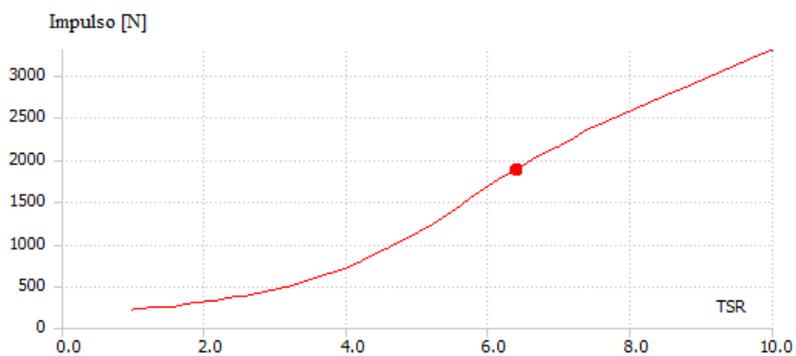


Figura 3.12 – Impulso aplicado no rotor da turbina.

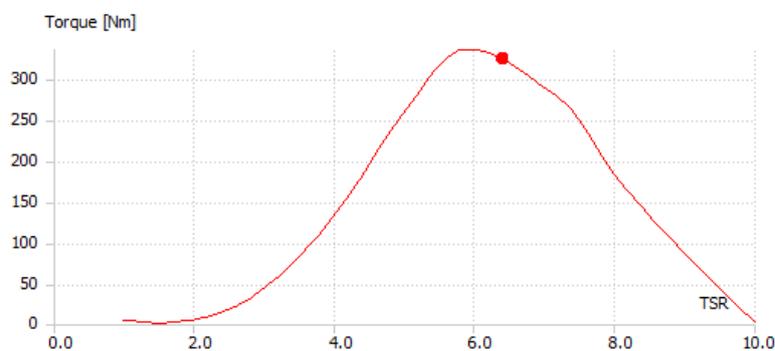


Figura 3.13 – Torque aplicado no eixo de rotação.

Observa-se que na Figura 3.11 existe um ressalto da carga aplicada na pá entre, aproximadamente, 0,5 m e 1,0 m da pá. Isto ocorre devido as imperfeições geométricas daquelas seções tendo, conseqüentemente, ângulos de ataque desfavoráveis.

4. ANÁLISE NUMÉRICA ESTRUTURAL

Os *softwares* de análise estrutural em elementos finitos são capazes de modelar estruturas complexas graças a seu procedimento padronizado de cálculo. O método consiste em transformar o contínuo em uma associação de elementos discretos, fazendo uso de equações diferenciais para a determinação de soluções aproximadas. O método atende aos critérios de continuidade. Portanto, em problemas estruturais, a função de deslocamento deve ser contínua nas interfaces dos elementos, para assim ser possível a definição de tensões e deformações no processo de análise (Assan, 2013).

Alguns trabalhos podem ser citados, por exemplo, o de Chazly (1993), que apresentou como principal objetivo a análise das tensões resultantes de forças aerodinâmicas em pás eólicas. Com elemento de placa triangular foram obtidas as frequências naturais do sistema e matriz de massa consistente e rigidez. As forças de sustentação e arrasto foram criadas dentro de condições de vento constante, como forças normais e tangenciais sobre as pás, em um determinado ângulo de ataque. Assim, foi verificado que as tensões máximas ocorrem na raiz das pás, portanto, no cubo do rotor. Ajustar as pás num determinado ângulo em relação ao plano de rotação aumenta a sua força, pois acaba direcionando as pás na direção do vento (Chazly, 1993). A torção na ponta das pás faz com que sua rigidez aumente afetando a vibração livre, de modo a diminuir os resultados das frequências naturais e modos de vibração.

Chung e Yoo (2001) realizaram uma pesquisa com base no MEF utilizando a deformação por tensão. Por meio do princípio de Hamilton – que trata de variações virtuais de todo o movimento, desde o tempo inicial até o tempo final – foram obtidas as derivadas de três equações diferenciais parciais com suas respectivas condições de contorno. As equações foram discretizadas para dois movimentos: *flapwise* e *edgewise*. Com a definição de dois nós no elemento de viga, investigaram o comportamento das frequências naturais em função da velocidade de rotação. Assim, foram obtidas as respostas em função do tempo das tensões e deformações nas direções citadas.

Kong *et al.* (2005) propõe um projeto estrutural para a concepção de uma pá de turbina eólica composta de fibra de vidro e epóxi analisadas por meio do MEF. As cargas de projeto foram determinadas com base na especificação da norma internacional IEC 61400/1:2014. Sugeriram uma configuração de estrutura capaz de suportar com eficácia várias cargas. Teste

estático estrutural com cargas aerodinâmicas simuladas verificaram a integridade da estrutura. A partir desses resultados, o protótipo de pá eólica foi certificada pelo instituto alemão *Germanisher Lloyd*.

Lou *et al.* (2007) apresentaram formulações para movimentos de vigas de Timoshenko sujeitas à força concentrada. Analisaram uma resposta dinâmica com várias condições de limite e foram comparadas com os resultados de outros trabalhos publicados. As formulações foram realizadas através do MEF onde extraiu-se respostas dinâmicas sob uma massa em movimento. Com a viga discretizada em 4 graus de liberdade, a equação de movimento foi derivada a partir do Princípio de Trabalho Virtual e apresentada na forma matricial. A resolução do problema foi realizada por meio da técnica de integração de Wilson- θ , e foi observado que esse método não somente analisa o problema dinâmico de uma viga de Timoshenko simplesmente apoiada submetido a forças concentradas, mas também pode analisar essa mesma viga em várias condições de contorno, inclusive apoios intermediários. É mais eficaz do que a técnica de elemento discreto utilizada por outros autores de referência para investigar o problema dinâmico.

Chen e Chen (2010) projetam turbinas eólicas observando, inicialmente, o comprimento da corda e os ângulos de torção das seções transversais e a distribuição ótima do material compósito. Carregado por forças e momentos máximos extraídas das simulações em ANSYS, foi criado um modelo de pá eólica em elementos finitos, otimizada aerodinamicamente. A turbina poderia gerar até 3 MW de potência, mas os resultados levaram à uma conclusão de inviabilidade de fabricação e uso devido a um alto nível de tensão máxima, excedendo o limite superior.

No artigo de Carvalho e Donadon (2011) realiza-se a análise estrutural de uma pá eólica simulando vibração livre e instabilidade para um gerador de 2 MW. A pá estudada fora fabricada em material compósito. O problema foi formulado via MEF com o auxílio dos *softwares* Excel, CATIA e Abaqus. Os autores não consideraram nas análises os reforços e as longarinas que são parte integrantes das pás, mostrando, dessa maneira, resultados primários para uma simulação dada à espessura da pá. Seus resultados mostram que há necessidade de se incluir longarinas nas pás, por reforçarem a estrutura devido aos esforços das cargas aerodinâmica.

Ferreira *et al.* (2013) modelam uma pá hidrocínética na forma de um sólido HTUC utilizando o pacote ANSYS com elementos sólidos tetraédricos. Araújo *et al.* (2014), por sua vez, propõe uma modelagem dessa mesma pá para a obtenção dos parâmetros aerodinâmicos. Utilizando elementos de viga de Timoshenko de 6 graus de liberdade por nó e um elemento não estrutural capaz de memorizar informações geométricas das seções e transmiti-las ao elemento estrutural, avalia seus resultados validando todo o processo por meio comparações com os valores encontrados por Ferreira *et al.* (2013). A metodologia, embora não muito encontrada na literatura, apresentou bons resultados com um baixo custo computacional, dando uma boa opção na extração das propriedades dinâmicas da estrutura contribuindo positivamente no sentido da modelagem com elementos de viga apesar da complexidade geométrica da pá.

Oliveira *et al.* (2015) mostram que vários fatores influenciam nos níveis de vibração das pás de uma turbina eólica, como por exemplo a altura elevada e geometria, operação da turbina, bem como o carregamento de vento. Os autores consideraram também os efeitos das forças centrífugas e giroscópicas, bem como outro fator de influência, o peso próprio da estrutura. Perceberam que há uma contribuição importante devido ao posicionamento dos elementos da turbina resultando em cargas de tração ou compressão, podendo adicionar ou diminuir rigidez da estrutura e, certamente, influenciar nos valores das frequências naturais. No estudo não foi somente necessário a análise modal. Quando se considera o peso próprio das pás, é necessário realizar análise estática para o cálculo do estado de tensão. Segundo Oliveira *et al.* (2015), a influência do peso próprio quando submetidas à compressão apresenta valores de frequência natural menores se comparadas com os resultados sem os efeitos do peso próprio. Concluíram que o comportamento da frequência natural desconsiderando os efeitos da componente axial da força peso (representado por uma força distribuída triangularmente), varia em função da posição da pá, resultados estes observados sob o ponto de vista estático.

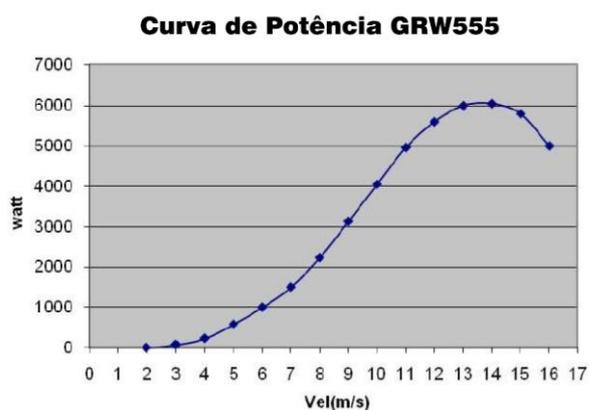
Curtu *et al.* (2015) analisaram numericamente os estados de tensão e deformação de uma pá eólica de 1,5 m de comprimento fabricada com quatro tipos de materiais: lignocelulósico, fibra de vidro, fibra de carbono e madeira. Modelando a pá no *software* CATIA aplicaram quatro tipos de cargas externas, simulando a força do vento. Observaram que há uma variação dos estados de deformação e tensão em áreas de risco da estrutura, concluem que as deformações podem ser reduzidas através de adição material.

Ghasemi e Mohandes (2016) estudaram a estática de pás eólicas em material compósito utilizando o MEF em quatro tópicos principais: análise de tensão, aeroelasticidade, *design* e fadiga. De acordo com a análise de tensão, a camada crítica pôde ser identificada e, também, a especificação do fator de segurança com base no critério de falha de Tsai-Wu.

Araújo *et al.* (2016) propuseram uma análise numérica e experimental da pá eólica do aerogerador modelo Verne 555 para a obtenção de parâmetros dinâmicos. O objetivo foi avaliar os resultados levando-se em consideração a geometria real da pá. Os autores concluíram que os resultados foram satisfatórios tendo em vista ser ainda um estudo preliminar.

4.1 DESCRIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO: PÁ DO AEROGERADOR VERNE 555

A pá estudada nesse trabalho é do aerogerador Verne 555, desenvolvido pela empresa Enersud – Soluções Energéticas Ltda, sediada em Maricá, Rio de Janeiro. Com extensão de 5,5 m de diâmetro e velocidade rotacional de aproximadamente 240 rpm a 12 m/s de velocidade de vento, a turbina eólica foi projetada para captar energia em condições de baixas velocidades do vento com capacidade para gerar até 6 kW de potência. As Figuras 4.1(a) e 4.1(b) mostram, respectivamente, a curva de potência da turbina eólica e o modelo da turbina. A Figura 4.2 mostra a pá estudada.



(a)



(b)

Figura 4.1 – (a) Curva de potência e (b) TEEH do modelo VERNE555. (Fonte: Enersud, 2016).

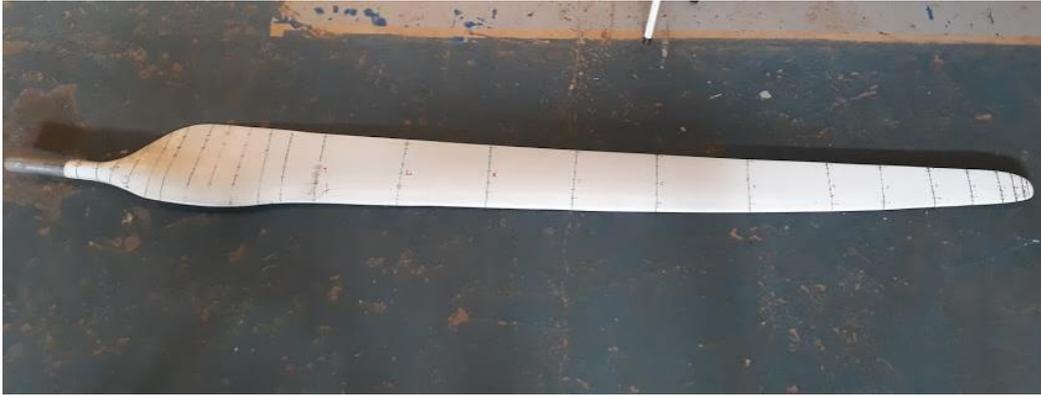


Figura 4.2 – Pá eólica da empresa Enersud.

De acordo com o Manual do Aerogerador Verne 555 (Enersud, 2016), a pá é fabricada em material compósito com uma camada externa em fibra de vidro e reforço interno em alumínio. Em razão da empresa fabricante não disponibilizar maiores detalhes das características da pá, algumas estimativas foram feitas, tais como o reforço interno, que foi admitido como sendo de alumínio, sua geometria também foi estimada e se presumiu, no restante da área interna, um preenchimento com um material em polímero termoplástico em aspecto de espuma. A Figura 4.3 mostra a disposição dos materiais considerada.

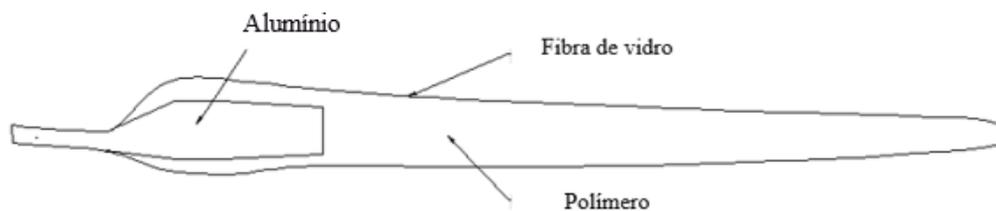


Figura 4.3 – Materiais e detalhe da estrutura interna da pá.

Isto posto, atribuímos aos elementos as propriedades mecânicas de cada material baseado nos valores mencionados em Callister Jr. (2007), como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados na análise. (Fonte: Callister Jr., 2007).

Materiais	Módulo de Elasticidade	Coefficiente de Poisson
Alumínio	69,0 GPa	0,33
Epóxi	2,4 GPa	0,40
Fibra de Vidro	72,5 GPa	0,22

4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA PRELIMINAR

No presente trabalho realizou-se uma análise estática da pá via MEF. O processo de modelagem da pá é o mesmo adotado por Araújo *et al.* (2016). Adequado para analisar estruturas reticuladas de seção transversal complexa, o autor modela uma pá do aerogerador Verne 555 com o elemento de viga BEAM188 que possui seis graus de liberdade por nó, com translações e rotações nos eixos x , y e z . Nesta análise considerou-se para o modelo prévio a linearidade geométrica. A geometria, a localização dos nós e o sistema de coordenadas do elemento BEAM188 são mostrados na Figura 4.4.

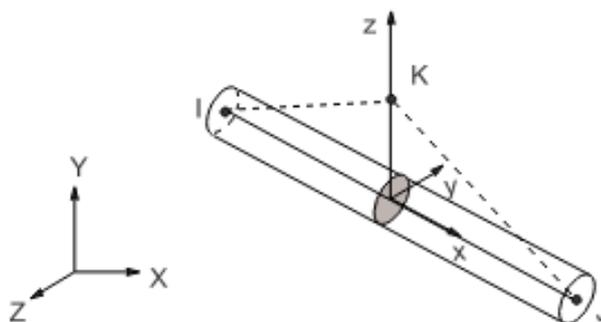


Figura 4.4 – Materiais e detalhe da estrutura interna da pá.

Foram utilizadas 9 das 26 seções transversais obtidas anteriormente, disponíveis em um arquivo CAD, apresentadas no Anexo 2. Cada seção foi exportada e salva com extensão .igs. Na linguagem do ANSYS APDL estas seções foram batizadas como elemento MESH200 (Sharcnet, 2014 e Araújo *et al.*, 2016). O MESH200 é um elemento quadrilátero com 8 nós e não possui comportamento estrutural, utilizado, portanto, apenas para armazenar as informações geométricas de cada seção e transferi-las para o elemento de viga. Após a aplicação do MESH200 a seção é vista conforme a Figura 4.5.

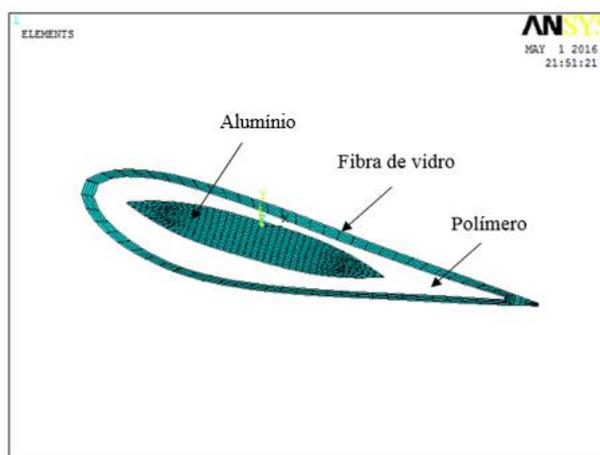


Figura 4.5 – Exemplo da quarta seção após aplicado o MESH200 configurada no ANSYS.

O perfil geométrico da pá afunila-se de forma gradual formando um aspecto cônico até a sua extremidade não engastada. Como cada seção possui sua respectiva geometria e previamente salva num arquivo com identificação individual, para atingir essa concepção foi associado a cada perfil pelo comando SECTYPE às respectivas geometrias contidas nesses arquivos. É importante destacar que as reais dimensões da estrutura não são fornecidas pelo fabricante por motivos de confidencialidade comercial. Portanto, as dimensões deste elemento são estimadas também.

Todas as seções precisam ser topologicamente idênticas, com o mesmo número de elementos e material. Para isso, utilizou-se o comando subsequente SECDATA. As Figuras 4.6 e 4.7 mostram o modelo em elementos finitos adotado para a pá.

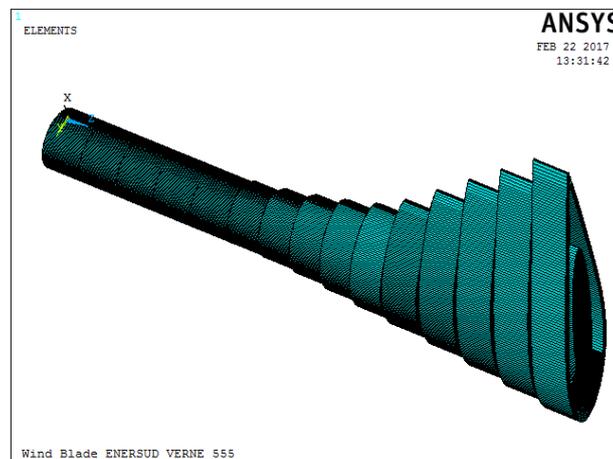


Figura 4.6 – Malha das primeiras seções agrupadas no ANSYS.

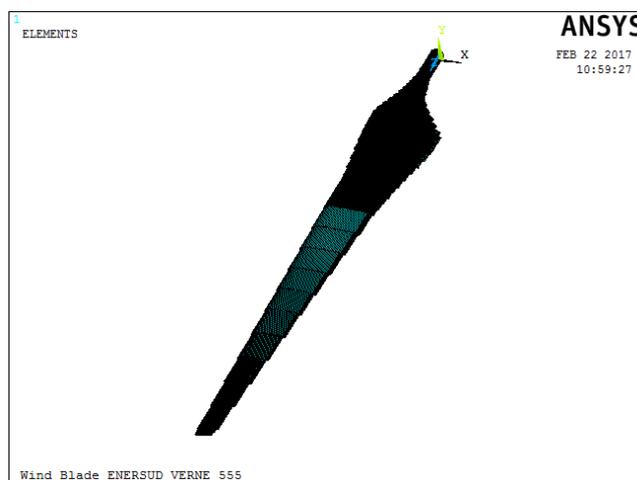


Figura 4.7 – Modelo em elementos finitos adotado.

Foi aplicada uma carga pontual de intensidade $\frac{Q \cdot l}{2}$, no ponto indicado na Figura 4.8. Esta carga representa a resultante de uma carga triangular obtida pelo *software* QBlade pensada como uma simplificação da carga real do vento sobre uma pá eólica.

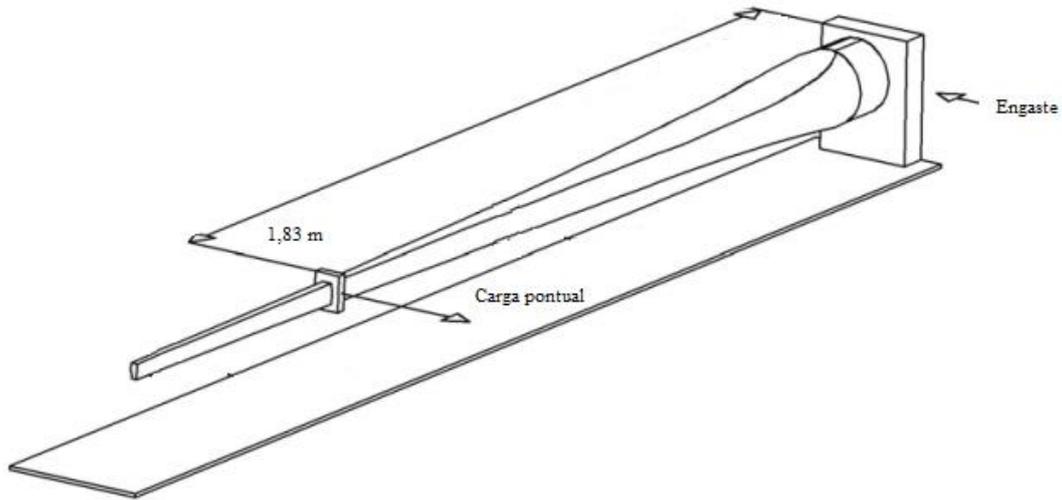


Figura 4.8 – Representação da pá eólica submetida a carga pontual.

Em seguida, as Tabelas 4.2 e 4.3 mostram, respectivamente, as cargas projetadas no procedimento numérico e os resultados das deflexões na extremidade livre da pá e no ponto de aplicação da carga, tensões e momentos no engaste causadas pela força do vento e peso próprio. As Figuras 4.9 e 4.10 mostram, respectivamente, os momentos fletores e tensões para o carregamento previsto para o teste estático ao longo da pá.

Tabela 4.2 – Valores das cargas para testes numéricos e experimentais.

Tipos de Carga	Valor da carga para teste
Projeto (F_d)	850,10 N
Teste Estático (F_p)	935,11 N

Tabela 4.3 – Deflexões, momentos e tensões na pá.

Referências	Deflexão		Tensão máxima	Momento máximo
	Local da carga	Ponta da pá		
Peso próprio	0 mm	8 mm	14,1 MPa	120,2 Nm
Carga de Projeto	59,7 mm	127 mm	161 MPa	1417,4 Nm
Carga de Teste Estático	65,7 mm	139,2 mm	177 MPa	1559,11 Nm

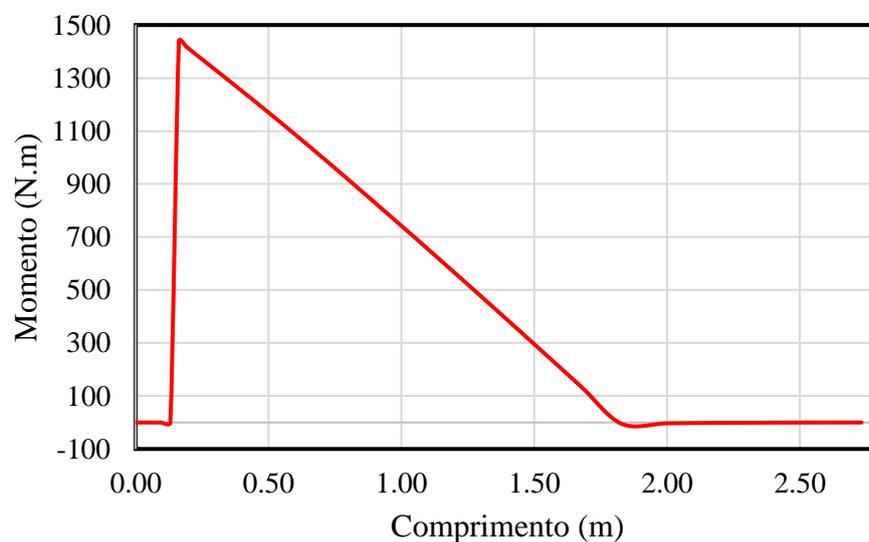


Figura 4.9 – Diagrama de momento fletor para a carga de projeto. (Fonte: Próprio autor).

