



PUCRS

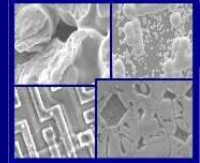
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia

Faculdade de Física

Faculdade de Química



PGETEMA

ANÁLISE DE FADIGA EM PÁS DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE

JOÃO GILBERTO ASTRADA CHAGAS FILHO

ENGENHEIRO DE PRODUÇÃO - MECÂNICA

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Porto Alegre

Março, 2011



PUCRS

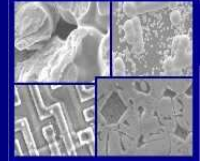
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia

Faculdade de Física

Faculdade de Química



PGETEMA

ANÁLISE DE FADIGA EM PÁS DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE

JOÃO GILBERTO ASTRADA CHAGAS FILHO
ENGENHEIRO DE PRODUÇÃO - MECÂNICA

ORIENTADOR: PROF. DR. Carlos Alexandre dos Santos

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Jorge Antonio Villar Alé

Trabalho realizado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

Trabalho vinculado ao Projeto Depinee (Capes edital pró-engenharias 01/2007)

**Porto Alegre
Março, 2011**

*“Privilegie o geral em
detrimento do particular”*

*(João Gilberto Astrada
Chagas)*

DEDICATÓRIA

Dedico a todas as pessoas que de alguma forma tenham contribuído até o momento para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores e a equipe do CE - eólica sem o qual não teria êxito nesta jornada. Em especial a meu amigo Gabriel Cirilo da Silva Simioni o qual empreendeu participação determinante na elaboração e implementação do sistema de controle e aquisição de dados da bancada de ensaios dinâmicos fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

SUMARIO

DEDICATÓRIA	4
AGRADECIMENTOS	5
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE QUADROS.....	15
RESUMO	18
ABSTRACT	19
1. INTRODUÇÃO	20
1.1. Energia Eólica	20
1.2. Histórico dos Materiais Utilizados em Pás	23
1.3. Objetivos	28
1.4. Delimitação do Problema	29
1.5. Visão geral da dissertação	29
2. AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE: CARGAS E NORMAS	31
2.1. Caracterização de um Sistema Eólico.....	31
2.1.1. Rotor	33
2.1.3. Freios de Ponta de Pá	35
2.1.4. Torres.....	35
2.1.5. Geradores CC.....	36
2.1.6. Alternadores.....	37
2.1.7. Inversores.....	37

2.1.8. Geradores de Indução	38
2.1.9. Curvas de Potência.....	38
2.2. Cargas Atuantes em Pás de Turbinas Eólicas	40
2.2.1. Inércia, Gravidade e Forças Atuantes	41
2.2.2. Efeito da Freqüência e Razão de Tensões.	43
2.3. Método Simplificado para Cálculo de Cargas em Turbinas Eólicas de Pequeno Porte.	44
2.3.1. Esforços Cíclicos Sobre Pás e Eixo de Turbinas Eólicas.....	46
2.3.2. Componente de Tensão Equivalente.	50
2.4. Utilização de Dados de Ventos	51
2.4.1. Distribuição de Weibull e Determinação de seus Parâmetros.	52
2.4.2. Método Padrão do Fator de Energia.	54
3. ENSAIOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS DE PÁS	57
3.1. Materiais de Pás de Aerogeradores.....	57
3.2. Propriedades Mecânicas dos Materiais de Pás de Aerogeradores	60
3.2.1. Condições Estáticas.....	64
3.2.2. Condições Cíclicas	66
3.3. Ensaio Mecânicos Estáticos e Normas	69
3.3.1. Ensaio de Tração	69
3.3.2. Ensaio de Flexão.....	72
3.4 Ensaio Mecânicos de Fadiga e Normas	74
3.4.1. Normas IEC.....	75
3.4.2. Demais Ensaio	75
3.4.3. Condições Gerais de Ensaio	78
4. METODOLOGIA.....	80
4.1. Descrição Global da Metodologia Proposta	80
4.2. Ensaio Mecânicos Estáticos	82
4.2.1. Ensaio de Tração	82
4.2.2. Ensaio de Flexão.....	85
4.3. Projeto da Bancada de Testes para Ensaio Cíclicos de Pás.....	86
4.3.1. Implementação do Sistema de Medição e Coleta de Dados	87

4.4. Ensaio Experimentais Estáticos	95
4.4.1. Ensaio para medição de deflexão	96
4.5. Procedimento para Determinação das Cargas e Número de Ciclos	98
4.5.1 Metodologia de Cargas pelo Método Simplificado	99
4.5.2. Metodologia para Espectro de Frequência.....	103
4.6. Realização dos Ensaio de Fadiga.....	107
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	110
5.1. Ensaio de Tração e Flexão	110
5.1.1. Curvas Tensão-Deformação	110
5.1.2. Superfície de Fratura dos C.P ensaiados em Tração	113
5.2. Ensaio Experimentais Estáticos da Pá até Limite de Ruptura.....	114
5.2.1. Calibração do Sistema	114
5.3. Ensaio de Fadiga.....	118
5.3.1. Ciclo Variável em Função da Frequência de Ventos no RS.....	118
5.3.2. Ciclo Constante.....	124
6. CONCLUSÃO.....	129
7. TRABALHOS FUTUROS	130
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
ANEXO A – TABELA COMPLETA - MSC	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Exemplos de aerogeradores de pequeno porte.....	21
Figura 1.2. Exemplos de aerogeradores de pequeno porte.....	22
Figura 1.3. Moinho de vento, geração de potência mecânica através da captação de energia eólica.	24
Figura 1.4. Moinho de bombeio americano, aproveitamento direto da energia mecânica para o bombeamento de água.....	25
Figura 1.5. Cronologia da utilização de materiais para fabricação de pás de aerogeradores.....	26
Figura 1.6. Modelo atual de aerogerador de eixo horizontal com pás em resina epóxi reforçadas com fibra de vidro.	27
Figura 2.1. Topologia de uma TEEH.....	32
Figura 2.2. Turbinas eólicas de eixo horizontal.2.1.2. Pás.....	33
Figura 2.3. Pá de rotor eólico de pequeno porte.....	34
Figura 2.4. Torres para aerogeradores de pequeno porte.	36
Figura 2.5. Curva de potência de aerogerador de pequeno porte.	39
Figura 2.6. Cargas aerodinâmicas sobre aerogeradores.	40
Figura 2.7. Forças aerodinâmicas e rotacionais sobre pás.....	42
Figura 2.8. Curva carga, deformação e número de ciclos.....	44
Figura 2.9. Função de Weibull adimensional.	53
Figura 3.1. Análise CAE em pá de aerogerador.	58
Figura 3.2. Secções transversais e estruturas internas de diversos rotores.....	60
Figura 3.3. Rigidez x massa específica para vários materiais.....	61

Figura 3.4. Mecanismo de dano por fadiga em materiais compósitos.	67
Figura 3.5. Esquema de ensaio de tração em corpo de prova.....	70
Figura 3.6. Curva de ensaio de tração para materiais compósitos.	72
Figura 3.7. Esquema de ensaio de flexão em três pontos.	73
Figura 3.8. Teste por atuadores hidráulicos.	77
Figura 3.9. Testes através de dispositivo de massas excêntricas.	78
Figura 4.1. Fluxograma de etapas do trabalho	81
Figura 4.2. Aerogerador Enersud verne555.	82
Figura 4.3. 1ª fase da confecção dos corpos de prova.	83
Figura 4.4. Dimensões dos corpos de prova.....	83
Figura 4.5. 2ª fase da confecção dos corpos de prova.	84
Figura 4.6. Máquina para ensaios de tração.	84
Figura 4.7. Máquina para ensaios de mecânicos de flexão.	85
Figura 4.8. Procedimentos para ensaio mecânico de flexão.	86
Figura 4.9. Bancada de testes para ensaios de pás de aerogeradores de pequeno porte.	86
Figura 4.10. Detalhes da (a) célula de carga e (b) oscilador.....	87
Figura 4.11. Posicionamento dos extensômetros ao longo da pá.....	88
Figura 4.12. Posicionamento dos extensômetros ao longo da pá.....	89
Figura 4.13. Ponte de Wheatstone para ligação de extensômetros ao sistema de aquisição de dados	90
Figura 4.14. Detalhes do (a) extensômetro e (b) <i>datalogger</i>	92

Figura 4.15. Detalhes do (a) extensômetro e (b) <i>datalogger</i>	93
Figura 4.16. Detalhes do (a) sistema de aquisição de dados e (b) inversor de freqüência.	94
Figura 4.17. Detalhes do (a) sistema de aquisição de dados e (b) inversor de freqüência.	94
Figura 4.18 Ponto de aplicação da carga.....	95
Figura 4.19 Ensaio de flexão experimental estático.....	95
Figura 4.20. Detalhes dos componentes de aplicação de carga e medição do ensaio experimental estático.....	96
Figura 4.21 Ensaio experimental estático.	97
Figura 4.22. Medição de deslocamento devido a flexão.	97
Figura 4.23. Distribuição da velocidade do vento para uma região do RS medida a 15m do solo.....	103
Figura 4.24. Espectro de cargas – razão de tensões em porcentagem.....	104
Figura 4.25. Variáveis de entrada para ensaio de esforços cíclicos	108
Figura 4.26. Posicionamento dos extensômetros ao longo da pá.....	109
Figura 5.1. Gráfico Força (N) x Alongamento (mm) para os corpos de prova 1,2,4,5 ensaiados a tração.....	110
Figura 5.2. Gráfico força (N) x deslocamento para corpo de prova ensaiado a flexão.....	112
Figura 5.3. Imagens obtidas durante realização dos ensaios de flexão estática. ...	112
Figura 5.4. Região de ruptura para corpo de prova 1.	113
Figura 5.5. Região de ruptura para corpo de prova 2.	113
Figura 5.6. Região de ruptura para corpo de prova 5	114
Figura 5.7. Gráfico Força (N) x Alongamento (mm) para a pá 1.....	115

Figura 5.8. Gráfico Força (N) x Alongamento (mm) para pá 1.....	116
Figura 5.9. Pá submetida a ensaio estático.	117
Figura 5.10. Força aplicada pela deflexão até a fratura.....	118
Figura 5.11. Sinais de deformação coletados dos extensômetros.....	119
Figura 5.12. Sinal da força aplicada coletada da célula de carga.....	119
Figura 5.13. Gráfico das solicitações e deformações para ventos de 5m/s.....	120
Figura 5.14. Gráfico das solicitações e deformações para ventos de 6m/s.....	121
Figura 5.15. Gráfico das solicitações e deformações para ventos de 7m/s.....	122
Figura 5.16. Gráfico das solicitações e deformações para ventos de 8m/s.....	122
Figura 5.17. Gráfico das solicitações e deformações para ventos de 9m/s.....	123
Figura 5.18. Região da extremidade da pá (raiz) antes dos ensaios dinâmicos.....	124
Figura 5.19. Região da extremidade da pá (raiz) após ensaios dinâmicos.....	125
Figura 5.21. Comportamento em fadiga de material compósito em matriz de poliéster reforçado com fibra de vidro (+45°-45°) $V_f=0.38$ $\sigma_f=107\text{MPa}$	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Materiais compósitos produzidos a partir das fibras listadas e matriz polimérica com propriedades $E = 3 \text{ GPa}$, $\sigma_f = 100 \text{ MPa}$, and $\rho = 1.2 \text{ g/cm}^3$. Os termofixos mais utilizados são os poliésteres, vinylesters, e epóxi. Todos têm valores de E entre 3 à 4 GPa e ρ entre 1,1 à 1,3 g/cm ³	66
Tabela 4.1. Dados básicos da turbina eólica Enersud modelo Verne555.....	98
Tabela 4.2. Parâmetros obtidos a partir dos dados de entrada da turbina eólica Enersud.....	102
Tabela 4.3. Valores de força e tensão equivalente.	102
Tabela 4.4. Valores de razões de tensão para realização do ensaio cíclico.....	103
Tabela 4.5. Função distribuição de Weibull para velocidades de vento.	105
Tabela 4.6. Função distribuição de Weibull para razão de tensões (R).....	105
Tabela 4.7. Obtenção do número de ciclos relacionando velocidade do vento e razão de tensões.....	106
Tabela 4.8. Parâmetros ajustados para os ensaios dinâmicos cíclicos.	107
Tabela 5.1. Dados de módulo de elasticidade para corpos de prova em ensaio de tração.	111
Tabela 5.2. Parâmetros obtidos a partir dos dados de entrada da turbina eólica Enersud.....	114
Tabela 5.3. Parâmetros obtidos a partir dos dados de entrada da turbina eólica Enersud.....	115
Tabela 5.4. Parâmetros obtidos a partir dos dados de entrada da turbina eólica Enersud.....	115
Tabela 5.5. Parâmetros obtidos a partir dos dados de entrada da turbina eólica Enersud.....	116
Tabela 5.6. Dados coletados no ensaio de flexão da pá.	117

Tabela 5.7. Dados coletados no ensaios de cíclicos. 120

Tabela 5.8. Dados coletados no ensaio cíclico para velocidade de 5m/s..... 120

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1. Lista de símbolos para equação do (MSC).....	47
Quadro 2.2. Lista de símbolos para equação do (MSC).....	47
Quadro 2.3. Lista de símbolos para equação do (MSC).....	48
Quadro 2.4. Condição de carga de projeto para o modelo simplificado de cargas.	48
Quadro 2.5. Lista de símbolos para equação do (MSC).....	49
Quadro 2.6. Lista de símbolos para equação do (MSC).....	49
Quadro 2.7. Lista de símbolos para equação do (MSC).....	50
Quadro 2.8. Equações para calculo de tensão equivalente.....	51
Quadro 2.9. Faixa do fator de forma e descrição qualitativa do vento associado.....	54
Quadro 3.1. Comparação dos métodos para ensaio de fadiga de aerogeradores.....	76
Quadro 4.1. Características da célula de carga.....	89
Quadro 4.2. Posicionamento dos extensômetros ao longo da pá.....	91
Quadro 4.3. Características do equipamento de aquisição de dados.....	91
Quadro 4.4. Características do equipamento de aquisição de dados.....	93
Quadro 4.5. Declaração de variáveis Equação 4.13.....	106

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

TEEH	Turbina eólica de eixo horizontal	n/a
TEEV	Turbina eólica de eixo vertical	n/a
TEPP	Turbina eólica de pequeno porte	n/a
GFRP	Compósito em matriz poliéster reforçado em fibra de vidro	n/a
MPFE	Método padrão do fator de energia	n/a
WASP	Wind atlas analysis and application program	n/a
MSC	Método simplificado de cargas	n/a
TSP	Razão de ponta de pá – tip speed ratio	n/a
MB	Índice de mérito	n/a
Θ	Orientação da fibra	n/a
ρ	Densidade	kg/m ³
E	Módulo de elasticidade	GPa
σ	Resistência a tração	MPa
w	Velocidade relativa	m/s
V_t	Velocidade angular	m/s
Ω	Rotação angular	rad/s
R	Raio local	rad
ϕ	Ângulo de fluxo	rad
ω	Velocidade angular	rad/s
dF_T	Força tangencial no elemento de pá	n/a
dF_N	Força normal no elemento de pá	n/a
B	Número de pás	n/a
C_N	Coeficiente de força normal	n/a
C_T	Coeficiente de força tangencial	n/a
ρ	Massa específica	kg/m ³
c	Corda	m
dr	Distância entre os elementos de pá	m
C_L	Coeficiente de sustentação	n/a
C_D	Coeficiente de arrasto	n/a

λ	Relação de velocidades de ponta	n/a
R	Raio da turbina	m
α	Ângulo de ataque	rad
β	Ângulo de passo	rad
Γ	Função gamma	n/a
F	Função de Weibull	n/a
C_P	Coeficiente de potência	W
A	Área varrida	m ²
η	Rendimento global	n/a
η_m	Rendimento de máquina	n/a
n	Rotação	rpm
P_r	Potência nominal	W
V_r	Velocidade nominal curva de potência	m/s
δF	Força resultante aerodinâmica	N
δA	superfície da pá	m ²
R_f	Razão de tensões	n/a
σ_{\max}	Tensão máxima	Pa
σ_{\min}	Tensão mínima	PA
σ_f	Tensão de ruptura	MPa
$f(v)$	Função distribuição velocidade do vento	n/a

RESUMO

CHAGAS FILHO, João Gilberto Astrada. **Análise de Fadiga em Pás de Aerogeradores de Pequeno Porte**. Porto Alegre. 2011. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Atualmente a indústria de energia eólica, especificamente os fabricantes das pás de aerogeradores, buscam melhorias no desempenho e nas propriedades dos materiais empregados em tais componentes. As características em relação à fadiga são essenciais no projeto e aplicação dos aerogeradores, em especial nas pás das turbinas eólicas. A literatura apresenta diversas informações em relação à pás de grande porte, no entanto observa-se uma carência em relação à pás de pequeno porte. Assim sendo, para se determinar tais características torna-se fundamental entender o comportamento dos materiais utilizados em condições estáticas para posteriormente se realizar os ensaios cíclicos. O objetivo do presente trabalho consistiu na determinação das principais propriedades mecânicas a tração (módulo de elasticidade e limite de resistência à ruptura) do material utilizado na confecção de pás de aerogeradores de pequeno porte. Como material utilizou-se o compósito de matriz polimérica (poliéster) com reforço em fibra de Vidro do tipo E, segundo informações do fabricante. Corpos de prova foram retirados longitudinalmente em relação ao comprimento da pá, e ensaiados segundo norma NBR 9622. Os resultados obtidos a partir dos ensaios de seis corpos de prova foram analisados, e os valores médios determinados para o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura do material. Posteriormente foi desenvolvido um equipamento capaz de submeter as pás à esforços cíclicos, e através da metodologia que determinou os parâmetros de entrada para a bancada de ensaios, foi possível avaliar as principais características em relação à fadiga do material que constitui a pá.

Palavras-Chaves: Aerogerador, Pás, Fadiga, Ensaios.

ABSTRACT

CHAGAS FILHO, João Gilberto Astrada. **Fatigue Analysis of Small Wind Turbine Blades**. Porto Alegre. 2011. Master. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

Currently the wind energy industry, particularly the wind turbine blade manufacturers seek improvements in performance and materials properties used in such components. The technical features related to fatigue are essential in the design and implementation of wind turbines, especially in wind turbine blades. The specialized literature contains several information regarding the large wind turbine blades, however there is a shortage for small wind turbine blades. Therefore, to determine such characteristics becomes critical to understand the behavior of materials under static conditions to subsequently perform the cyclic stress tests. The purpose of this study was to determine the main tensile testing (tensile modulus and rupture tensile) of material used to produce small wind turbine blades. The material used was extract of the rotor blades consisting polymer matrix (polyester) with glass fiber reinforcement from type E according to manufacturer information. Samples were taken along the blade length, and tested according to NBR 9622. The results obtained from six specimens tests were analyzed, and the average values determined the tensile modulus and rupture tensile of material. Afterwards was developed a device able to submit the wind turbines blades to cyclic stresses, and also through the methodology that determined input parameters for the test bench, it was possible to evaluate the main characteristics for the blade material fatigue.

Key-words: Wind turbine, Blade, Fatigue, Testing.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Energia Eólica

Entre as fontes de energia renováveis, a dos ventos está entre as de maior crescimento entre as demais formas de geração em razão da queda nos custos de produção. As projeções que afirmavam que o custo do kW/h para o ano de 2010 iria sofrer um decréscimo de 5 para 2 centavos de dólar foram superadas (Adegas et al, 2003).

A energia cinética dos ventos provém da radiação solar, sendo que as movimentações das massas de ar ocorrem conforme a diferença de temperaturas da superfície terrestre aliada a diferença de pressões. Aspectos como altura, rugosidade, obstáculos e relevo que compõe uma dada região são determinantes na formação e determinação do potencial eólico no local. Os valores destes parâmetros são considerados e medidos, apresentando estes resultados em mapas eólicos a partir dos quais é possível determinar o potencial de cada região e, portanto, definir o local onde deve se instalar o aerogerador de forma a maximizar a geração de energia (Alé et al, 2009).

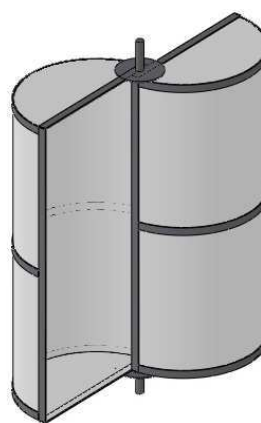
A maneira mais eficiente de converter energia do vento em energia elétrica é oferecida por turbinas eólicas que operam com o princípio de sustentação aerodinâmica. Dentre as turbinas eólicas de eixo vertical que operam com este princípio, encontram-se as turbinas de pás retas e de pás curvas chamadas de tipo Darrieus devido ao seu inventor (Paraschivoiu, 2002). As turbinas com sustentação aerodinâmica por apresentarem maior rendimento que as por princípio de arrasto são mais indicadas para a geração de energia elétrica.

Atualmente muitos aerogeradores de grande porte construídos possuem eixo horizontal em função de sua eficiência, entretanto turbinas eólicas de eixo vertical tipo Darrieus Figura 1.1a e savonius Figura 1.1b também denominada do tipo S é uma turbina de baixa rotação e alto torque o qual pode operar com baixas velocidades de vento predominando no seu funcionamento as forças de arrasto. As TEEV também apresentam outras vantagens a primeira e talvez a mais interessante seja o fato deste rotor captar o vento em todas as direções sem a necessidade de qualquer mecanismo direcionador instalado em sua torre para possibilitar o funcionamento da turbina. O rotor de eixo vertical também simplifica a instalação e manutenção das caixas de engrenagens, quando existirem, e do gerador elétrico por serem acondicionados junto ao solo, reduzindo as solicitações mecânicas na torre e oportunizando a construção de estruturas de menor porte. Porém a captação do vento através de rotores de eixo vertical apresenta algumas desvantagens. Uma delas seria a necessidade da instalação de torres estaiadas Figura 1.1a onde é necessária a instalação de longos cabos para prover sustentação o que pode inviabilizar a instalação de parques eólicos principalmente no mar.



Fonte: www.symscape.com

(a) Turbina eólica de eixo vertical.



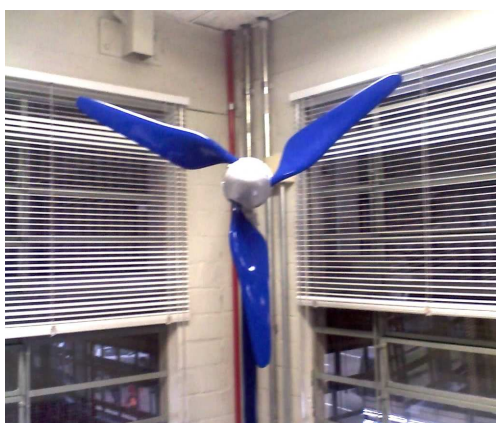
Fonte: www.pucrs.br/ce-eolica

(b) Turbina eólica eixo vertical.

Figura 1.1. Exemplos de aerogeradores de pequeno porte.

O mercado de turbinas eólicas de pequeno porte está crescendo significativamente em todo o mundo. Existem mais de 50 fabricantes de turbinas eólicas de pequeno porte, com portfólio amplo de produtos

contemplando 125 modelos. É notória a dependência de importação para a composição final de aerogeradores de pequeno e grande porte no Brasil. Hoje a energia eólica no Brasil é vista como uma fonte alternativa de energia renovável, abundante e limpa (Adegas et al, 2003). A Figura 1.2a apresenta um exemplo de turbina de eixo horizontal de pequeno porte, Na Figura 1.2b é mostrada um exemplo de turbina de eixo vertical.



Fonte: CE - Eólica

(a) Turbina eólica de eixo horizontal.



Fonte: CE - Eólica

(b) Turbina eólica eixo vertical.

Figura 1.2. Exemplos de aerogeradores de pequeno porte.

Uma hipótese para aplicabilidade de TEPP esta nas áreas remotas, onde o relevo e outras condições climáticas dificultam a instalação tornando-se onerosa a construção de linhas de transmissão para um grupo tão pequeno de clientes, portanto, a geração isolada acaba sendo mais econômica. Ainda os sistemas de geração isolada eólica é mais vantajosa em termos de custo comparado ao modelo fotovoltaico que proporcionalmente ainda tem custo elevado comparado ao sistema isolado eólico (Garcia et al, 2007) entretanto os custos estão em constante mudança e atualmente dependendo das condições de ventos locais o sistema eólico pode se tornar mais caro.

Nesse tipo de sistema tanto a energia eólica quanto a solar podem flutuar durante o dia ou mesmo em questão de horas. Deste modo, eles devem possuir algum meio de armazenamento de energia que possa ser usado mais tarde para suprir as demandas de carga em períodos de baixa produção.

Alternativamente, os sistemas eólicos e fotovoltaicos podem ser ligados em conjunto, originando um sistema híbrido, incluindo ainda um gerador diesel e aumentando a confiabilidade do fornecimento em áreas afastadas e urbanas (Garcia et al, 2007).

De acordo com dados oficiais, mais de dois bilhões de pessoas no mundo vivem em lugares afastados dos grandes centros onde ainda não estão conectadas a nenhum tipo de rede elétrica. Estas localidades têm um grande potencial para o uso de sistemas híbridos isolados da rede elétrica convencional usando geradores diesel associados com aerogeradores ou painéis fotovoltaicos para suprir suas necessidades energéticas. Outro aspecto de fundo social é a criação de mais empregos nestes locais, diminuindo a migração destas pessoas para outras cidades (Alé et al, 2009).

A geração de energia por sistemas isolados tem desempenhos e características de projeto diferentes quando comparados com uma rede elétrica convencional. Isso leva a novos desafios e inicialmente a custos financeiros diferenciados, porém, busca-se a oportunidade de desenvolvimento deste sistema.

1.2. Histórico dos Materiais Utilizados em Pás

É da natureza do homem buscar fontes de energia que facilitem o seu trabalho e que lhe tragam conforto. Muitas fontes foram exploradas, entre elas, o vento que já na idade média era usado por moinhos em toda a Europa com a finalidade de moer grãos (Figura 1.3). Os primeiros moinhos de vento eram montados sobre eixo, o moinho inteiro girava em torno de seu eixo central para ficar de frente para o vento. As pás eram feitas de lona esticada sobre uma armação de madeira, frágeis e muitas vezes não resistiam a uma tempestade. Em 1770, Andrew Meickle aperfeiçoou o modelo de pá existente, sendo esta constituída de placas articuladas mantidas em seu lugar por uma mola que ao sofrer a pressão de um vento forte se abriam sem deixar que o vento causasse estragos (CIEMAT, 2001).



Fonte: www.travelpod.com

Figura 1.3. Moinho de vento, geração de potência mecânica através da captação de energia eólica.

Os moinhos na idade média convertiam a energia dos ventos em energia mecânica e esta era diretamente usada, semelhante ao que atualmente se busca das turbinas eólicas, com a diferença de que nestas o interesse está voltado para a geração de eletricidade.

Em meados do século XIX, estas máquinas evoluíram incorporando contínuas melhorias tecnológicas a partir de elementos mecânicos. As primeiras bombas eólicas que surgiram em 1850 eram rotores de muitas pás montados a um sistema biela-manivela e uma bomba com pistão (CIEMAT, 2001). Em 1890 inicia-se a fabricação de equipamentos com pás metálicas, conhecidos como 'moinho de bombeio americano' (Figura 1.4), onde as turbinas de várias pás estavam iniciando um novo conceito de máquina eólica, mas suas aplicações estavam voltadas exclusivamente para o bombeamento de água do subsolo, o que limitam suas possibilidades de desenvolvimento e expansão.

Atualmente a energia eólica utilizada no bombeamento de água dedica-se ao uso doméstico, em propriedades rurais e pequenos sistemas de irrigação, em virtude da grande quantidade de energia elétrica dispensada para colocar em funcionamento bombas hidráulicas. Esta energia é aproveitada apenas usando a energia mecânica dos ventos para retirar água do subsolo,

sem a necessidade da conversão de energia mecânica para energia elétrica. Este equipamento possui em torno de dezoito pás, pois seu funcionamento consiste em velocidades de giro menores, e em contra partida necessita de torque maior para realizar sua função, diferente dos aerogeradores, que são equipamentos direcionados para geração de energia onde deseja-se velocidades de vento maiores, sendo que o número de pás normalmente se limita a três e o desenho aerodinâmico é mais complexo. Sendo as máquinas eólicas para bombeamento de água de geometria das pás mais simples e funcionamento com velocidades de rotação menores, nestas podem ser utilizados materiais como a madeira e chapas metálicas delgadas para sua construção (Silva et al, 2000).



Fonte: www.travelpod.com

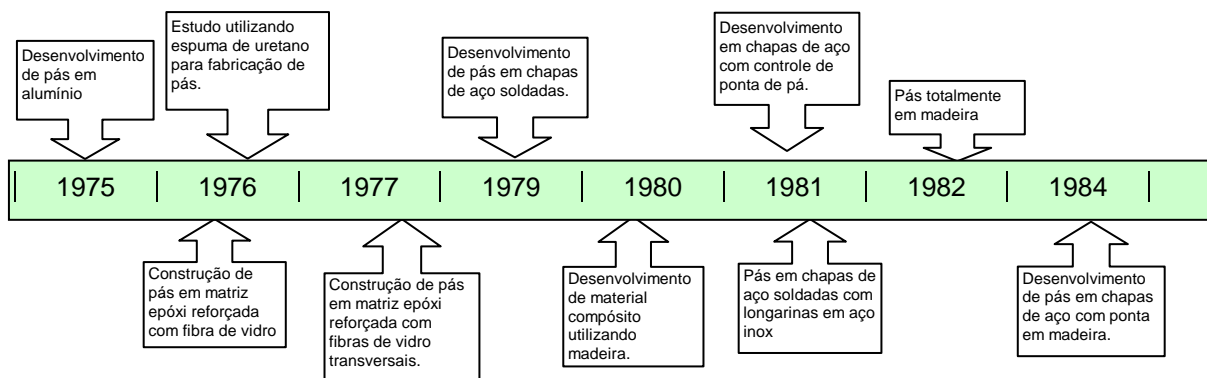
Figura 1.4. Moinho de bombeio americano, aproveitamento direto da energia mecânica para o bombeamento de água.

Os primeiros experimentos utilizaram o alumínio, constituindo as estruturas internas e as placas formando o corpo externo das pás, assim como são construídas as asas de aeronaves. No entanto, a utilização deste processo de fabricação voltado para rotores tornou-se caro e muito susceptível à falhas mecânicas por serem constituídos de muitos rebites e parafusos. Máquinas com pás de até 10 metros de comprimento eram construídas a partir de placas

de fibra de vidro curadas em moldes para este fim, e após isso, unidas através de rebites e parafusos em aço. Este desenvolvimento continua sendo dominante para rotores desta dimensão em países europeus (Clausen e Wood, 2000).

Turbinas eólicas com pás na ordem de 24m de comprimento utilizando fibras de vidro, e rotores com 60m de diâmetro construídas a partir de chapas de aço unidas por solda, foram testadas com sucesso no programa de tecnologia de construção de pás de aerogeradores no centro de pesquisas da Agência Espacial Norte Americana (Spera, 1994).

No entanto, como o mercado encontra-se em crescente expansão, permite mais investimentos em máquinas para enrolamento de fibras, automatizando o processo de fabricação das pás em material compósito, o que provoca a tendência de saída das pás em aço do mercado. Materiais como fibra de carbono são utilizados algumas vezes, mas na maioria das aplicações não proporciona a economia necessária, tornando-se caro o uso deste material. Em centros de pesquisa da NASA várias formas e materiais para turbinas eólicas foram examinados. A Figura 1.5 mostra uma linha de tempo adaptada da cronologia de testes do programa realizados nesta instituição com instalações de campo mostrando a evolução dos materiais naquele período.



Fonte: Adaptado de Spera, David A. (1994)

Figura 1.5. Cronologia da utilização de materiais para fabricação de pás de aerogeradores.

Tanto a fibra de vidro na forma de filamento quanto em fita mostraram-se favoráveis à fabricação através de máquinas automatizadas (Spera, 1994). Mais tarde levaria a redução da mão de obra, redução de custos e melhoria no controle de qualidade, essencial para solucionar problemas nestas estruturas altamente solicitadas mecanicamente. Um exemplo de turbina eólica fabricada atualmente é mostrado na Figura 1.6.



Fonte: www.winwind.fi/

Figura 1.6. Modelo atual de aerogerador de eixo horizontal com pás em resina epóxi reforçadas com fibra de vidro.

A carga sobre pás de aerogeradores é baseada no histórico de funcionamento levando em consideração os requisitos de resistência dos materiais empregados na fabricação. A resistência em fadiga deve ser verificada para atender os requisitos de vida útil. Estes requisitos são estabelecidos por diversos laboratórios e entidades tais como: DNV-Risoe ou

Germanischer Lloyd. Uma variedade de modelos têm sido sugeridos e utilizados para descrever o comportamento em degradação e a evolução do dano nos materiais. Alguns modelos são baseados em observações físicas e mecânicas, e outros modelos empíricos são descrições matemáticas dos dados experimentais. A fim de verificar os modelos e aprovar os materiais utilizados para uma dada vida em fadiga, os ensaios são realizados levando em consideração os aspectos de projeto de rotores. Existe um pequeno número de normas para medir o desempenho em fadiga de materiais compósitos. Segundo Brondsted et al, (2005) o material existente fornece orientações muito breves para teste de tração, com uma tensão axial de solicitações cíclicas e também não estabelecem os procedimentos de fixação, freqüências, ou a redução de dados e, portanto, contribui pouco em aplicações práticas. Posteriormente foi estabelecida uma definição de procedimentos gerais para ensaios de fadiga. No entanto, sugestões de procedimentos e avaliações de dados ainda são vagos e não consideram todas as conclusões e resultados de pesquisas mais recentes. Recentemente em 2009 foi lançada a norma IEC 61400-2, a qual foi concebida a partir da filosofia de segurança e estabelece requisitos para projeto, manutenção, operação e também critérios relacionados ao degradação em fadiga para aplicação em rotores com área varrida de até 200 m².

1.3. Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento, montagem e testes de solicitações cíclicas em pás de aerogeradores de eixo horizontal para aplicações urbanas ou pequenas propriedades rurais. Com esta finalidade foram realizados ensaios estáticos para determinação de propriedades mecânicas dos materiais das pás com o objetivo de avaliar e identificar as principais características em relação à fadiga dos materiais empregados na fabricação das pás.

1.4. Delimitação do Problema

- Construir um dispositivo para ensaios de fadiga em pás de até 2,7m.
- Instrumentar e controlar os principais parâmetros dos ensaios.
- Realizar ensaios estáticos para determinar propriedades mecânicas do material sob avaliação.
- Realizar ensaios nas pás segundo recomendações da IEC (International Electrotechnical Commission) e relatos da literatura.
- Analisar e definir a vida à fadiga das pás.

1.5. Visão geral da dissertação

Esta dissertação foi separada em seis capítulos. O primeiro capítulo trata principalmente da descrição do problema, fazendo uma breve revisão de alguns fatos sobre a energia eólica. Também contém a opinião do autor por meio da revisão bibliográfica julgada interessante pelo mesmo.

O segundo capítulo é uma compilação específica sobre aerogeradores de pequeno porte e sua constituição. Posteriormente são identificadas as forças aerodinâmicas que atuam sobre máquinas, tanto de grande quanto de pequeno porte, apresentado o primeiro caso que trata do mecanismo de desgaste por fadiga relacionada ao método simplificado de cargas oriundo da norma IEC 61400-2 de 2009, e por fim é apresentada a utilização de dados de vento através de uma distribuição de Weibull.

O terceiro capítulo apresenta uma revisão de materiais utilizado em pás de aerogeradores de pequeno porte, suas propriedades mecânicas e como se comportam em condições estáticas e cíclicas. Também destaca os diferentes ensaios estáticos e as propriedades mecânicas levantada pelos mesmos, assim como apresenta outras normas e tipos de ensaios dinâmicos ou de fadiga específicos para aerogeradores.

O quarto capítulo descreve o desenvolvimento e montagem da bancada de ensaios e seu sistema de coleta e aquisição de dados e operacionalização dos equipamentos. Trata do detalhamento passo a passo da metodologia empregada para a realização dos ensaios responsáveis por levantar tanto as propriedades mecânicas dos materiais empregados em pás de aerogeradores em condições estáticas, como a utilização destes resultados responsáveis por nortear a análise do comportamento em fadiga da pá. Basicamente a metodologia para ensaios dinâmicos em escala real consistiu em dois tópicos principais: primeiro a entrada de dados proveniente da pá ensaiada alimentando um conjunto de equações que determinaram as cargas aplicadas durante o ensaio, e segundo a tratamento dos dados de vento coletados de uma determinada região e compilados através de uma distribuição de Weibull, culminando no número total de ciclos para o qual deve ser realizado o ensaio.

O quinto capítulo apresenta os resultados dos ensaios estáticos somando um total de quatro tipos, e também os resultados dos ensaios dinâmicos realizados em escala real para a pá, que neste caso foi de 2,7 m de comprimento. São discutidas extensivamente as relações entre os seis diferentes ensaios e levantados os dados finais a cerca do desgaste em fadiga.

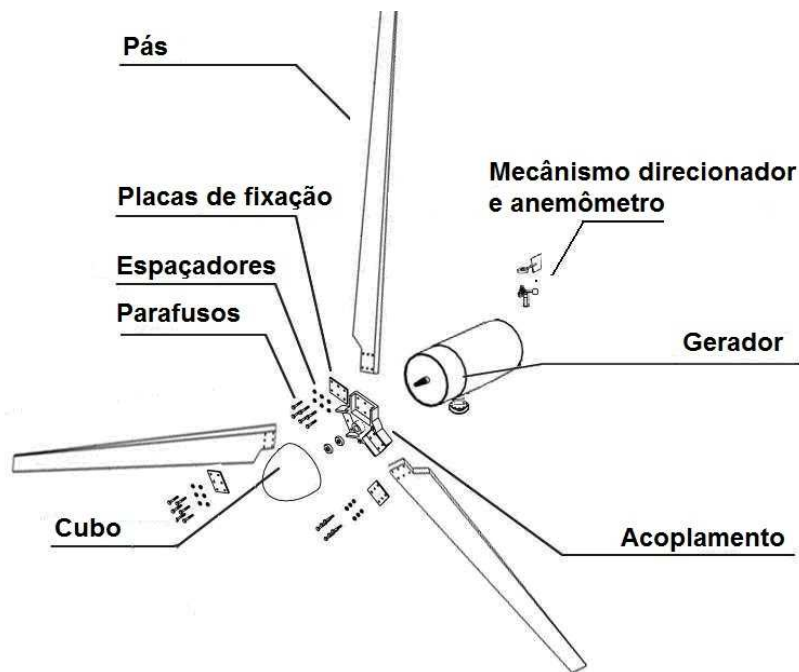
O sexto capítulo é o último capítulo desta dissertação. Este apresenta as conclusões gerais do trabalho de pesquisa empreendido. Além disso são sugeridos outros trabalhos a serem desenvolvidos na presente linha de pesquisa.

2. AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE: CARGAS E NORMAS

O assunto abordado neste capítulo está focado nas pás que constituem os rotores de aerogeradores de pequeno porte e adicionalmente algumas informações pertinentes sobre máquinas de grande porte. O rotor e suas três pás constituem uma estrutura que pode estar sujeita a falha dependendo da condição de operação. Os aspectos básicos de projeto para um rotor eólico estão na seleção do material e no formato das pás. O material deve ser rígido, forte e resistente à intempéries. A forma deve ser aerodinâmica, semelhante aos perfis das asas de aeronaves, procurando privilegiar o desempenho aerodinâmico. No entanto, devem reduzir possíveis pontos de concentração de tensões fortalecendo o componente (Brondsted et al, 2005).

2.1. Caracterização de um Sistema Eólico.

A turbina eólica de eixo horizontal TEEH tem como aplicação sistemas eólicos autônomos com carregamento de baterias. Geradores síncronos de ímã permanente vêm sendo utilizados em pequenos sistemas de geração de energia, particularmente em sistemas eólicos. São tipicamente construídos com ímãs fixados ao rotor e enrolamentos trifásicos no estator. Sua corrente alternada é convertida em corrente contínua através de um retificador de corrente de onda completa. Esta é uma opção atrativa em aplicações em energia eólica, primeiramente pelo fato de não ser necessária energia externa para excitar o campo magnético, e também pelo fato de o atrito mecânico ser menor devido à ausência de escovas no gerador (Alé e Lopez, 2007). A topologia do sistema de aerogerador de pequeno porte é ilustrada na Figura 2.1.



Adaptado: www.uscg.mil

Figura 2.1. Topologia de uma TEEH.

Ao final dos anos 70, pequenos rotores eólicos foram projetados para acionar geradores com intenção de fornecer carga para baterias de sistemas autônomos. Com o surgimento de turbinas com diâmetro de rotores de 12 m foi possível ligá-las a uma rede elétrica local, pois possuíam carga necessária para tanto. Em muitos aspectos, as turbinas eólicas de pequeno porte se assemelham com as de grande porte. Um dos aspectos que tornam diferentes as TEEH de pequeno porte das maiores é a necessidade de um leme na calda do equipamento para que o mesmo possa buscar a direção em que o vento esta soprando no momento. A maioria das turbinas de pequeno porte vendidas até o momento é de eixo horizontal. Apesar da quantidade de projetos iniciados visando à penetração no mercado das TEEV, poucos permaneceram, pois segundo alguns testes, os projetos de máquinas desta natureza não eram competitivas em termos de custos com projetos de eixo horizontal (Alé et al, 2004). Portanto, existe um número limitado de fabricantes que produzem as TEEV ao redor do mundo.