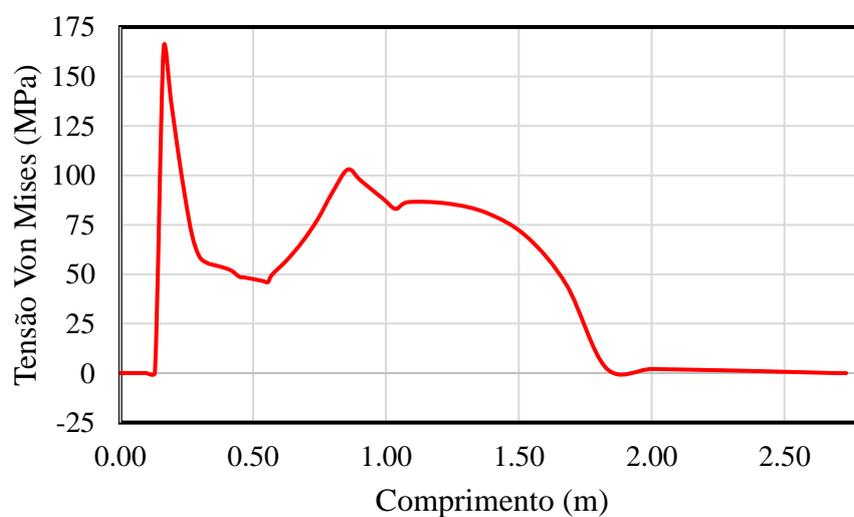


Figura 4.10 – Tensão para a carga de projeto. (Fonte: Próprio autor).

Após a análise estática numérica procede-se com o ensaio experimental. A partir dos resultados experimentais uma calibração do modelo deve ser realizada para aproximar os resultados numéricos daqueles obtidos experimentalmente.

4.2.1 Análise de Convergência

A análise de convergência é necessária para avaliar se o refinamento da malha utilizada no modelo numérico converge à solução confiável. As condições de convergência do método dependem não só da formulação dos elementos, mas também da malha gerada para analisar um determinado problema (Martha, 1994).

Toda análise numérica realizada nesta pesquisa foi discretizada de tal forma que se obteve 47 elementos no total. Sem embargo, a Figura 4.11 mostra o resultado da convergência da malha.

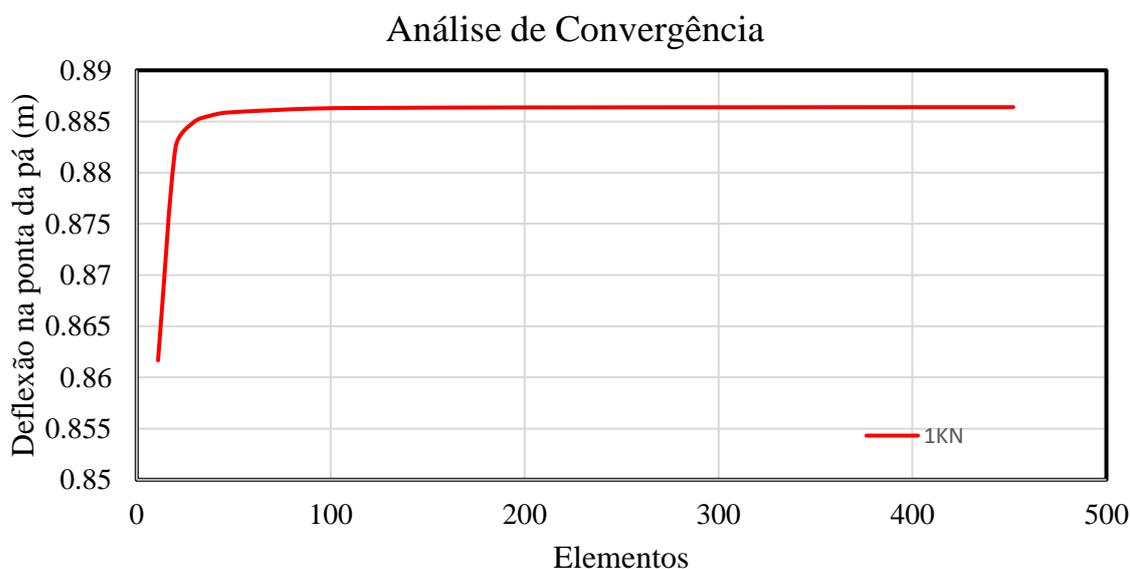


Figura 4.11 – Análise de convergência da malha. (Fonte: Próprio autor).

4.2.2 Linearidade e Não-Linearidade Geométrica

A finalidade de uma análise estrutural é determinar o comportamento da estrutura quando submetida às ações externas. Assim, é necessário determinar a resposta da estrutura

de forma a verificar se as restrições de projeto são atendidas. Isto posto, o processo de análise deve ser o mais eficiente possível.

A maioria das estruturas de engenharia apresentam um comportamento linear elástico sob cargas de serviço. Entretanto, existem exceções em que estruturas sujeitas a um escoamento pontual prematuro ou fissuração, por exemplo, apresentam um comportamento não-linear. De acordo com Silva (2017), antes de alcançar o seu limite de resistência, quase todas essas estruturas vão apresentar uma resposta não-linear significativa.

Uma estrutura pode apresentar um comportamento não-linear ainda que constituída de um tipo de material que obedeça à lei de Hooke. A proposta deste trabalho, contudo, é verificar, a partir das respostas dos ensaios estáticos, a deformada da estrutura. Isso permitirá, dentro do estudo da estabilidade da pá, empregar ou não os efeitos não-lineares durante o processo de análise estrutural em ANSYS. A fonte não-linear aplicada na análise em elementos finitos será, apenas, a classe de não-linearidade geométrica, que se refere apenas aos efeitos causados pela deformação e deslocamento dos elementos estruturais da pá. O ANSYS utiliza a abordagem do método Newton-Hampson para a resolução de problemas não-lineares.

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 PROJETO DA BANCADA DE TESTES PARA ENSAIO ESTÁTICO

Ensaio experimentais são utilizados para determinar parâmetros diversos de um sistema, complementando e atestando um conjunto de análises numéricas conduzidas para a garantia da segurança e funcionalidade da peça. Em geral, testes de resistência de pás eólicas exigem uma bancada apropriada para sua fixação e métodos de aplicação de cargas de teste. Toda a concepção de montagem deve ter como objetivo principal a reprodução das condições de contorno reais do problema. Entretanto, verifica-se que as pás eólicas utilizadas nos testes do presente trabalho, em face dos resultados obtidos, não representam um resultado médio de um determinado lote de fabricação.

Reproduziu-se um modelo de bancada semelhante ao adotado por Alé *et al.* (2011), fabricada em tubo de aço carbono de seção transversal quadrada, com dimensões principais de 275 x 960 cm de comprimento e largura, respectivamente, conforme pode ser observado na Figura 5.1. Detalhes das dimensões da bancada podem ser vistos no Anexo 5.



Figura 5.1 – Representação da bancada de ensaio para testes estáticos de pás eólicas.

A base de fixação foi construída para simular o suporte de ligação da pá ao rotor da turbina eólica. Ela foi feita com chapas em aço de $\frac{1}{2}$ polegada formando uma espécie de “berço” para melhor encaixe da raiz da pá, como mostra a Figura 5.2. Ela foi reforçada com

seis parafusos de $\frac{3}{4}$ de polegada e borrachas com espessuras de 5 mm em suas superfícies a fim de se reduzir a possibilidade de rotação ou qualquer outro tipo de deslocamento nessa região.



Figura 5.2 – Detalhe do suporte da pá.

A pá, após a fixação no suporte construído, foi carregada pontualmente a $\frac{2}{3}$ de seu apoio. Os valores definidos para o carregamento e seus suaves incrementos tem como objetivo, além da preservação de sua característica estática, atingir a ruptura, seguindo as definições estabelecidas na Tabela 4.2. A aplicação de uma carga pontual, tal como se considerou no presente trabalho, é sugerida pela norma IEC 61400/23:2001.

Muitas vezes, quando uma pá eólica é testada com uma carga pontual, apresenta um acúmulo de danos na região de aplicação que pode acarretar em uma possível variação da força real. A tensão nessa região é mais proeminente manifestando maior velocidade na dispersão dos danos. Uma pá eólica testada com uma maior parte de área submetida a carga de teste expõe menor dispersão dos danos, uma vez que estas áreas são testadas de maneira mais uniforme (IEC, 2001). Entretanto, desta forma, a carga produzirá uma distribuição linear do momento fletor. Isso, segundo a IEC 61400/23:2001, pode aproximar a distribuição da carga-teste em toda a extensão da pá, porém, exigirá o carregamento progressivo na pá. Assim, apenas uma ou duas seções podem ser testadas com a mesma precisão de um teste com múltiplos pontos de carga.

Perante o exposto, deve-se levar em consideração alguns cuidados prévios e no decorrer do ensaio. A pá deve ser protegida no ponto de aplicação da carga a fim de impedir deformações provocadas pela pressão concentrada na área de contato. Isso pode ser alcançado aplicando um revestimento externo entre a fonte de carga e a superfície da pá a

ser testada. Com o propósito de evitar efeitos dinâmicos durante o teste, o carregamento deve ser aplicado lento e gradualmente, observando a conformidade desta em cada incremento de carga.

Geralmente, as propriedades dos materiais de estruturas expostas à ensaios destrutivos apresentam alterações na resistência no decorrer do processo. A norma IEC 61400/23:2001 sugere, portanto, em avaliar o intervalo de tempo na duração de cada carga aplicada e o tempo total, sendo que a pá suporte cada incremento de carga por no mínimo 10 s, num período de 30 a 60 min de tempo total do teste. Isto é coerente quando se analisa a carga-alvo ou carga-teste de pás eólicas, pois a maior representatividade de carregamento possível é ocasionada por rajadas de vento que ocorrem isoladamente por 10 s num período de 50 anos. Não obstante deve-se executar pelo menos quatro passos de carregamentos entre 25% e 100% do carregamento total de teste.

5. 2 SISTEMA DE MEDIÇÃO E COLETA DE DADOS

5.2.1 Ensaio Estático

O sistema de aquisição de dados utilizado é composto pelos seguintes equipamentos: extensômetros elétricos instalados ao longo da pá, célula de carga e módulo para coleta e processamento de dados.

Os extensômetros do tipo elétrico de resistência são transdutores usados para medir a deformação mecânica de um objeto. É um bipolo de resistência nominal que, quando instalado na região de interesse sofre a mesma deformação à medida que o objeto se deforma, alterando, portanto, sua resistência. Foram utilizados nos ensaios seis extensômetros do fabricante *Deek-Robot* tipo BF 350 - 3 AA. A opção por este modelo, dentre outras coisas, foi por apresentar menor dispersão do coeficiente de sensibilidade.

As características do sensor são apresentadas na Tabela 5.1 bem como as posições pré-definidas dos extensômetros ao longo da pá na Figura 5.3, onde E1, E2 e E3 são as posições dos extensômetros instalados na região 1, 2 e 3, respectivamente. Estas regiões foram selecionadas devido ao modelo numérico apresentar maiores tensões nas bordas de ataque e de fuga.

Tabela 5.1 – Características dos extensômetros usados nos ensaios.

Esquema	Modelo	Resistência (Ω)	Fator de Sensibilidade (mV/V)	Comprimento (mm)	Largura (mm)
	Deek- Robot	350	$\pm 2,0$	6,5	4,5

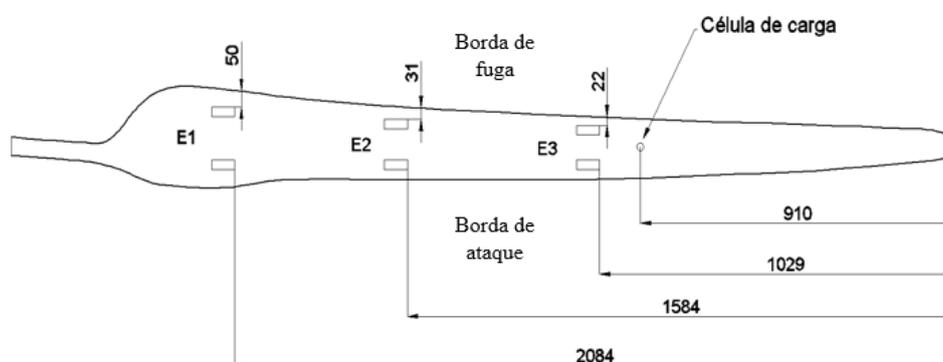


Figura 5.3 – Posicionamento dos extensômetros (em milímetros).

O circuito escolhido para a aquisição das deformações foi a disposição de $\frac{1}{4}$ de ponte. Mostra-se conveniente a adoção desse modelo devido o presente trabalho se concentrar no monitoramento da deformação em apenas uma direção. Seus terminais são ligados em fios que por sua vez são conectados em cabos mantendo comunicação com um amplificador de sinal, como pode ser visto na Figura 5.4.

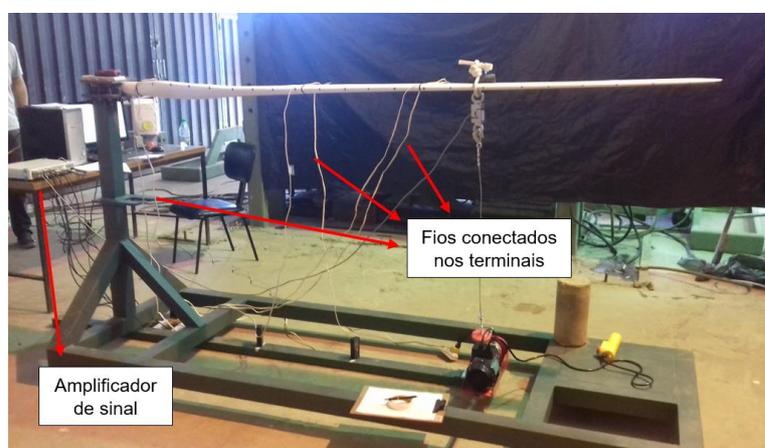


Figura 5.4 – Sistema de montagem para aquisição de sinais.

O transdutor responsável pela medição da força aplicada é a célula de carga da fabricante HBM, instalada no ponto de aplicação da carga. A Tabela 5.2 mostra as principais características da célula de carga utilizada nos ensaios de acordo com as especificações fornecidas pelo fabricante.

Tabela 5.2 – Características da célula de carga tipo S. (Fonte: HBM, 2017).

Esquema	Carga Máx.	Resistência de Saída	Tensão de Referência	Sensibilidade
	2000 N	350 $\Omega \pm 1,5$	5 V	$\pm 2,0$ mV/V
Dimensões (mm)				
	Comprimento	Altura	Espessura	Rosca
	50,8	76,2	25,4	M12

Para o processamento dos sinais utilizou-se o amplificador de frequência *Spider8* da fabricante HBM. Todo o condicionamento de sinal é combinado em uma caixa que, conectado ao computador, está pronta para uso imediato. Todas as configurações necessárias são feitas através de um *software* por comandos dispensando o uso de potenciômetros, sensores e *jumpers* (HBM, 2017). As principais características do módulo são mostradas na Tabela 5.3. O *Spider8* interage com o programa *Catman8* também da empresa HBM, responsável por exibir instantaneamente, após o ajuste dos parâmetros pelo usuário, as informações mais importantes, como o tempo, valor da carga aplicada e a variação de deformação.

Tabela 5.3 – Dados do módulo *Spider8* para aquisição de dados. (Fonte: HBM, 2017).

Esquema	Fabricante / Modelo	Vetor de Frequência	Transdutores Compatíveis	Resistência (Ω)	Classe de Precisão
	HBM/Spider 8-30 SR 30	600 Hz	Ponte completa / meia-ponte / ¼ de ponte	120, 350, 700	0,1

5.2.2 Ensaio de Tração

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o *Software®Bluehill* da Instron. Para cada ensaio de tração alimentou-se previamente o *software* com a média das características geométricas de cada corpo de prova aqui denominados CP 1 a CP 5 bem como a regulagem da velocidade em 2 mm/min. Observa-se na Figura 5.5 a disposição do par de extensômetros distanciados em 15 mm.

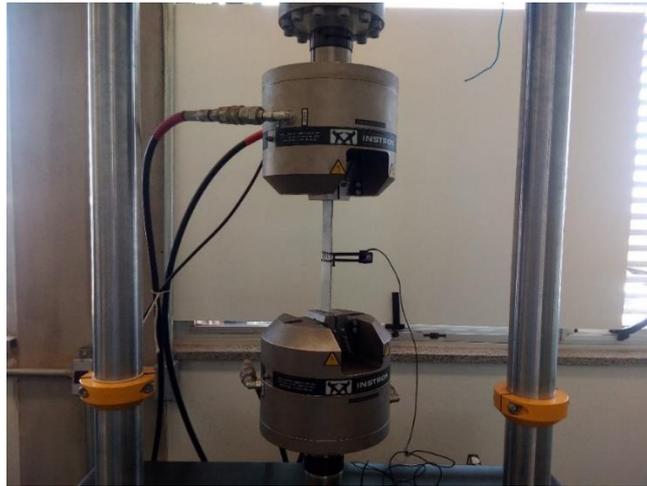


Figura 5.5 – Configuração do pré-ensaio de tração.

5.3 METODOLOGIA DE ENSAIO

5.3.1 Ensaio Estático

Foram realizados individualmente três testes estáticos de flexão da pá eólica dos quais os dois últimos foram conduzidos até a ruptura da peça. O primeiro não atingiu a ruptura por limitações no procedimento de ensaio que serão discutidas mais adiante. Cada pá ensaiada foi fixada em uma de suas extremidades na bancada de ensaio e flexionadas na parte livre por um cabo de aço ligado a uma talha elétrica integrada à bancada numa distância horizontal de 1,83 m, local este onde existe uma maior concentração da força aerodinâmica conforme descrito nos Capítulos 3 e 4, subitens 3.3.1 e 4.2, respectivamente. A Tabela 5.4 mostra as principais características da talha elétrica e a Figura 5.6 mostra a configuração da bancada pré-ensaio.

Tabela 5.4 – Características técnicas da talha elétrica. (Fonte: Nagano, 2017).

Esquema	Fabricante	Potência	Comprimento do Cabo de Aço	Capacidade de Carga
	Nagano	600 W	6/12 m	150/300 kg

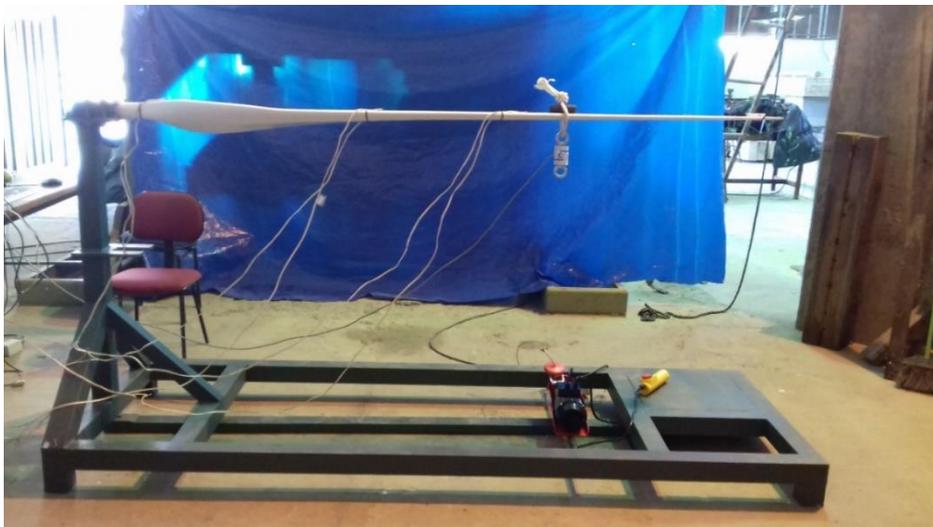
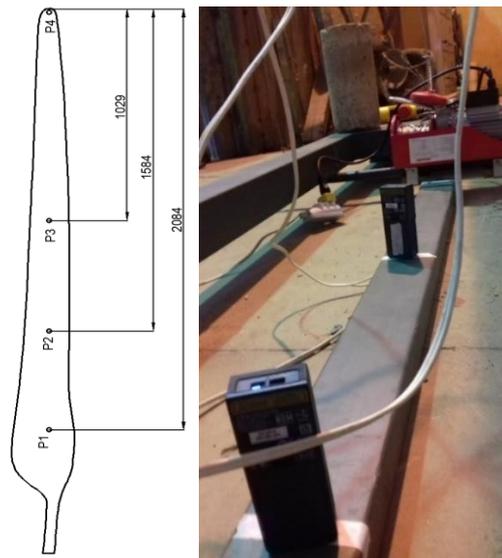


Figura 5.6 – Configuração da bancada de testes.

A cada passo de carga mediu-se: o valor da carga aplicada, a deformação e a deflexão da pá. O monitoramento da amplitude de deflexão foi feito com quatro trenas à laser posicionadas em quatro pontos ao longo do comprimento da pá. É evidente que, à medida que a pá flexiona tem-se a necessidade de se movimentar as trenas no sentido de acompanhar os pontos previamente demarcados na pá. As Figuras 5.7 (a) e (b) mostram os locais e a disposição das trenas. As trenas são da fabricante Bosch com precisão de ± 3 mm.

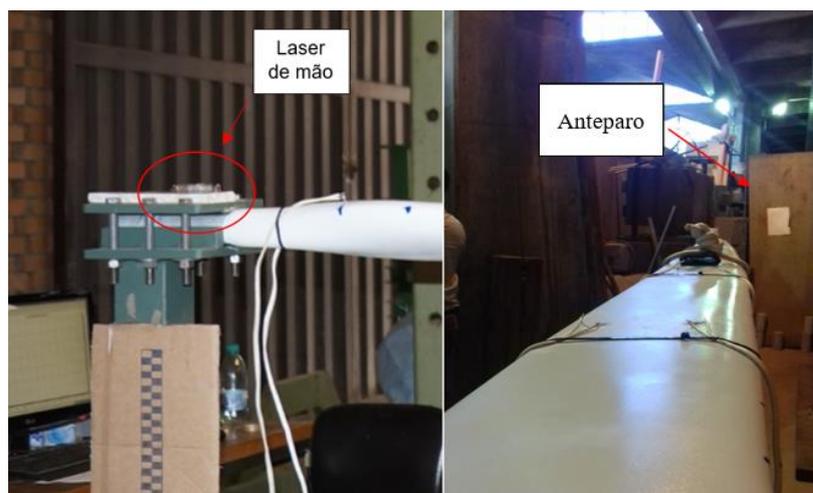


(a)

(b)

Figura 5.7 – (a) Local e (b) posicionamento das trenas à laser (em milímetros).

Durante o ensaio, além do monitoramento dos pontos citados, foi supervisionado o local do engaste da pá, a fim de se acompanhar um possível deslocamento angular neste apoio. Um laser de mão foi posicionado nessa região e apontado para um anteparo auxiliar a 6,85 m de distância, conforme pode ser observado nas Figuras 5.8 (a) e (b). À medida que a pá se defletia, portanto, para cada incremento de carga, acompanhava-se a mira à laser, gravando manualmente o local da mira no artefato auxiliar. Dessa forma, avaliando-se a posição inicial da mira com a posição final, determina-se o ângulo de rotação do apoio.



(a)

(b)

Figura 5.8 – (a) Posicionamento do laser de mão, (b) anteparo para medir a distância das miras à laser para determinar a rotação do engaste.

A variação de resistência ocorrida em cada um dos extensômetros foi captada pelo sistema de aquisição de dados e armazenada em um arquivo de extensão *.iod* e *.xls* para posterior análise e discussão. Estes sinais foram registrados e lidos ininterruptamente.

5.3.2 Ensaio de Tração

Para a realização dos ensaios de tração foram utilizados cinco CP retirados da pá eólica no sentido longitudinal, conforme mostrado na Figura 5.9. Estas amostras foram removidas da região não deformada da primeira pá eólica utilizada no ensaio estático e, dentre as dimensões geométricas disponíveis pela norma ASTM D3039:2017, foi selecionada aquela mais adequada para o material em questão. No corte, foi utilizada a minirretífica Dremel e uma lixadeira elétrica Bosch com a finalidade de dar acabamento nas bordas bem como das superfícies. Não foram extraídas amostras de CP's das outras pás devido a complexidade de remoção. A geometria adotada neste trabalho foi para material compósito com fibra orientada aleatória-descontínua, conforme Pacheco (2016) representa na Figura 5.10, atendendo, portanto, às exigências em norma.



Figura 5.9 – Corpos de prova utilizados no ensaio de tração.

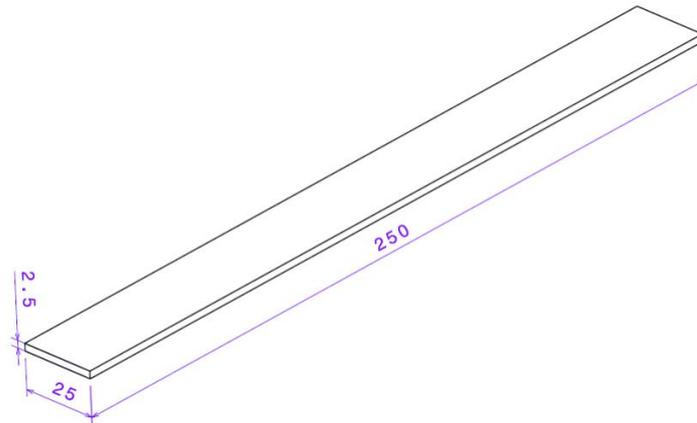


Figura 5.10 – Dimensão do corpo de prova. (Fonte: Pacheco, 2016).

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais da Faculdade UnB-Gama utilizando a máquina de ensaio de tração servo-hidráulico Instron 8801, célula de carga com capacidade de até 100 kN e garras equivalentemente espaçadas de modo a permitir o comprimento útil dos CP's em 174 mm. A Figura 5.8 mostra o modelo da máquina utilizado neste ensaio. O teste foi conduzido em temperatura padrão de laboratório em concordância com a norma ASTM 5229/D:2014.