O conjunto de uma turbina eólica consiste de uma série de componentes mecânicos e elétricos necessários para converter força mecânica recebida do rotor em energia elétrica. As TEEH são colocadas sobre torres, por isso é importante que elas sejam projetadas para receberem o mínimo de manutenção possível. Algumas TEEH de pequeno porte e ao menos uma TEEH de médio porte tem seu eixo ligado direto do rotor até o gerador, não necessitando de caixa de engrenagens ou outro eixo para o gerador.

2.1.1. Rotor

Durante anos tentou-se consolidar uma variedade de configurações de rotores em máquinas de pequeno porte. Até meados de 1980, turbinas de pequeno porte usadas para carregar baterias possuíam 2 pás em seu rotor. Ainda muito anterior, alguns rotores possuíam 4 pás, mas atualmente está consagrado o modelo com 3 pás, que provêm maior estabilidade dinâmica em relação as outras configurações. Sendo assim, poucas empresas Européias permanecem insistindo na produção de máquinas pequenas impulsionadas com apenas uma pá ou 2 pás, conforme Figura 2.2 (Spera, 1994).



Fonte: www.wind-energy-the-facts.org/

(a) Rotor em uma única pá.



Fonte: www.trendir.com

(b) Rotor em duas pás.

Figura 2.2. Turbinas eólicas de eixo horizontal.2.1.2. Pás

Com exceção de formas produzidas por pultrusão¹ ou extrusão, a maioria das pás em turbinas de pequeno porte tem perfil aerodinâmico torcido e cônico. Por isso, estes processos são mais adequados para fornecer componentes para indústria das pequenas TEEH. No entanto, de forma limitada são usados perfis provenientes de extrusão em alguns projetos de pequenas TEEV. Nos anos 70 foram produzidas turbinas eólicas na Austrália com 3 pás extrudadas em alumínio que normalmente são usadas para rotores Darrieus pequenos (Paraschivoiu, 2002). Um projeto sobre o comando do departamento de energia americana foi o primeiro no uso de pás em fibra de vidro produzidas pelo processo de pultrusão, sendo ampliados posteriormente os diâmetros dos rotores e realizados inúmeros testes de campo com máquinas de eixo horizontal com capacidade produtiva de 1 – 10 KW (Mandell et al, 2003).

Outro material freqüentemente usado em aerogeradores de pequeno porte é a madeira, sendo muito empregada na fabricação de rotores de pequeno porte, para perfis aerodinâmicos simples, as quais são como as pás em fibra de vidro de baixo custo de produção, forte e resistente à fadiga (Peterson e Clausen, 2004). A Figura 2.3. mostra um exemplo de pás de pequeno porte produzidas em resina epóxi reforçada com fibras de vidro.



Fonte: www.nrel.gov

Figura 2.3. Pá de rotor eólico de pequeno porte.

¹ Pultrusão é um processo de fabricação contínuo de perfis constituídos por fibras e resinas termo endurecidas, que consiste em “puxar” as fibras embebidas na resina matriz através de uma fieira ou molde.

2.1.3. Freios de Ponta de Pá

Destacam-se 2 tipos de dispositivos de parada fixados na própria pá de turbinas eólicas. Um deles é o *tip brake* que são chapas metálicas ou de fibra de vidro colocadas paralelamente e no fim de cada uma das pás dos rotores. Em uma situação de emergência, estes dispositivos operam centrifugamente e agem de forma perpendicular em reação às pás, reduzindo sua velocidade por efeito de arraste. Trata-se de um mecanismo simples, efetivo e tem salvado vários aerogeradores de pequeno porte do colapso. No entanto, *tip brakes* não são aerodinamicamente partes de uma pá, e quando empregados, não reduzem a sustentação aerodinâmica. Quando não ativados, eles adicionam significativo arraste, reduzindo a eficiência do rotor (Spera, 1994).

Outra categoria de dispositivo chamado de freio de ponta é o *Pitchable tips*, diferem dos *tip brakes* porque eles são parte integral das pás. Quando ativados, eles são girados para dentro de seu plano. Isto não só cria arrasto perto da ponta, mas também reduz cerca de 10% a operação de cada pá, porque é próximo da extremidade que é criada a maior parte do coeficiente de sustentação e com as pontas ativadas reduz drasticamente o torque do rotor. Este efeito pode ser maior se as mesmas não operarem adequadamente (Spera, 1994).

2.1.4. Torres

Para posicionar o rotor a uma altura onde os ventos são mais fortes, as torres para turbinas eólicas de pequeno porte são geralmente colocadas a uma altura maior em relação à área varrida, que é a área compreendida dentro do diâmetro de giro do rotor em relação às máquinas de grande porte.

Ao contrário do predomínio de torres autoportantes para turbinas comerciais de grande porte, as torres estaiadas (Figura 2.4.(b)) tornaram-se mais populares para turbinas de pequeno porte. Torres estaiadas, particularmente estaiadas e treliçadas, são menos onerosas e muitas vezes mais fáceis de instalar do que as torres autoportantes da mesma altura. A

instalação da torre de treliça estaiada requer apenas ferramentas manuais simples e um veículo com guincho. Torres apenas de treliça (Figura 2.4.(a)) são semelhantes às utilizados para TEEH maiores. Turbinas de pequeno porte são geralmente montados em mastros de torres que são constituídos a partir de uma variedade de materiais, incluindo madeira, fibra de vidro, concreto e aço tubular. Para as turbinas a partir de 1 kW até 5 kW, postes de madeira oferecem uma opção barata de torre. Postes de madeira são ajustados para diferentes cargas e podem ser dimensionados para as cargas produzidas pela turbina. Os problemas de transporte e instalação de torres de madeira e fibra de vidro são semelhantes. Torres de concreto e fibra de vidro têm disponibilidade limitada nas áreas mais remotas que comumente necessitam de aerogeradores (Spera, 1994).



Fonte: www.smallwindenergy.ca/

(a) Torre treliçada.



Fonte: www.smallwindenergy.ca/

(b) Torre estaiada.

Figura 2.4. Torres para aerogeradores de pequeno porte.

2.1.5. Geradores CC

O uso de geradores de corrente contínua para turbinas de pequeno porte é determinado pelo conjunto rotor gerador. Em locais remotos onde é necessário carregar baterias são utilizados geradores de corrente contínua.

Projetistas escolhem freqüentemente geradores por indução para aplicações onde o aerogerador será conectado à rede elétrica (Alé et al, 2005). Durante os anos 30 era comum o uso de aerogeradores para carregar banco de baterias CC. Neste equipamento a corrente elétrica passava diretamente do rotor do gerador por escovas este sistema gera atrito o que torna a produção de energia menor em relação aos geradores de imã permanente. Outra vantagem da utilização de geradores de imã permanente é a redução na freqüência de manutenção em relação aos geradores que utilizavam escovas (Alé et al, 2005).

2.1.6. Alternadores

Muitos aerogeradores de pequeno porte atualmente são construídos usando alternadores, os quais usam materiais mais eficientes em relação aos geradores CC, onde a corrente passa fora do estator. Os anéis de um alternador comum transportam apenas a corrente suficiente para criar o campo magnético, portanto, não há necessidade de substituir escovas reduzindo custo de manutenção. A saída em corrente alternada é retificada para corrente contínua para carregar baterias. Em alguns casos, a tensão variável CA é primeiro retificada para CC, então é invertido de volta para freqüência constante para entregar a energia produzida a rede elétrica. Isso é chamado de sistema elétrico CA/CC/CA (Pereira, 2004).

2.1.7. Inversores

Para produzir freqüência e tensão constantes para um alternador de velocidade variável, algumas formas de inversores são utilizadas. Inversores também convertem CC do banco de baterias para CA da rede elétrica convencional. Alguns inversores usavam banco de baterias CC para conduzir um conjunto motor gerador chamados inversores rotativos para ter sua própria autonomia em corrente alternada (Pereira, 2004).

Em aplicações interconectadas, inversores síncronos ou de linha comutada são usados para converter a saída do alternador para uma linha AC. O inversor síncrono usa o sinal da forma de onda da linha como sinal para disparar ou comutar a ponte de tiristores. Os tiristores agem como portas que permitem a passagem de corrente com tensão apropriada conforme o necessário para a produção de uma forma de onda de corrente alternada, seguindo a mesma da energia elétrica da concessionária. Os inversores síncronos são suscetíveis a variações de transientes de linha e são dispendiosos em questão de reparo, contudo, funcionam de forma confiável em centenas de localidades nos Estados Unidos (Spera, 1994).

2.1.8. Geradores de Indução

Geradores por indução são comuns na indústria de aerogeradores em todo mundo. Eles se adaptam a diversas aplicações e são acessíveis quando comparados com alternadores. Não distante, alguns fabricantes têm usado geradores por indução em turbinas eólicas de pequeno porte. Este foi o tipo de aerogerador de uso mais abrangente nos Estados Unidos, atingindo o pico da produção em 1980-1981. Alguns fabricantes permaneceram no mercado até hoje, porque, a maior parte dos projetos de geradores por indução são adequados para turbinas de médio porte (Adegas et al, 2003).

2.1.9. Curvas de Potência

Também chamadas de curvas características de turbinas eólicas, expressam a característica em termos de desempenho de máquinas eólicas. A medida que a turbina inicia seu giro com uma velocidade inicial (V_i), e conforme a intensidade do vento, sua rotação irá aumentar de forma a aumentar proporcionalmente a potência gerada com o aumento da velocidade do vento até atingir a velocidade nominal (V_r), que por sua vez mantida acima de (V_r) garante o ponto de maior eficiência do aerogerador, conseqüentemente atingindo sua potência nominal (P_r). Conforme Alé et al. 2002 os

aerogeradores possuem um sistema de controle que atua estabilizando a potência produzida para velocidades superior a velocidade nominal (V_r), ou seja, atua no sentido de manter a mesma potência para outras velocidades, procurando torná-la o mais próxima possível da potência nominal (P_r) e constante impactado positivamente na qualidade de fornecimento de energia. Ainda quando a máquina atinge velocidades de rotação muito elevadas, o sistema de freios atua paralisando a rotação e também o fornecimento de energia, este fenômeno ocorre quando a velocidade de giro é tão, alta atingindo a velocidade limite projetada, também chamada de velocidade de parada (V_{co}) ou velocidade de *cut-off*. A Figura 2.5 mostra a curva de potencia para TEEH fornecida do modelo verne555 do fabricante enersud.

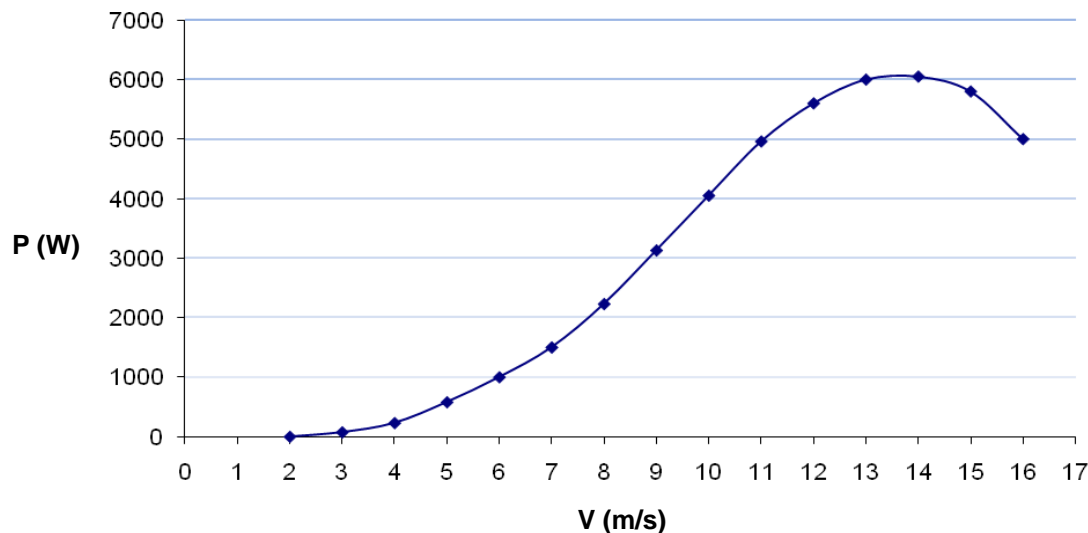


Figura 2.5. Curva de potência de aerogerador de pequeno porte.

Para cálculo da potência nominal (P_r) é utilizada a Equação 2.1, retirando o valor da velocidade nominal (V_r) da curva de potência

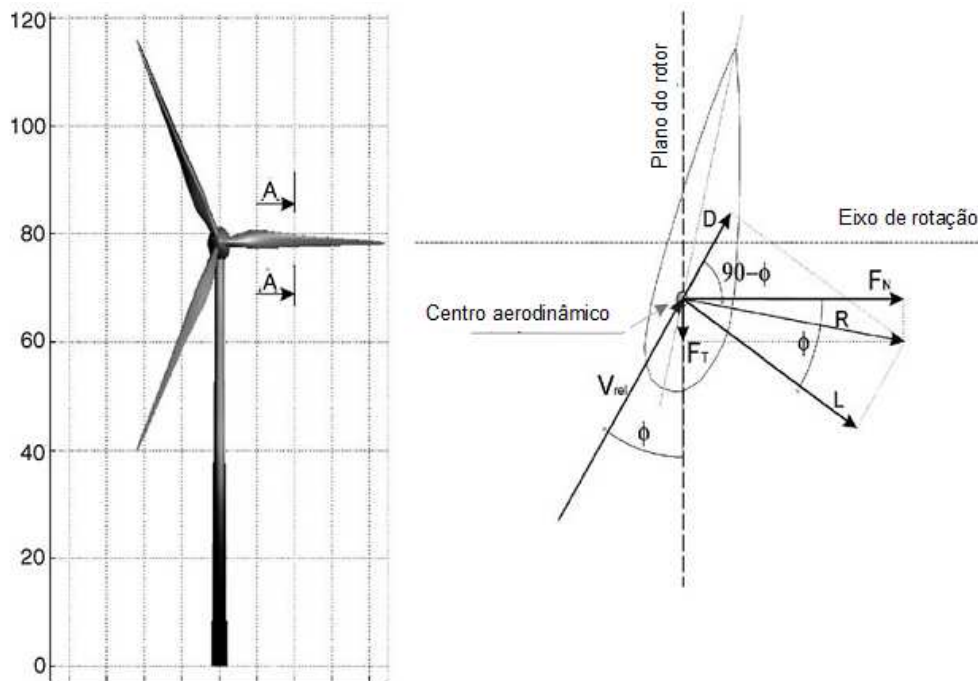
$$P_r = \frac{1}{2} \rho A V_r^3 C_p \eta_m \quad (2.1)$$

onde A é a área de giro do rotor, ρ é massa específica do ar. O rendimento global do sistema eólico é o produto do coeficiente de potência C_p pelo rendimento da máquina η_m , o qual é considerado de bom desempenho quando

atinge valores em torno de 30%. Contudo, turbinas eólicas comerciais têm seu rendimento global de 15 a 30%.

2.2. Cargas Atuantes em Pás de Turbinas Eólicas

As pás são divididas segundo a teoria de elemento de pá em um número discreto de seções com corda $c(r)$ e distância dr (Wenzel, 2007). Na Figura 2.6 se apresentam detalhes de um elemento de pá e as definições das velocidades, ângulos e forças aerodinâmicas.



Fonte M. Jureczko et al. (2005)

Figura 2.6. Cargas aerodinâmicas sobre aerogeradores.

Considerando B o número de pás as forças de sustentação e arrasto originam uma força axial e uma força tangencial atuando a uma distância r do centro do rotor, definidas por:

$$dF_N = BC_N \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (2.2)$$

$$dF_T = BC_T \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (2.3)$$

Os coeficientes normal e tangencial são definidos como:

$$C_N = C_L(\alpha) \cos \phi + C_D(\alpha) \sin \phi \quad (2.4)$$

$$C_T = C_L(\alpha) \sin \phi - C_D(\alpha) \cos \phi \quad (2.5)$$

onde C_L e C_D são os coeficientes de sustentação e arrasto do perfil aerodinâmico.

Já a relação entre a velocidade de corrente livre e a velocidade tangencial da ponta da pá é definida como relação de velocidade de ponta Equação 2.6.

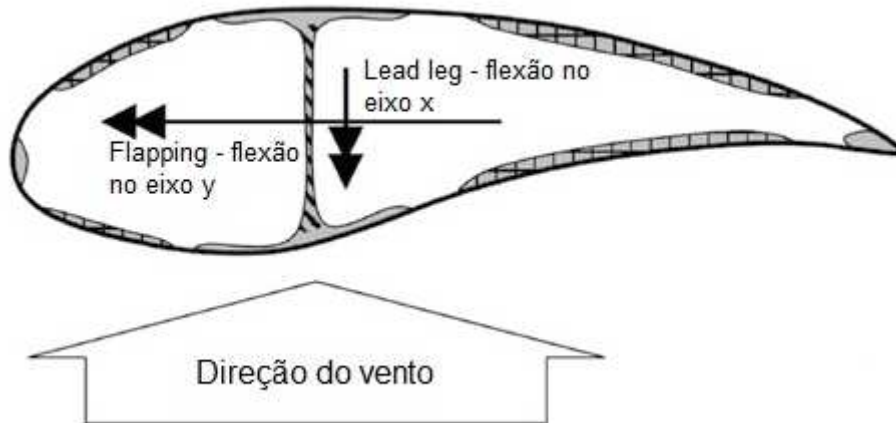
$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_0} \quad (2.6)$$

2.2.1. Inércia, Gravidade e Forças Atuantes

Essas forças ocorrem em função da massa das pás, a rotação e a gravidade, contribuem para o total das forças atuantes. Uma combinação de forças aerodinâmicas, gravitacional e inercial leva ao mesmo tempo a dois movimentos significativos: *flapping*, movimento de flexão da pá para fora do seu plano de rotação, causado fundamentalmente pela variação do fluxo de vento. E o *lead-leg* que é essencialmente causada pela rotação da pá em funcionamento, em função do seu campo gravitacional (Epaarachchi, 2002).

A Figura 2.7 mostra as forças que atuam sobre uma pá eólica em funcionamento. A força centrífuga que atua sobre a pá em funcionamento cria um momento que age contra a pressão aerodinâmica. Portanto, as forças

centrífugas reduzem a deformação por flexão causada pelas cargas aerodinâmicas.



Adaptado: Hayman B. et al. (2008)

Figura 2.7. Forças aerodinâmicas e rotacionais sobre pás.

Desde que a força resultante aerodinâmica seja (δF) agindo sobre a superfície da pá (δA) por meio de um raio (r) na direção Y (nota: as forças gravitacionais e a componente normal da pressão aerodinâmica são perpendiculares ao plano *flapping*) sobre uma lâmina em operação constante por meio da velocidade rotacional (Ω) (< velocidade nominal de operacional). Neste instante, o momento de flexão total na base em torno do eixo perpendicular ao eixo de rotação da pá ($M_{direção\ flapping}$) pode ser determinado por:

$$M_{direçãoFlapping} = \sum_{comp.pá} \left(\sum_{corda} \delta F r - \sum_{corda} \delta M \Omega^2 r d \right) \quad (2.9)$$

Com um aumento na velocidade maior que a velocidade nominal, a deflexão da pá (d) tende a aumentar devido à carga aerodinâmica. No entanto, o aumento da força centrífuga e o aumento da velocidade da turbina, diminuindo o momento de flexão na base da pá $M_{direçãoFlapping}$.

2.2.2. Efeito da Frequência e Razão de Tensões.

Devido à natureza viscoelástica dos materiais da matriz em compósitos, verificou-se que aumentando a frequência de aplicação da carga para a maioria dos polímeros e compósito ocorre o prolongamento da vida em fadiga, desde que a temperatura da amostra mantenha-se inalterada. Para frequências mais altas, a temperatura do compósito sobe e uma diminuição da vida em fadiga ocorre se o aumento de temperatura é significativo. Esse comportamento é devido ao complexo comportamento transiente e dinâmico da matriz de material visco elástico. Portanto, testes em frequência maiores podem alterar as características do material (Mandell et al, 2003).

Matrizes como epóxi mostraram ter maior vida em fadiga quando submetidas à compressão do que à tração. Os dados obtidos para matriz epóxi reforçada com fibra de vidro na razão de tensão $R = -1$ mostram boa resistência mesmo se as solicitações em compressão forem inferiores. Portanto, isso não implica que a falha é causada pelo modo de compressão.

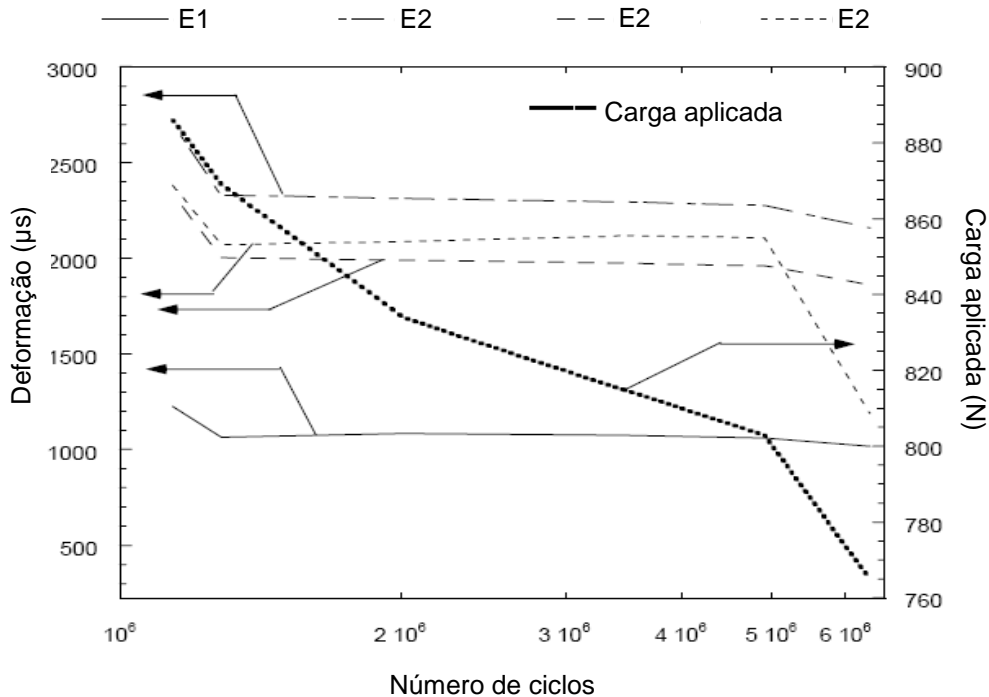
O modelo apresentado em Epaarachchi, 2002 está em concordância com as previsões e dados experimentais encontrados para uma ampla gama de polímeros reforçados com fibra de vidro. Os resultados de testes de estáticos sugerem a utilização de um conjunto de 13 níveis diferentes de carga em razões de tensão dadas pela Equação 2.10.

$$R_f = \frac{\sigma_{mín}}{\sigma_{máx}} \quad (2.10)$$

Portanto, para ensaios dinâmicos completos de pás em bancada é proposto testes de fadiga com um *range* de razões de tensão que vão de $R = 0$ até $R = 0,9$ associado a valores de frequência que evitem o aquecimento da amostra, são suficientes para prever a vida à fadiga nas curvas tensão por número de ciclos (S-N) para um compósito em fibra de vidro.

O gráfico da Figura 2.8 é um exemplo de curva carga deformação pelo número de ciclos em ensaio dinâmico verificado o comportamento do material

através do posicionamento de quatro extensômetros e medição de cargas no ponto de aplicação de forças gerando as tensões necessárias para a realização do experimento.



Adaptado: (Epaarachchi, 2002).

Figura 2.8. Curva carga, deformação e número de ciclos.

2.3. Método Simplificado para Cálculo de Cargas em Turbinas Eólicas de Pequeno Porte.

O equacionamento para a composição dos esforços que são utilizados nos testes em laboratório compreendidos nesta dissertação trata do método simplificado de cargas normalizado pela IEC. A norma (IEC 61400-2, 2009) foi lançada recentemente com o propósito de oferecer um método simples e confiável para avaliação de segurança e também preencher algumas deficiências deixadas pela norma (IEC TS 61400-23, 2001) que trata da certificação de máquinas de grande porte.

A consolidação da (IEC 61400-2, 2009) deve ocorrer na medida em que a mesma seja utilizada por diferentes avaliadores e fabricantes num esforço de

cooperação para que os dados sejam compartilhados, melhorando dessa forma as questões de aplicabilidade dos testes e criando novas oportunidades para melhoria de projeto de máquinas de pequeno porte. Baseado no rigoroso processo de certificação de turbinas eólicas de grande porte, a norma IEC tem como objetivo contribuir dando apoio ao projeto de pequenas turbinas eólicas.

Turbina eólica de pequeno porte é definida como equipamento que possui área varrida pelo rotor (A) com menos de 200 m^2 , o qual corresponde a uma potência em torno de 50 kW . A norma prevê a utilização destes mesmos procedimentos para as micro-turbinas como as de área varrida de 2 m^2 ou menos, já que elas podem ser avaliadas, independentemente da sua torre, pois muitas têm aplicações urbanas e são instaladas em terraços de edifícios ou telhados de residências. Para todas as outras turbinas, a torre deve ser avaliada em conjunto com a turbina.

O objetivo é comparar a simplicidade do equacionamento do método simplificado de cargas (MSC) com os procedimentos utilizados rotineiramente para certificação de máquinas de grande porte chamado de modelagem aeroelástica que envolve o emprego de estrutura computacional mais robusta e precisa em função da natureza estocástica de dados de entrada como mudança na direção do vento e rajadas. Talvez o principal problema com o modelo aeroelástico se deva ao alto custo do software ou a grande quantidade de tempo necessária para sua implementação levando este método a ser raramente utilizado em turbinas eólicas de pequeno porte.

Portanto, MSC é dedicado à turbinas eólicas de pequeno porte TEPP, sendo desenvolvido como uma alternativa menos onerosa em relação à modelagem complexa e dispendiosa do modelo aeroelástico. Talvez o maior ônus do modelo simplificado seja justamente o grau de simplificação de suas equações cujos coeficientes de segurança sejam ligeiramente elevados.

Este texto dedica-se apenas a descrever o caso A do MSC (IEC 61400-2, 2009) no que diz respeito ao desgaste normal de utilização, ou seja, a degradação do material das pás devido à fadiga.

Como a partir das equações extraídas da norma é possível calcular as tensões equivalentes sobre as pás de qualquer máquina de pequeno porte

estes valores foram tomados como referência para aplicações em testes dinâmicos.

2.3.1. Esforços Cíclicos Sobre Pás e Eixo de Turbinas Eólicas.

Para certas configurações de turbinas, as cargas podem ser calculadas com base em equações simples para um conjunto limitado de casos de carga. No entanto, se a configuração da turbina não cumprir as exigências destas configurações as equações simplificadas não podem ser utilizadas. Então o método aeroelástico pode ser usado como alternativa na definição de medidas de cargas utilizadas. As configurações de turbinas capazes de usar as equações simplificadas devem satisfazer os seguintes requisitos:

- eixo horizontal;
- rotor composto por duas ou mais pás;
- pás em balanço;
- cubo rígido (não oscilatório).

A configuração da turbina pode utilizar um rotor barlavento ou sotavento rotor, que pode operar em velocidade de vento constante ou variável; ter mecanismo de controle de passo ativo ou passivo, assim como controle de passo fixo. O modelo simplificado de carga usa os seguintes parâmetros de entrada:

- velocidade de rotação de projeto, (n_{proj});
- velocidade do vento de projeto, (V_{proj}) ($1,4V_m$ média da velocidade do vento);
- torque do eixo de projeto, (Q_{proj});
- guinada máxima, ($\omega_{g,max}$);
- velocidade de rotação máxima, (n_{max}).

A equação 2.11 abaixo define respectivamente a razão de ponta de pá (λ) e a velocidade angular do rotor (n_{proj}).

$$\lambda_{proj} = \frac{R}{1,4.V_m} \cdot \frac{\pi.n_{proj}}{30} \quad (2.11)$$

Quadro 2.1. Lista de símbolos para equação do (MSC).

Incógnita	Descrição	Unidades
λ_{proj}	Razão de ponta de pá (projeto)	n/a
n_{proj}	Velocidade de projeto do rotor ¹	RPM
R	Raio do rotor	m
V_m	Média anual de velocidade de vento na altura do hub	m/s
π	Constante: 3,1415	n/a

A rotação de projeto é definida levando em consideração condições aerodinâmicas. Entretanto, a velocidade máxima de rotação é limitada pelo mecanismo de segurança que impede o dano do equipamento por excesso de velocidade de rotação. A potência de projeto, (P_{proj}) é determinada em função da velocidade do vento de projeto do rotor (n_{proj}) com a carga nominal elétrica conectada, ou seja, com a máquina instalada. O torque de design, Q_{proj} , é encontrado usando a seguinte equação:

$$Q_{proj} = \frac{30000 \cdot p_{proj}}{\eta \pi 30 n_{proj}} \quad (2.12)$$

Quadro 2.2. Lista de símbolos para equação do (MSC).

Incógnita	Descrição	Unidades
Q_{proj}	Torque no rotor (projeto)	Nm
n_{proj}	Velocidade de projeto do rotor	RPM
P_{proj}	Potência de projeto	kW
η	Eficiência de transmissão	n/a
π	Constante: 3,1415	n/a

A eficiência, η , deve ser satisfeita segundo as condições para turbinas de pequeno porte:

$$\eta = 0,6 + 0,000005 \cdot P_{proj} \quad \text{para} \quad P_{proj} \leq 20000W \quad (2.13)$$

¹ A velocidade de projeto n_{proj} é um dos casos que fazem referência a norma IEC 61400-2 que possui uma nomenclatura diferenciada dos demais textos de energia eólica onde, por exemplo, a velocidade angular pode ser representada por Ω .

$$\eta = 0,7 \quad \text{para} \quad P_{proj} > 20000W$$

Quadro 2.3. Lista de símbolos para equação do (MSC).

Incógnita	Descrição	Unidades
η	Eficiência de transmissão	n/a
P_{proj}	Potência de projeto	kW

Para o projeto de TEPP existem algumas situações o qual são identificadas conforme o tipo apropriado de análise. Para a norma IEC 61400-2, (2009) estas situações são indicadas pelas letras 'F' e 'U' o qual F Quadro 2.4 refere-se a análise de cargas de fadiga para ser utilizado na avaliação da resistência em fadiga, U se refere à análise que excedem o limite de ruptura como tal essas análises excedem a resistência do material. As diversas situações ou condições de de carga de projeto estão no Quadro 2.4.

Quadro 2.4. Condição de carga de projeto para o modelo simplificado de cargas.

Situação de projeto	Condição de carga	Tipo de análise
Produção de energia	A Operação normal	F
	B Orientação	U
	C Erro de guinada	U
	D Empuxo máximo	U
Produção de energia mais ocorrência de falha	E Velocidade de rotação máxima	U
Desligamento	F Curto circuito na conexão	U
Modo em espera (modo livre ou imobilizado)	G Desligamento (parada)	U
Parado em condições de falha	H Carregamento de vento em modo de espera	U
	I Carregamento de vento em modo de espera (exposição máxima)	U
Manutenção e reparo	J Indicado pelo fabricante	U

Fonte: adaptado IEC 61400-2, (2009).

As cargas de projeto em situações onde o aerogerador opera normalmente são cargas de fadiga. Para este caso se utiliza um intervalo de valores de cargas constantes, tanto para o eixo quanto para as pás, sendo esses intervalos dados a seguir. Os intervalos devem ser considerados na avaliação da fadiga como valores de pico a pico. Os valores médios dos níveis de carga podem ser ignorados. Portanto, para o cálculo de cargas em pás tem-se as seguintes equações:

$$\Delta F_{zB} = 2 m_B R_{cog} \omega_{n,proj}^2 \quad (2.14)$$

Quadro 2.5. Lista de símbolos para equação do (MSC).

Incógnita	Descrição	Unidades
ΔF_{zB}	Força centrífuga na raiz da pá (eixo-z)	N
R_{cog}	Distância radial entre o centro de gravidade da pá e o centro do rotor.	m
ω_n	Velocidade de rotação do rotor (projeto)	Rad/s
m_B	Massa da pá	Kg

$$\Delta M_{xB} = \frac{Q_{proj}}{B} + 2 m_B g R_{cog} \quad (2.15)$$

Quadro 2.6. Lista de símbolos para equação do (MSC).

Incógnita	Descrição	Unidades
ΔM_{xB}	Momento fletor <i>lead-lag</i> na raiz da pá (eixo-x)	Nm
R_{cog}	Distância radial entre o centro de gravidade da pá e o centro do rotor	m
Q_{proj}	Torque do rotor (projeto)	Nm
B	Numero de pás	n/a
M_b	Massa da pá	kg
g	Aceleração devido a gravidade: 9,81	m/s ²

$$\Delta M_{yB} = \frac{\lambda_{proj} Q_{proj}}{B} \quad (2.16)$$

Quadro 2.7. Lista de símbolos para equação do (MSC).

Incógnita	Descrição	Unidades
ΔM_{yB}	Momento fletor (flapwise) na raiz da pá (eixo-y)	N
λ_{proj}	Razão de ponta de pá (projeto)	n/a
Q_{proj}	Torque no rotor (projeto)	Nm
B	Numero de pás	n/a

As cargas que provocam a fadiga em pás de aerogeradores são normalmente observadas na extremidade da pá próxima ao cubo ou na junção que une a pá e o cubo. O cálculo de tensões é a combinação das cargas centrífugas F_{zB} e os momentos de fletores (M_{xB} e M_{yB}).

2.3.2. Componente de Tensão Equivalente.

Seguindo os cálculos MSC, cada uma das forças e momentos são combinados para obter o nível de tensão limite nos principais carregamentos que os componentes são expostos. Para o eixo principal e a raiz ou extremidade da pá são usadas as equações indicadas na Quadro 2.8 como cargas equivalentes ou carga chave. Para o cálculo dos níveis de tensão equivalente devem ser levados em consideração os seguintes fatores:

- Variações de tensão ao longo do componente;
- Concentração de tensões;
- O tamanho e a direção da carga ou tensão resultante;
- Variações das dimensões dos componentes e espessura;
- Tratamento de superfície dos componentes;
- O tipo de carregamento no componente;
- Qualquer efeito sobre a fabricação, como soldagem, usinagem etc.

Quadro 2.8. Equações para cálculo de tensão equivalente.

Solicitação	Raiz circular da pá	Raiz retangular da pá	Eixo do rotor
Carga axial	$\sigma_{zB} = \frac{F_{zB}}{A_B}$	$\sigma_{zB} = \frac{F_{zB}}{A_B}$	$\sigma_{x-eixo} = \frac{F_{x-eixo}}{A_{eixo}}$
Flexão	$\sigma_{MB} = \frac{\sqrt{M_{xB}^2 + M_{yB}^2}}{W_B}$	$\sigma_{MB} = \frac{M_{xB}}{A_{xB}} + \frac{M_{yB}}{A_{yB}}$	$\sigma_M = \frac{M_{eixo}}{W_{eixo}}$
Cisalhamento	Desprezível	Desprezível	$\sigma_{M-eixo} = \frac{M_{x-eixo}}{2W_{eixo}}$
Combinação (carga axial + flexão)	$\sigma_{eqB} = \sigma_{zB} + \sigma_{MB}$	$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_{x-eixo} + \sigma_{M-eixo})^2 + 3\tau_{M-eixo}^2}$	

Fonte: adaptado IEC 61400-2, (2009).

2.4. Utilização de Dados de Ventos

Geralmente, grandes turbinas eólicas são projetadas para, pelo menos, uma vida útil de 20 anos. Antes de desenvolver um novo projeto de pá, esta deve ser submetida às condições de serviço para avaliação de sua integridade estrutural, para garantir que este requisito de 20 anos de vida útil ocorra. Na fase de projeto de uma pá, uma análise completa das estruturas é normalmente realizada para garantir que a estrutura possa suportar todas as cargas. No entanto, a vida útil da pá é afetada em função da fadiga do material. Como tal, um método adequado para análise de fadiga deve ser implantado na fase de projeto para estimar a vida em fadiga e partindo desta análise um teste adequado sobre a pá deve ser realizado para verificar a vida em fadiga. Um dos principais obstáculos na análise e teste de fadiga em turbinas de pequeno porte é a inexistência de um padrão de carga (espectro) adequado. Para turbinas de grande porte existe um espectro de cargas chamado *wisper/wisperx*, tornando o procedimento de teste mais padronizado. Infelizmente, este espectro, que foi desenvolvido a partir de dados obtidos a partir de grandes aerogeradores, não é adequado para os pequenos devido à

diferença de tamanho e parâmetros operacionais. A resposta estrutural de uma turbina eólica em termos gerais tem seu comportamento atrelado as séries temporais de velocidade do vento, onde é possível se reproduzir a partir destes dados a condição para ensaios de fadiga sendo a metodologia deste trabalho baseada neste conceito (Epaarachchi, 2002).

A partir da avaliação de potencial eólico e posterior tratamento estatístico de dados meteorológicos que representam medidas importantes na estimativa da produção de energia, estes dados podem ser utilizados para compor o espectro de cargas porque mostram o comportamento dos ventos e as velocidades para levantamento de curvas de potência e também empregado para determinação de uma faixa de razões de cargas baseada no regime do local onde os dados foram coletados.

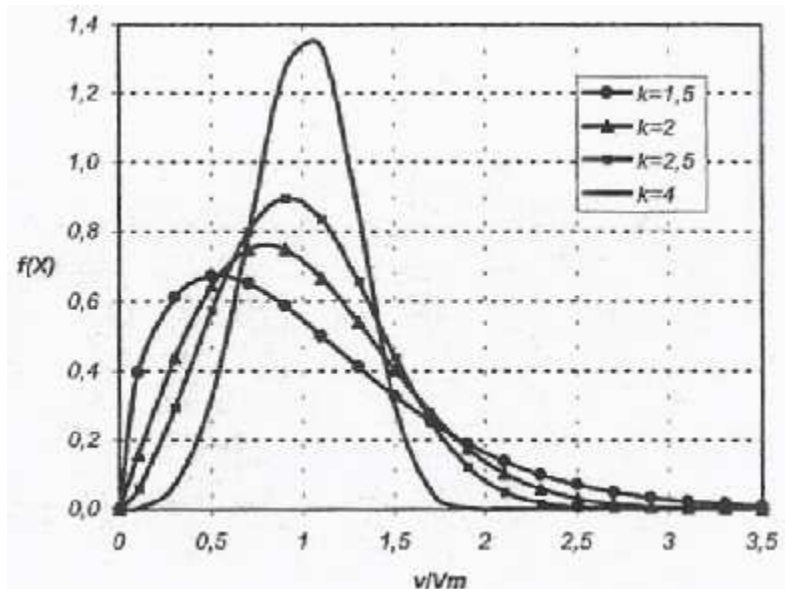
2.4.1. Distribuição de Weibull e Determinação de seus Parâmetros.

A quantificação do recurso eólico pode ser estimada ajustando o histograma de velocidade por alguma função de densidade da probabilidade ou de distribuição da velocidade do vento $f(v)$. Desta forma, o tratamento dos dados torna-se mais prático, uma vez que a integração dos dados é simplificada. Com a função é vantajoso graficar a distribuição acumulativa da frequência, com a qual pode-se, estimar a fração de tempo que o vento sopra acima da velocidade de entrada em funcionamento de uma turbina. Os dados recolhidos no local permitem construir o histograma de velocidades no tempo. Na análise de dados torna-se útil ter graficamente a distribuição de frequência. Tais gráficos podem ser determinados estatisticamente. O resultado de tal distribuição pode ser utilizada para estimar a energia gerada por um sistema eólico.

A distribuição de velocidade de Weibull é comumente recomendada, utilizada e aceita para expressar a frequência da velocidade do vento e também para estimar o potencial energético. A função probabilidade de distribuição de Weibull é dada pela Eq. 2.17.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.17)$$

onde $f(v)$ é a distribuição da velocidade de vento; v é a velocidade do vento; k é parâmetro de forma que é adimensional e c é o parâmetro de escala com unidades em metros por segundo. Baixos valores de k representam locais com velocidade médias menos intensas com uma menor uniformidade em relação à velocidade média, ao passo que altos valores representam ventos mais intensos com maior uniformidade dos dados ao entorno da velocidade média. O comportamento de k pode ser observado na Figura 2.9.



Fonte: (Alé & Pereira, 2002)

Figura 2.9. Função de Weibull adimensional.

Uma das propriedades que torna a distribuição de Weibull mais utilizada é que a partir da medida da velocidade de vento em uma determinada altura é possível ajustar esses parâmetros para outras alturas. Estudos mostram que o parâmetro de forma abrange uma faixa de 1,2 a 2,75 para a maior parte dos regimes de vento em todo o mundo Akdag & Dinler, 2009. O Quadro 2.9 mostra a ordem de grandeza em relação ao fator de forma.

Quadro 2.9. Faixa do fator de forma e descrição qualitativa do vento associado.