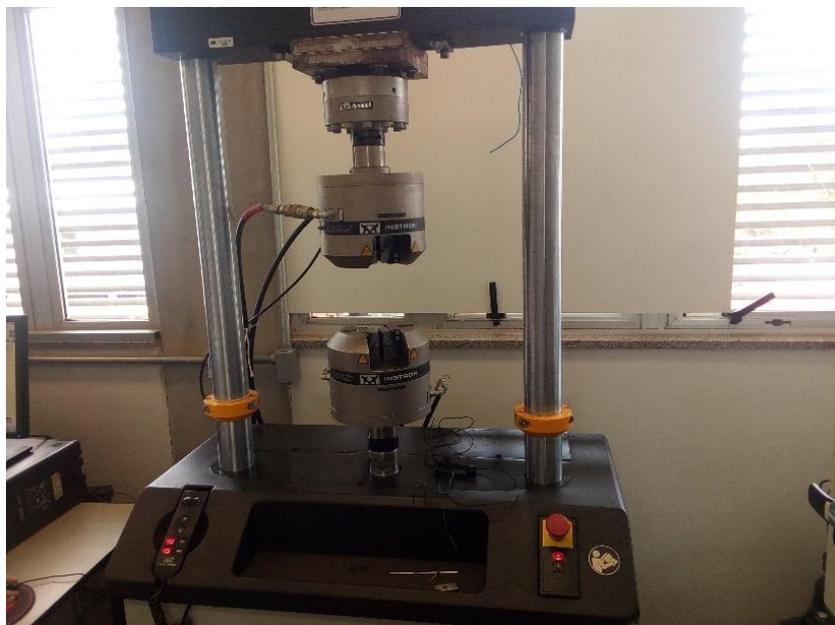


Figura 5.11 – Máquina de tração marca Instron 8801.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 ENSAIO ESTÁTICO

No presente trabalho, foram realizados três ensaios, na qual três pás eólicas foram avaliadas isoladamente. Uma previsão de estágios de carregamento foi determinado e está disposta na Tabela 6.1 (ver mais detalhes no Anexo 6). Para cada incremento de carga aplicado estaticamente mediram-se na pá a deformação, deslocamento e carga resultante. Desta forma, a descrição dos resultados de cada ensaio é detalhada a seguir.

Tabela 6.1 – Estágios de carregamento utilizados nos ensaios.

Dados	Carga (kgf)			
	25%	50%	75%	100%
Valor da carga de serviço (F_k)	16,05	32,09	48,14	64,20
Valor da carga de Projeto (F_d)	21,66	43,33	64,99	86,66
Valor da carga para Teste Estático (F_p)	23,83	47,66	71,49	95,32

6.1.1 Ensaio 1

Neste ensaio a pá apresentou falha visível para um carregamento 86,5% acima da carga prevista para o teste estático. A Figura 6.1 mostra a pá deformada com o carregamento máximo do teste estático listado na Tabela 6.1.



Figura 6.1 – Ensaio de flexão 1 da pá eólica com 100% da carga de projeto.

Durante o ensaio, no passo de carga 30 especificamente, identificou-se um deslizamento, não previsto, da ligação do cabo de aço da talha elétrica com a pá após os 10 s de sustentação da carga prevista em norma. Esse deslocamento provocou pequenas vibrações na pá, porém, sem danos aparentes. Todavia, nesse passo de carga havia-se superado a carga máxima prevista para F_p vista na Tabela 6.1. Nos passos de carga 33 e 37 o deslizamento ocorreu novamente. Nesse instante, suspendeu-se o ensaio para estabilizar o conjunto de ligação com fita adesiva *silver tape* e grampos de fixação sobre a superfície da pá, como mostra a Figura 6.2.

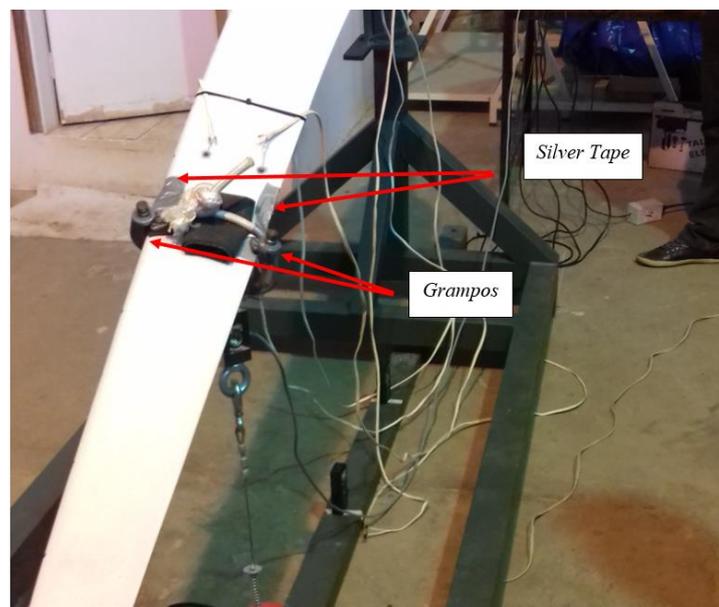


Figura 6.2 – Detalhe dos ajustes no local onde ocorreu o deslizamento do cabo.

A pá eólica mantém-se íntegra durante o teste de carregamento estático visualmente. Entretanto, no passo de carga 42, estalos foram percebidos e fissuras foram identificadas em seguida na superfície tracionada entre as seções 11 e 16 – compreendido entre 0,71 m e 1,58 m distantes da raiz da pá – em sentido transversal, localizadas na região da borda de ataque, conforme pode ser observado na Figura 6.3.

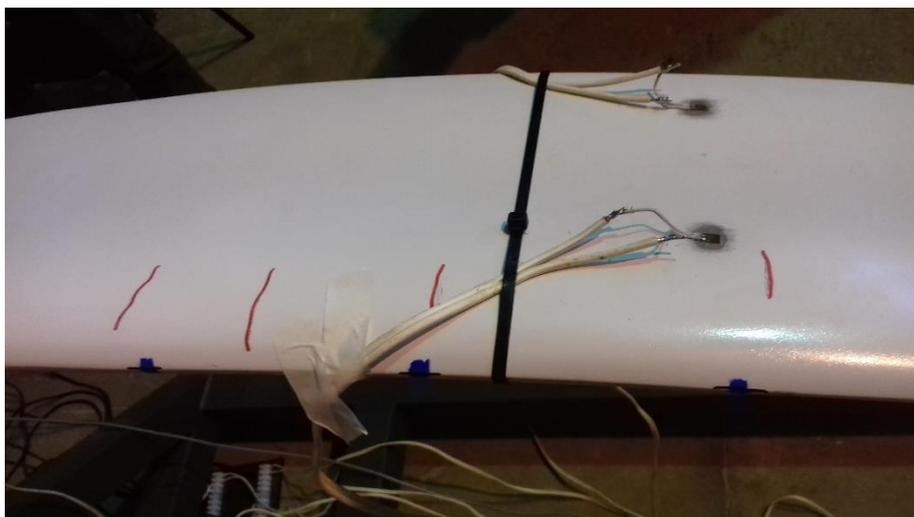


Figura 6.3 – Local das fissuras no ensaio 1.

O ensaio foi novamente interrompido no passo de carga 48 por conta da limitação da talha que estava preparada para atingir o limite de carga de aproximadamente 150 kgf. Com a carga em 86,5% superior em relação a carga máxima a F_p , o motor da talha não foi capaz de gerar mais incrementos de carga. Portanto, decidiu-se encerrar o ensaio, pois, observando a norma IEC 61400/23:2001, tem-se que a maioria dos materiais de pás eólicas apresentam redução de resistência conforme a duração da carga, podendo introduzir indesejáveis incertezas na interpretação dos resultados.

No decurso do ensaio – especificamente a partir do passo de carga 15, ou seja, 25% de carga aplicada – observou-se a inclinação do cabo de aço, conforme notado na Figura 6.4, acarretando o surgimento de componentes perpendiculares de forças à pá deformada. Considera-se, portanto, que a partir desse instante, todas as forças aplicadas na pá poderiam ser decompostas, de forma que a Figura 6.5 mostra apenas a componente da força na direção Y. O ângulo de inclinação foi medido com o auxílio do *software* Measure, apresentando variações entre 0,1° e 6,2° graus.

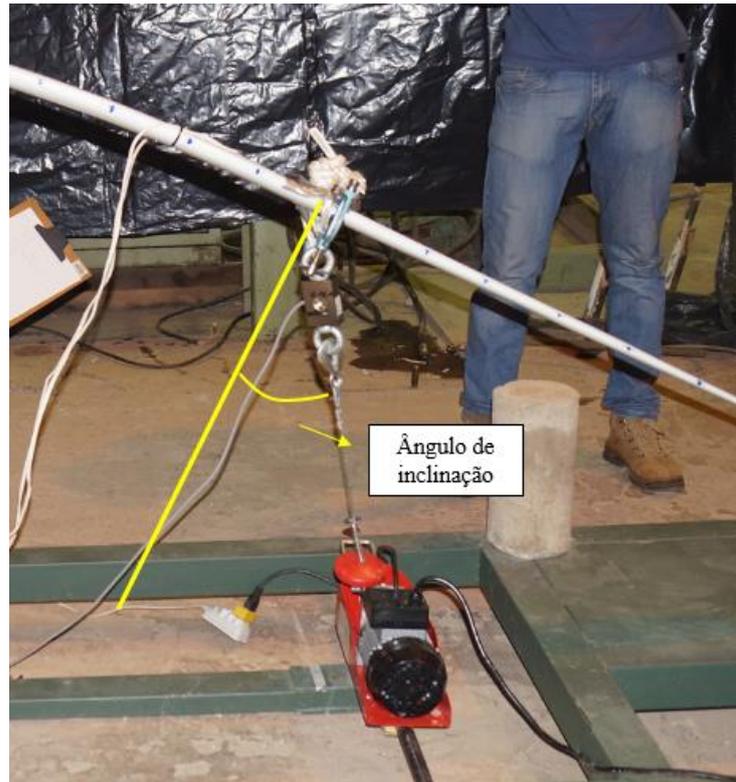


Figura 6.4 – Ângulo de inclinação produzido entre o cabo de aço e o local de aplicação da carga durante o ensaio 1.

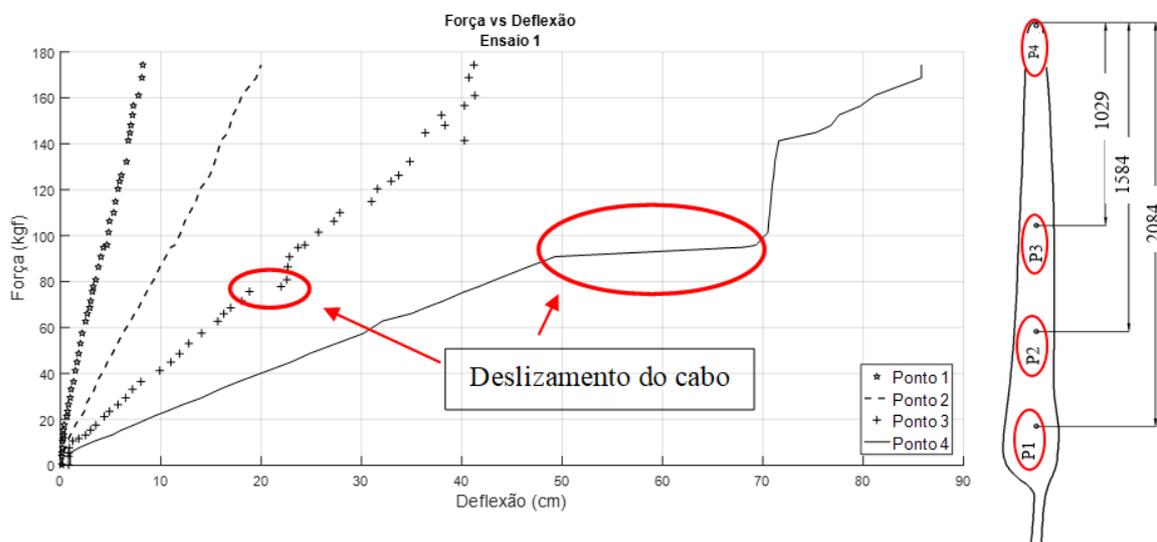


Figura 6.5 – Diagrama de Força vs Deflexão do Ensaio 1 considerando decomposição da força.

Com a aplicação dos carregamentos durante o ensaio, a chapa superior do suporte de fixação da pá apresentou deslocamentos dada a observação no anteparo. A Figura 6.5 identifica o momento desta ocorrência, e isso pode ter interferido nos resultados medidos. Entretanto, percebeu-se que a base do suporte da pá não sofreu nenhum tipo de deformação

que possa configurar em deslocamento rotacional. O motivo do referido deslocamento foi devido ao afrouxamento de algumas das porcas utilizadas para fixar os parafusos. Após as medidas das deflexões na pá para cada incremento de carga os dados do diagrama mostrados na Figura 6.5 foram corrigidos levando-se em consideração o deslocamento angular de $2,43^\circ$ do suporte, que aqui denomina-se como “folga”, mas não houve significativa mudança nos resultados, conforme observados no Figura 6.6 (ver mais detalhes no Anexo 7).

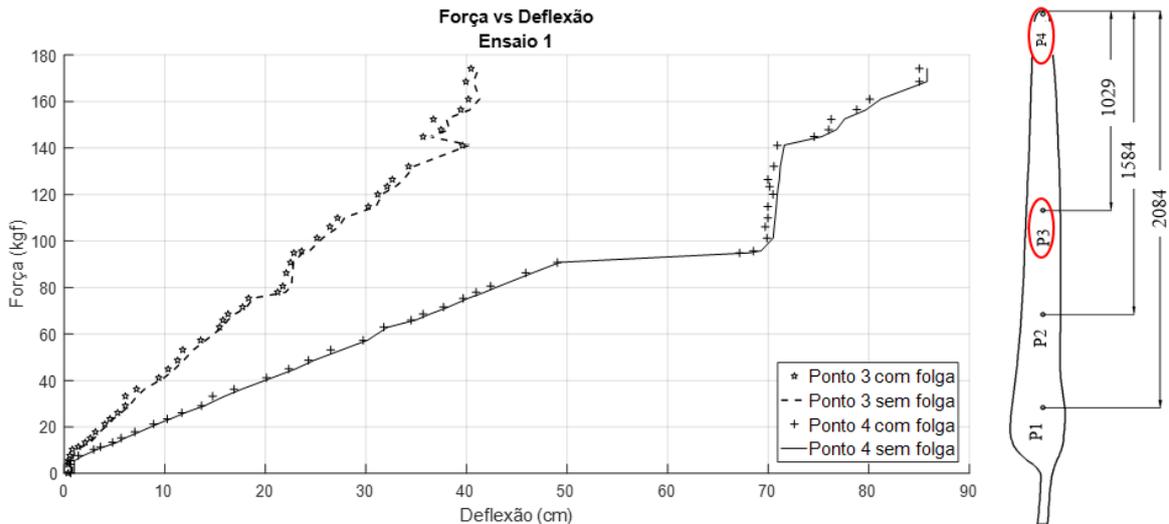


Figura 6.6 – Gráfico comparativo de Força vs Deflexão com e sem a folga do engaste no Ensaio 1.

Para o ajuste do diagrama anterior seguiu-se os seguintes procedimentos: antes de qualquer incremento de carga marcou-se no anteparo a posição em que o laser apontava, dada como posição inicial. Durante o ensaio, foi-se monitorando esta mira. Em um dado instante percebeu-se que a mira do laser se deslocara verticalmente. Logo, indicou-se no próprio anteparo o deslocamento vertical entre a distância original e a distância atual em que o laser apontava para cada incremento de carga. Dessa forma, com a obtenção da distância vertical e a distância horizontal do laser ao artefato, pode-se calcular o ângulo de inclinação.

Os sinais gerados pelos seis extensômetros foram ajustados via MATLAB, onde se utilizou comandos de ajuste polinomial com a finalidade de gerar linhas de tendência resultando em uma análise mais elaborada. Geraram-se as Figuras 6.7 a 6.9 onde se comparam as deformações ocorridas nas bordas de fuga e ataque das três regiões analisadas em relação aos incrementos de carga aplicados.

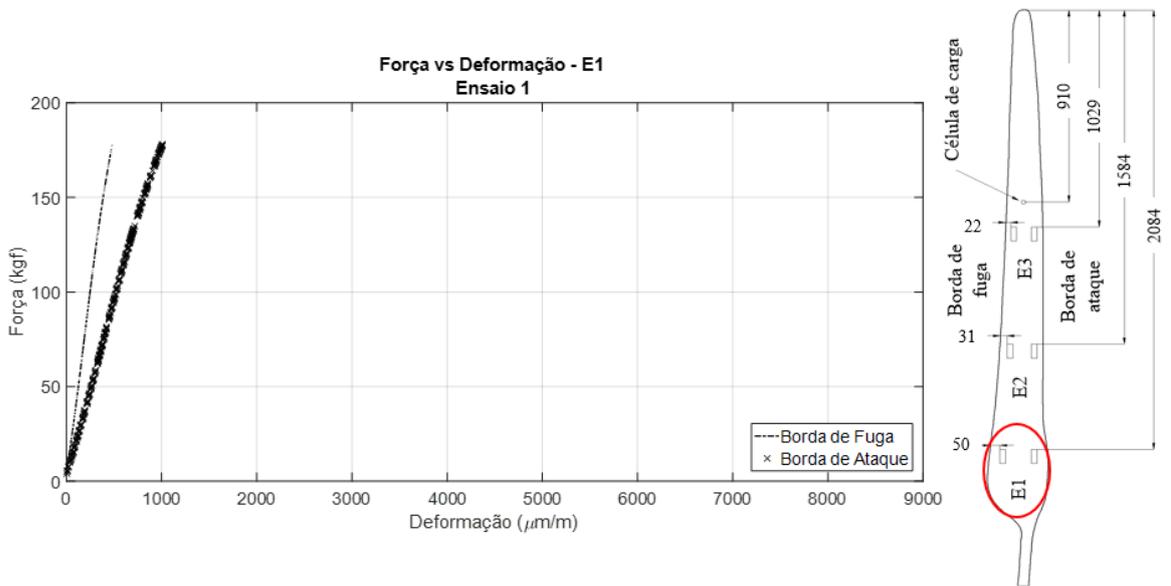


Figura 6.7 – Diagrama Força vs Deformação correspondente aos extensômetros na região E1 do Ensaio 1.

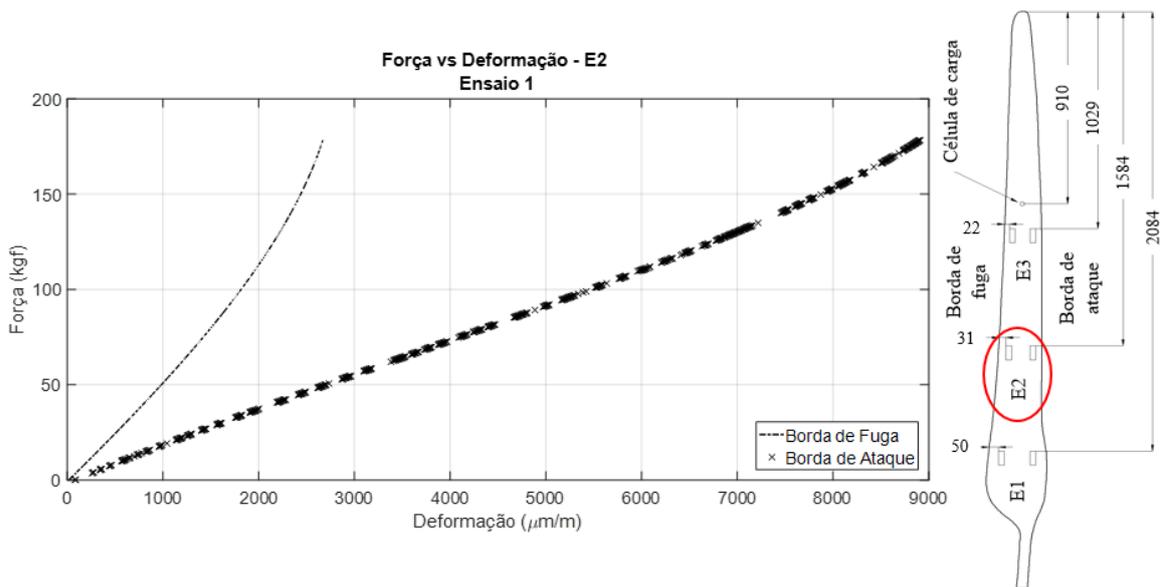


Figura 6.8 – Diagrama Força vs Deformação correspondente aos extensômetros na região E2 do Ensaio 1.

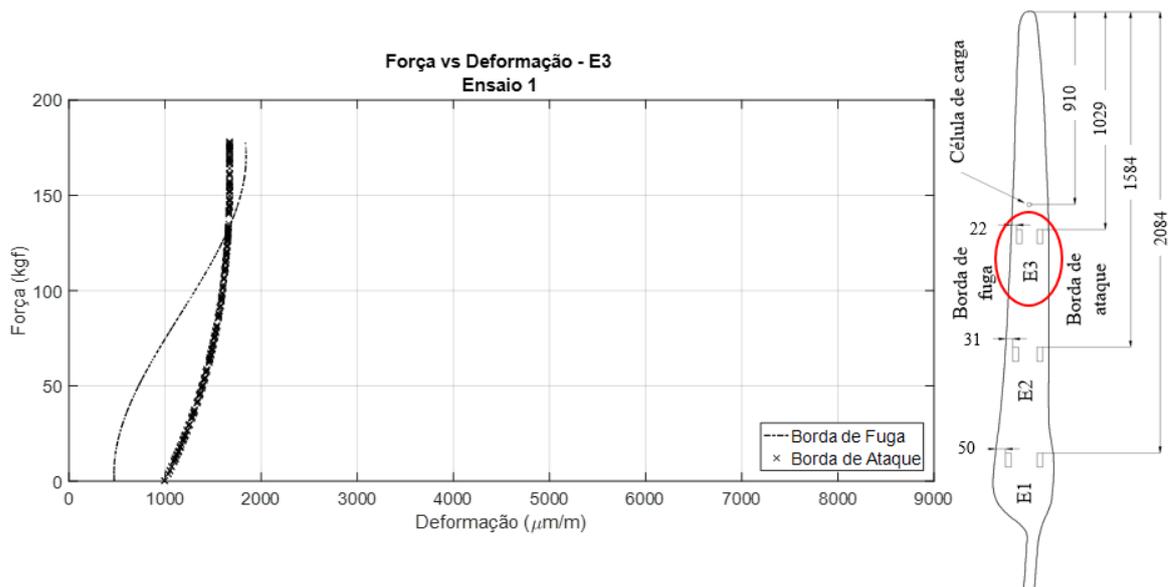


Figura 6.9 – Diagrama Força vs Deformação correspondente aos extensômetros na região E3 do Ensaio 1.

Desde o início do ensaio o desempenho da borda de fuga indicava uma maior resistência, de modo que em todas as regiões analisadas na borda de ataque verificaram-se maiores deformações, indicando uma probabilidade maior de falha. Os diagramas sugerem uma não linearidade física.

A região E1 apresentou deformações menores do que nos demais pontos monitorados. Isto era esperado devido à proximidade do ponto de fixação da pá. A região E2 apresentou maior nível de deformação entre as regiões analisadas, tendo a borda de fuga apresentado enrijecimento de material. A região E3 exibiu um comportamento particular. Infere-se que a paralisação do ensaio para o ajuste do ponto de fixação da carga pode ter influenciado nos resultados, mais proeminente na região E3. A inclinação do cabo de aço da talha elétrica pode também ter proporcionado carregamentos capazes de gerar deslocamentos fora do plano de sollicitação.

6.1.2 Ensaio 2

No ensaio seguinte teve-se a precaução de adotar medidas que pudessem minimizar as falhas ocorridas no primeiro ensaio. Observa-se, de acordo com o Anexo 6, que os passos de carga previstos neste ensaio foram reduzidos em números, porém, respeitou-se o tempo de teste previsto em norma.

O primeiro cuidado foi a modificação do conjunto de ligação do cabo de aço da talha elétrica com a pá. Para o apoio da corda foi utilizado uma base composta de isopor plastificado, isso promoveu um melhor encaixe da corda e, sobretudo, melhor amortecimento da carga aplicada nessa região. Modificou-se, também, a posição da talha elétrica, permitindo, durante a aplicação da carga, reduzir ao máximo as componentes de força perpendiculares que surgiram no primeiro ensaio, além da inversão de polia, conforme mostrado na Figura 6.10. No suporte de encaixe da pá foram colocadas arruelas de pressão em todos os parafusos na parte superior do mesmo. Com o auxílio de um torquímetro, os seis parafusos sofreram ajustes precisamente iguais de 5 kgf, permitindo o máximo de aperto sem o risco de danificar a peça.



Figura 6.10 – Ligação da polia de aplicação da força na pá.

No passo de carga 7, com aproximadamente 95% de carga em relação a F_d , ocorreu um dano no ponto de aplicação da carga proveniente do contato da corda com a superfície lateral da pá, como mostra a Figura 6.11.