Intervalo de K	Característica do vento superficial
$0,8 \leq k \leq 1,0$	Fluxo turbulento tipo brisa (terrestre ou marinha), se observa único padrão diário; vento local.
$1,0 \leq k \leq 1,6$	Fluxo ligeiramente turbulento, tipo vale_montanha; observa-se um padrão diário.
$1,6 \leq k \leq 2,0$	Fluxo pouco turbulento, pode ser do tipo brisa ou vale-montanha influenciado por vento de altura.
$2,0 \leq k \leq 2,5$	Ventos com baixa turbulência e intensos; são regularmente ventos em grandes altitudes; não se observa Padrão

Adaptado: (Alé & Pereira, 2002)

A função cumulativa para obtenção da distribuição de Weibull é dada pela Eq. 2.18.

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.18)$$

2.4.2. Método Padrão do Fator de Energia.

Para obter uma distribuição de densidade Weibull é necessário determinar (k) parâmetro de forma e o parâmetro de escala (c). Existem vários métodos na literatura, os mais usados são: o método de máxima semelhança, o método de máxima verossimilhança e o método dos mínimos quadrados. O seguinte é um novo método chamado Método Padrão do Fator de Energia (MPFE), que é comparado com WASP¹. Uma versão muito similar ao (MPFE) é apresentado por (Akdag e Dinler, 2009). O (MPFE) descrito a seguir usa um procedimento iterativo para determinar o parâmetro de forma de Weibull, e satisfazer o critério de convergência. Inicialmente deve-se encontrar a velocidade média utilizando a Eq. 2.19 através da série de dados de vento coletada em campo.

¹ A ferramenta computacional WASP - *Wind Atlas Analysis and Application Program*, produzido pelo Risø –Laboratório de Energia Eólica da Dinamarca, vem sendo empregada em diversos países do mundo a fim de realizar análises e avaliações do potencial eólico.

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (2.19)$$

Posteriormente determinar o Fator de Energia (K_e) usando a série de dados de vento. A relação entre a quantidade total de energia contida no vento dividida pela energia obtida considerando a velocidade como constante e igual a velocidade média é denominada fator de energia, dada na Equação 2.20.

$$k_e = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i\right)^3} = \frac{\overline{V_c^3}}{V_m^3} \quad (2.20)$$

Com a Equação 2.21 a função gama (Γ) é determinada iterativamente, o parâmetro de forma (k) permite converter o fator de energia da mesma forma como mostrado na Equação 2.20.

$$k_e = \frac{\overline{V_c^3}}{V_m^3} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2.21)$$

Depois do processo de conversão do Fator de Energia é determinado o parâmetro de forma (K) e usando a Equação 2.22 para determinação do parametro de escala (c).

$$c = \frac{V_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2.22)$$

De posse de k e c a distribuição de Weibull $f(v)$ é determinada pela Equação 2.18 mostrada no item 2.4.1.

As variáveis mostradas nas respectivas equações são: a velocidade do vento v ; a média da velocidade do vento V_m ; a média cúbica da velocidade de vento V_c ; Γ função gamma e n é o número de amostras na série de dados de vento.

3. ENSAIOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS DE PÁS

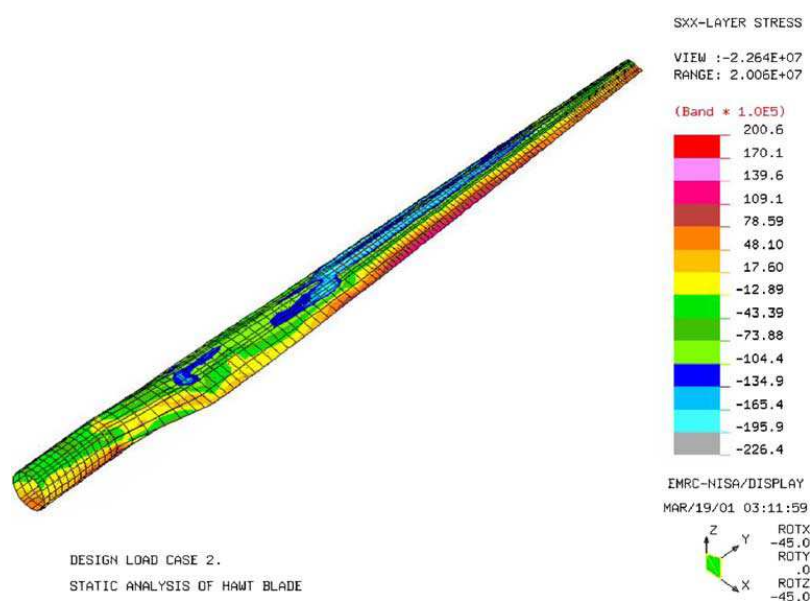
3.1. Materiais de Pás de Aerogeradores

Pás de turbinas eólicas de pequeno são fabricadas a partir de madeira laminada, materiais compósitos laminados de fibra de vidro e materiais compósitos reforçados com fibra de carbono. Pela experiência adquirida ao longo do tempo, todas as pás de turbinas eólicas são submetidas a um elevado número de ciclos de flexão, por isso é imprescindível que o material das pás tenha vida extremamente longa à fadiga por se tratar de um dos componentes aerodinâmicos mais submetidos a essa condição (Clausen e Wood, 1999). Para a fabricação de pás de turbinas eólicas de micro e pequeno porte pode ser utilizada madeira. Esta opção pode ser atraente porque a madeira tem vida longa à fadiga e seu custo como matéria prima para produção é razoável. Entretanto, a madeira não é o material mais conveniente para a fabricação de pás de formas mais complexas que são necessárias para alcançar alta eficiência aerodinâmica. Este efeito é constatado quando é necessária a introdução de concavidades na superfície inferior, que são bastante comuns nas seções de muitas pás de alto desempenho, tornando-se difícil reproduzi-las em madeira. Além disso, cada pá deve ser usinada separadamente para manter a tolerância dimensional (Peterson e Clausen, 2004).

A maioria das pás de turbinas eólicas de grande porte consiste de uma estrutura construída a partir de um invólucro ou casca de material compósito laminado e/ou madeira laminada. Há um consenso geral entre pesquisadores levando em conta que pouquíssimas pás de turbinas de pequeno porte são fabricadas a partir de madeira laminada, pois é provável que seu custo de

fabricação seja alto. Materiais compósitos laminados exigem moldes com integridade dimensional elevada, que podem ser usinados com o auxílio de centros de usinagem CNC *Computed Numeric Control*. Dar forma às pás de aerogeradores está se tornando tarefa cada vez mais fácil de realizar, devido aos avanços com funcionalidade e facilidade de uso de fabricação assistida por computador (CAM). Isso, combinado com a diminuição dos custos de computadores de alto desempenho tem dado possibilidade à pequenas empresas para construção de pás de alta qualidade e eficiência para turbinas eólicas (Clausen e Wood, 2000).

Ferramentas CAE *Computer Aided Engineering*, como análise de elementos finitos pode ser usado para aperfeiçoar a quantidade e disposição de fibras (Figura 3.1), concebendo pás suficientemente resistentes e leves (Konga et al, 2005).



Fonte: C. Konga et al. (2005)

Figura 3.1. Análise CAE em pá de aerogerador.

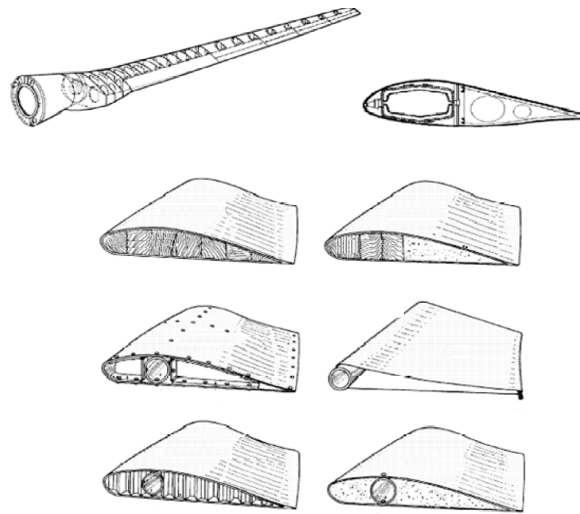
Com um projeto cuidadoso, uma pá com redução de massa tem baixa inércia rotacional, o que leva o aerogerador a entrar em funcionamento com velocidades de ventos mais baixas. Atualmente, a maior barreira para a utilização dos compósitos é o alto custo para confecção dos moldes, pois ainda há dificuldade para conseguir retorno financeiro devido aos investimentos no

desenvolvimento das técnicas de fabricação, que devem ser recuperados ao longo de uma produção que acredita ser limitada. No entanto, a demanda crescente deverá gradativamente reduzir significativamente estes custos de fabricação (Hayman et al, 2008).

Normalmente as pás de aerogeradores são constituídas por compósitos de matriz polimérica com reforços em fibras de vidro. A razão para isso é a elevada rigidez, elevada relação rigidez-densidade e boa resistência à fratura. Em sua maioria são compósitos de fibras de vidro contínuas, porém os fabricantes estão trabalhando para substituir a fibra de vidro por fibra de carbono, pois são sensivelmente mais resistentes, e como sua utilização já ocorre na indústria aeronáutica, aos poucos está se tornando mais acessível para a indústria eólica. Talvez a principal diferença entre as aplicações da fibra de vidro e fibra de carbono fosse a forma como são dispostas na matriz polimérica relativamente mais grosseira no que diz respeito às fibras de vidro. As fibras embebidas em matriz polimérica provêm alguma resistência à compressão, mas principalmente tem o intuito de alinhar e manter as fibras arranjadas geometricamente. Uma grande porcentagem das pás fabricadas atualmente tem como matriz o poliéster, porém o epóxi é também muito usado. A densidade é bastante similar, mas o melhor desempenho à fadiga é atribuído para os compósitos de matriz epóxi, que também apresentam uma fabricação mais fácil, e ainda tem ausência de emissões tóxicas durante o processo (Nijssen, 2007).

Os contornos aerodinâmicos do exterior da pá são formados por cascas relativamente finas. Eles são apoiados por uma viga estrutural longitudinal ou mantas, que suportam uma parte substancial da carga ao longo da pá. No sentido longitudinal, as pás eólicas são cônicas e torcidas. Ainda no sentido longitudinal, é necessário o afinamento da secção para redução de peso devido ao aumento de cargas que atuam da ponta a raiz de estrutura. A redução das secções, tanto no corpo externo como na espessura da casca, nas vigas estruturais internas e tecido de fibras, geralmente é destinado a garantir o mesmo carregamento ao longo do material, como por exemplo, estar conforme as tensões máximas previstas em projeto (Nijssen, 2007). A forma e

estrutura de pás eólicas são mostradas nas seções transversais e isométrica na Figura 3.2.



Fonte: CIEMAT, (2001)

Figura 3.2. Seções transversais e estruturas internas de diversos rotores.

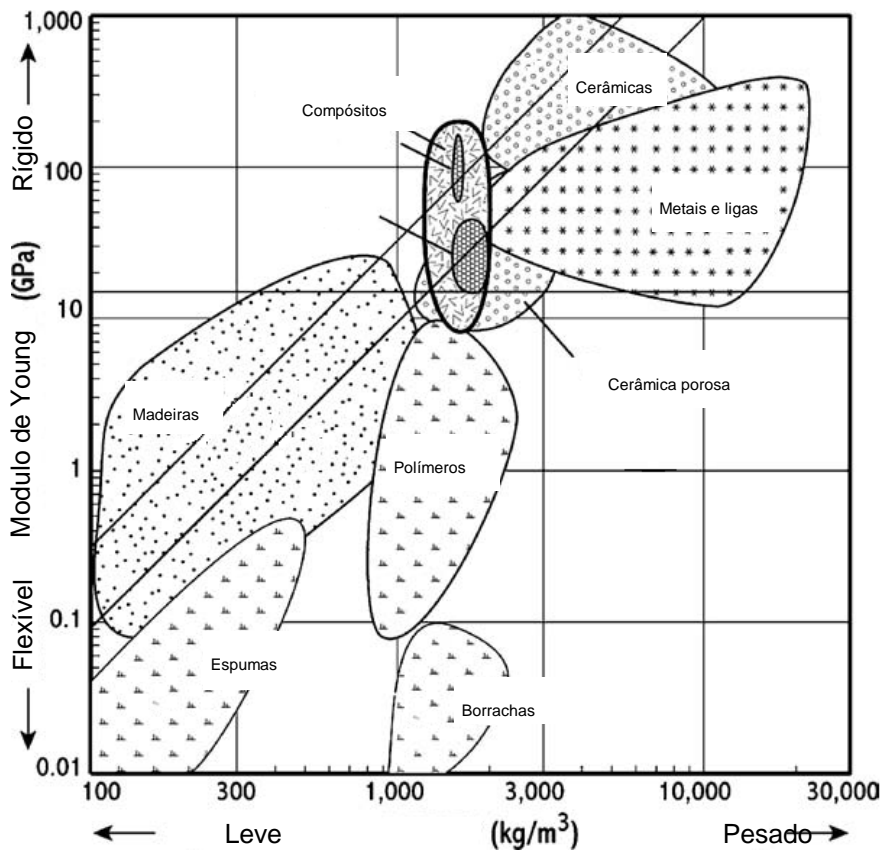
3.2. Propriedades Mecânicas dos Materiais de Pás de Aerogeradores

As propriedades que os materiais devem ter para aplicação em rotores de aerogeradores são a alta rigidez, baixo peso e vida longa à fadiga. De forma simplificada, o diagrama de rigidez em função da massa específica na Figura 3.3. mostra o procedimento a ser usado. O projeto mecânico de uma pá de aerogerador corresponde ao equacionamento do índice de mérito (M_b) (Brondsted et al, 2005).

$$M_b = \frac{E^{1/2}}{\rho} \quad (3.1)$$

onde (E) é o módulo de elasticidade do material e (ρ) é a massa específica. Linhas onde o índice de mérito (M_b) é constante são sobrepostas no diagrama, e materiais que cumprem os critérios (parcial ou total) estão delimitados entre as linhas diagonais sobre o gráfico no canto superior esquerdo.

As linhas mostradas na Figura 3.3 destacam materiais que são igualmente bons em termos de rigidez e massa específica. Acima da linha inferior indica que os materiais utilizados devem ser madeira, compósitos, metais e cerâmicas. A linha inferior possui índice de mérito $M_b = 0,003$ com unidades de E em [GPa] e ρ em [kg/m^3]. Se o índice é duplicado para $M_b = 0,006$, a linha superior é válida. Esta linha indica que os materiais mais apropriados são madeiras, materiais compósitos e cerâmicos.



Fonte: adaptado (ASHBY & JONES, 1981)

Figura 3.3. Rigidez x massa específica para vários materiais.

O segundo critério é a rigidez em escala absoluta onde um material rígido causa menos deflexão em uma viga que é um material flexível. No diagrama da Figura 3.3., o critério de rigidez corresponde à linha horizontal. Deflexões em pás de aerogeradores estão relacionadas com a geometria e dimensões, bem como a concepção global da torre e do rotor, em especial a deformação da pá quando passa pela torre. Uma deformação adequada exige

uma rigidez de material de 10-20 GPa (no gráfico da Figura 3.3 a linha de $E = 15$ GPa). Materiais sobre ou acima desta linha satisfazem o critério, sendo possível observar que a maioria das madeiras, alguns compósitos e algumas cerâmicas porosas são excluídos.

Em termos de robustez, resistência contra longos ciclos de fadiga é importante considerar a resistência à fratura dos materiais. A dureza em relação à massa específica é coletada em um esquema similar. O índice para a resistência à fratura de alta e baixa massa específica mostra que os materiais adequados são madeiras e compósitos (Peterson e Clausen, 2004).

A combinação do desempenho de alguns materiais como madeira e compósitos é o critério para identificar os melhores materiais para a construção dos rotores. Madeiras são potencialmente interessantes por causa da sua baixa massa específica, mas sua rigidez relativamente baixa torna seu uso difícil em função do limite de deflexão para pás de grandes aerogeradores. Mesmo a madeira com fibra celulósica todas alinhadas na direção da maior carga que solicitam o rotor estão próximas do máximo desempenho para a madeira que é um material natural e, assim, ambientalmente atrativo, mas ao mesmo tempo difícil de obter reprodutibilidade e alta qualidade, que é um requisito para a produção estável e econômica de rotores. Por estas razões, os compósitos têm sido até agora o material mais amplamente utilizado (Peterson e Clausen, 2004).

A base da ciência dos materiais para o uso de compósitos e seu potencial uso é a existência de fibras rígidas associadas a polímeros com técnicas de processamento acessíveis. As fibras rígidas em si não são utilizáveis para fins estruturais, suas propriedades podem ser exploradas apenas como um componente importante dos compósitos. No entanto, é importante dizer que as fibras em compósitos para pás de aerogeradores são classificadas como material estrutural. De longe, as fibras mais utilizadas são as fibras de vidro. Recentemente está havendo um aumento no interesse em fibras de carbono em função das novas necessidades apresentadas pelos rotores de aerogeradores de larga escala e diminuição no preço da fibra de carbono. Outro material de potencial interesse são as fibras de aramida,

polietileno e celulose, os quais têm propriedades mecânicas moderadas, e baixa ou muito baixa massa específica (Brondsted et al, 2005). Os principais dados para estas fibras e seus compósitos são mostrados na Tabela 3.1.

O vidro é geralmente composto de SiO_2 , Al_2O_3 e quantidades menores de outros óxidos. Os átomos de Si e O não formam uma rede cristalográfica, portanto são as fibras de vidro materiais amorfos, com suas propriedades isotrópicas, como rigidez e expansão térmica. Fibras de vidro são produzidas em diversas composições químicas, para fins específicos (Brondsted et al, 2005). A fibra de vidro do tipo E (elétrico) é a mais amplamente utilizada para fabricação de compósitos. Fibras de vidro têm diâmetros normalmente na faixa de 10 a 20 μm e são produzidas a partir de vidro fundido, puxando feixes de fibras em feixes de centenas de milhares de fibras individuais. Suas superfícies são normalmente revestidas com polímero, geralmente silano (composto químico derivado do silício), para proteger a fibra contra trincas e umidade. Este revestimento tem a função de melhorar a ligação da superfície da fibra de vidro com a matriz polimérica, normalmente termofixa e, assim, melhorar as propriedades do compósito (Jureczko et al, 2005).

As fibras de carbono são produzidas por dois métodos diferentes. O primeiro e mais utilizado método começa com fibras poliácridonitrila (PAN). Estas fibras são oxidadas, esticadas e tratadas termicamente em temperaturas de 1500 a 2500 $^{\circ}\text{C}$. Essas etapas do processo alinham e unem as cadeias originais de carbono PAN dentro dos planos hexagonais do grafite necessário para constituição das fibras. O segundo método começa a partir do alcatrão natural, que contém as unidades de grafite em uma mistura aleatória. Várias etapas de processamento levam à produção de fibras através de feixes, que garantem o alinhamento dos planos de grafite e, assim, as propriedades exigidas das fibras. O primeiro método realiza o alinhamento dos planos no grafite através do acoplamento de C-C na cadeia carbônica, enquanto que o segundo método alinha planos pré-existentes do grafite. Ambos os métodos requerem matérias primas caras e inúmeras etapas de processamento e tratamento também é oneroso. Em países como os Estados Unidos há uma iniciativa para encontrar matérias-primas mais baratas obtidas a partir da

biomassa como a lignina, e o desenvolvimento de processos produtivos mais econômicos reduzindo o número de etapas (Brondsted et al, 2005).

3.2.1. Condições Estáticas

Os compósitos poliméricos com fibras de vidro e carbono têm matrizes de polímeros, geralmente termofixos ou termoplásticos. Ambos são muito macios e flexíveis (rigidez menor que 4 GPa), e seu principal objetivo é vincular as fibras entre si, para que possam agir em conjunto e dar ao compósito funcionalidade para fins estruturais. Assim, as matrizes introduzem tenacidade aos compósitos via mecanismo de absorção de energia em função de sua interface. Os primeiros materiais compósitos para rotores foram fibras de vidro combinadas com poliéster retirados da indústria naval. A boa disponibilidade de materiais e processos foi parte da razão para o desenvolvimento bastante rápido de pás para rotores no início da indústria eólica (Clausen e Wood, 1999).

Os termofixos mais utilizados são poliésteres, vinil éster e epóxi. Todos têm valores de rigidez de 3-4 GPa e massa específica de 1,1-1,3 g/cm³ e, portanto, interagem bem com as fibras. Os termofixos passam por uma reação irreversível de cura, o que implica em tensões internas nos materiais compósitos. As propriedades destas matrizes também têm valores de rigidez em torno de 1-3 GPa e massa específica de 0,9-1,4 g/cm³. O interesse está centrado no potencial de reciclagem de polímeros termoplásticos, e isso tem sido investigado, embora até o momento nenhum procedimento tenha sido estabelecido para a reciclagem de materiais compósitos a base de polímeros termoplásticos (Brondsted et al, 2005). Os termoplásticos passam por um rápido processo de aquecimento e solidificação. A solidificação também introduz um estado de tensões internas, as quais podem ser altas em função da temperatura de processamento para termoplásticos, sendo que os termoplásticos têm pontos de fusão mais elevados. As tensões internas, independentemente da sua origem, afetam as propriedades mecânicas, muitas vezes negativamente.

As fibras e a matriz são combinadas para formar o compósito. Muitas combinações de misturas são possíveis, mas geralmente as propriedades dos compósitos são regidas pelas fibras, sendo estabelecida entre a matriz e a interface normalmente duas componentes. Propriedades de fibras e matrizes são, obviamente, importantes, assim como a maneira pelas quais eles são organizados no compósito. Os parâmetros mais importantes são seus valores relativos, freqüentemente descritos pela fração volumétrica das fibras, e pela orientação das fibras dentro da matriz. Portanto, a rigidez de um compósito E_c é controlada e calculada de acordo com a expressão (Brondsted et al, 2005):

$$E_{comp} = \eta \cdot V_f \cdot E_f + V_m \cdot E_m \quad (3.2)$$

onde (E_{comp}) é o módulo de elasticidade, V é a fração volumétrica, η é o fator de orientação das fibras também conhecido como fator de eficiência da fibra e f e m correspondem respectivamente às fibras e a matriz. Para um material isento de porosidade $V_f + V_m = 1$. O fator de orientação é igual a 1 para fibras paralelas alinhadas e carregadas ao longo da direção da fibra. Para uma montagem de fibras orientadas aleatoriamente em duas dimensões (chamado tapete de fibra), o fator de orientação é 1/3 (Brondsted et al, 2005).

A faixa de valores listadas na Tabela 3.1 mostra as propriedades mecânicas baseada em tipos de fibras. Normalmente as fibras dão a contribuição determinante para as propriedades dos compósitos. Para fins de comparação, todas as propriedades dos compósitos são calculadas para uma matriz termofixa com parâmetros de $E_m = 3\text{GPa}$, $\sigma_m = 100\text{MPa}$ e $\rho_m = 1,2\text{g/cm}^3$. Para cada compósito a base de fibra, a primeira linha da tabela descreve um composto com 50% do volume em fibras, totalmente alinhado com $n = 1$, enquanto que a segunda linha descreve um composto com 30% de seu volume em fibras dispostas aleatoriamente em uma esteira planar.

Os materiais modernos são, na maioria dos casos, uma combinação de fibras de vidro e fibras de carbono em uma construção híbrida. Os aspectos

híbridos podem ser utilizados em escala macro, com peças selecionadas para rotores, atuando tipicamente no peso exterior de elementos críticos feitos em fibra de carbono, ou pode estar em nível da estrutura, onde os compósitos de fibras de vidro e carbono são misturados em uma camada ou até mesmo com base em feixes de fibras individuais. O conceito híbrido tem o compromisso de estabelecer um material com desempenho melhor que somente à fibra de vidro em função do elevado custo das fibras de carbono.

Tabela 3.1. Materiais compósitos produzidos a partir das fibras listadas e matriz polimérica com propriedades $E = 3$ GPa, $\sigma_f = 100$ MPa, and $\rho = 1.2$ g/cm³. Os termofixos mais utilizados são os poliésteres, vinylesters, e epóxi. Todos têm valores de E entre 3 à 4 GPa e ρ entre 1,1 à 1,3 g/cm³.

Tipo	Fibras			Compósitos					
	Rigidez E_f GPa	Resistência a tração σ_f MPa	Densidade ρ_f g/cm ³	Fração volumétrica V_F	Orientação θ	Rigidez E_c GPa	Resistência a tração σ_c MPa	Densidade g/cm ³	M_b (Eq. 3.1)
Vidro-E	72	3500	2,54	0,5	0°	38	1800	1,87	3,3
				0,3	aleatória	9,3	420	1,6	1,9
Carbono	350	4000	1,77	0,5	0°	176	2050	1,49	8,9
				0,3	aleatória	37	470	1,37	4,4
Aramida	120	3600	1,45	0,5	0°	61	1850	1,33	5,9
				0,3	aleatória	14,1	430	1,27	2,9
Polietileno	117	2600	0,97	0,5	0°	60	1350	1,09	7,1
				0,3	aleatória	13,8	330	1,13	3,3
Celulose	80	1000	1,5	0,5	0°	41	550	1,35	4,7
				0,3	aleatória	10,1	170	1,29	2,5

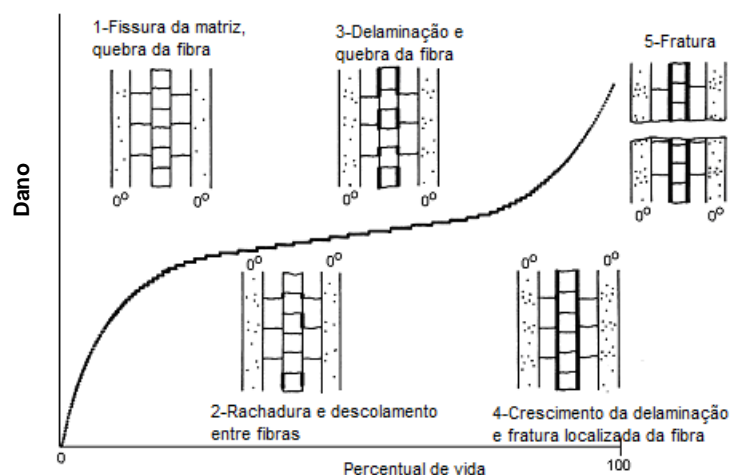
Fonte: adaptado P. Brøndsted, (2005).

3.2.2. Condições Cíclicas

No início do desenvolvimento de compósitos de fibra de vidro, eram feitas análises elementares sobre a propagação da trinca em materiais compósitos e foi proposto que estes critérios fossem usados para projeto destes materiais. Com o aumento da procura por compósitos, muitos problemas associados com a natureza viscoelástica das resinas e seus efeitos sobre as propriedades têm sido continuamente alvo de investigação. As propriedades viscoelásticas associadas aos polímeros têm influência nos parâmetros que determinam o comportamento à fadiga, tais como: tensão

média, temperatura e freqüência de oscilação de carga em polímeros e compósitos. Posteriormente foi analisada a vida à fadiga sob carregamento e amplitude constante, utilizando mecanismos de propagação linear da trinca. Também se discute a aplicação da viscoelasticidade não-linear para explicar alguns problemas práticos, tais como concentração de tensões ao redor das fibras. Foram investigados os fatores que influenciam a fluência viscoelástica, relaxamento, amortecimento e danos, que podem ser cumulativos e induzir à falha posteriormente, ainda levando em consideração a importância da inclusão do tempo em que variam as cargas para a regra de danos cumulativos (Epaarachchi, 2002).

Após várias observações sobre o ponto de vista físico, foi proposto um modelo para o comportamento da fadiga. A propagação de trincas em materiais compósitos é influenciada pela sua natureza anisotrópica. Fissuras na superfície do plano e através da espessura causam degradação na resistência e rigidez do material que leva à falha final. Através de experimentos foi observado que o número de trincas através da espessura para um comprimento fixo torna-se estável após um determinado número de ciclos de tensão. Nesta situação, o espaçamento entre as fissuras se torna fixo. Este fenômeno foi definido como "estado de dano característico" do laminado. O mecanismo de dano de fadiga de materiais compósitos é reproduzido esquematicamente na Figura 3.4. (Wahl, 2001).



Adaptado: Wahl, N.K. 2001.

Figura 3.4. Mecanismo de dano por fadiga em materiais compósitos.

As propriedades mecânicas de materiais compósitos dependem de vários fatores, incluindo o material da matriz, material de fibra, frações volumétricas, orientação da fibra, teor de umidade, porosidade, faixa de tensão/deformação e amplitude de tensões. Em particular, o comportamento viscoelástico de matrizes poliméricas usado em compósitos tem efeito significativo na vida à fadiga sobre os compósitos em várias condições. Comportamento à fadiga de materiais compósitos têm demonstrado ser altamente dependente da razão de tensões, (R) e frequência de aplicação de carga cíclica conforme Epaarachchi, 2002. Foram discutidos os efeitos das razões de tensão (R) sobre a vida a fadiga de materiais compósitos, tendo mostrado que para uma tensão máxima dada em um caso de tensão, a vida em fadiga aumenta com o aumento da magnitude R ($-\infty < R < 1$). Em carregamento de compressão-compressão, aumenta à magnitude R ($1 < R <$) reduzindo à vida a fadiga do compósito. Também mostra que, aumentando a taxa de propagação de trinca diminui o aumento de vida em fadiga do polímero.

Várias teorias sobre fadiga têm sido propostas para correlacionar o comportamento da fadiga com amplitude constante de materiais compósitos. As teorias disponíveis podem ser categorizadas como: empíricas, decréscimo residual da força, a degradação da rigidez e mecânica da fratura. Apesar de modelos baseados no decréscimo da força terem um grande inconveniente de não estarem diretamente relacionados ao mecanismo de dano dos compósitos, eles são atualmente aceitos como previsão de vida baseado na força residual como referência para o dano. Muitos modelos de fadiga têm sido propostos e se baseiam no decréscimo da força e rigidez. Depois de consolidar o mesmo tipo de modelo de fadiga à flexão de fibra aleatória e contínua de termoplásticos reforçados, este modelo é aplicável ao termofixo e compósitos de matriz termoplástica, desde que o reforço nas fibras seja contínuo e orientado aleatoriamente. Seu modelo mostrou que, usando uma curva característica, o comportamento à fadiga de um compósito pode ser expresso para vários valores de (R) por um modelo que utiliza um conceito de energia de

deformação para descrever a vida em fadiga de um compósito para valores positivos de R . Este modelo de dano tem como base no módulo de degradação à fadiga (Wahl, 2001).

É importante, no entanto, que um modelo de fadiga global seja desenvolvido para atender uma gama de materiais compósitos, assim pode ser estendido para incluir a acumulação de danos, e ser de confiança na abordagem de dispersão dos dados experimentais. Em Epaarachchi, 2002 não foram encontrados modelos de fadiga para GFRP *glass fiber reinforced plastics* que satisfaçam todos esses critérios. No entanto, é apresentado um modelo de fadiga confiável, baseado em critérios de carregamento por razão de tensões.

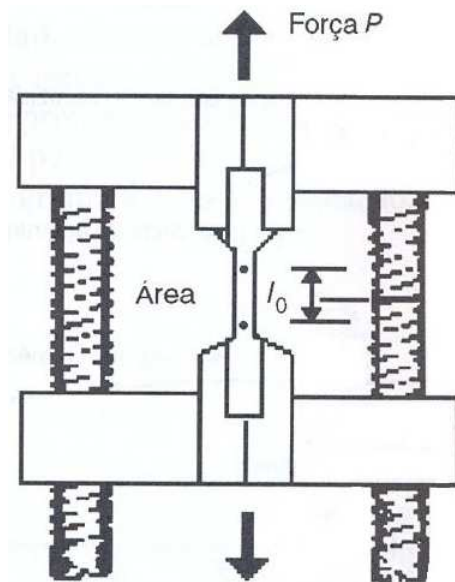
3.3. Ensaios Mecânicos Estáticos e Normas

3.3.1. Ensaios de Tração

O ensaio de tração de materiais compósitos é realizado usando técnicas bem estabelecidas e regidas por normas, onde a ASTM D3039 e ISO 527 são as melhores e mais difundidas. No entanto, a norma utilizada para ensaio neste trabalho foi NBR 9622 para determinação das propriedades mecânicas à tração para materiais plásticos. Fazendo entre cinco e dez testes com pequenas amostras, normalmente determina-se o módulo de resistência elástica dos materiais, coeficiente de Poisson e propriedades de resistência e tensão.

O ensaio estático de tração consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. Mede-se a variação do comprimento em função da carga. Trata-se de ensaio amplamente utilizado na medição de propriedades mecânicas de componentes devido à vantagem de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais. Em sua forma mais simples (Figura 3.5), o teste de tração consiste em fixar os extremos opostos de um corpo de prova a uma estrutura de carga de uma máquina de teste. Em seguida, uma força de tração é aplicada pela

máquina, resultando em uma deformação gradual e eventual fratura do corpo de prova. Durante esse processo, dados de deformação e força são obtidos, sendo medidas quantitativas de quanto o material se deforma sob a aplicação de força.



Fonte: Garcia et al, 1999

Figura 3.5. Esquema de ensaio de tração em corpo de prova.

O ensaio de tração é bastante utilizado como teste para o controle das especificações da entrada de matéria prima. Os resultados fornecidos pelo ensaio de tração são fortemente influenciados pela temperatura, pela velocidade de deformação, pela anisotropia do material, pelo tamanho de grão, pela porcentagem de impurezas, bem como pelas condições ambientais (Garcia et al, 1999).

O ensaio de tração longitudinal apresenta uma maior concentração de esforços nas fibras de reforço, que estão alinhadas no sentido de carregamento da máquina. Com a aplicação da carga, as deformações que ocorrem no corpo de prova são uniformemente distribuídas pelo menos até atingir a carga máxima permitindo medir satisfatoriamente a resistência do material. A força aplicada é medida pela máquina e a deformação pode ser medida com um extensômetro. Para calcular os valores de tensão utiliza-se a Equação 3.3.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

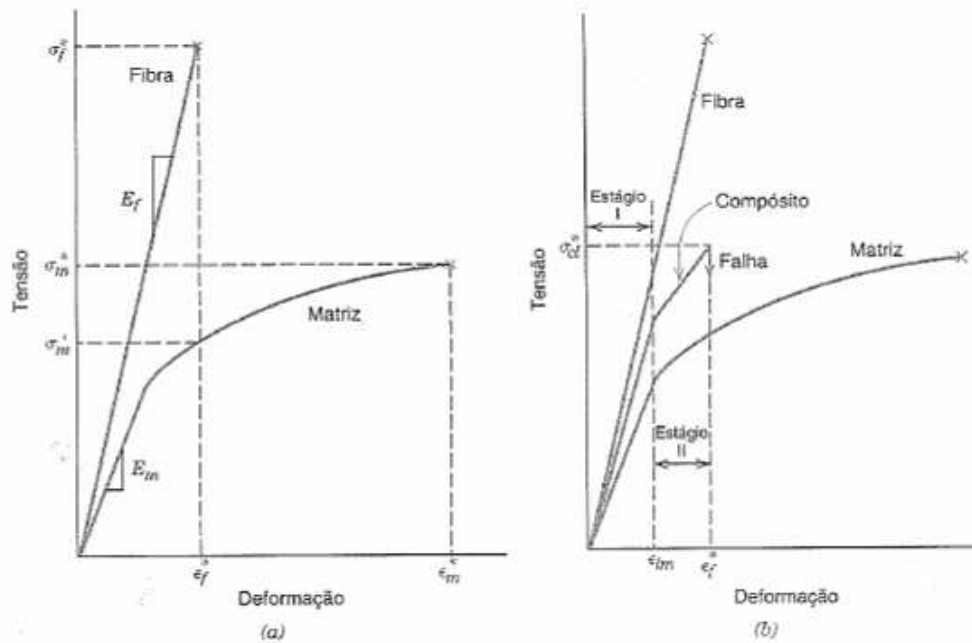
onde σ é a resistência a tração em (MPa), F a força medida (N) e A é a área da seção transversal em (mm²). Para o cálculo dos valores de deformação \mathcal{E} utiliza-se a Equação 3.4.

$$\varepsilon = \frac{l - l_o}{l_o} = \frac{\Delta l}{l_o} \quad (3.4)$$

onde ε é a deformação na direção do esforço axial, ΔL o alongamento e L_o o comprimento inicial da amostra (mm). O módulo de elasticidade fornece uma indicação da rigidez do material e depende fundamentalmente das forças de ligação interatômicas, o que explica seu comportamento inversamente proporcional à temperatura. É determinado dividindo a tensão pela deformação na região linear do diagrama tensão-deformação (Figura 3.6). Para cálculo do módulo de elasticidade recorre-se a Equação 3.5 onde E é o módulo de elasticidade em (GPa).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{P.l_o}{S_o.\Delta l} \quad (3.5)$$

A Figura 3.5 mostra uma curva de tensão por deformação obtida através de um ensaio de tração de um compósito, onde é mostrada separadamente a curva do reforço e matriz (Barros, A.S. 2009). Para ser possível análise destas curvas cada uma delas é separada em duas regiões. A primeira refere-se à região de deformação elástica, onde a inclinação da curva fornece o módulo de elasticidade do material e a segunda região evidencia a deformação plástica.



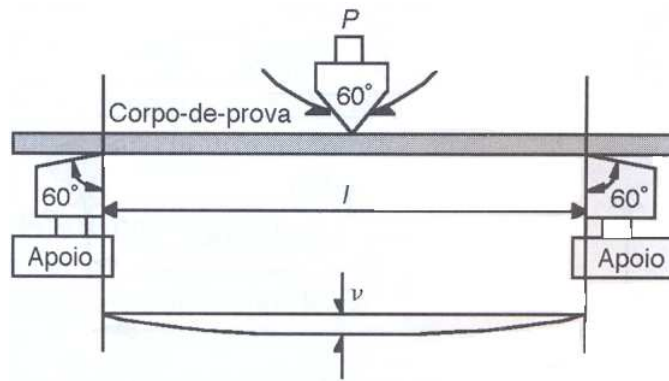
Fonte: Barros, A.S. 2009

Figura 3.6. Curva de ensaio de tração para materiais compósitos.

3.3.2. Ensaio de Flexão

Como se sabe que a pá passa boa parte do tempo em operação sendo flexionada, os resultados obtidos com ensaio de flexão são imprescindíveis para o estabelecimento do regime de testes. Além disso, vários problemas podem ocorrer durante o ensaio de fadiga à flexão como: falhas próximas aos suportes e falha precoce devido a problemas nos apoios. Portanto é fundamental proceder com testes de resistência à flexão, seguido do teste uniaxial de fadiga.

O ensaio de flexão consiste na aplicação de carga no centro de um corpo de prova apoiado em dois pontos ou engastado em uma das extremidades, dependendo do método a ser utilizado. O procedimento regido pela norma ASTM E 855-90 determina que o valor da carga aplicada pelo deslocamento do ponto central é a resposta do ensaio. Para realização de ensaio com barra apoiada em dois pontos com aplicação de carga no centro da distância entre apoios, o ensaio é chamado de ensaio de flexão em três pontos (Figura 3.7).



Fonte: Garcia et al, 1999

Figura 3.7. Esquema de ensaio de flexão em três pontos.

Outra possibilidade é o ensaio de flexão em quatro pontos que consiste na colocação do corpo de prova apoiado em dois pontos, da mesma forma como é feito no ensaio de três pontos, no entanto, a diferença está na forma como é aplicada a força que utiliza um dispositivo chamado mesa de carga com a aplicação da força distribuída entre dois pontos. Neste caso a quantidade de pontos de cargas é quatro, dando nome ao método de ensaio de flexão em quatro pontos.

Ensaio de flexão são utilizados em materiais frágeis ou de elevada dureza, pois este tipo de material devido à baixa ductilidade, dificultam a utilização de outros tipos de ensaios mecânicos. No entanto, para materiais muito dúcteis não é possível utilizar este tipo de ensaio e sim uma variante chamada ensaio de dobramento.

O limite de ruptura σ_{fu} é o valor máximo da tensão de tração e compressão nas fibras dispostas na superfície dos corpos de prova para o ensaio de flexão. A tensão de flexão máxima é dada pela Equação. 3.6.

$$\sigma_{fu} = \frac{M_{fmax}}{I_z} \cdot y_{LN} \quad (3.6)$$

onde (σ_{fu}) corresponde à tensão de flexão medida em (Pa), I_z é o momento de inércia da secção transversal e (y_{LN}) é à distância da superfície a linha neutra. Para corpos de prova com secção retangular são substituídos (I_z) e (y_{LN}) pelos seguintes termos mostrados na Equação 3.7.

$$\sigma_{fu} = \frac{M_{f_{m\acute{a}x}}}{\left(\frac{w \cdot h^3}{12}\right)} \cdot \frac{h}{2} \quad (3.7)$$

onde (w) corresponde a largura da secção transversal do corpo de prova, (h) é a altura e ($M_{f_{m\acute{a}x}}$) é o valor do momento fletor onde ocorreu a ruptura do corpo de prova.

Para cálculo do módulo de elasticidade (E) necessita-se da medida da flecha para cada carga aplicada no material, sendo esta aplicada dentro do regime de deformação elástica, estes valores são obtidos para uma secção transversal retangular através da Equação 3.8.

$$v_{\max} = \frac{p \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_z} \quad (3.8)$$

onde o máximo deslocamento ocorre no ponto de aplicação da carga na metade do comprimento $x=l/2$:

$$E = \frac{p \cdot l^3}{4 \cdot w \cdot h^3 \cdot v} \quad (3.9)$$

sendo (w) e (h) a largura e a altura da secção transversal, respectivamente.

A Equação 3.9 é utilizada para cálculo do módulo de elasticidade (E) no ensaio de flexão em três pontos. Para os casos onde recomenda-se ensaio em quatro pontos os procedimentos e equações estão descritos na norma ASTM E855-90.