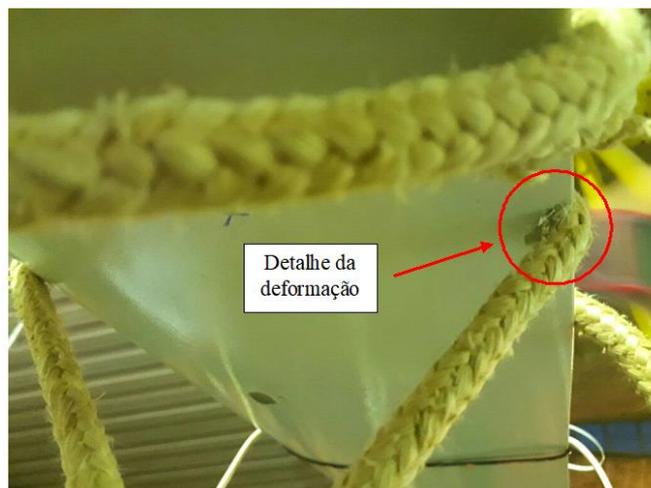


Figura 6.11 – Detalhe do dano ocorrido durante o Ensaio Estático 2.

Com uma carga aproximadamente 25% superior a carga final prevista para o F_d e 13% superior a carga final correspondente ao F_p , a pá eólica apresentou as primeiras fissuras nas bordas de fuga e ataque próximas a raiz e também na própria raiz. No penúltimo passo de carga, agora com 36% superior a carga máxima prevista para o F_p , identificou-se um início de esmagamento na superfície comprimida da pá, conforme mostrado na Figura 6.12. A perda de resistência nessa região manifestou-se de forma brusca. Deste modo, em consequência do último passo de carga, a pá entrou em colapso com a propagação abrupta da fissura até a borda de ataque no sentido transversal à pá, conforme pode ser observado na Figura 6.13.



Figura 6.12 – Instabilidade da membrana da superfície comprimida da pá no Ensaio 2.



Figura 6.13 – Colapso da pá.

Observando as Figuras 6.12 e 6.13 reconheceu-se um mecanismo de falha na superfície comprimida da pá: efeito *brazier*. Esse comportamento implica numa pressão por esmagamento e é conhecida também como efeito de ovalização. De outro modo, *brazier* é a perda de resistência à flexão devido a pressão por compressão. Isso foi observado na pesquisa feita por Jensen *et al.* (2006), na oportunidade a pá tinha 34 m de comprimento.

Durante o teste não foi identificado nenhuma inclinação do cabo de aço da talha elétrica. Contudo, ocorreu um pequeno afrouxamento das porcas dos parafusos no mecanismo de apoio formando um ângulo de inclinação de apenas 1,71°, abaixo do ocorrido no primeiro ensaio. A Figura 6.14 exhibe, portanto, o diagrama força-deflexão obtido no Ensaio 2. Pode-se observar que o comportamento da pá quanto à deflexão foi semelhante aos resultados do primeiro ensaio, embora tenha havido o deslizamento do cabo de aço no primeiro estático.

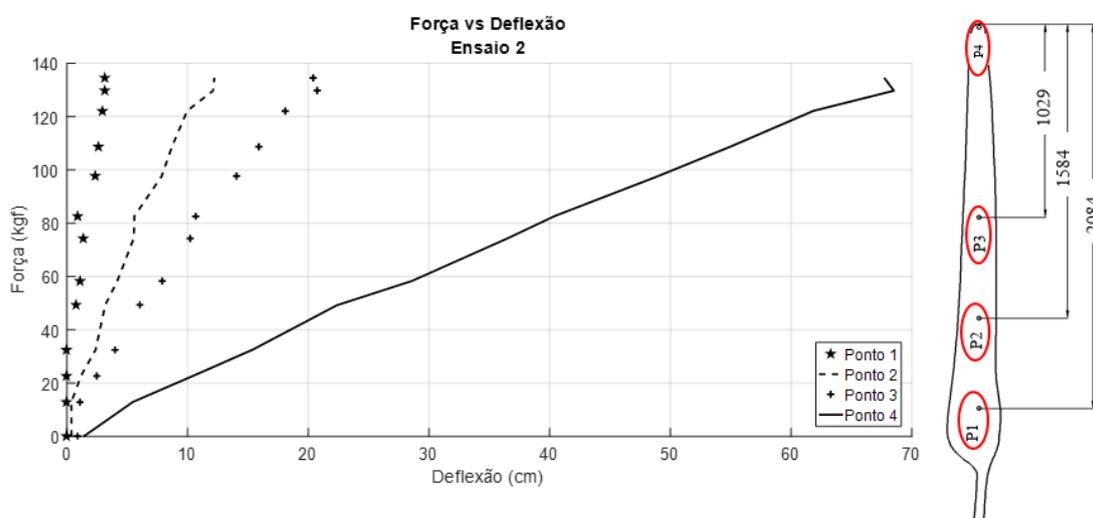


Figura 6.14 – Diagrama Força vs Deflexão do Ensaio 2.

Com os sinais gerados pelos seis extensômetros – posicionados de acordo com o indicado na Figura 5.9 – geraram-se as Figuras 6.15 a 6.17 onde são comparadas as deformações ocorridas nas bordas de fuga e ataque das três regiões analisadas.

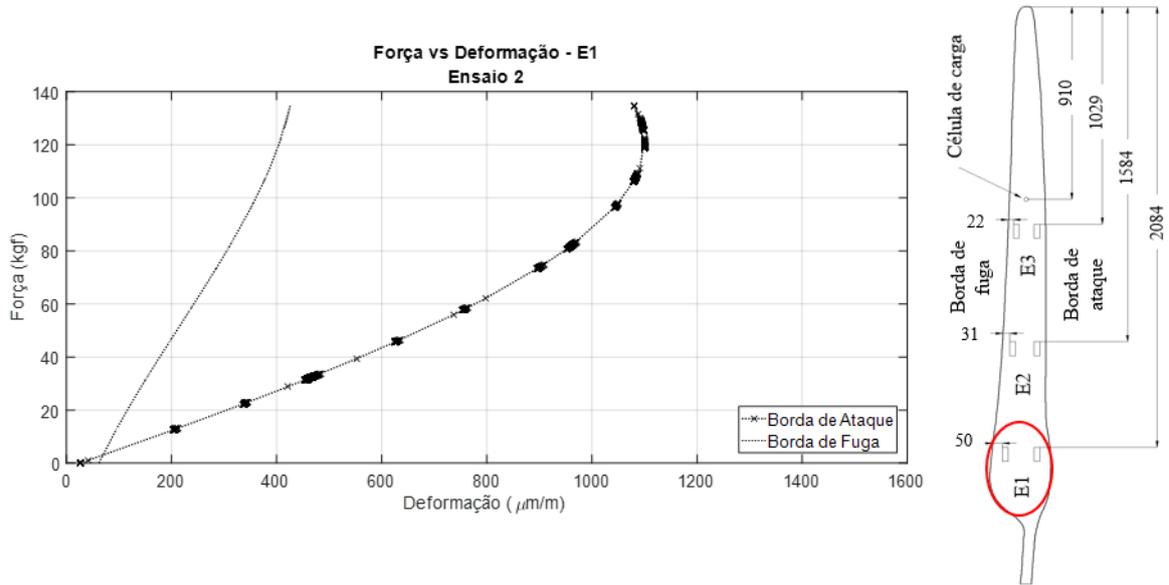


Figura 6.15 – Diagrama Força vs Deformação correspondente aos extensômetros na região E1 do Ensaio 2.

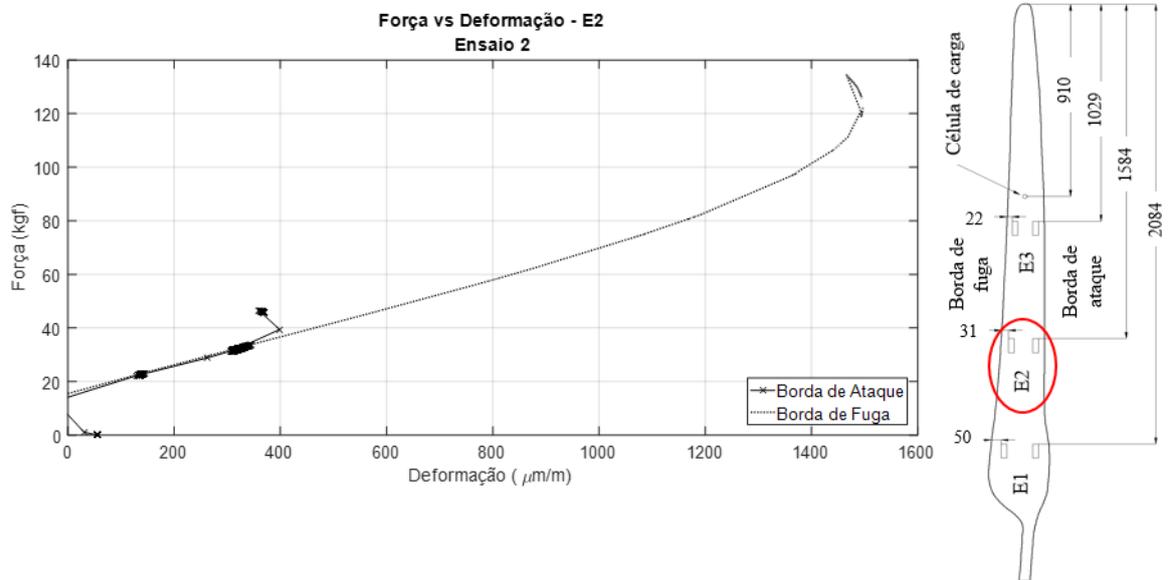


Figura 6.16 – Diagrama Força vs Deformação correspondente aos extensômetros na região E2 do Ensaio 2.

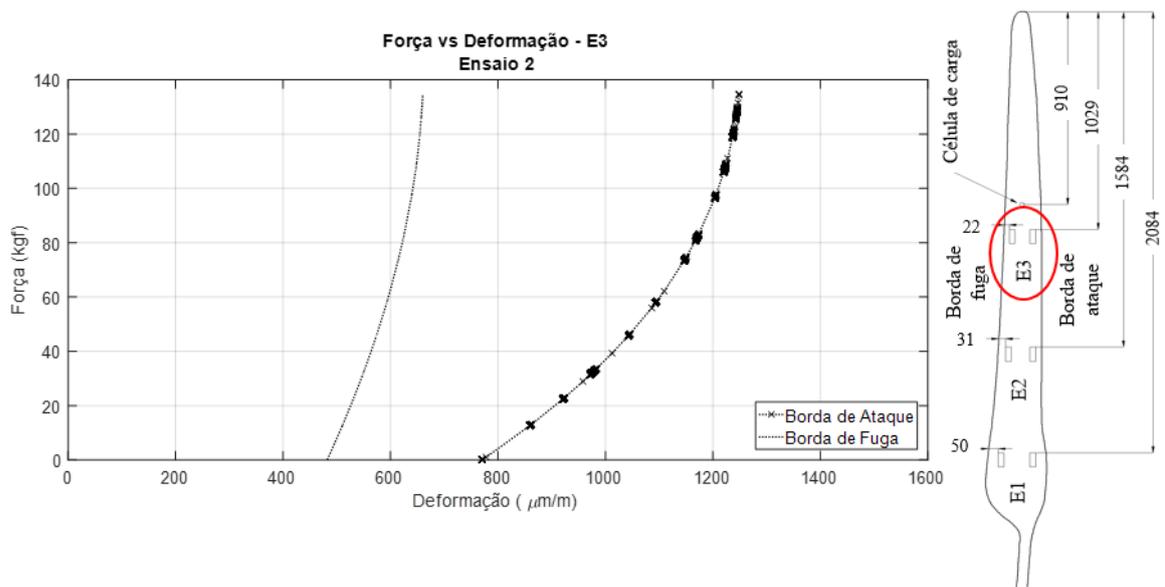


Figura 6.17 – Diagrama Força vs Deformação correspondente aos extensômetros na região E3 do Ensaio 2.

O material apresentou comportamento não-linear de acordo com os resultados. Todas as regiões apresentaram deformações menores daquelas ocorridas no Ensaio 1. Reduziu-se a inclinação do suporte de fixação da pá e inclinação do cabo de aço da talha elétrica. Esta última, provavelmente, minimizou as possibilidades de forças fora do plano de solicitação, o que poderia introduzir incertezas nos resultados. Foi observado, igualmente ao primeiro ensaio, que a região E1 apresentou deformações menores e a região E2 teve deformações maiores, porém, abaixo dos valores apresentados no primeiro ensaio. Isto pode ter correlação com a dispersão das fibras naquelas regiões, bem como a ausência de uma mesma carga por um longo período de tempo como ocorreu no Ensaio 1. Esses eventos podem ter influenciados nos resultados. Da deformação em E2 nota-se que a borda de ataque foi parcial, ocorrência que caracterizou a falha do transdutor.

Outra característica nos resultados é, novamente, a tendência que o material tem de se enrijecer. A performance do compósito reforçado com fibras de vidro é observada, dentre outros fatores mencionados anteriormente, pela orientação e alinhamento das fibras bem como da fração volumétrica das fases do compósito. As respostas mecânicas, segundo Callister Jr. (2002), dependem da consistência desses fatores. Não foram identificadas trincas na superfície tracionada, o esmagamento ocorrido na superfície inferior foi o primeiro evento a ser registrado. Não obstante, infere-se que a aquela região pode ser um local de alta instabilidade. Nessa perspectiva, a baixa rigidez tem validade se se pensarmos que naquela região seja a transição do reforço interno com a provável longarina, caso no traspasse não tenha a devida ligação dos elementos.

É difícil, portanto, identificar o momento em que os efeitos *brazier* se iniciam. Isso propõe analisar a instabilidade do laminado quando sujeitos a solicitações de flexão, pois, segundo Silva (2012) *apud* Calladine (1989), quando sujeito a este tipo de esforço, a partir de um valor de carga (onde os autores denominam como carga crítica), os laminados tendem a sofrer uma distorção transversal, ou seja, ocasionam-se deslocamentos segundo uma direção perpendicular à carga aplicada. Sem embargo, o efeito conjugado desses deslocamentos devido à flexão apresenta uma nova característica para a resposta do colapso da pá, o efeito *buckling*. Os deslocamentos transversais provocam a encurvadura local devido à compressão e o efeito *buckling*, segundo a IEC 61400/23 (2001), se dá pelo aumento não-linear da deflexão devido a mudança de carga compressiva. Devido às características anisotrópicas dos compósitos poliméricos, Reis *et al.* (2016) mencionam que é evidente ao longo dos anos que a fratura interlaminar é potencialmente um dos principais processos de falha que limita a vida de um determinado componente.

6.1.3 Ensaio 3

Neste último ensaio a única modificação com relação aos ensaios anteriores foi a aplicação de grampos de fixação no suporte de engaste da pá, conforme indica a Figura 6.18. A intenção foi de reforçar o mecanismo de apoio reduzindo os deslocamentos e, assim, melhorando a condição de apoio.



Figura 6.18 – Detalhe da inserção dos grampos no suporte.

Os primeiros estalos identificados neste ensaio ocorreram com 95% de carga aplicada em relação a F_p na raiz da pá, apresentando apenas um descolamento da camada externa com a parte de alumínio da raiz. Ocorreu início de fissuração a 30 cm de distância do engaste orientadas no sentido transversal à pá e também na borda de fuga, conforme pode ser verificado na Figura 6.19. Nesta ocasião a carga já ultrapassava em aproximadamente 100,6% a carga de projeto (F_p).

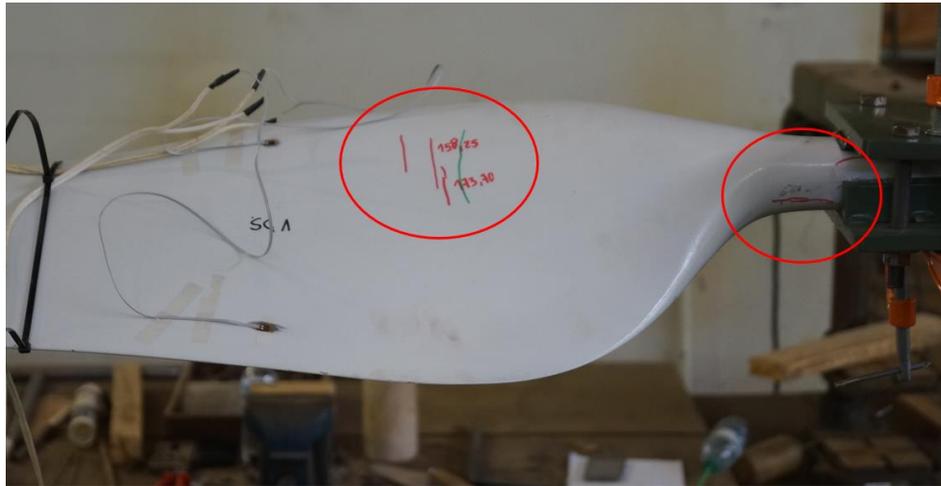


Figura 6.19 – Surgimento das primeiras fissuras superficiais no Ensaio 3.

O colapso da pá ocorreu com a carga 125,6% superior a F_p com a propagação principalmente das fissuras advindas da raiz para as bordas de ataque e fuga, conforme indicam as Figuras 6.20 e 6.21.



Figura 6.20 – Detalhe da fissura na borda de ataque no Ensaio 3.



Figura 6.21 – Detalhe da fissura na borda de fuga no Ensaio 3.

A ocorrência mostrada nas figuras anteriores caracteriza a perda da capacidade resistente da pá por delaminação. Os materiais compósitos podem exibir múltiplas fraturas antes de se romper. A principal fonte de danos, segundo Shiino *et al.* (2009), é a transferência de tensão entre camadas de compósitos com orientações diferentes, podendo conduzir a falhas por delaminação. Por sua vez, a fonte de danos por delaminação é gerada por tensões de cisalhamento que surgem devido a rotação individual das camadas do compósito – a delaminação cria pontos de concentração de tensão (Silva, 2017). No processo de usinagem dos compósitos é utilizada uma liga adesiva que mantém as camadas unidas e a separação da interface dessas camadas podem ocorrer numa escala micro ou macroscópica. A delaminação ocorre frequentemente quando os compósitos são testados à flexão (Gomes, 2015). As Figuras 6.22 a 6.25 mostram, respectivamente, o diagrama Força vs Deflexão do Ensaio 3 e as deformações das três regiões estudadas.

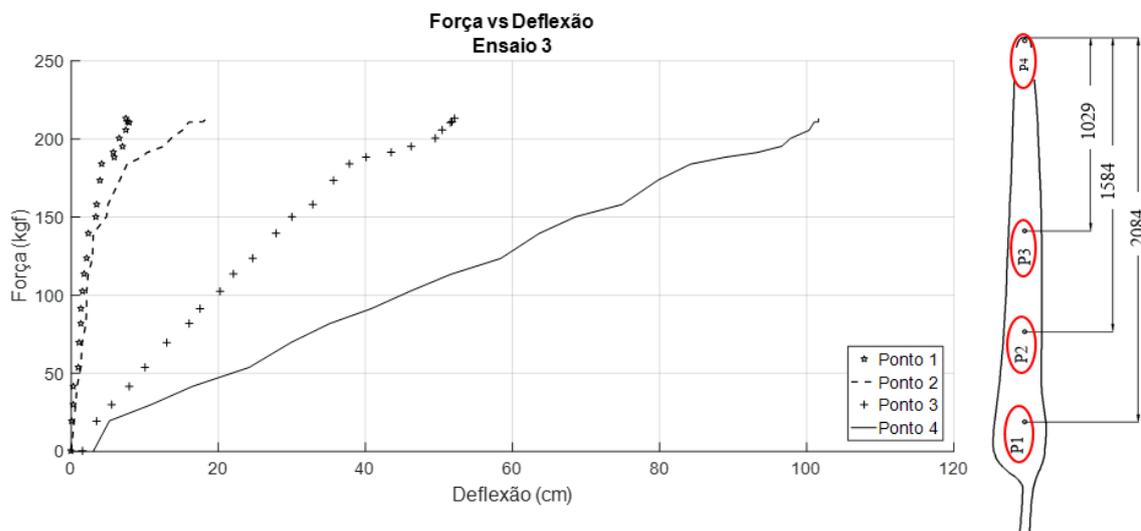


Figura 6.22 – Diagrama Força vs Deflexão do Ensaio 3.

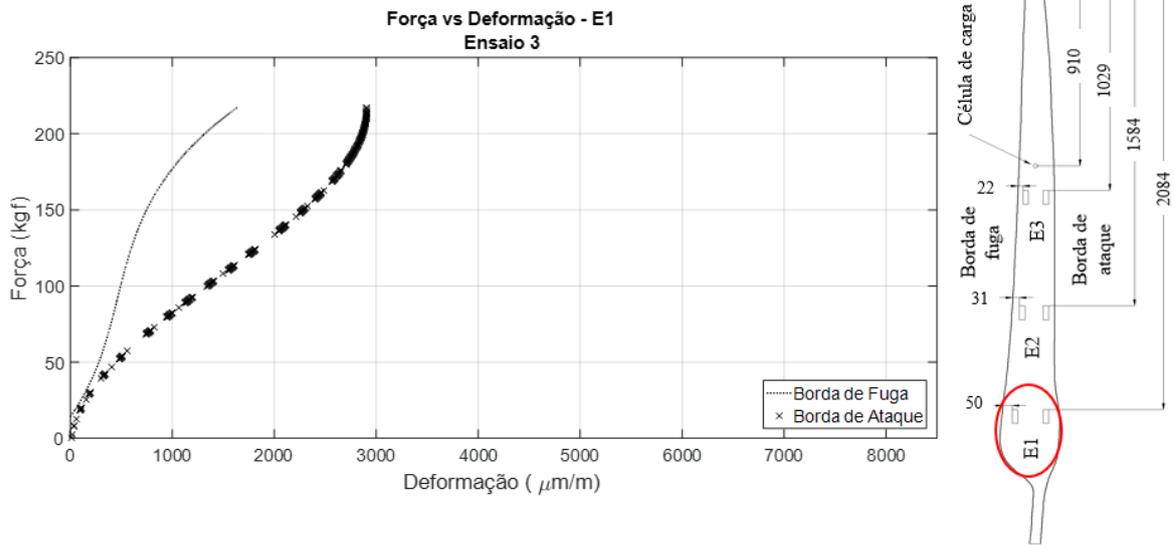


Figura 6.23 – Deformação dos extensômetros na região E1 do Ensaio 3.

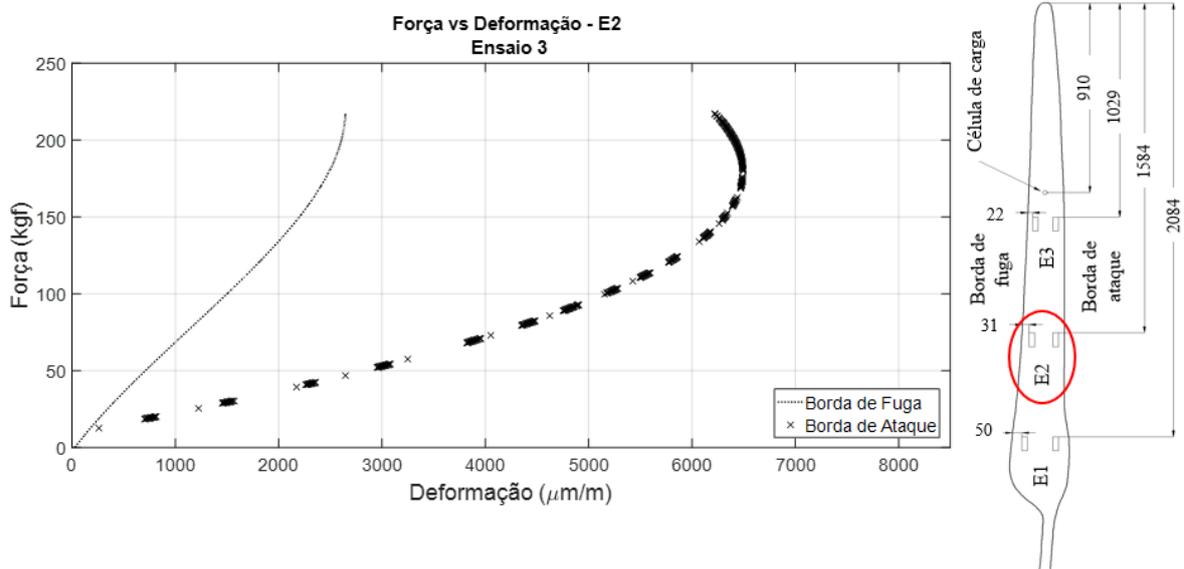


Figura 6.24 – Deformação dos extensômetros na região E2 do Ensaio 3.

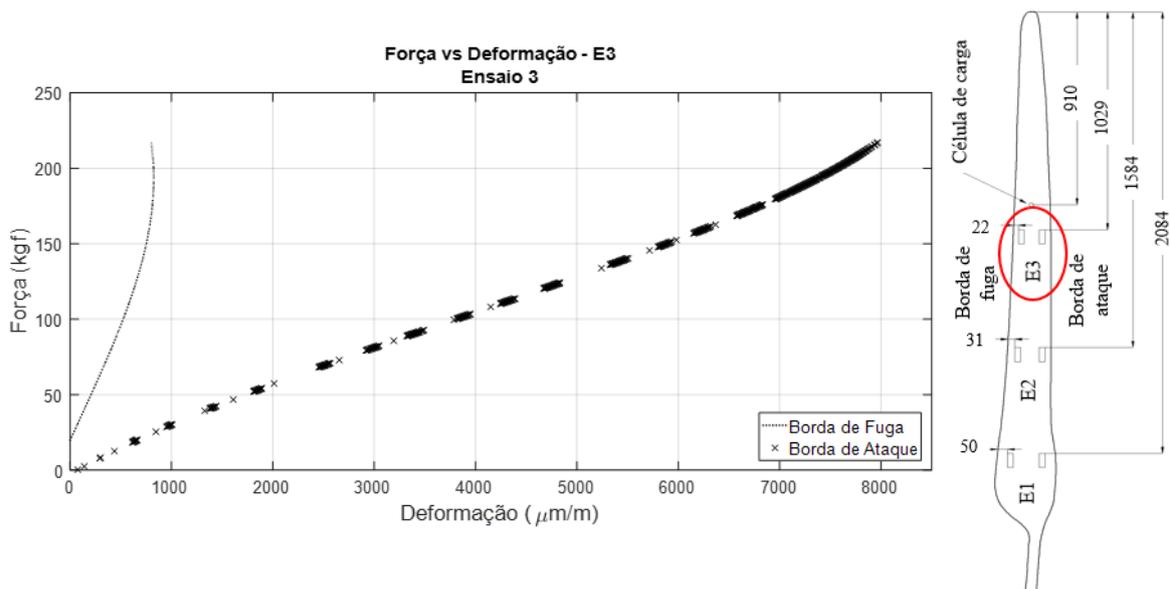


Figura 6.25 – Deformação dos extensômetros na região E3 do Ensaio 3.