3.4 Ensaios Mecânicos de Fadiga e Normas

Nesta secção são apresentadas algumas generalidades a respeito de ensaio de fadiga para máquinas de grande escala. Este conceito é importante tendo em vista que os procedimentos de ensaio para turbina de pequeno porte também é fundamentado nesta metodologia.

3.4.1. Normas IEC

Há muitas maneiras de se carregar uma pá de turbina eólica em testes de fadiga. As cargas podem ser aplicadas em um único ponto ou em vários pontos. Cargas de torção podem ser aplicadas a um único eixo, ou cerca de dois ou mais eixos. A carga pode ser de amplitude e frequência constante ou variável. Cada tipo tem suas vantagens e desvantagens. O tipo de carga utilizada, muitas vezes depende de equipamentos de ensaio utilizados.

Em testes de amplitude constante, a carga de ensaio é caracterizado por um ciclo de carga única, que é repetida muitas vezes, em que os valores máximos e mínimos de carga são fixos. Com os testes de amplitude constante, os modos de falha não-lineares são mais fáceis de evitar quando as cargas são amplificadas para acelerar os testes. Testes de amplitude constante ignoram a possibilidade de efeitos da sequência de carga e vão introduzir alguma incerteza adicional devido à sua sensibilidade para a formulação de fadiga.

Nos carregamentos de amplitude variável, a carga é caracterizada por uma série de ciclos de carga com diferentes magnitudes e valores médios. A série de carga é normalmente repetida várias vezes, mas o espectro de carga pode conter uma série de razões de carga de amplitude e magnitude. Estes espectros são mais difíceis de comparar com os dados tomados na amplitude constante. Carregamentos de amplitude variável dá maior precisão na correspondência entre o espectro de carga de projeto, porque o cálculo de fadiga não é tão sensível para a incerteza na formulação de fadiga.

3.4.2. Demais Ensaio

Na indústria eólica mundial os testes de fadiga realizados nas turbinas eólica de grande porte são considerados uma parte essencial no desenvolvimento de novas formas aerodinâmicas e estruturais de aerogeradores. As pás de turbinas eólicas estão sujeitas ao longo de sua vida útil a uma vasta gama de esforços os quais são complexos e difíceis de serem

reproduzidos com exatidão em qualquer experimento laboratorial. Conforme Epaarachchi, J. A. and Clausen, P. D. (2004) atualmente existem dois métodos para ensaio de fadiga em aerogeradores de grande porte: um por meio do uso de dispositivo de massa excêntrica e outro com o uso de atuadores hidráulicos solicitando as pás a serem testadas próximas a sua freqüência natural de vibração. A Tabela 3.2. mostra as características relativas aos dois métodos. O método que utiliza atuadores hidráulicos permite obter resultados dos esforços de fadiga de forma mais realística aumentando o número de atuadores. Cabe assinalar que tanto o dispositivo de massa excêntrica quanto sistemas por atuadores hidráulicos são aplicáveis para testes em aerogeradores.

Quadro 3.1. Comparação dos métodos para ensaio de fadiga de aerogeradores.

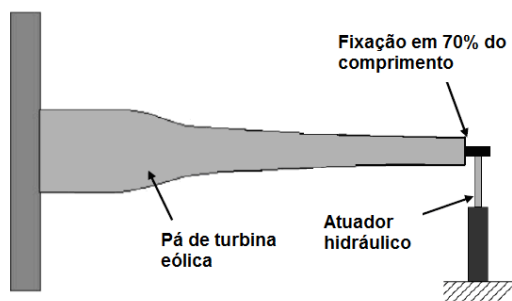
Parâmetro de teste.	Teste por dispositivo de massa excêntrica.	Teste por atuadores hidráulicos.
Velocidade de teste	Depende do deslocamento e freqüência do volante	Depende do controle de deslocamento (tamanho do cilindro hidráulico)
Espectro	Amplitude constante. Flexão em uma única direção.	Varias seqüências de cargas em varias direções.
Distribuição da força longitudinal	Depende da distribuição da rigidez.	Aumenta a acurácia quanto maior o numero de atuadores
Custo do teste	Relativamente baixo	Pode aumentar bastante com o tamanho e o numero de atuadores.

Fonte: Epaarachchi, J. A (2002)

O método de ensaios utilizando atuadores hidráulicos é mais apropriado para testes de pás de grande porte, pois estes componentes requerem forças de flexão elevadas e baixa freqüência. Já as turbinas eólicas consideradas de pequeno porte apresentam forças de flexão mais baixas e freqüência mais alta, devida a maior velocidade de rotação e a freqüência de vibração natural das pás serem maiores. O sistema com atuador hidráulico poderia ser construído para o teste de pás pequenas, contudo é relativamente mais caro, tanto para construir quanto para operar.

O teste de deslocamento por atuadores é utilizado por laboratórios como NREL, WMC/TU deslft, CRES. A grande vantagem deste ensaio é que os

atuadores hidráulicos têm replicação de carga mais precisa e boa representatividade de carga. Suas desvantagens são o alto custo para a montagem da infra-estrutura de ensaios, o grande consumo de energia, as baixas velocidades de teste limitadas pela capacidade dos atuadores hidráulicos tornando-se difícil realizar os testes no comprimento total das pás (Hughes, 2008). Um esquema com este sistema de teste é mostrado na Figura 3.8.



Adaptado: www.nrel.gov

(a) Esquema de testes com atuadores hidráulicos

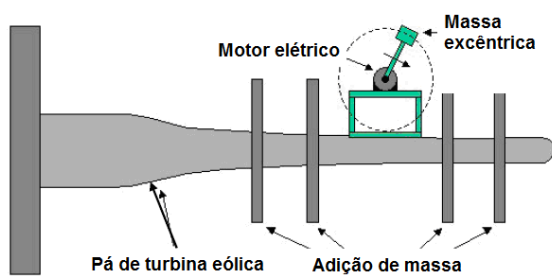


Fonte: www.nrel.gov

(b) Teste com atuador hidráulico

Figura 3.8. Teste por atuadores hidráulicos.

O *dispositivo de massas excêntricas*: é utilizado pelas seguintes entidades e empresas: RISO, LM, Vestas, NEG Micon/UK. Suas vantagens são o baixo investimento em equipamento para testes, as grandes velocidades de testes, sendo possível ensaiar a pá em toda sua extensão. Sua desvantagem é a adição de momentos indesejados devido a cargas axiais, e a não possibilidade de aplicar simultaneamente cargas laterais bem com cargas transversais. A Figura 3.9 apresenta um esquema ilustrativo deste sistema de teste.



Adaptado: www.nrel.gov

(a) Esquema de testes com massa excêntrica.



Fonte: www.riso.dk

(b) Teste com massa excêntrica.

Figura 3.9. Testes através de dispositivo de massas excêntricas.

3.4.3. Condições Gerais de Ensaio

Devido à natureza dos regimes do vento, as pás de aerogeradores são solicitadas conforme determinado número de ciclos de fadiga sobre sua vida útil projetada em termos econômicos em 20 anos (Epaarachchi e Clausen, 2006). Portanto, uma análise de fadiga adequada deve ser realizada na fase de projeto para garantir vida útil adequada, e se possível, verificar através de ensaios convencionais, tais como os utilizados convencionalmente para análise de pás de grande porte. Segundo a norma IEC 1400-2, (1998) devem ser considerados nos cálculos de fadiga apenas os ciclos de carga perto da velocidade nominal da turbina eólica, e também é importante prever no procedimento de ensaio a coleta de dados de vento de locais onde ele sopra razoavelmente forte para que os testes validem a operação destas máquinas em qualquer lugar do mundo. As forças que atuam nas pás são de equilíbrio, transitórias e alternadas. Quando ocorre o equilíbrio de forças devido principalmente à rotação das pás com carga aerodinâmica e vento constante não ocorrem solicitações de fadiga na estrutura da pá. Portanto, as maiores forças aerodinâmicas são provocadas pela natureza instável dos ventos enquanto as forças alternadas se devem principalmente a ação da gravidade em função do desequilíbrio de massa das pás e as forças de giro.

É desejável que os dados de vento para o levantamento de parâmetros de vida em fadiga para turbinas eólicas sejam adquiridos em amostras de dez minutos durante cinquenta anos na área escolhida em acordo com as normas Européias para confecção de turbinas eólicas. No entanto, a natureza cíclica da distribuição de velocidade dos ventos determinada pelo padrão anual nos estudos meteorológicos permite modelar de forma rápida e confiável através de métodos de análise estatística (Epaarachchi e Clausen, 2006). Essa distribuição na velocidade dos ventos pode ser perfeitamente representada por uma função de distribuição de Weibull. Contudo, é razoável supor que um mínimo de 1 ano de dados de vento será suficiente para predizer generalizadamente os regimes de ventos anuais em qualquer local.

4. METODOLOGIA

A metodologia consistiu no procedimento laboratorial para tornar possível a análise de esforços cíclicos em pás de aerogeradores de pequeno porte. Foi construída uma bancada fixando uma pá de aerogerador que pode ser submetida a esforços cíclicos. Os ensaios foram realizados em uma pá de aerogerador de 6 kW que possui um comprimento de 2,7m. Para os testes foi definido um espectro de esforços e razão de tensões equivalente a um regime normal de operação do aerogerador em condições climáticas do Rio Grande do Sul - Brasil. A obtenção do número de ciclos para a realização dos testes foi definido em função da distribuição da velocidade local de vento. Pela disposição de extensômetros ao longo da pá foi possível avaliar os esforços e deformações sofridas pela pá durante os testes. A magnitude dos esforços foi determinada a partir de procedimentos apresentados na IEC-61400-2 específica para testes de aerogeradores de pequeno porte.

4.1. Descrição Global da Metodologia Proposta

A seguir, na Figura 4.1, é mostrado o fluxograma das etapas da metodologia proposta para concepção de dispositivos, realização de ensaios e análise dos resultados obtidos.

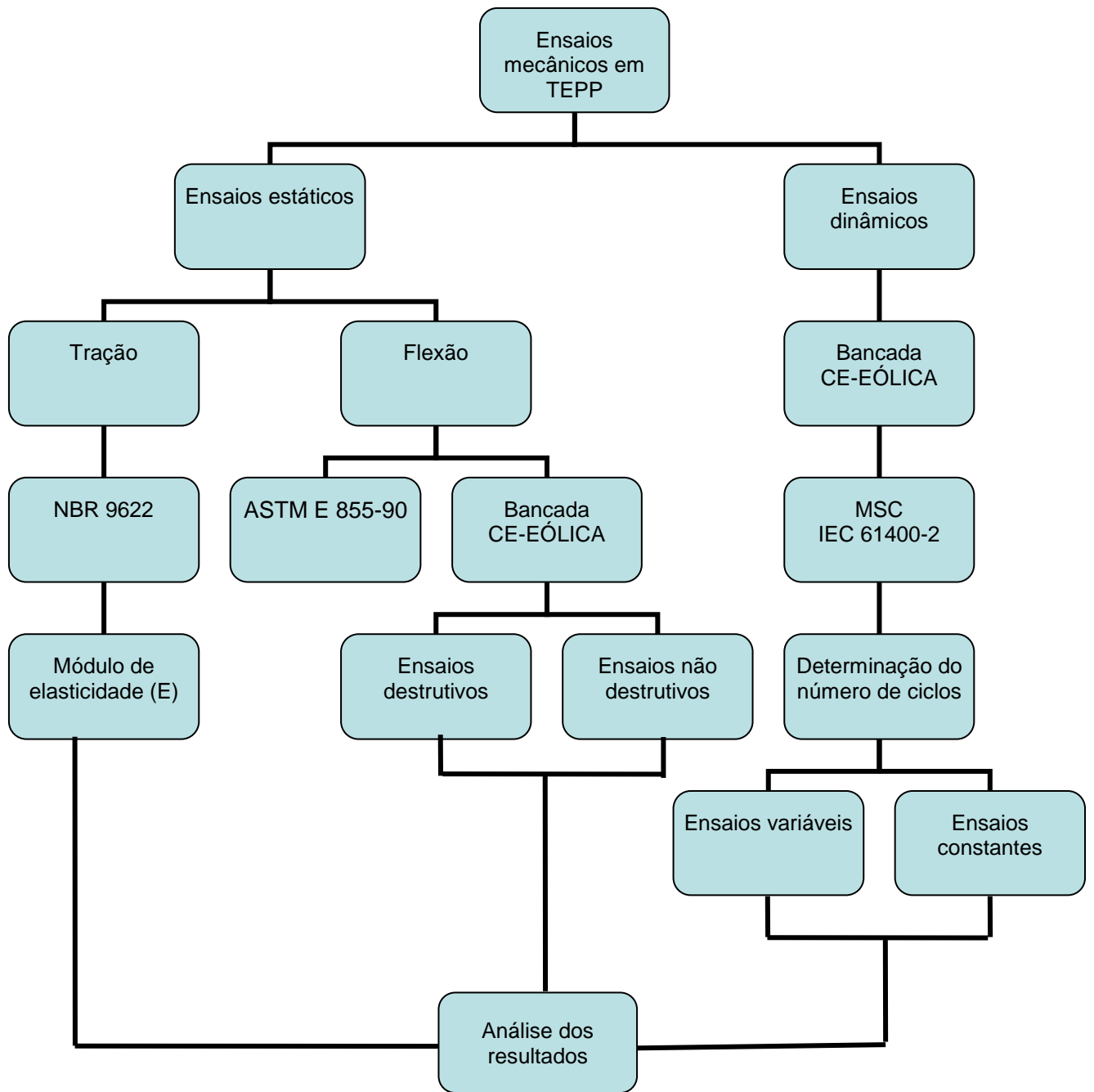


Figura 4.1. Fluxograma de etapas do trabalho

4.2. Ensaio Mecânico Estático

4.2.1. Ensaio de Tração

Durante os ensaios foram coletados dados como tempo, alongamento do material e força aplicada para que a deformação ocorra. O resultado do ensaio é uma curva da força aplicada em função do alongamento, a partir da análise deste gráfico é possível obter propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade (E), limite de escoamento (σ_e) e limite de resistência a tração (σ_u).

Para realização dos ensaios de tração foram utilizados corpos de prova retirado das pás do aerogerador Enersud modelo verne555, mostrado na Figura 4.2. Conforme informações do fabricante, o material em estudo é um compósito com matriz em poliéster reforçado com fibra de vidro do tipo E na direção de 45°.



(a) Aerogerador completo



(b) Pá ensaiada (sem pintura)

Figura 4.2. Aerogerador Enersud verne555.

São mostradas nas Figuras 4.3 (a) e (b) as etapas de elaboração dos corpos de prova para o ensaio de tração seguindo as especificações da norma NBR 9622 para determinação de propriedades mecânicas à tração para materiais plásticos.



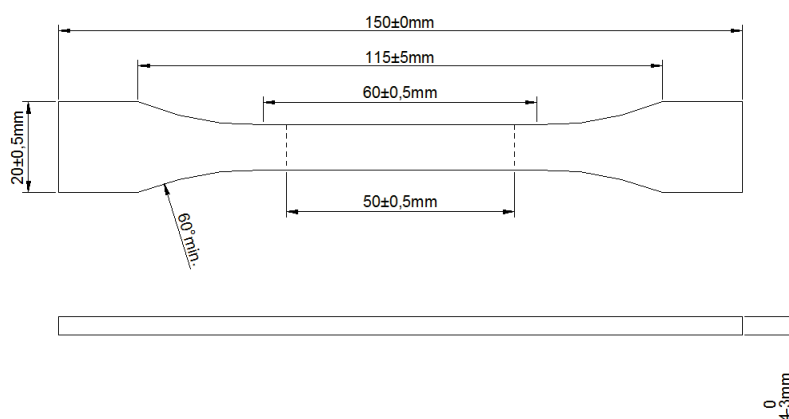
(a) Corte da face posterior



(b) Amostra após usinagem

Figura 4.3. 1ª fase da confecção dos corpos de prova.

Dentre as dimensões disponíveis de corpos de prova foi selecionada àquela cujas características do material fossem mais adequadas. No caso, as dimensões da Figura 4.4 é indicada para materiais a base de resinas e produtos de moldagem, os quais possuem baixos alongamentos à ruptura.

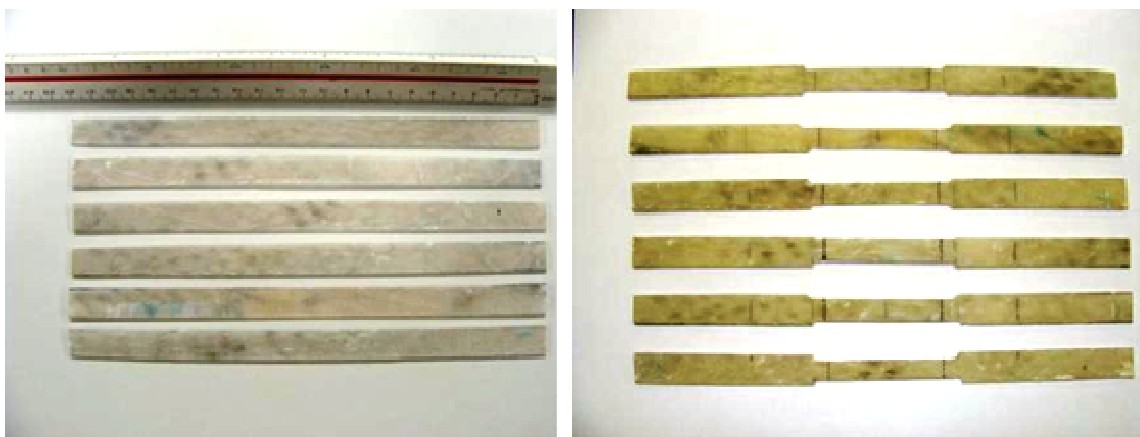


Adaptado: NBR 9622

Figura 4.4. Dimensões dos corpos de prova.

Após a retirada de uma parcela de material da face da pá, estas foram cortadas e deixadas na espessura adequada para confeccionar ao menos 6 corpos de prova para realização dos ensaios mecânicos. Posteriormente, foram cortados nos respectivos comprimentos e usinados no formato e

dimensões de corpo de prova do tipo “dog bone”, conforme mostra a Figura 4.5.



(a) Corpos de prova 2ª etapa

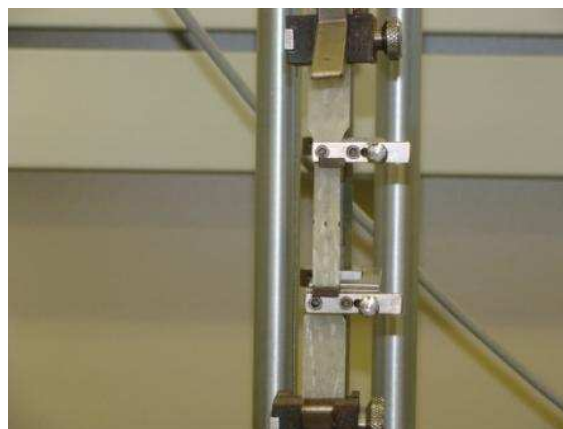
(b) Corpos de prova dimensão final

Figura 4.5. 2ª fase da confecção dos corpos de prova.

O ensaio foi realizado posicionando os corpos de prova através das garras da máquina de ensaio de marca EMIC, modelo DL, com capacidade de 10.000 N utilizando célula de carga com certificado de calibração EMIC 352/2010 e sistema de aquisição de dados do próprio fabricante, do modelo EEGA – 250, lotada na Faculdade de Engenharia da PUCRS. A distância de fixação entre o par de extensômetros é de 50 mm e a velocidade do ensaio é de 1mm/min. Os ensaios foram realizados em condições normais de pressão e temperatura. A vista geral da máquina e o posicionamento dos extensômetros são mostrados conforme Figura 4.6.



(a) Visão geral da máquina de ensaio



(b) Sistema de fixação e pontos de medição

Figura 4.6. Máquina para ensaios de tração.

4.2.2. Ensaio de Flexão

O dispositivo montado na máquina de ensaios restringe-se a realizar ensaios de flexão a três pontos no equipamento de marca EMIC modelo PC 200 I lotada no laboratório de Engenharia Civil da PUCRS. O testes realizados nestes corpos de prova têm objetivo de analisar o comportamento do material quando solicitado a esforços mecânicos de flexão (Figura 4.7). O ensaio consistiu na aplicação de uma carga (P) no centro do corpo-de-prova (retirado da pá), apoiado em dois pontos conforme norma ASTM E 855-90. A carga aplicada parte do valor inicial e aumenta lentamente até a ruptura do corpo-de-prova. O valor da carga aplicada *versus* o deslocamento do ponto central consistiu na resposta do ensaio. Foi empregada uma velocidade de 1 mm/min para a aplicação da carga, para o ensaio do corpo de prova.