Novamente, em todos os resultados o material apresentou comportamento não-linear. Os grampos de fixação desempenharam um papel fundamental na garantia da condição de engaste da pá, não foi identificado nenhum deslocamento nesta seção. A carga final aplicada neste ensaio superou em 125,6% em relação a F_p , onde a carga de colapso excedeu em aproximadamente 60% em relação a carga final atingida no Ensaio 2. Cada incremento de carga pode ser visto no Anexo 6. Esta notável diferença, sobretudo, pode ser devida às disposições da manta e do jateamento da fibra, o que pode gerar variabilidade nas características físicas e geométricas de cada pá.

Em posse dos resultados estáticos experimentais, a Figura 6.26 correlaciona a deflexão no local de aplicação da carga (ponto 3) destes resultados até a finalização do carregamento. As respostas dos três ensaios foram semelhantes, porém, apenas o ensaio 1 exibiu um resultado destoante dos demais. Acredita-se que por toda a ocorrência tida no primeiro ensaio, a duração da carga de teste pode ter sido longa o suficiente para reduzir a resistência da pá. Segundo a IEC 61400/23:2001, todo material utilizado na fabricação de pás de turbinas eólicas exibem uma redução de resistência com a duração da carga. Isso introduz uma incerteza indesejável na interpretação dos resultados do teste.

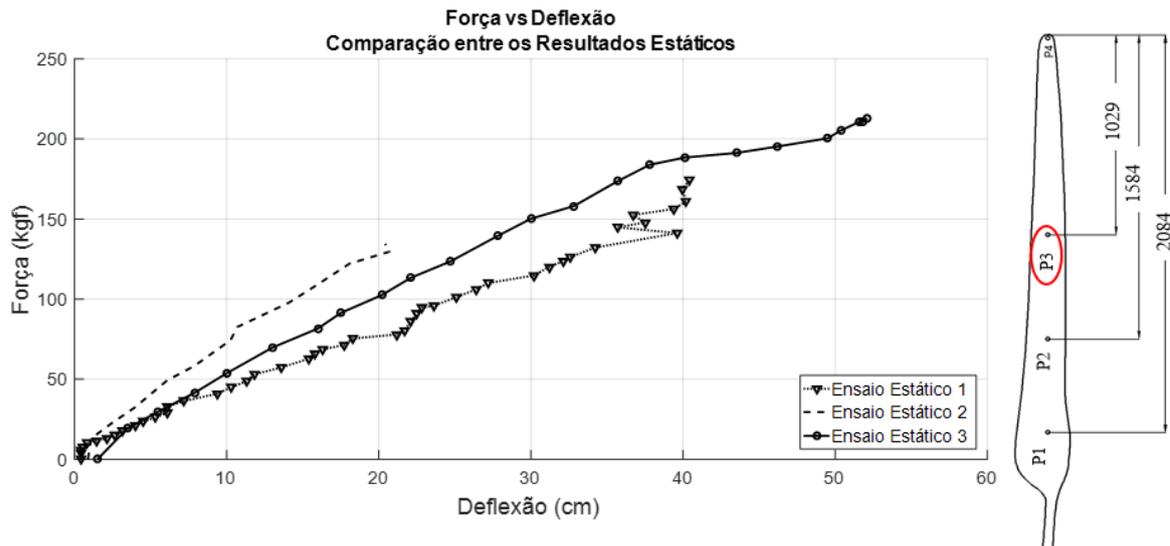


Figura 6.26 – Correlação entre os resultados estáticos experimentais.

6.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Para caracterização do material compósito que compõe a camada externa da pá, foram extraídos 5 corpos de prova da pá eólica do Ensaio Estático 1 para realização do ensaio de tração.

Os modos de falha foram observados e identificados conforme apresentado na Figura 6.27, de acordo com as especificações das Tabelas 2.5 a 2.7. A Tabela 6.2 apresenta os tipos de ruptura observados para os CP's ensaiados. Nota-se pela Figura 6.27 que o comportamento apresentado pelos CP 3 e CP 4 podem ter sido influenciados pelo aperto das garras, demonstrando necessidade de se colocar *tabs* entre as garras e o corpo de prova conforme sugerido por norma. A observância deste detalhe não foi considerada visto que a norma não estabelece o uso, apenas sugere. Portanto, a Figura 6.28 apresenta os resultados referentes a curva Tensão-Deformação dos CP's 1, 2 e 5 considerados válidos neste trabalho. Os CP's descartados não apresentaram rupturas dentro da área denominada útil e não foram considerados nos cálculos para compor a média global do módulo de elasticidade, ordem de grandeza utilizada na calibração do modelo numérico.

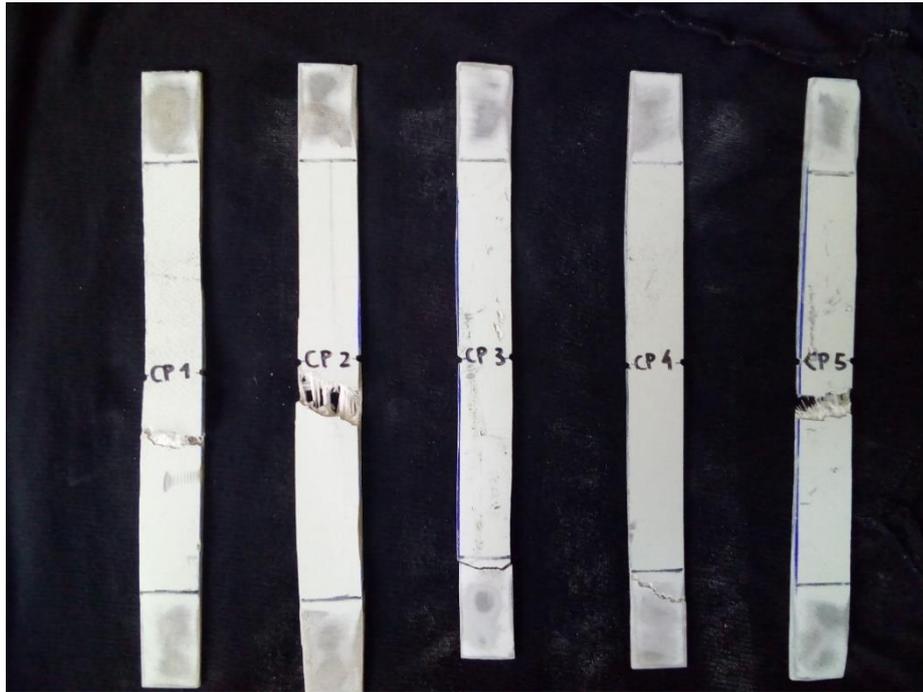


Figura 6.27 – Região de ruptura dos CP's.

Tabela 6.2 – Modos de fratura dos CP's analisados de acordo com ASTM D3039:2014.

CP's	Código de Identificação	Tipo de Fratura	Área da Fratura	Localização da Fratura
1	LGM	Lateral	Gage do CP	Meio
2	AGM	Angular	Gage do CP	Meio
5	LGM	Lateral	Gage do CP	Meio

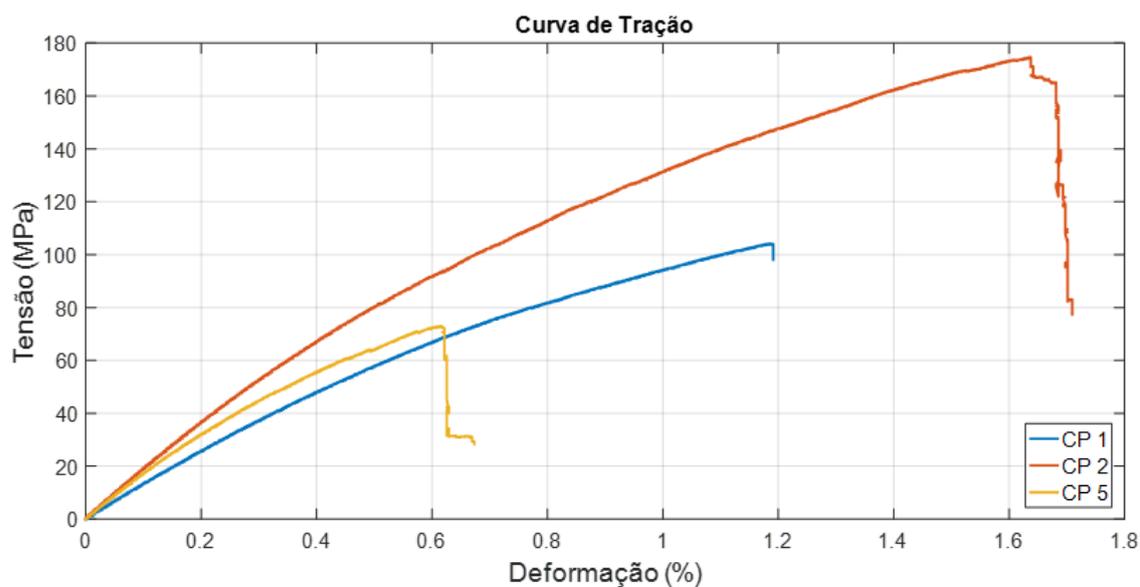


Figura 6.28 – Curvas Tensão-Deformação.

Todavia, mesmo os CP's sendo extraídos de uma mesma região da pá nota-se que os resultados obtidos apresentam diferenças entre si, embora a velocidade de carga dos experimentos tenham sido equivalentes. Diante do exposto e para melhor processamento do conjunto de dados medidos, efetuou-se um tratamento estatístico dos mesmos a fim de expressar a variação destes em relação ao valor medido. A Tabela 6.3, portanto, foi elaborada e mostra, além dos parâmetros mecânicos do material ensaiado de cada CP, média e o desvio padrão dos resultados.

Tabela 6.3 – Propriedades mecânicas do material compósito.

CP's	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão Máxima (MPa)	Carregamento Máximo (kN)	Tensão de Ruptura (%)
1	12,16	97,94	6,23	1,19
2	15,91	153,41	10,45	1,72
5	13,88	58,82	4,37	0,67
Média	14,02	103,39	7,02	1,19
Desvio-Padrão	±1,87	±47,52	±3,12	±0,53

A resistência à tração das amostras é fortemente dependente da preparação da amostra, das propriedades da fibra, da presença ou não de defeitos de superfície e da temperatura ambiente e do material. A curva tensão-deformação mostrada na Figura 6.28 é não-linear desde o início do teste e a falha súbita ocorre quando a tensão máxima é atingida. Não obstante, a não-linearidade da estrutura compósita está associada com a plastificação da matriz durante os carregamentos do ensaio de tração. Constata-se que, em média, os CP's apresentaram dispersões na ordem de 12,8% a 23,5% em relação ao módulo de elasticidade. No entanto, a diferença é pouco significativa tendo em conta a variação de resultado estatístico expresso através do desvio-padrão. As pequenas variações geométricas dos CP's resultantes da ausência de usinagem dos mesmos podem ter sido a principal responsável pelas variações de resistência à tração verificadas.

A região elástica está relacionada à deformação nesse regime tanto das fibras como da matriz epoxídica. Este comportamento, porém, é muito brevemente alterado, pois a tensão de escoamento da matriz é muito inferior à das fibras. Desta maneira, de acordo com Callister Jr. (2007), a matriz passa a se deformar plasticamente enquanto as fibras continuam a se deformar elasticamente. O início da falha do material compósito se dá quando as fibras sem rompem devido aos elevados carregamentos.

6.3 ANÁLISE DO MODELO NUMÉRICO PRELIMINAR

Esta simulação considera o modelo preliminar adotado, realizando-se uma análise numérica utilizando os carregamentos descritos no Anexo 6 de cada ensaio até a carga máxima F_p prevista, considerando, neste caso, a linearidade geométrica. A partir desses resultados pôde-se construir um diagrama comparativo Numérico vs Experimental dos quatro pontos de deflexão monitorados no ensaio estático 1. Os resultados podem ser vistos através das Figura 6.29 a 6.32 analisando apenas até a carga máxima prevista para F_p .

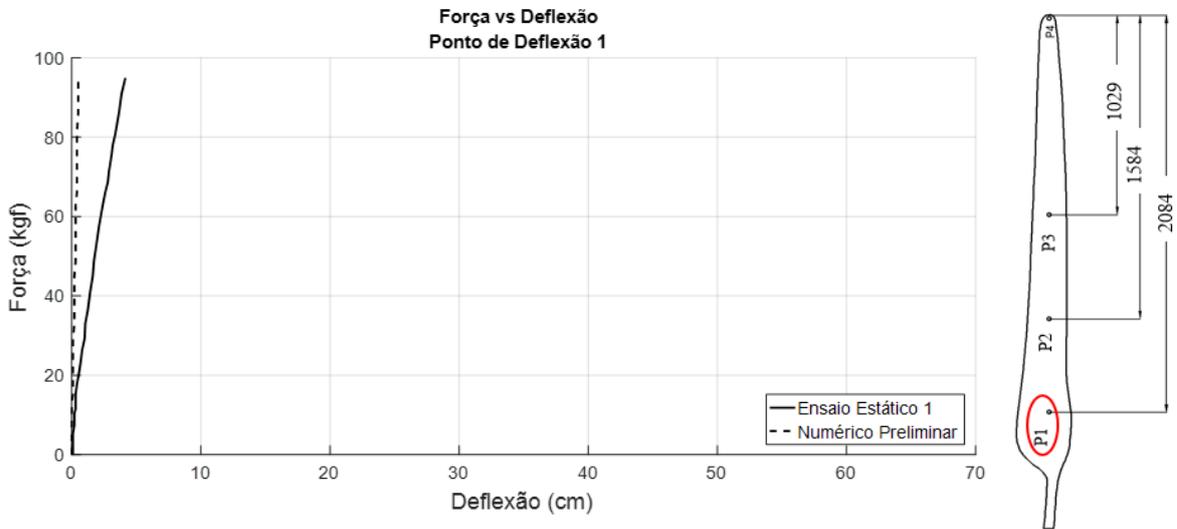


Figura 6.29 – Diagrama Força-Deflexão Numérico vs Ensaio 1 da deflexão no ponto 1.

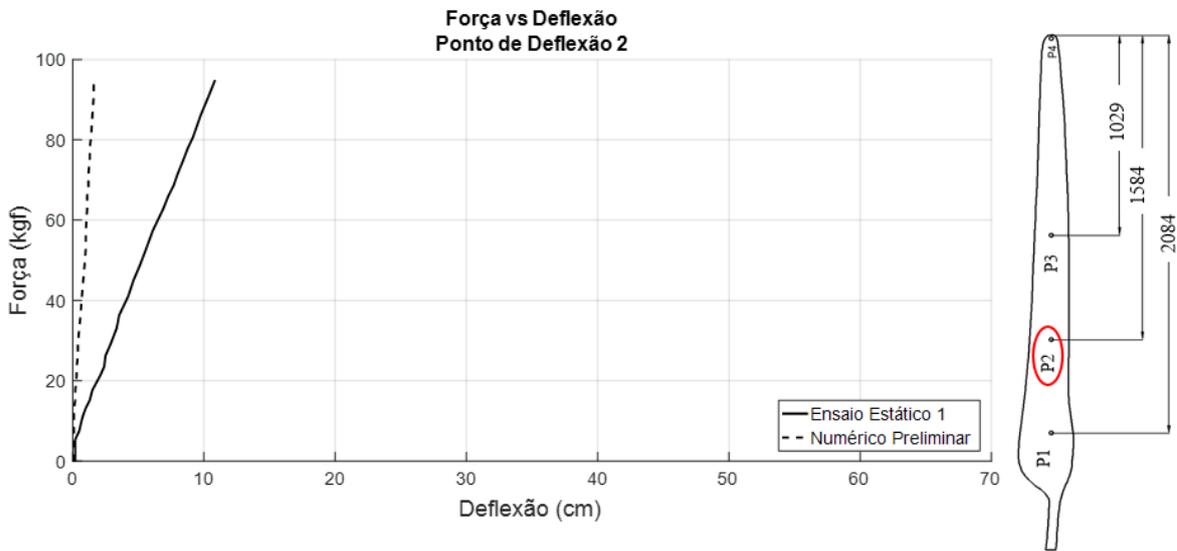


Figura 6.30 – Diagrama Força-Deflexão Numérico vs Ensaio 1 da deflexão no ponto 2.

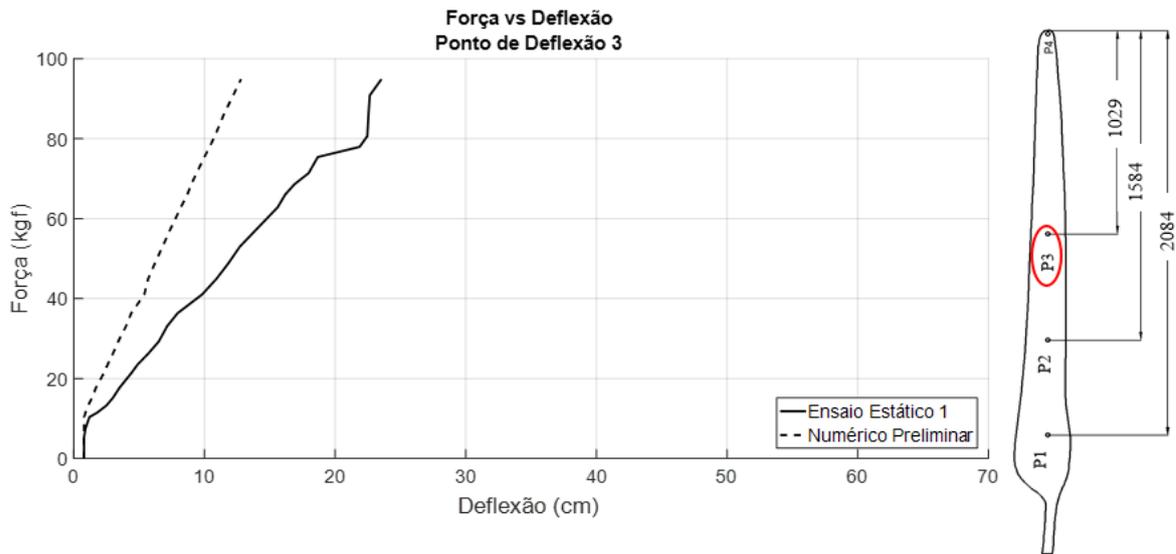


Figura 6.31 – Diagrama Força-Deflexão Numérico vs Ensaio 1 da deflexão no ponto 3.

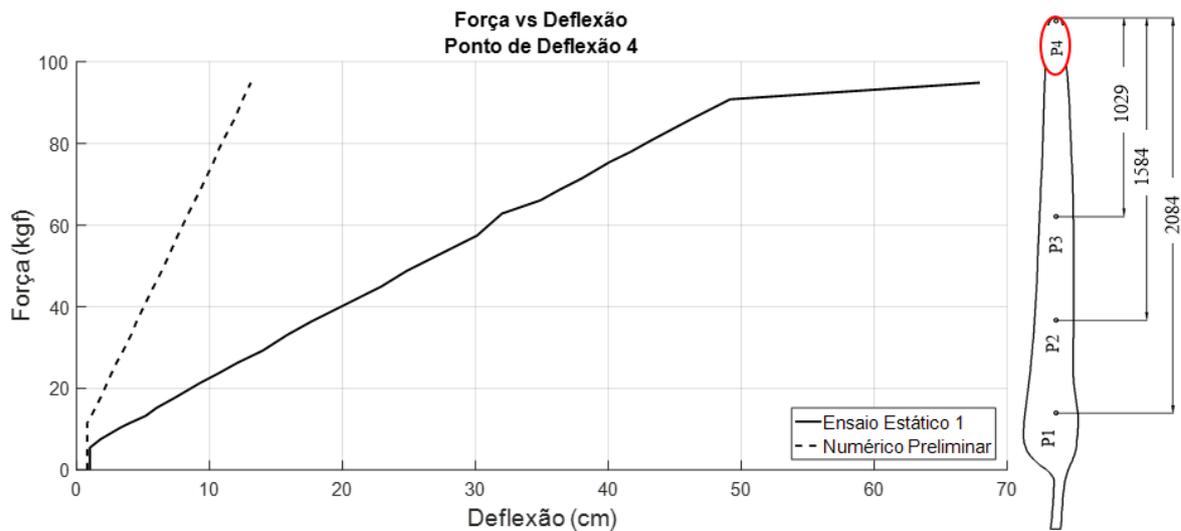


Figura 6.32 - Diagrama Força-Deflexão Numérico vs Ensaio 1 da deflexão no ponto 4.

Nota-se que os resultados do modelo numérico preliminar utilizando as propriedades mecânicas com base em Callister Jr. (2007) apresentam discrepância na ordem de 88%, 84,5%, 44,7% e 80,4% nos quatro pontos de deflexão analisados, respectivamente. Vale ressaltar que as diferenças nos resultados eram esperadas uma vez que alguns parâmetros mecânicos foram estimados, bem como as dimensões e material do reforço interno.

6.4 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Todo o programa experimental realizado forneceu informações para adequação do modelo numérico prévio, de modo que os resultados correspondentes dos ensaios e do modelo numérico calibrado sejam adequadamente correlacionados.

Após os ensaios estáticos, realizou-se a fragmentação de uma das pás com o objetivo de expor sua estrutura interna, mostrando assim a localização de reforços, uso de longarina e visualização do material interno. Com o auxílio de uma microrretífica subdividiu-se um dos exemplares de pá eólica em várias partes. Constatou-se que o modelo possui de fato um reforço em alumínio, como mencionado nos capítulos anteriores, localizada entre as seções 5 e 8. Com dimensões de 14 x 9 cm, essa estrutura possui chapas de 5 mm de espessura dispostas nas duas superfícies internas da pá. O espaço restante entre as chapas foi preenchido com material polimérico. Identifica-se, também, que a pá eólica apresenta uma longarina a partir desse reforço com dimensões de 146 x 4 x 4 cm posicionada a aproximadamente 6 cm da borda de ataque e ao longo da pá. Os reforços estruturais podem ser vistos na Figura 6.33. Nota-se que existe um espaço entre o reforço da chapa e a longarina, acarretando uma redução de resistência nesta região.

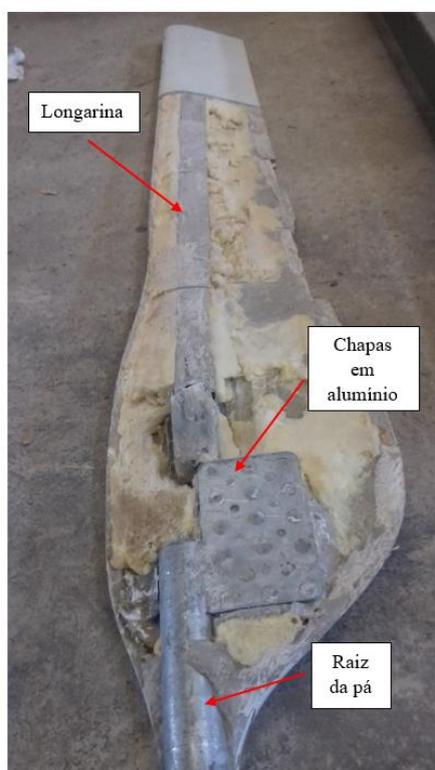


Figura 6.33 – Detalhe da estrutura interna da pá.

Os materiais internos – tanto o material da longarina quanto o material polimérico do preenchimento – foram coletados em amostra e submetidos a análise laboratorial. A investigação foi realizada no Laboratório de Análise Instrumental da UnB/FGa por meio da análise técnica termoanalítica, sobretudo entre termogravimetria (*TGA*), termogravimetria derivada (*DTG*) e calorimetria exploratória diferencial (*DSC*). A escolha por esse método se fundamenta no que explica Denari e Cavalheiro (2012), pois requer menor quantidade de massa de amostra e alta precisão em apenas um único experimento. O equipamento utilizado foi o SDT Q600 da fabricante *TA Instruments*, conforme visto na Figura 6.34. Os resultados em DTG/TGA podem ser observados no Figura 6.35, onde pode-se observar a existência de três estágios de degradação da amostra. No ensaio térmico, a variação de temperatura foi submetida entre 0° C e 700° C.



Figura 6.34 – Analisador térmico modelo SDT Q600.

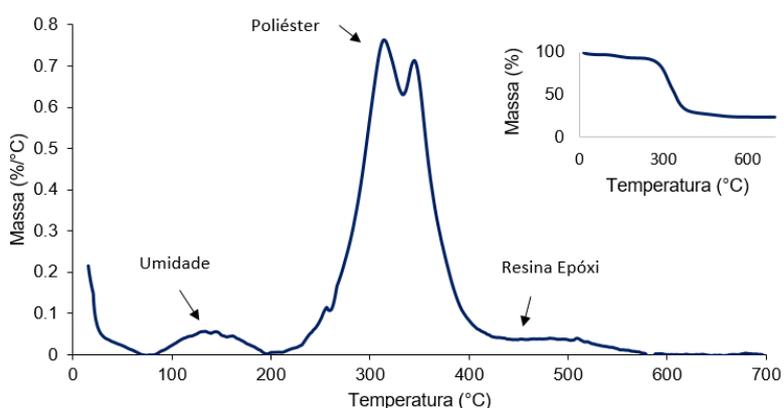


Figura 6.35 – Resultados de DTG/TGA da amostra de polímero componente da pá eólica.

De acordo com o que descreve Brandrup *et al.* (1998) e Kaisersberger *et al.* (1994), estágios como este permite identificar o tipo de material comparando-se a taxa de

temperatura de degradação entre as análises DTG e TGA. Conhecendo as etapas de decomposição de alguns materiais mais regularmente utilizados na fabricação de pás eólicas na literatura, pode-se determinar que os dois últimos eventos indicam o uso de material poliéster e resina epóxi. Os resultados estão dentro da faixa de temperatura de degradação referenciados por estes autores. O primeiro evento, portanto, o primeiro pico exotérmico, está relacionado apenas com a liberação de água hidratada. No instante em que a amostra estava submetida a temperatura de 700 °C, teve-se aproximadamente 76% de material analisado.

6.4.1 Modelo Numérico Calibrado

Procede-se a calibração do modelo numérico da pá eólica em questão substituindo-se no modelo numérico antigo o valor do módulo de elasticidade do material compósito e as dimensões do reforço, além da consideração da não-linearidade geométrica nas análises, conforme Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Itens ajustados para a configuração do novo modelo numérico.

Item	Parâmetro Considerado
Módulo de Elasticidade	15,0 GPa
Reforço	Dimensões de 14x9 cm entre as seções 5 e 8
Análise Numérica	Não-linearidade geométrica

Na análise não-linear tenta-se melhorar a simulação do comportamento da pá. O objetivo fundamental é ter uma previsão segura do comportamento da pá sob efeitos de cargas de serviço e adicionais. Não se previa antes da realização do primeiro ensaio estático valores relativamente grandes de deslocamento para a pá estudada. Dessa forma, as Figuras 6.35 a 6.37 mostram diagramas de comparação entre os modelos numéricos calibrados (linear e não-linear) com os ensaios estáticos das três pás eólicas, em relação ao local de aplicação da carga (ponto de deflexão 3).

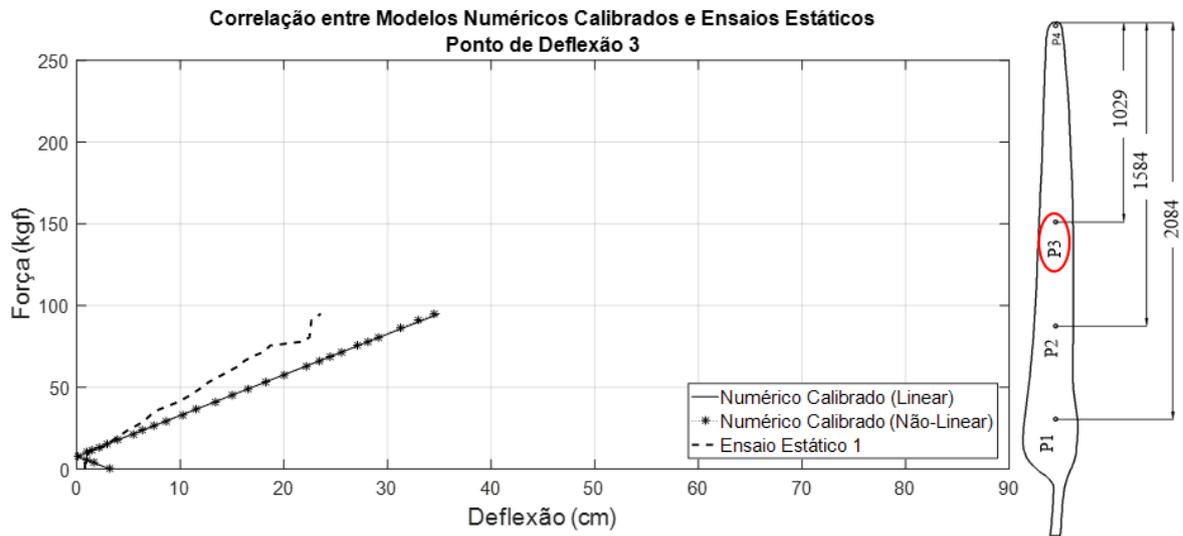


Figura 6.36 – Comparação dos diagramas força-deflexão Numéricos Calibrados vs Ensaio Estático 1.

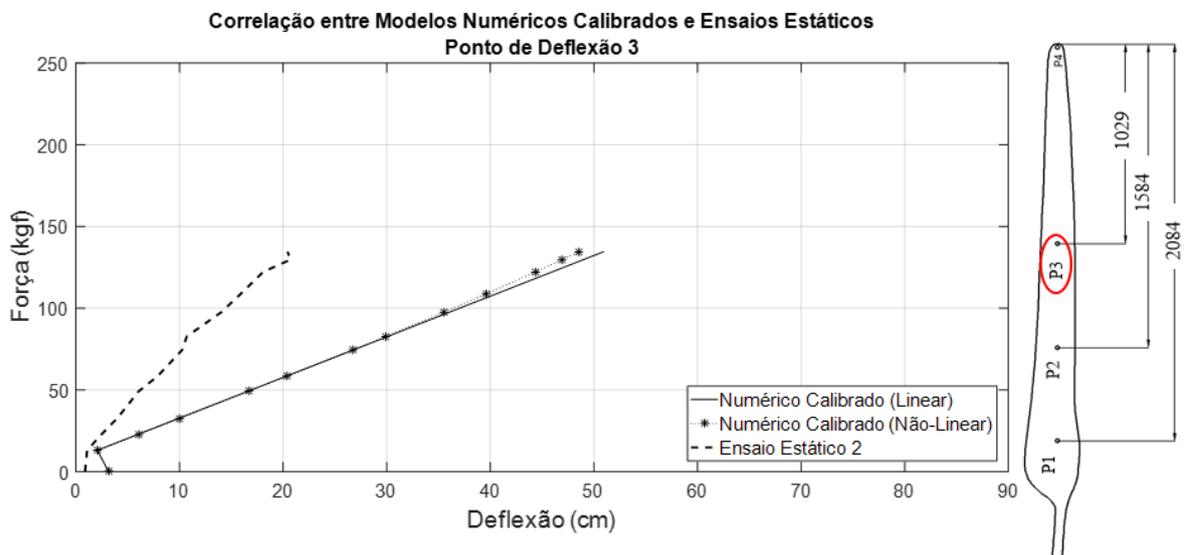


Figura 6.37 – Comparação dos diagramas força-deflexão Numéricos Calibrados vs Ensaio Estático 2.

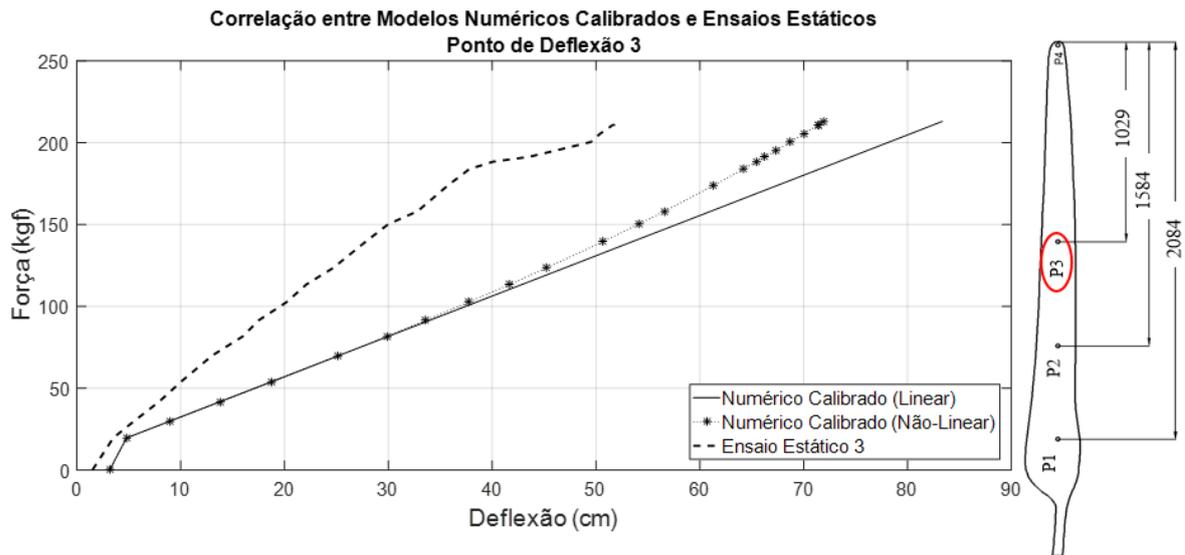


Figura 6.38 – Comparação dos diagramas força-deflexão Numéricos Calibrados vs Ensaio Estático 3.

Estes resultados mostram melhor compatibilidade entre o numérico calibrado e os ensaios estáticos. Nota-se, a título de comparação, que o modelo numérico calibrado da Figura 6.35 teve uma melhor aproximação do que o resultado do modelo numérico preliminar da Figura 6.30, apresentando uma redução entre os resultados na ordem de 6,36%. Com o novo modelo numérico a pá apresentou maior flexibilidade e maior aproximação dos resultados experimentais. Os demais resultados dos ensaios estáticos 2 e 3, tiveram dispersões na ordem de 56,2% e 27,7%.

7. CONCLUSÕES

O ensaio estático é um dos procedimentos realizados para a certificação de pás eólicas, no qual se verifica a capacidade de carga resistência. Neste trabalho, objetivou-se analisar experimentalmente a pá sob o aspecto estático com a finalidade de ajustar um modelo numérico computacional pré-concebido da estrutura fabricada pela empresa Enersud Ltda, sediada no Rio de Janeiro, onde-se compõe a turbina eólica modelo Verne 555.

Destaca-se no primeiro ensaio estático algumas falhas ocorridas durante a sua realização, tais como o deslizamento do cabo de aço da talha elétrica, o limite de carga gerada pela mesma e o afrouxamento dos parafusos do suporte de engaste. Entretanto, mesmo com estes imprevistos, a carga máxima imposta havia superado em 86,5% em relação a carga de teste (F_p). Ajustes foram feitos para que estas falhas pudessem ser corrigidas nos ensaios estáticos subsequentes. Desde o início do ensaio o desempenho da borda de fuga indicava uma maior resistência à tensão, de modo que em todas as regiões analisadas a borda de ataque sempre se estabeleceu numa região de maior deformada, indicando uma probabilidade maior de falha. A região E3 (localizada próxima ao local de aplicação da carga) exibiu um comportamento particular nas bordas de ataque e de fuga. Infere-se que a paralisação do ensaio para o ajuste do ponto de fixação da carga pode ter influenciado nos resultados. A inclinação do cabo de aço da talha elétrica pode também ter proporcionado carregamentos capazes de gerar deslocamentos fora do plano de solicitação.

Os ensaios estáticos 2 e 3 superaram a carga máxima de F_p em 36% e 125,6%, respectivamente. Acredita-se, todavia, que a pá, sob o ponto de vista estático, está projetada para atender com folga a carga limite para a sua ruptura, pois, em todos os ensaios estáticos, a pá superou a carga-limite prevista sem danos aparentes que poderiam configurar na não operacionalidade da peça. Identifica-se, também, que em praticamente todos os ensaios estáticos a pá apresentou menores deformações na região E1 e maiores deformações na borda de ataque, indicando, ali, uma maior possibilidade de dano. É difícil, no entanto, dentro do procedimento adotado, prever o momento da ocorrência das primeiras falhas e, por sua vez, o percentual da carga que o provoca. Não há como saber, todavia, a representatividade das pás testadas dentro da produção total das pás deste fabricante.

Não foram identificadas trincas na superfície tracionada no ensaio estático 2, o esmagamento ocorrido na superfície inferior foi o primeiro evento a ser registrado. Não

obstante, infere-se que a aquela região pode ser um local de alta instabilidade. Nessa perspectiva, a baixa rigidez tem validade se se pensarmos que naquela região seja a transição do reforço interno com a provável longarina, caso o traspasse não tenha a devida ligação dos elementos.

No ensaio estático 3 identificou-se os efeitos *brazier* na estrutura. Isso propõe analisar a instabilidade do laminado quando sujeitos a solicitações de flexão, pois, segundo Silva (2012) *apud* Calladine (1989), quando sujeito a este tipo de esforço, a partir de um valor de carga (onde os autores denominam como carga crítica), os laminados tendem a sofrer uma distorção transversal, ou seja, ocasionam-se deslocamentos segundo uma direção perpendicular à carga aplicada. Sem embargo, o efeito conjugado desses deslocamentos devido à flexão apresenta uma nova característica para a resposta do colapso da pá, o efeito *buckling*. Os deslocamentos transversais provocam a encurvadura local devido à compressão e o efeito *buckling*, segundo a IEC 61400/23 (2001), se dá pelo aumento não-linear da deflexão devido a mudança de carga compressiva.

A ocorrência mostrada nos resultados do ensaio estático 3 caracteriza a perda da capacidade resistente da pá por delaminação. Os materiais compósitos podem exibir múltiplas fraturas antes de se romper. A principal fonte de danos, segundo Shiino *et al.* (2009), é a transferência de tensão entre camadas de compósitos com orientações diferentes, podendo conduzir a falhas por delaminação. Por sua vez, a fonte de danos por delaminação é gerada por tensões de cisalhamento que surgem devido a rotação individual das camadas do compósito – a delaminação cria pontos de concentração de tensão (Silva, 2017).

Uma característica importante identificada nos resultados dos ensaios estáticos é a tendência que o material tem de se enrijecer. A performance do compósito reforçado com fibras de vidro é observada, dentre outros fatores mencionado anteriormente, pela orientação e alinhamento das fibras bem como da fração volumétrica das fases do compósito. As respostas mecânicas, segundo Callister Jr. (2002), dependem da consistência desses fatores.

Os resultados numéricos do modelo prévio apresentaram uma diferença importante com os obtidos experimentalmente, no entanto, tal discordância foi esperada uma vez que alguns parâmetros de análise foram estimados. Os ensaios realizados permitiram identificar, sobretudo, a capacidade máxima de carga das pás e grandes efeitos de deformação. É importante mencionar que, os coeficientes de segurança parciais usados neste trabalho são

responsáveis pelas incertezas e variabilidades das cargas e materiais, pelas incertezas nos métodos de análise e pela importância dos componentes estruturais em relação às consequências de falha. Entretanto, esses fatores, de acordo com Sørensen *et al.* (1994), podem ser calibrados para obter o nível de confiabilidade desejado à estrutura. Assim, o comportamento da pá quanto a deformação apontou a necessidade de uma análise numérica que contemplasse a não-linearidade geométrica. Esta evolução técnica permitiu compreender melhor a realidade que rege o problema.

Para a fase de calibração do modelo numérico, alguns parâmetros foram extraídos de procedimentos experimentais. Ensaio termoanalítico, por exemplo, foram suficientes para identificar o material interno da pá como sendo de poliéster e resina epóxi, as curvas DTG/TGA indicam uma sucessão de reações correspondendo à perda ou ganho de massa utilizadas para determinar os materiais constituintes.

O ensaio de tração em amostras retiradas da pá nos forneceu parâmetros mecânicos importantes para a calibração do modelo numérico. A curva tensão-deformação mostrada é não-linear desde o início do teste e a falha súbita ocorre quando a tensão máxima é atingida. A não-linearidade da estrutura compósita está associada com a plastificação da matriz durante os carregamentos do ensaio. Os CP's apresentaram dispersões na ordem de 12,8% a 23,5% em relação ao módulo de elasticidade, diferença esta pouco significativa tendo em conta a variação de resultado estatístico expresso através do desvio-padrão. Entretanto, a alta dispersão nos resultados mostrados no gráfico tensão-deformação pode ter influência no aperto das garras da máquina, irregularidades no corte dos CP's, além de ser fortemente dependente da preparação da amostra, das propriedades da fibra e da presença ou não de defeitos de superfície.

Sugere-se para trabalhos futuros:

- Realizar testes não-destrutivos a fim de entender melhor o comportamento da estrutura danificada e o momento da ocorrência dos danos e defeitos, determinando quando estes devem ser considerados como críticos;
- Realizar ensaios de fadiga traçando curvas características de Tensão-Ciclos a fim de estimar, dentro de um certo nível de carga, a vida útil apropriada ao funcionamento em aerogeradores de pequeno porte;
- Propor melhorias para o suporte de engaste da pá;

- Desenvolver e aplicar métodos não-destrutivos com o intuito de detectar danos internos invisíveis a olho nu;
- Realizar a usinagem dos CP's para os ensaios de tração, bem como a colocação de *tabs* quando da realização do ensaio;
- Melhorar a coleta de informações da geometria da pá, realizando a leitura metrológica da estrutura interna;
- Incluir no modelo em elementos finitos a não-linearidade física, correlacionando os resultados por meio de diagramas Momento *vs* Curvatura das seções;
- Investigar a tendência de propagação de trincas em cascas, observando o colapso progressivo;
- Inserir nas análises a quantificação de incertezas e índice de falhas nos ensaios experimentais. O teste *z-score* pode também ser incluído na análise de tração;
- Investigar a estabilidade do estado de equilíbrio, observando a tendência que o sistema apresenta em retornar, ou não, ao seu estado de equilíbrio original após uma perturbação.

Acredita-se que no campo estrutural, por exemplo, ao invés de pensarmos em que força deve resistir a estrutura, pensarmos em qual nível de deslocamento deve resistir a pá. No projeto de pás eólicas, é importante levar em consideração diferentes efeitos não-lineares conforme descrito por Jensen *et al.* (2011). A análise não-linear é uma ferramenta potencialmente útil na compreensão e quantificação do comportamento estrutural.

Em geral, a melhor combinação das propriedades dos compósitos reforçados com fibras é obtida quando a sua distribuição é uniforme. De acordo com Ventura (2009), os compósitos com fibras contínuas e alinhadas têm respostas mecânicas que dependem de vários fatores como o comportamento tensão-deformação das fases fibra e matriz, as frações volumétricas das fases e a direção na qual a tensão ou carga é aplicada. De acordo com Hull e Clyne (1996), o tipo de fratura em compósitos com fibras multidirecionais estudados nesta pesquisa tem como principal fonte de dano a transferência de tensão entre lâminas com orientações diferentes, podendo, como resultado, conduzir a falha por delaminação, fato este que ocorreu neste trabalho.

Os materiais compósitos podem exibir múltiplas fraturas antes de se romper, mas não foi encontrada na literatura uma teoria que possa prever o modo de fratura para todos os níveis de análise, condições de carregamento ou tipos de materiais utilizados. Certamente, o

número de amostras para o ensaio de tração têm pouca representatividade estatística. De acordo com Neto *et al.* (2001), para que uma amostra seja uma representação realista, deve-se considerar a hipótese de aleatoriedade. Esta condição é importante na prática, pois as inferências estatísticas sempre supõem que as amostras são representativas de uma determinada população, no caso, de pás eólicas. Para se ter dados experimentais confiáveis, é relevante executar um procedimento bem definido, com detalhes operacionais que dependem da finalidade do experimento, como o aperto das garras da máquina de tração, por exemplo.

Não se sabe que incerteza está associada aos valores encontrados nos resultados de tração. Cada uma das operações de laboratório envolvidas está sujeita à erros, e todos esses erros podem influenciar o resultado final. Segundo Triola (1999), não se pode evitar a ocorrência do erro amostral, porém, pode-se limitar seu valor através da escolha adequada do tamanho da amostra. Investigar os efeitos de todos os fatores envolvidos sobre todas as propriedades, poderia melhorar a qualidade dos resultados. Dessa forma, sugere-se que sejam realizados novos ensaios de tração com um número maior de amostras de um determinado conjunto das pás estudadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULAZIZ, A. H., ELSABBAGH, A. M., WAEL, A. N. *Dynamic and Static Characterization of Horizontal Axis Wind Turbine Blades Using Dimensionless Analysis of Scaled-Down Models*. International Journal of Renewable Energy Research, 2015.

ABEE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. *Sobre parques eólicos*. Associação Brasileira de Energia Eólica, 2016. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/noticias/5003-cear%C3%A1-tem-24-parques-e%C3%B3licos-em-constru%C3%A7%C3%A3o.html>>. Acesso em: 13 de outubro de 2016.

ABEE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. *Sobre Capacidade de Energia Eólica Instalada*. Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2017/02/Dados-Mensais-ABEEolica-02.2017.pdf>>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2017.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 9622/1986 – Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração*. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=8230>>. Acesso em: 25 de dezembro de 2016.

ADKINS, C. N., LIEBECK, R. H. *Design of Optimum Propellers*. Journals of Propulsion and Power. Washington, 1994.

AGUILAR, M. M. C. *Análisis Aerodinámico de la Hélice de um Aerogerador Tripala de Eje Horizontal de 3 kW mediante Simulación Numérica*. Tese de Doutorado da Faculdade de Ciências e Engenharia. Perú, 2014.

ALÉ, J. A. V., SIMIONI, G. C. S., FILHO, J. G. C. SANTOS, C. A. *Aerodynamic Loads and Fatigue of Small Wind Turbine Blades: Standards and Testing Procedures*. European Wind Energy Conference & Exhibition, 2011.

ALMEIDA, M. S. *Implementação Computacional para Desenvolvimento de Pás de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal*. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, 2013.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Atlas de Energia Eólica no Brasil – Projetos em Operação no País em 2005*. ANEEL 2ª ed. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_eolica/6_6_1.htm>. Acesso em: 14 de novembro de 2016.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *BIG - Banco de Informações de Geração, 2016*. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 16 de novembro de 2016.

ANSYS RELEASE. *Product Launcher Release 13.0*. ANSYS 13.0, Help 8.

ARAÚJO, D. C., MORAIS, M. V. G., AVILA, S. M., SHZU, M. A. M. *Análise Modal de uma Pá de Turbina Eólica Modelada como Elemento de Viga utilizando a Plataforma Ansys*. Proceedings of the XXXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. Fortaleza, Ceará, Brasil: ABMEC, 2014.

ARAÚJO, D. C., SHZU, M. A. M., AVILA, S. M., MORAIS, M. V. G. *Análise Numérica e Experimental de um Protótipo de Pá de Turbina Eólica*. XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. Brasília, Distrito Federal, Brasil: CILAMCE, 2016.

ARYAL, B. U., BHURTEL, B., GIRI, K., BHANDARI, A. S., CHITRAKAR, S. *Design and Analysis of a Small Scale Wind Turbine Rotor at Arbitrary Conditions*. Rentech Symposium Compendium, Volume 4, Setembro, 2014.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials*. ASTM D 5229/D 5229M, U.S.A, 2014.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. ASTM D 3039/D 3039M, U.S.A, 2014.

ASSAN, A. E. *Método dos Elementos Finitos*. Editora UNICAMP, 2013.

AUTODESK. *AutoCAD versão 2014*. AUTOCAD 14.0.

AUTODESK. *AutoCAD Civil 3D versão 2014*. AUTOCAD 14.0.

AWEA – American Wind Energy Association. *Small Wind Global Market Study*. 2010.

AYMERICH, F. *Composite Materials for Wind Turbine Blades: Issues and Challenges*. Departamento de Engenharia Mecânica, Química e Materiais. Universidade de Cagliari, Itália, 2012.

BRANDRUP, J., IMMERGUT, E. H., GRULKE, E. A. *Polymer Handbook*. Four Edition, John Wiley & Sons, London, New York, 1998.

BURTON, T., SHARPE, D., JENKINS, N. BOSSANYI, E. *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons Ltda. Toronto, 2001.

BUTTERFIELD, C.P. MUSIAL, W.P. SIMMS, D.A. *Combined Experiment Phase I Final Report*. NREL/TP-257-4655. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 1992.

CAITHNESS WIND FARM. *Accident Statistics*. Disponível em: <<http://www.caithnesswindfarms.co.uk/AccidentStatistics.htm>>. Acesso em: 15 de junho de 2017.

- CALLADINE, C. R. *Theory of Shell Structures*. University Press, p.1150, 1989.
- CALLISTER JR., W. D. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. University of Utah, USA. John Wiley & Sons, 2007.
- CAMPOS, M.O. *Estudo Comparativo de Pás para Aerogeradores de Grande Porte Fabricadas em Materiais Compósitos Reforçadas com Fibra de Carbono ou Fibra de Vidro*. Dissertação de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Exatas e da Terra. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, 2013.
- CARVALHO, A. F. C., DONADON, M. V. *Análise Estrutural de Uma Pá de Gerador Eólico de 2MW Fabricado em Material Compósito*. Anais do XVII Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XVII ENCITA / 2011.
- CEYHAN, Ö. *Aerodynamic Design and Optimization of Horizontal Axis Wind Turbines by using BEM Theory and Genetic Algorithm*. Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Aeroespacial da Universidade Técnica do Oriente Médio, Turquia, 2008.
- CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Avaliação e Percepções para o Desenvolvimento de uma Política de CT & I no Fomento da Energia Eólica no Brasil*. Brasília, Brasil, 2012.
- CHAZLY, N. M. *Static and Dynamic Analysis of Wind Turbine Blades using the Finite Element Method*. Department of Mechanical Engineering, National Research Centre, Cairo, Egypt. 1993.
- CHEN, K. N., CHEN, P. Y. *Structural Optimization of 3MW Wind Turbine Blades Using a Two-Step Procedure*. IJSMDO, 2010.
- CHORTIS, D. I. *Structural Analysis of Composite Wind Turbine Blades: Nonlinear Mechanics and Finite Element Models with Material Damping*. European Academy of Wind Energy. Springer, 2013.
- CHUNG, J., YOO, H. H. *Dynamic Analysis of a Rotating Cantilever Beam by using the Finite Element Method*. Journal of Sound and Vibration, 2002.
- CLAUSEN, P.D., WOOD, D.H. *Recent Advances in Small Wind Turbine Technology*. Wind Engineering 24, 2000, p189–201.
- COTTET, G. H., KOUMOUTSAKOS, P. *Vortex Methods*. Cambridge University Press, 2000.
- CSE – COMPUTER SCIENCE ENGINEERING. *Moinhos de Vento do Século XIX*. Disponível em: <<http://www.cse.cuhk.edu.hk/~ttwong/photo/europe1/netherland1>>. Acesso em: 21 de março de 2017.

- CURTU, I., TESULĂ, I., STANCIU, M. D., PISCOI, P., SAVIN, A. *Analysis of Wind Turbine Blades from Lignocellulosic Composites Subjected to Static Bending*. Pro Ligno, vol.11, 2015.
- DANIEL, I.M.; ISHAI, O. *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press, Oxford, 2006.
- DA SILVA JR, S. S. *Avaliação da Resposta Dinâmica de Diferentes Tecnologias de Aerogeradores*. Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Janeiro, 2015.
- DEBEL, C. P. *Identification of Damage Types in Wind Turbine Blades Tested to Failure*. Risø National Laboratory, 2004.
- DELLEZZOPOLLES, C. F. *Análise Dinâmica de Torre de Energia Eólica*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil, 2011.
- DENARI, G B., CAVALHEIRO, E. T. G. *Princípios e Aplicações de Análise Térmica*. Material de apoio. Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos, São Carlos, 2012.
- DET NORSKE VERITAS. *Design and Manufacture of Wind Turbine Blades, Offshore and Onshore Wind Turbines*. Offshore Standard. Revisão, 2010.
- EBC – EMPRESA BRASILEIRA DE COMUNICAÇÃO. *Sobre a Infraestrutura de Energias Renováveis no Brasil em 2016*. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/01/brasil-e-um-dos-principais-geradores-de-energia-eolica-do-mundo>>. Acesso em: 18 de fevereiro de 2017.
- ENERGY.GOV. *Sobre Certificação de Pequenas Turbinas Eólicas*. Disponível em: <https://www.energy.gov/energysaver/articles/want-tax-credit-small-wind-system-be-sure-its-certified>>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2017.
- ENERSUD. *Manual do Produto: Aerogerador VERNE555*. Rio de Janeiro, Brasil, 2016.
- FERREIRA, G. B., COSTA, D. I., MORAIS, M. V. G., NETO, F. L., MIRANDA, M. *Projeto Estrutural e Fabricação do País*, In: Brasil Júnior, Antônio César Pinho (Coord.). Eletronorte, 2013.
- GARCIA, A. *et al. Ensaio de Materiais*. 2ª edição, Campinas, LTC, 1999.
- GASCH, R.; TWELE, J. *Windkraftanlagen Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb*, Teubner. Wiesbaden, 2007.
- GHASEMI, A. R., MOHANDÉS, M. *Composite Blades of Wind turbine: Design, Stress, Analysis, Aeroelasticity and Fatigue*. 2016.
- GLAUERT, H. *Airplane propellers*. Aerodynamic Theory, vol. 4, Division L, Julius Springer, Berlin, 1935.

GOMES, M. A. *Propriedades Mecânicas de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Folhas de Abacaxizeiro*. Tese de Doutorado apresentado a Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, 2015.

GREENHALGH, E. S., ROGER, C., ROBINSON, P. *Fractography observations on delamination growth and the subsequent migration through the laminate*. Composite Science and Technology, 2009.

GWCE – GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. *Sobre Estatísticas Globais de Energia Eólica*. Disponível em: <<http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>>. Acesso em 20 de fevereiro de 2017.

HAU, E. *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Berlim: Springer, 2ª edição, 2006.

HANSEN, M. O. L. *Aerodynamics of Wind Turbines*. Londres: Earthscan, 2008.

HBM – HOTTINGER BALDWIN MESSSTECHNIK. *Operating Manual Spider8 and Characteristics of the Load Cell S40A 200 kg*. PC Measurement, HBM, 2017.

HERTZ, T.J.; SHIRK, M.H.; RICKETTS, R.H.; WEISSHAAR, T.A. *Aeroelastic Tailoring with Composites Applied to Forward Swept Wings*. Report AFWAL-TR-81-3043, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, NASA Langley Research Center and Purdue University, 1981.

HULL, D., CLYNE, T. W. *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press, New York, 1996

IEA – International Energy Agency. *Energy Technology Perspectives: Technology Roadmap Wind*. Disponível em: <<http://www.iea.org.br>>.

IEC – International Electrotechnical Commission. *IEC WT 01: System for Conformity Testing and Certification Wind Turbines – Rules and Procedures*. 2001.

IEC – International Electrotechnical Commission. *IEC 61400-1 International Standard: Wind Turbines – Part 1: Design requirements*. 2014.

IEC – International Electrotechnical Commission. *IEC 61400-2: Design Requirements for Small Wind Turbines*. 2006.

IEC – International Electrotechnical Commission. *IEC 61400-23: Wind Turbine Generator Systems – Part 23: Full-scale Structural Testing of Rotor Blades*. 2001.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 2394 – Princípios gerais de confiabilidade das estruturas*, 1998.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 527/1 – Determination of Tensile Properties – Part 1: General principles*, 2012.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 2394 – General principles on reliability for structures*, 2015.

JENSEN, F. M., PURI, A. S., DEAR, J. P., BRANNER, K., MORRIS, A. *Investigating the impact of non-linear geometrical effects on wind turbine blade - Part 1. Current issues and future challenges in design optimisation*. *Wind Energy* 14, 239–254, 2011. DOI: 10.1002/we.415.

JENSEN, F. M., FALZON, B. G., ANKERSEN, J., STANG, H. *Structural Testing and Numerical Simulation of 34m a Composite Wind Turbine Blade*. *Composite Structures* 76, 2006.

JØRGENSEN, E. R., BORUM, K. K., MGUGAN, M., THOMSEN, C. L., JENSEN, F. M., DEBEL, C. P., et al. *Full Scale Testing of Wind Turbine Blade to Failure – Flapwise Loading*. Roskilde: Risø National Laboratory. Report n°: Risø-R-1392(EN); Junho, 2004.

KAISERSBERGER, KNAPPE, MÖHLER, RAHNER. *TA for Polymer Engineering*. Netzsch. Annual Volume 3, Seib, 1994.

KALE, S., HUGAR, J. *Static Strength Design of Small Wind Turbine Blade using Finite Element Method Analysis and Testing*. Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2015.

KELKAR, A. D., TATE, J. S., BOLICK, R. *Structure integrity of aerospace textile composites under fatigue load*. 2006, 78-84.

KONG, C., BANG, J., SUGIYAMA, Y. *Structural Investigation of Composite Wind Turbine Blade Considering Various Load Cases and Fatigue Life*. *Energy* 30, Elsevier, 2005.

LEE, H. G., PARK, J. *Static Test until Structural Collapse after Fatigue Testing of a Full-Scale Wind Turbine Blade*. *Composites Structures*, 2015.

LEI 10.438 de 26 de abril de 2002. *Dispõe sobre a Criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA)*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm>. Acesso em: 18 de fevereiro de 2017.

LEISHMAN, J. *Principles of Helicopter Aerodynamics*. Cambridge University Press, 2nd edition, 2006.

LEITÃO, E. S. *Caracterização Mecânica de Compósitos Poliméricos Bobinados em Diversas Orientações do Reforço*. Dissertação do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, USP, 2007.

LOCK, C. N. H. *Experiments to Verify the Independence of the Elements of Airscrew Blade*. ARCR R&M No. 953, 1924.

LOU, P., DAI, G. L., ZENG, Q. Y. *Dynamic Analysis of a Timoshenko Beam Subjected to Moving Concentrated Forces Using the Finite Element Method*. *Shock and Vibration*, 2007.

- LOVE, M.; BOHLMANN, J. *Aeroelastic Tailoring and Integrated Wing Design*. Report N89-25167. General Dynamics, Fort Worth, TX, U.S.A., 1989.
- MADENCI, E., GUVEN, I. *The Finite Element Method and Applications in Engineering using ANSYS*. University of Arizona. Ed. Springer, 2006.
- MARBEEK. *Survey of the Small Wind (300W to 300kW) Turbine Market in Canada*. CANMET Energy Technology Centre. Natural Resources Canada, 2005.
- MARTHA, L. F. *Método dos Elementos Finitos: Notas de Aula*. Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, 1994.
- MATLAB. *Mathworks R2014b*.
- MANWELL, J. F., MCGOWAN, J. G., ROGERS, A. L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Wiley 2ª edição, 2009.
- MARTEN, D., WENDLER, J. *Q-Blade Guidelines v0.6*. Berlin Technical University Department of Experimental Fluid Mechanics. Janeiro, 2013.
- MUSIAL, W. D., BUTTERFIELD, C. *Using Partial Safety Factors in Wind Turbine Design and Testing*. National Renewable Energy Laboratory. Austin, Texas, 1997.
- NAGANO – MATERIAIS E EQUIPAMENTOS. *Manual de Utilização da Talha Elétrica TE12*. Disponível em: <<http://www.naganoprodutos.com.br/novosite/upload/download/963.pdf>>. Acesso em: 1 de fevereiro de 2017.
- NETO, B. B., SCARMINIO, I. S., BRUNS, R. E. *Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria*. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2001.
- NREL – NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. *Sobre Efeitos Buckling em Pás de Turbinas Eólicas*. Disponível em: <http://www.nrel.gov/continuum/spectrum/wind_farm.html>. Acesso em: 2 de fevereiro de 2017.
- OLIVEIRA, F. A. L. *Estudo Numérico-Analítico dos Efeitos de Cargas Axiais sobre o Comportamento Vibratório de Pás Eólicas*. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia. Universidade de Brasília, Faculdade UnB Gama. Brasília, 2015.
- OVERGAAD, L. C. T., LUND. *Structural Design Sensitivity Analysis and Optimization of Vestas V52 Wind Turbine Blade*. Proceedings of the 6th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, 2005.
- OVERGAAD, L. C. T., LUND, E., THOMSEN, O. T. *Structural Collapse of a Wind Turbine Blade, Part A: static test and equivalent single layered models*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010.

PACHECO, G. *Análise Numérica e Experimental em Placa de Material Compósito de Aplicação na Indústria Automotiva*. Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Automotiva, Universidade de Brasília, 2016.

PINTO, M. O. *Fundamentos de Energia Eólica*. LTC, 2013.

PORTAL ENERGIA. *Sobre aerogeradores em colapso*. Site Portal Energia, 2016. Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/aerogerador-perde-duas-pas-lancadas-200-metros-casa/>>. Acesso em: 14 de novembro de 2016.

PORTAL ENERGIA. *Sobre aerogeradores em colapso no Brasil*. Site Portal Energia, 2016. Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/forte-tempestade-derruba-8-aerogeradores-em-parque-eolico-no-rs-brasil>>. Acesso em: 14 de novembro de 2016.

PORTAL ENERGIA. *Resumo de Acidentes em Aerogeradores no Mundo*. Site Portal Energia, 2016. Disponível em: <http://www.portal-energia.com/downloads/resumo-acidentes-aerogeradores-parques-eolicos.pdf>>. Acesso em: 14 de novembro de 2016.

QBLADE. *QBlade Guidelines v0.6*. Janeiro de 2013. Disponível em: <<http://www.qblade.org/#welcome>>.

RENOVA ENERGIA. *Sobre o Potencial Eólico Brasileiro, 2015*. Disponível em: <http://www.renovaenergia.com.br/pt-br/imprensa/noticias/paginas/noticia.aspx?idn=423>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2016.

REIS, J. F., ABRAHAO, A. B. M., COSTA, M. L., BOTELHO, E. D. *Avaliação da Resistência Interlaminar do Compósito PEI/Fibras de Carbono Soldado pelo Método de Resistência Elétrica*. Soldagem & Inspeção, Pindamonhangama, 2016.

REUTERS BRASIL. *Sobre Índice de Fontes Renováveis, 2017*. Disponível em: <<http://br.reuters.com/article/businessNews/idBRKBN15O2J3>>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2017.

REVISTA TÉCNICA. *Sobre Ranking Internacional de Expansão de Energia Eólica*. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/tecnologias-sistemas/brasil-e-o-quinto-em-ranking-internacional-de-expansao-da-377373-1.aspx>>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2017.

RIBEIRO, F. (21 de 12 de 2014). *G1 Rio Grande do Sul*. Site *G1/Globo*, 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2014/12/ventania-derruba-torre-de-energia-eolica-em-santana-do-livramento-rs.html>>. Acesso em: 15 de agosto de 2016.

ROBERTS, D.W. *The Aerodynamic Analysis and Aeroelastic Tailoring of a Forward-weight Wing*. Master of Science Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC, U.S.A., 2006.

ROSA, E. S., GANZAROLLI, M. M., MAZZA, R. A. *Notas de Aula: Mecânica dos Fluidos Computacional*. UNICAMP, 2011. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~phoenics/>>. Acesso em: 27 de março de 2017.

SANDIA NATIONAL LABORATORIES – SNL. *Sobre Turbinas Eólicas, 2007*. Disponível em: <<https://share-ng.sandia.gov/news/resources/releases/2007/blade.html>>. Acesso em: 2 de fevereiro de 2017.

SCHERECK, S. J., ROBINSON, M. C. *Horizontal Axis Wind Turbine Blade Aerodynamics in Experiments and Modeling*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, March, 2007.

SCHUBEL, P. J., CROSSLEY, R. J. *Wind Turbine Blade Design Review*. Wind Engineering Volume 36, 2012.

SHARCNET. *Modal Analysis of a Wind Turbine Blade Using Beam Elements*. Disponível em: <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent14/help/ans_tec/tecwindturbine.html>. Acesso em: 17 de janeiro de 2017.

SHIINO, M. Y., CIOFFI, M. O. H., VOORDWALD, H. C. J., REZENDE, M. C. *Análise Fractográfica de Fratura em Fadiga do Compósito NC2/RTM6*. Anais do 10º Congresso Brasileiro de Polímeros, Foz do Iguaçu, Paraná, 2009.

SHOKRIEH, M. M., RAFIEE, R. *Simulation of Fatigue Failure in a Full Composite wind Turbine Blade*. Composite Structures, 2006.

SHYY, W., LIAN, Y., TANG, J., VIIEU, D., LIU, H. *Aerodynamics of low Reynolds Number Flyers*. Cambridge University Press, New York, 2008.

SILVA, V. Q. C. P. *Avaliação Experimental dos Deslocamentos e das Cargas Críticas de Bending-Buckling em Placas Compósitas*. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. Coimbra, 2012.

SILVA, J.R.C. *Otimização da Posição de Aerogeradores em Parque Eólico*. Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia, Publicação 019ª/2014, FGA/ FT/ Universidade de Brasília, DF, 93p, Brasília, 2014.

SILVA, M. F. D. S. *Ferramenta Gráfico-Interativa para o Dimensionamento de Pórticos Planos de Concreto Armado considerando Não-Linearidade Geométrica*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil PUC-RJ, 2017.

SILVA, A. M., VIEIRA, R. M. F. *Energia Eólica: Conceito e Características Basilares para uma Possível Suplementação da Matriz Energética Brasileira*. Revista de Direito Ambiental e Sociedade, 2016.

- SILVA, L. M. *Avaliação da Delaminação na Furação de Materiais Compósitos Reforçados com Fibras de Carbono*. Semana Acadêmica de Engenharia Mecânica e de Produção, JCEC, 2017.
- SINGH, R. K., GARG, S., GUDIVADA, L. *Desing and Experimental Analysis of a 200W Micro Wind Turbine*. International Journal of Advance Research and Innovation, 2016.
- SMALLEY, R.E. *Our energy challenge*. Walter Orr Roberts Public Lecture Series, Rice University Aspen CO, 2003.
- SONG, Q., LUBITZ, W. D. *BEM Simulation and Performance Analysis of a Small Wind Turbine Rotor*. Wind Energy Volume 37, p.381-399, 2013.
- SØRENSEN, J. N., KROON, I. B., FABER, M. H. *Optimal reliability-based code calibration*. Structures Safety 15, 197–208, 1994. DOI: 10.1016/0167-4730(94)90040-X.
- SØRENSEN, J. N. *General Momentum Theory for Horizontal Axis Wind Turbine*. European Academy of Wind Energy, Springer, 2016.
- SØRENSEN, B. F., JØRGENSEN, E. R., DEBEL, C. P., JENSEN, F. M., JENSEN, H. M., JACOBSEN, T. K., et al. *Improved Design of Large Wind Turbine Blade of Fiber Composites Basedown Studies of Scale Effects (Phase1) – summary*. Roskilde: Risø National Laboratory, 2004.
- STEMPLE, A.D., LEE, S.W. *Finite Element Model for Composite Beams with Arbitrary Cross-Sectional Warping*. AIAA Journal, 1988.
- STIESDAL, H. *The Wind Turbine Components and Operation*. Bonus Energy A/S, 1999.
- TATTING, B. F., GÜRDAL, Z., VASILIEV, V. V. *The Brazier Effect for Finite Length Composite Cylinders under Beding*. International Journal Solids Structures, 1997.
- TRIOLA, Mário F. *Introdução à Estatística*. 7ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.
- THUWIS, G.A.A., DE BREUKER, R., ABDALLA, M.M., GÜRDAL, Z. *Aeroelastictailoring using lamination parameters: Drag reduction of a Formula One rearwing*. Struct Multidisc Optim, Industrial Application, pp. 1-10, 2009.
- TONG, W. *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. WIT Press, USA. 2010.
- TURNER, M.J., CLOUGH, R.W., MARTIN, H.C., TOPP, L.J. *Stiffness and deflection analysis of complex structures*. J. Aero. Sci. 23, 1956.
- VAN KUIK, G. A. M. *The Lanchester-Betz-Joukowsky Limit*. Wind Energy, volume 10, 2007.
- VENTURA, A. M. F. M. *Os Compósitos e sua Aplicação na Reabilitação de Estruturas Metálicas*. Ciência e Tecnologia dos Materiais, v.21, n.3-4, 2009.

VESTAS, 2017. *Imagens de Turbinas Eólicas*. Disponível em: <<https://www.vestas.com/en/media/images#!turbines>>. Acesso em: 21 de março de 2017.

VOGT, H. H. *Análise Estrutural de Pás de Gerador Eólico de Pequeno Porte feitas de Fibra Vegetal Brasileira*. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Físicas Aplicadas, Universidade Estadual do Ceará. Fortaleza, 2010.

WATSON, J. C., SERRANO, J. C. *Composite Materials for Wind Turbine Blades*. Wind Systems Magazine, 2010.

WHITE, F. M. *Viscous Fluid Flow*. McGraw-Hill, New York, 1991.

WILSON, R. E., LISSAMAN, P. B. S., WALKER, S. N. *Aerodynamic Performance of Wind Turbines*. Energy Research and Development Administration, ERDA/NSF/04014-76/1, 1976.

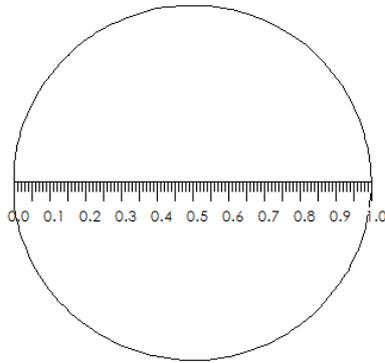
WIND POWER MONTHLY. *Sobre Falhas de Pás Eólicas no Mundo, 2015*. Disponível em: <<http://www.windpowermonthly.com/article/1347145/annual-blade-failures-estimated-around-3800>>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2017.

WINGERDE, A. V., SAYER, F., PUTNAM, E. *Test for Certification of Rotor Blades: Today and in the Future*. Brazil Windpower Conference and Exhibition. Rio de Janeiro, 2015.

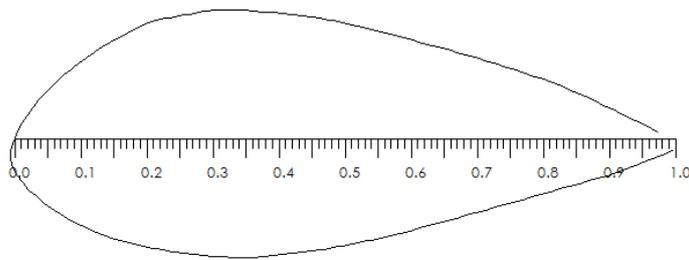
WOOD, D. *Small Wind Turbines: Analysis, Design and Application*. University of Calgary, Springer, 2011.

ANEXOS

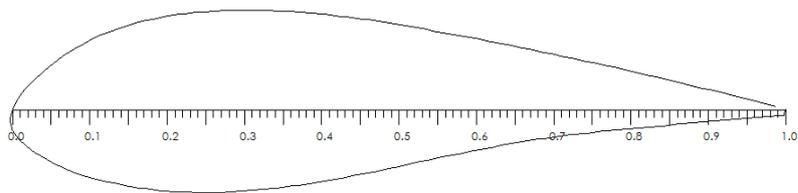
**ANEXO 1: DESENHO GEOMÉTRICO DA PÁ EM CAD E
RESPECTIVAS SEÇÕES TRANSVERSAIS.**



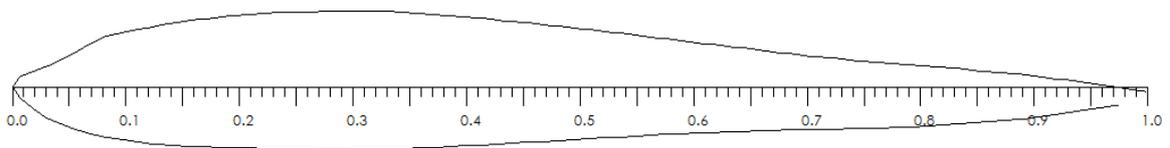
SEÇÕES 01 A 05



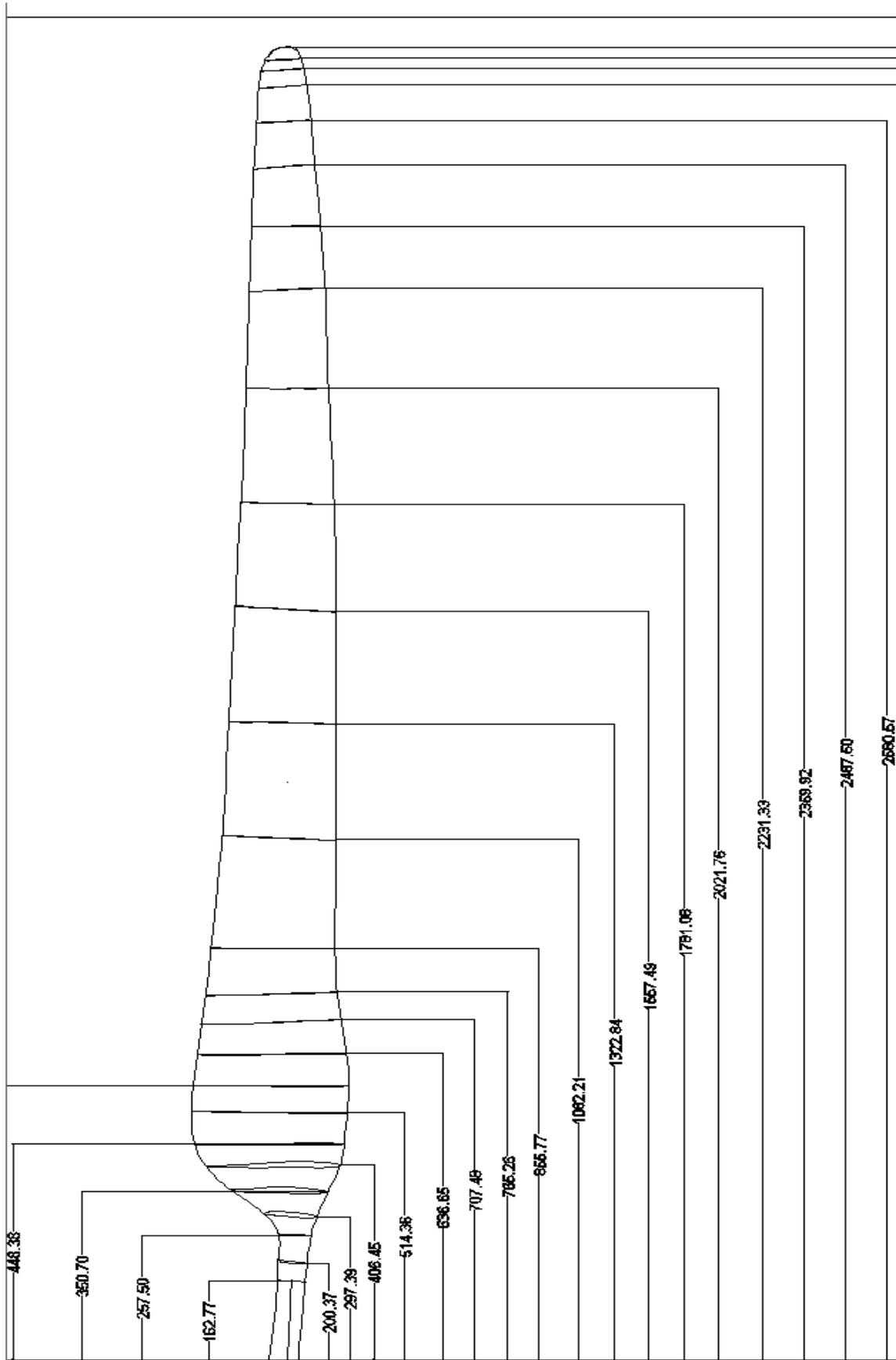
SEÇÕES 06 E 07



SEÇÕES 08 A 18

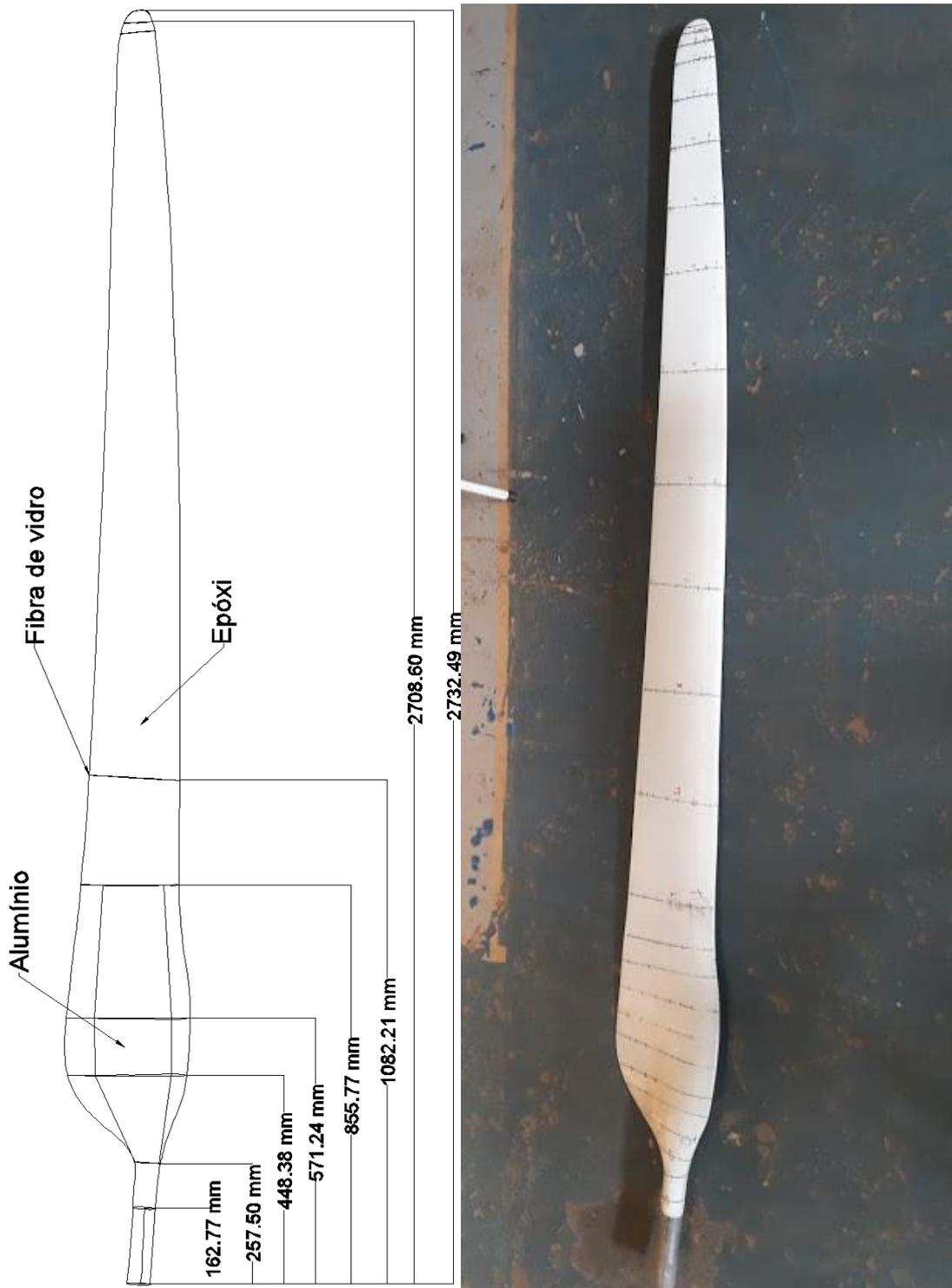


SEÇÕES 19 A 26



(Em milímetros)

ANEXO 2: POSIÇÃO DAS SEÇÕES EXPORTADAS PARA ANSYS.



ANEXO 3: TRANSFORMAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS DAS SEÇÕES PARA AS COORDENADAS DO QBLADE

```
clear all
clc

alpha= (-0.29*pi)/180;           % ANGULO DA CORDA COM O EIXO X
corda= 47.4;                     % VALOR DA CORDA

coord=[ 'c:/desktop/coordenadas_pa.txt' ]; % VALORES BRUTOS DAS COORDENADAS

eixo_00= [0.4316 24.1072];       % VALORES DAS DISTANCIAS PARA O EIXO 0,0

format short
x= coord(1:150,2)-eixo_00(1,1);  % VALORES DAS COORDENADAS NO EIXO 0,0
y= coord(1:150,3)-eixo_00(1,2);

EIXO= [x y];                    % MATRIZ DAS COORDENADAS NO EIXO 0,0

qblade= EIXO/corda;             % VALOR TRANSFORMADO PARA O QBLADE

M_Rot= [cos(alpha) sin(alpha);-sin(alpha) cos(alpha)]*[qblade]';
% MATRIZ DE ROTACAO
final= M_Rot';

final_inv= [final(1:150,1)*1 final(1:150,2)*(-1)]
```

ANEXO 4: CORREÇÕES PARA A TEORIA BEM

O modelo mais simples para a aerodinâmica de uma TEEH é a teoria BEM. Ela permite que a pá do rotor seja analisada em seções, onde as forças resultantes são somadas em todas as seções para obter as forças globais do rotor. A teoria usa os equilíbrios de impulso axial e angular para determinar o fluxo e as forças resultantes na pá.

As equações de momento para o fluxo bem a montante do disco determinam que o impulso e o torque induzam um fluxo secundário no vento que se aproxima. Isso, por sua vez, afeta a geometria do fluxo na pá que governa as respostas das forças na mesma por meio dos ângulos de ataque (Leishman, 2006). Essa interação entre os equilíbrios de impulso do campo a montante e as forças locais da pá requer a resolução das equações de momento e as equações de perfil aerodinâmico simultaneamente. Normalmente, *softwares* com base em métodos numéricos são utilizados para resolver esses modelos.

Existe uma grande variação entre as diferentes versões da teoria BEM. Primeiro, pode-se considerar ou não o efeito da rotação na esteira. Em segundo lugar, pode-se ir mais longe e considerar a queda de pressão induzida na rotação da esteira. Em terceiro lugar, o fator de indução tangencial pode ser resolvido com uma equação de momento, um balanço de energia ou uma restrição geométrica ortogonal (Cottet e Koumoutsakos, 2000); por último, um resultado da lei de Biot-Savart nos métodos de vórtice, o aumento da velocidade relativa de um elemento de pá na medida em que este se afasta da raiz, gera uma quantidade considerável de vórtices atrás do rotor (Almeida, 2013). Todos conduzem a um conjunto diferente de equações que precisam ser resolvidas. As equações mais simples e mais amplamente utilizadas são aquelas que consideram a rotação da esteira com a equação momento, mas ignoram a queda de pressão da rotação da esteira.

A teoria BEM, por si só, não representa com precisão a verdadeira física das turbinas eólicas reais. Existem duas principais deficiências: os efeitos de um número discreto de pás e efeitos de campo bem a montante quando a turbina está fortemente carregada. As deficiências secundárias se originam, de acordo com Cottet e Koumoutsakos (2000), por ter que lidar com efeitos transitórios, como a queda dinâmica, efeitos rotativos, como a força de Coriolis e o bombeamento centrífugo e os efeitos geométricos que surgem dos rotores de formato cônico e guinados. O estado atual da arte no BEM usa correções para lidar com essas principais deficiências. Segundo Cottet e Koumoutsakos (2000), não existe ainda um

tratamento aceito para as insuficiências secundárias. Essas áreas continuam sendo uma área de pesquisa altamente ativa na aerodinâmica de turbinas eólicas.

Existem alguns métodos propostos para a abordagem das perdas geradas na ponta da pá, mas para Adkins e Liebeck (1994), o efeito do número discreto de pás é tratado aplicando o fator de perda de ponta Prandtl. A forma mais comum deste fator é dada abaixo,

$$F_{ponta} = \frac{2}{\pi} \cdot \arccos \left(e^{-\frac{N \cdot (R-r)}{2 \cdot r \cdot \sin(\varphi)}} \right) \quad (7.4.1)$$

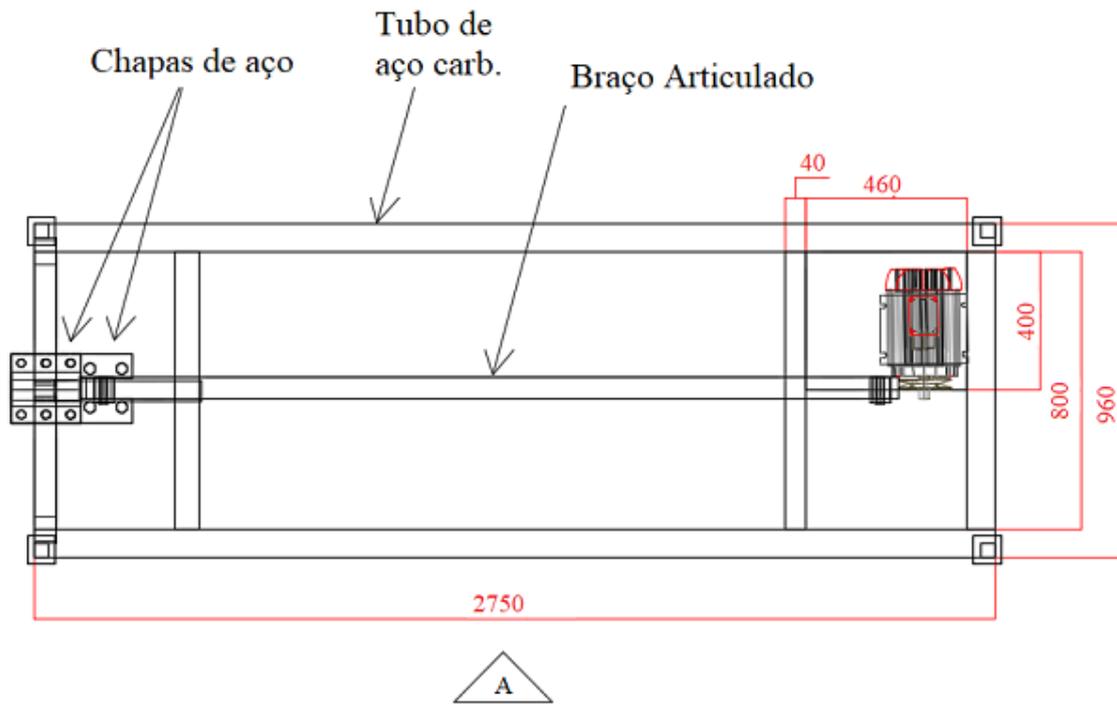
onde N é o número de pás, R é o raio externo e r é o raio local. A definição de F_{ponta} é baseada em modelos de disco atuador e não diretamente aplicável ao BEM. No entanto, para alguns autores, é comum aplicar a multiplicação dos termos fator de indução axial e tangencial (a e a') por F_{ponta} nas equações de momento, expressando, dessa forma:

$$a = \left(\frac{4 \cdot F_{ponta} \cdot \sin^2(\varphi)}{\sigma \cdot C_N} + 1 \right)^{-1} \quad (7.4.2)$$

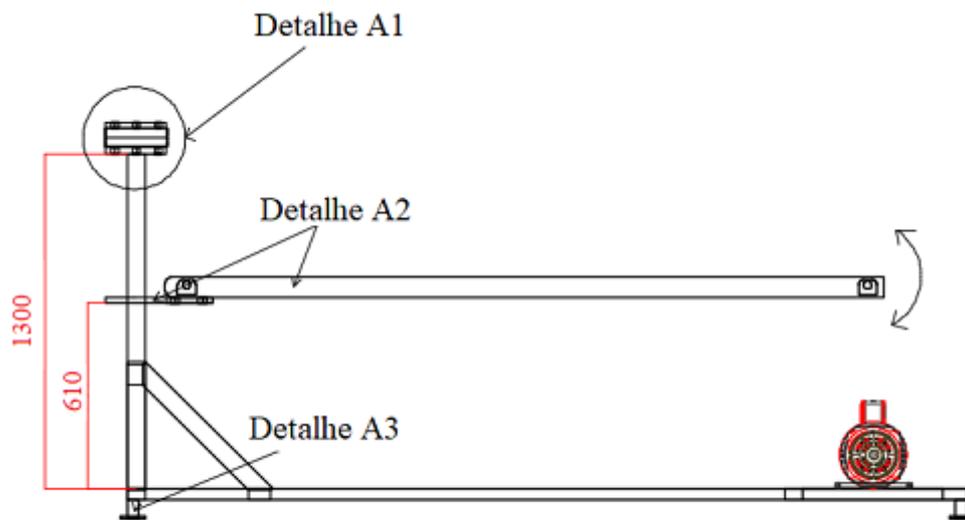
$$a' = \left(\frac{4 \cdot F_{ponta} \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi)}{\sigma \cdot C_T} - 1 \right)^{-1} \quad (7.4.3)$$

Como na equação do impulso existem muitas variações para a aplicação de F, alguns autores argumentam que o fluxo de massa deve ser corrigido tanto na equação axial quanto na tangencial. Outros sugerem um segundo termo de perda de ponta para explicar as reduções de forças na ponta das pás.

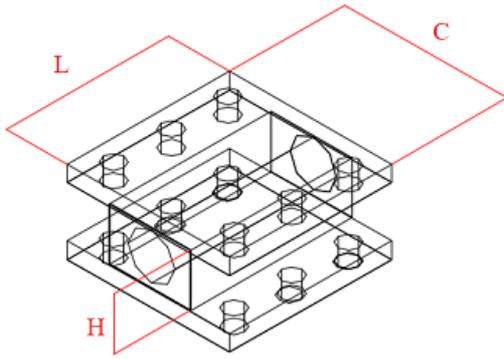
ANEXO 5: VISTAS DA BANCADA PARA TESTE EXPERIMENTAL.



1 Planta Baixa
Sem escala

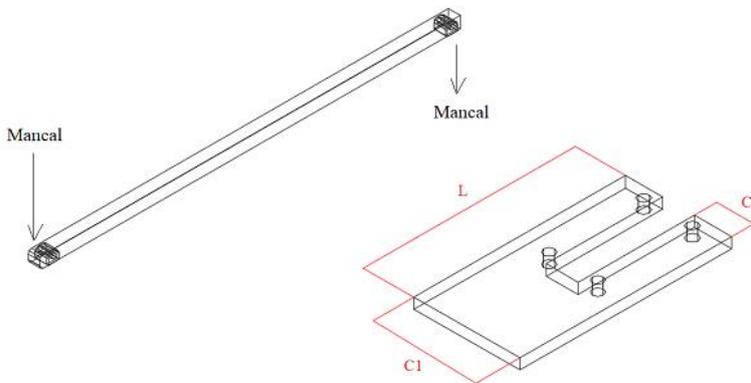


2 Vista A
Sem escala



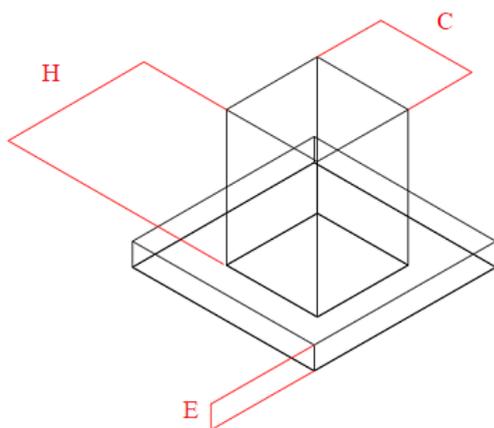
D1 Detalhe A1
Sem escala

MEMORIAL DESCRITIVO	
ITEM	DESCRIÇÃO
1	Chapa em aço de 1/2 polegadas
2	Porca sextavada 3/4 polegadas
3	Parafusos 3/4 de polegadas
H	Altura de 600 mm
L	Largura de 200 mm
C	Comprimento de 200 mm
E	Espessura de 50 mm



D2 Detalhe A2
Sem escala

MEMORIAL DESCRITIVO	
ITEM	DESCRIÇÃO
1	Perfil enrijecido seção quadrada
2	Mancais
L	Chapa em aço 1/2 pol - Comp. 350 mm
C1	Compr. 250 mm
C2	Compr. 105 mm



D3 Detalhe A3
Sem escala

MEMORIAL DESCRITIVO	
ITEM	DESCRIÇÃO
1	Perfil enrijecido seção quadrada
H	Altura 100 mm
E	Espessura 25 mm
C	Compr. 50 mm

ANEXO 6: CARGAS APLICADAS NOS ENSAIOS

ENSAIO 1

PASSO	CARGA (kgf)						
1	3,78	13	33,11	25	77,95	37	125,86
2	5,46	14	36,33	26	80,66	38	131,56
3	7,52	15	41,05	27	86,17	39	132,78
4	10,37	16	44,97	28	90,82	40	140,58
5	11,49	17	48,76	29	94,90	41	144,17
6	13,26	18	53,01	30	95,79	42	151,74
7	15,18	19	57,40	31	101,30	43	155,15
8	17,70	20	62,82	32	16,16	44	166,68
9	21,34	21	66,08	33	110,08	45	168,60
10	23,54	22	68,61	34	114,84	46	173,13
11	26,25	23	71,41	35	119,33	47	174,25
12	29,24	24	75,42	36	123,16	48	177,75

ENSAIO 2		ENSAIO 3	
PASSO	CARGA (kgf)	PASSO	CARGA (kgf)
1	13	1	19,54
2	22,8	2	29,80
3	32,56	3	41,60
4	46,29	4	53,75
5	58,34	5	69,75
6	74,41	6	81,72
7	82,67	7	92,40
8	97,62	8	102,58
9	108,83	9	113,35
10	122,19	10	123,54
11	129,72	11	139,45
12	134,56	12	150,25

**ANEXO 7: ÂNGULOS DE ROTAÇÃO NO ENGASTE OCORRIDOS
NO ENSAIO 1**

PASSO	ÂNGULOS (em graus)	PASSO	ÂNGULOS (em graus)	PASSO	ÂNGULOS (em graus)
1	0,41	13	0,04	25	0,08
2	0,09	14	0,07	26	0,09
3	0,07	15	0,08	27	0,05
4	0,04	16	0,05	28	0,06
5	0,06	17	0,03	29	0,06
6	0,05	18	0,08	30	0,07
7	0,08	19	0,07	31	0,11
8	0,04	20	0,05	32	0,08
9	0,03	21	0,08	33	0,09
10	0,04	22	0,06	34	0,07
11	0,06	23	0,07	35	-
12	0,03	24	0,03	36	-

Total = 2,43°

ANEXO 8: SCRIPT ANSYS DA MODELAGEM DA PÁ LINEAR E NÃO-LINEAR.

```

/TITLE, Blade analysis
*dim,filename,string,50,1
*****
*****
filename(1,1) = 'C:\numeric_model'    !Nome do diretório

!*****
*****

/PREP7
!Materials
!Glassfiber: E-glass
!young's modulus: 15 GPa, 72.5*10^3 MPa (10.5*10^6 psi)
!Density: 2.58 g/cm^3 = 0.00258g/mm^3
!Poisson's ratio: 0,22

!Aluminum 7075;
!young's modulus: 71 GPa, 71*10^3 MPa ( 10.3*10^6 psi)
!Density: 2.8 g/cm^3 = 0.00785 g/mm^3
!Poisson's ratio: 0,33

!Reference: CALLISTER

!*****
**
ET,1,BEAM188
KEYOPT,1,3,2    !função de forma quadrática
KEYOPT,1,12,1   !seção constante
KEYOPT,1,15,1   !

!*****
***

!Material 1: E-glass

MP,EX,1,15e9           ! modulo Young (Pa)
MP,NUXY,1,0.22        ! coeficiente de Poisson
MP,DENS,1,2580        ! densidade (Kg/m^3)
!*****
***

!Matrerial 2: alluminum 7075

MP,EX,2,EX2           ! modulo Young (Pa)
MP,NUXY,2,NUXY2      ! coeficiente de Poisson
MP,DENS,2,DENS2       ! densidade (Kg/m^3)
!*****
***

!Matrerial 3: poliéster

```

MP,EX,3,2.41e9 ! modulo Young (Pa)
MP,NUXY,3,0.4 ! coeficiente de Poisson
MP,DENS,3,30 ! densidade (Kg/m^3)

!*****

SECTYPE,1,BEAM,MESH,s1
SECOFFSET,ORIGIN
SECREAD,'sec1','sect',filename(1,1),MESH
SECTYPE,2,BEAM,MESH,s2
SECOFFSET,ORIGIN
SECREAD,'sec2','sect',filename(1,1),MESH
SECTYPE,31,BEAM,MESH,s3a
SECOFFSET,ORIGIN
SECREAD,'sec3_a','sect',filename(1,1),MESH

SECTYPE,32,BEAM,MESH,s3b4
SECOFFSET,ORIGIN
SECREAD,'sec3b4','sect',filename(1,1),MESH
SECTYPE,33,BEAM,MESH,s3b
SECOFFSET,ORIGIN
SECREAD,'sec3b4_b','sect',filename(1,1),MESH
SECTYPE,41,BEAM,MESH,s4
SECOFFSET,ORIGIN
SECREAD,'sec4','sect',filename(1,1),MESH
!*****

SECTYPE,4,BEAM,MESH,s4_5
SECOFFSET,ORIGIN
SECREAD,'sec4_5','sect',filename(1,1),MESH
SECTYPE,51,BEAM,MESH,s51
SECOFFSET,ORIGIN
SECREAD,'sec5','sect',filename(1,1),MESH
SECTYPE,5,BEAM,MESH,s5
SECOFFSET,ORIGIN
SECREAD,'sec5b','sect',filename(1,1),MESH
SECTYPE,71,BEAM,MESH,s71
SECOFFSET,ORIGIN
SECREAD,'sec7','sect',filename(1,1),MESH
SECTYPE,7,BEAM,MESH,s7
SECOFFSET,ORIGIN
SECREAD,'sec7b','sect',filename(1,1),MESH
SECTYPE,8,BEAM,MESH,s8
SECOFFSET,ORIGIN
SECREAD,'sec8_B','sect',filename(1,1),MESH
SECTYPE,9,BEAM,MESH,s9
SECOFFSET,ORIGIN
SECREAD,'sec9','sect',filename(1,1),MESH

!comprimento em metros
d1 = 0
d2 = 0.1627
d3 = 0.2974

d3b4 = 0.365
d4 = 0.4483
d5 = 0.5712
d6 = 0.8557
d7 = 1.0822
d10 = 1.830
d8 = 2.6883
d9 = 2.7325

K,1,0,0,d1
K,2,0,0,d2
K,3,0,0,d3
K,11,0,0,d3b4
K,4,0,0,d4
K,5,0,0,d5
K,6,0,0,d6
K,7,0,0,d7
K,10,0,0,d10
K,8,0,0,d8
K,9,0,0,d9

L,1,2
L,2,3
!L,3,4
L,3,11
L,11,4
L,4,5
L,5,6
L,6,7
!L,7,8
L,7,10
L,10,8
L,8,9

r=5 !refine

SECTYPE,10,taper !taper
SECDATA,1,0,0,d1
SECDATA,2,0,0,d2

ESIZE,,r
!type,1
!mat,1
secnum,10
lmesh,1

SECTYPE,11,taper !taper
SECDATA,2,0,0,d2
SECDATA,31,0,0,d3

ESIZE,,r
!type,1

secnum,11
lmesh,2

SECTYPE,12,taper !taper
SECDATA,31,0,0,d3
SECDATA,32,0,0,d3b4

ESIZE,,r
type,1
secnum,12
lmesh,3

SECTYPE,13,taper !taper
SECDATA,33,0,0,0.365
SECDATA,41,0,0,d4

ESIZE,,r
type,1
secnum,13
lmesh,4

SECTYPE,14,taper !taper
SECDATA,4,0,0,d4
SECDATA,51,0,0,d5

ESIZE,,r
type,1
secnum,14
lmesh,5

SECTYPE,15,taper !taper
SECDATA,5,0,0,d5
SECDATA,71,0,0,d7

ESIZE,,r
type,1
secnum,15
lmesh,6,7

SECTYPE,16,taper !taper
SECDATA,7,0,0,d7
SECDATA,8,0,0,d8

ESIZE,,r
type,1
secnum,16
lmesh,8,9

SECTYPE,17,taper !taper
SECDATA,8,0,0,d8
SECDATA,9,0,0,d9

```
ESIZE,,2  
type,1  
secnum,17  
lmesh,10
```

```
/VIEW,1,1,1,1  
/ESHAPE,1.0  
/CFORMAT,32,0  
/REPLOT
```

```
FINISH  
/SOLU  
DK,2,ALL ! Constrain keypoint 2
```

```
NLGEOM,ON
```

```
autots,on ! auto time stepping  
nsubst,5,1000,1 ! Size of first substep=1/5 of the total load, max # substeps=10  
outres,all,all ! save results of all iterations
```

```
!F = 1000 ! (Newtons) - implementada em MATLAB  
FK,10,FY,-1*F
```

```
ACEL, ,-9.8, !Gravity
```

```
SOLVE
```