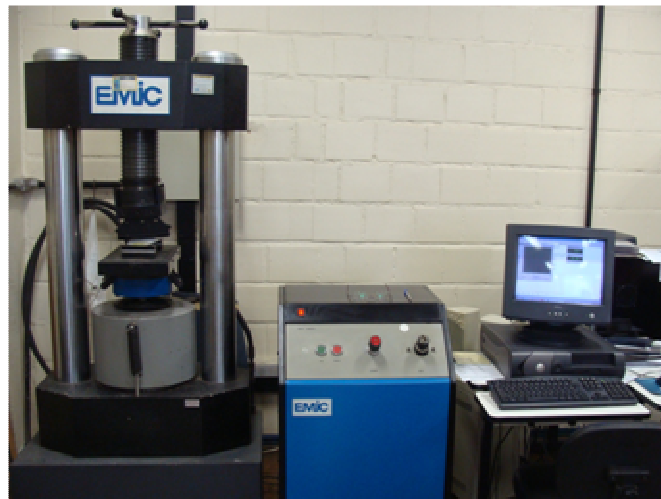


Figura 4.7. Máquina para ensaios de mecânicos de flexão.

A preparação dos corpos de prova exclusivamente para este ensaio são cortes transversais do perfil da pá, conforme Figura 4.8. A distância entre apoios foi de 142 mm e foi aplicada uma pré-carga de 150 N antes da realização do ensaio propriamente dito.



(a) Amostra retirada da pá

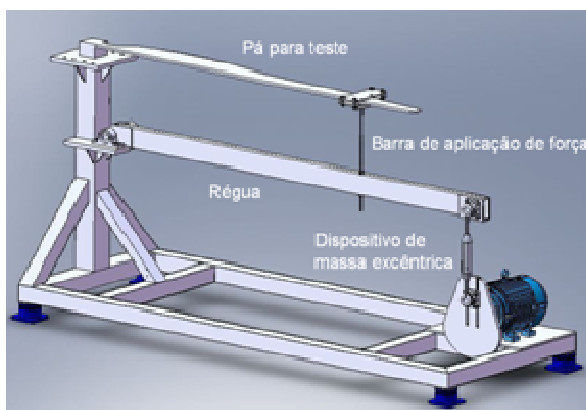


(b) Posicionamento da amostra em equipamento

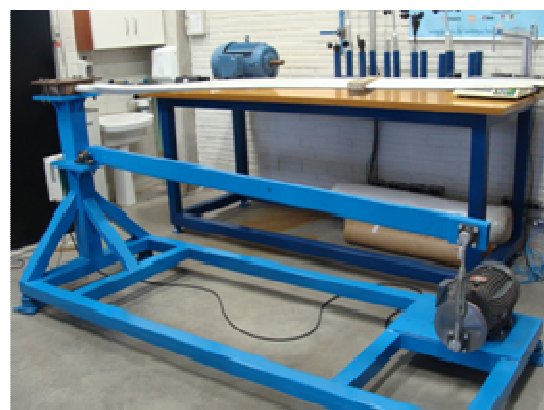
Figura 4.8. Procedimentos para ensaio mecânico de flexão.

4.3. Projeto da Bancada de Testes para Ensaio Cíclicos de Pás

Foi desenvolvida uma bancada de testes para ensaios de fadiga que apresenta uma estrutura metálica, na qual é fixada uma pá de aerogerador que pode ser submetida a esforços cíclicos. A bancada apresenta um dispositivo de massa excêntrica conectada a uma régua com controle da amplitude, permitindo submeter à pá a esforços cíclicos (Figuras 4.9). O deslocamento máximo de ensaio pode ser alterado mediante o ajuste do dispositivo de massa excêntrica.



(a) Projeto da bancada



(b) Bancada para ensaios de fadiga

Figura 4.9. Bancada de testes para ensaios de pás de aerogeradores de pequeno porte.

A régua ou barra horizontal é apoiada em suas extremidades por mancais. Sua função principal é transmitir o movimento de giro advindo do motor, transformando em movimento oscilatório pelo volante ligado a mesma através da biela. Além disto, a régua permite o ajuste do ponto de aplicação da carga na pá e também minimiza as vibrações vindas do motor e volante. A transmissão da força da régua para a pá é realizada pela respectiva barra de aplicação de força instrumentada com célula de carga Figura 4.10 (a).



(a) célula de carga

(b) oscilador

Figura 4.10. Detalhes da (a) célula de carga e (b) oscilador.

A bancada possibilita com facilidade adequar pás com diferentes comprimentos, sendo originalmente projetada para pás de 2,7m. A estrutura é apoiada sobre amortecedores evitando transmissão de vibrações. A Figura 4.9 (a) mostra uma vista isométrica da bancada.

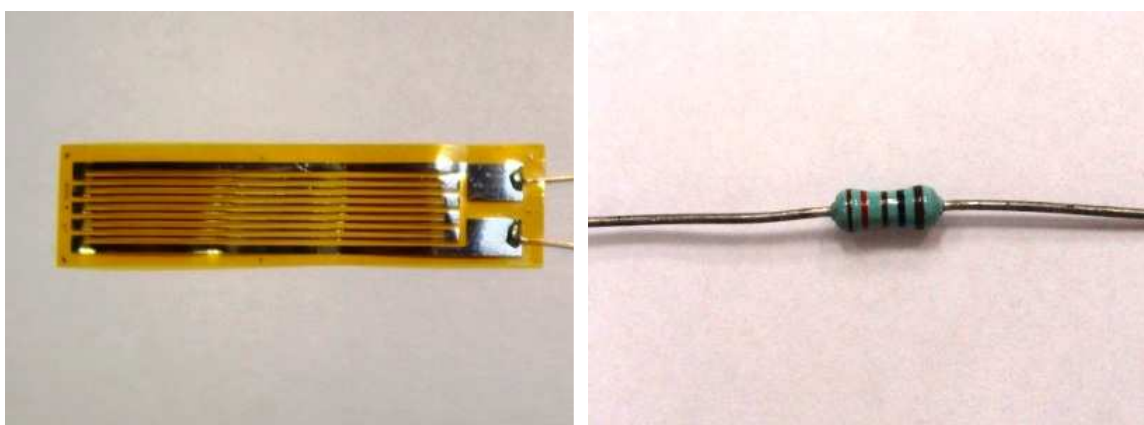
A base é composta por tubos de aço com secções quadradas utilizadas nas laterais, viga da base e coluna. Após a construção da estrutura metálica iniciou-se a montagem dos componentes da bancada como: régua, motor, mancais, posicionamento de amostras para testes preliminares, elaboração de dispositivos de fixação e instalação de equipamentos de acompanhamento, controle e medição das variáveis de testes.

4.3.1. Implementação do Sistema de Medição e Coleta de Dados

O dispositivo de ensaio permite aplicar cargas cíclicas sobre pás de

aerogeradores para a faixa de freqüências e deslocamentos que compreendem o caso estudado. As tensões recebidas pelas pás de aerogeradores são causadas por forças aerodinâmicas e forças de inércia. No presente trabalho espera-se reproduzir as mesmas por deslocamento através de um ponto de aplicação de forças que provêm da bancada de ensaio. Este dispositivo induz cargas de flexão em apenas uma direção, no entanto o funcionamento real origina tanto esforços de flexão quanto esforços na direção axial. O sistema de aquisição de dados utilizado apresenta como partes principais: sensores colocados ao longo da pá chamados extensômetros, célula de carga, equipamento de coleta e processamento de dados “datalogger”.

Os extensômetros são sensores que captam a deformação e convertem a mesma em valores de tensão elétrica para a leitura em um dispositivo remoto. Os extensômetros usados no ensaio são do fabricante nacional Excel sensores do tipo PA-06-1000BA-120L lote 090831. A Figura 4.11 mostra tanto os sensores de deformação (Figura 4.11 (a)) quanto os resistores de precisão (Figura 4.11 (b)), estes últimos utilizados para compor a ponte de Wheatstone, tornando possível a leitura da variação do sinal elétrico vinda do extensômetro.



(a) Extensômetros

(b) Resistor

Figura 4.11. Posicionamento dos extensômetros ao longo da pá.

A pá foi instrumentada ao longo de sua extensão em locais pré-definidos com extensômetros para medição da deformação conforme mostrado na

Figura 4.12.

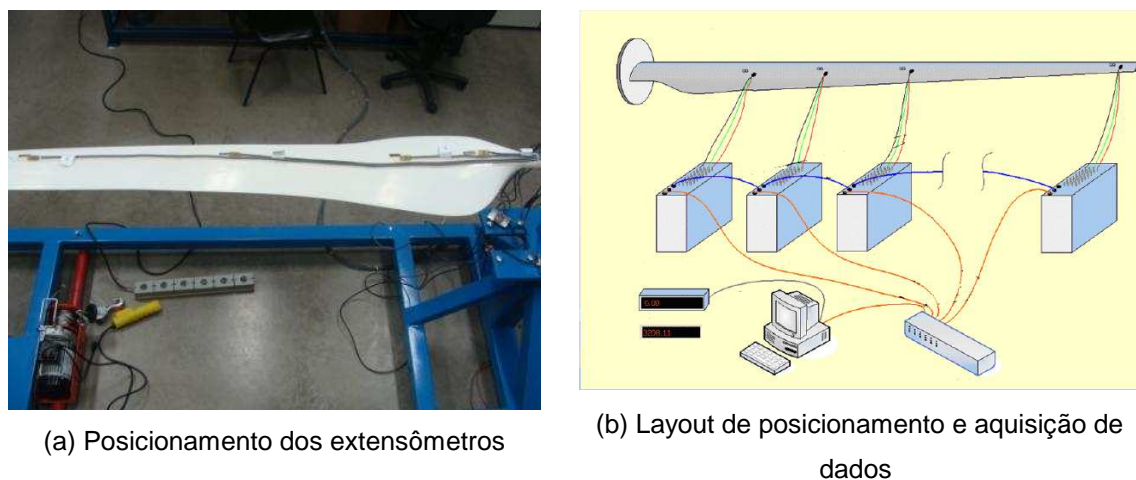
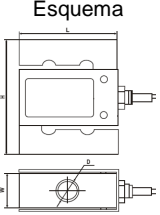


Figura 4.12. Posicionamento dos extensômetros ao longo da pá.

A célula de carga está localizada no ponto de aplicação de forças sendo responsável pela coleta dos valores de forças aplicados pelo conjunto do dispositivo oscilador. As características principais da célula de carga utilizada nos ensaios dinâmicos são mostradas na Tabela 4.1.

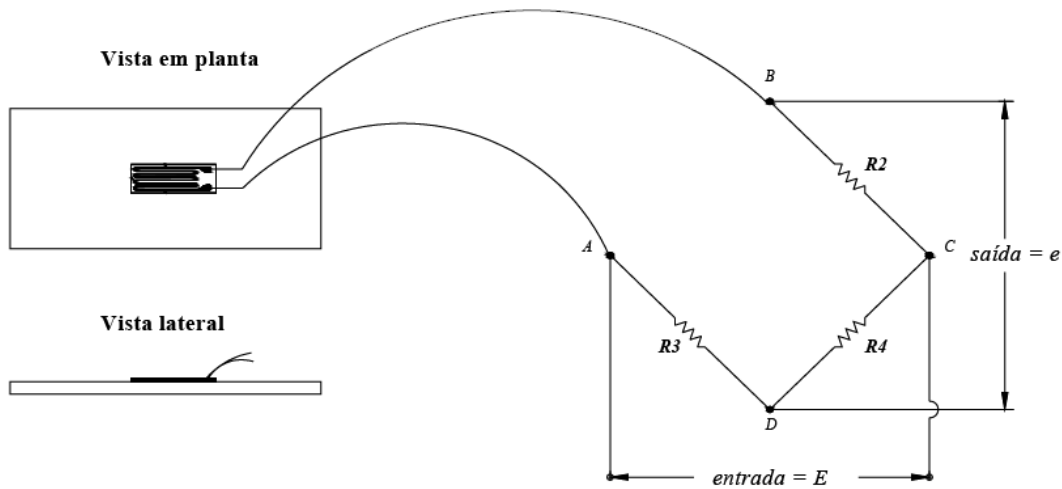
Quadro 4.1. Características da célula de carga.

Esquema	Fabricante/Modelo/Capacidade	Carga máx.	Material	Resistência de entrada	Tensão de referência	Sensibilidade
	HBM/S40/50kg	1500 N	Aço inoxidável	350 (Ohms)	5V	3,0mV/V
Dimensões						
	comprimento	largura	espessura	rosca		
	76,2 mm	50,8 mm	12,0 mm	M6 X 1		

A montagem do circuito escolhida para a medida das deformações foi a disposição dos extensômetros em um quarto de ponte. Este tipo de ligação é conveniente devido a facilidade de montagem e configuração, sua simplicidade ocorre em função da forma de medição que é feita em uma única direção. Isto poderia ser uma restrição caso houvesse necessidade de medir as deformações em mais de uma direção, no entanto esta situação não está prevista na metodologia de avaliação adotada. Outro detalhe seria o fato deste

tipo de ligação não funcionar adequadamente em ambientes onde ocorrem variações de temperatura bruscas o que é minimizado em ambiente laboratorial onde foram feitos os respectivos ensaios.

A Figura 4.13 apresenta o esquema de ligação de um extensômetro (E) por uma ponte de Wheatstone e a Figura 4.14 (a) mostra o circuito montado e operando. Todos os resistores utilizados são de precisão, com valores fixados em aproximadamente 120Ω por consequência da tensão de entrada ser normalmente 5V.



Fonte: nepae – Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural

Figura 4.13. Ponte de Wheatstone para ligação de extensômetros ao sistema de aquisição de dados

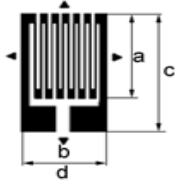
Para o procedimento de *off-set* é tomada a medida de saída da ponte e anotada seu valor inicial a partir desse valor, e sabendo que os valores de deformação dos outros resistores é 0, uma vez que, são resistores fixos e não extensômetros, é possível converter os valores de tensão (e) em deformação (ε) pela Equação 4.1.

$$-\varepsilon_{ext} + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = \frac{e.4}{K.E} \quad (4.1)$$

onde E é o módulo de elasticidade, assim como o valor do fator de sensibilidade teórico (K) é 2,11, conforme lote de sensores entregues pelo

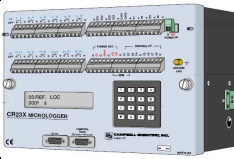
fabricante. As demais características dos extensômetros são mostradas na Tabela 4.2.

Quadro 4.2. Posicionamento dos extensômetros ao longo da pá.

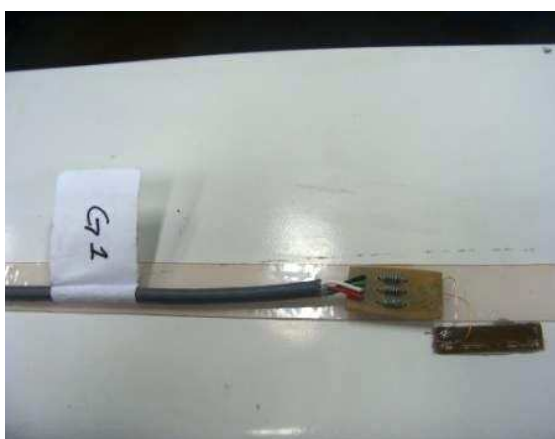
Esquema	Modelo	Material da base/filme metálico	Resistência (Ohms)	Característica	Dimensões (mm)			
					Grelha		Total	
					A comp.	B largura	C comp.	D largura
	PA-06-1000BA-120L	Base de poliamida com filme metálico de constantan	120	Fios de cobre colados nos terminais	35,4	6,35	31,8	6,35

O *datalogger* de marca Campbell Scientific modelo CR23X micrologger trata-se de um equipamento capaz de operar tanto em laboratório quanto em campo. Suas principais características em termos de processamento, taxa de aquisição de dados, precisão, resolução, quantidade e tipo de entradas são colocadas sucintamente na forma da respectiva Tabela 4.3.

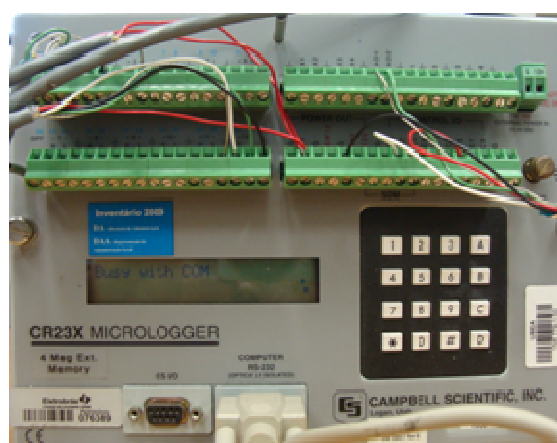
Quadro 4.3. Características do equipamento de aquisição de dados.

Esquema	Descrição	Precisão	Operação	Fator escala (mV)	Resolução (μV)		
					Diff.	SE	
	Entrada analógica	12 pares ou 24 terminais configurados separadamente. Expansão do canal fornecidas através AM16/32. Multiplexadores e termopar AM25T	$\pm 0.025\%$ de FSR, 0° para 40°C	$\pm 5\text{ V}$	± 5000 ± 1000 ± 200 ± 50 ± 10	166 33.3 6.66 1.67 0.33	333 66.6 13.3 3.33 0.66
	Saída analógica	4 chaves comutáveis ativas somente durante a medição, uma de cada vez e 2 contínuas	$\pm 5\text{ mV}$; $\pm 2.5\text{ mV}$ (0° to 40°C)	50 mA comutável e 15 mA contínuo	intervalo $\pm 5\text{ V}$	333 μV	
		Descrição	Frequência max. de operação	Resistência	Tensão (sem carga)		
					Baixa	Alta	
	Saída digital	8 portas configuráveis como entradas ou saídas digitais. Portas C5-C8 para contagem de pulsos de alta frequência	2.5 kHz	500 ohms	< 0.1	5.0 V $\pm 0.1\text{ V}$	
Entrada digital			100 kohms	-0.5 até +0.8 V	3.0 até 5.5 V		

A Figura 4.14 mostra uma das extremidades da onde os dados são coletados, mais precisamente as deformações sofridas pela pá. A Figura 4.14 (a) mostra o extensômetro *strain gauge* devidamente colado abaixo da camada de pintura, conforme instruções do fabricante, sendo seus terminais ligados na placa de circuito onde estão arranjados os três resistores, que por sua vez são conectados através de cabos mantendo a comunicação com o *datalogger*, Figura 4.14 (b).



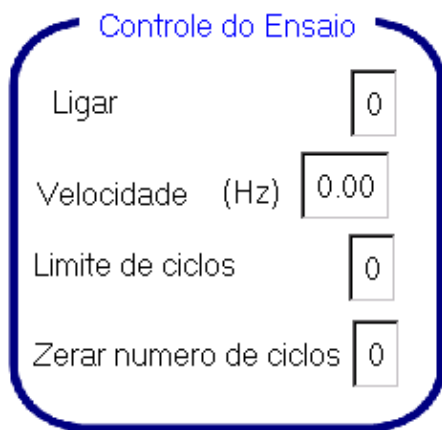
(a) extensômetro



(b) datalogger

Figura 4.14. Detalhes do (a) extensômetro e (b) *datalogger*.

O sistema é interfaceado pelo programa *Logger Net* que contém o programa *Edilog* que constrói, ajusta e faz a parametrização da automação de componentes montados na bancada, controlando a coleta de dados, digitalizando o sinal dos sensores e realizando a função transferência de dados entre *datalogger* e computador. Já o programa *RTMC Real Time Monitoring and Control* é responsável pela concepção da interface gráfica ou sistema supervisório, onde de forma intuitiva o usuário ajusta os parâmetros para desempenho do ensaio e também onde são exibidas de forma instantânea todas as informações mais relevantes, que neste caso são o tempo (número de ciclos e sua frequência), deformações e cargas aplicadas no corpo de prova. A tela do programa supervisório e seus detalhes são visualizados parcialmente na Figura 4.15.



(a) extensômetro



(b) datalogger

Figura 4.15. Detalhes do (a) extensômetro e (b) datalogger.

O sistema de controle e aquisição através do inversor de frequência (Figura 4.16 (b)) requer entrada de dados que permita ajustar os deslocamentos e frequências possíveis para que o motor funcione na faixa de rotação correta controlada por sensores indutivos, cujas principais características são colocadas na Tabela 4.4.

Quadro 4.4. Características do equipamento de aquisição de dados.

Esquema	Fabricante/Modelo	Distância de detecção	Alimentação	Dimensões	
				Comprimento	Rosca
	Autonics/PRL18-8DN	8 mm	12 a 24 VCC	80 mm	M18X1

A Figura 4.16 mostra o conjunto responsável pela estabilidade da frequência oscilatória de 3 Hz e a gama de cargas avaliadas nos ensaios dinâmicos controlado pelo sensor indutivo, Figura 4.16(a), fornecendo os dados necessários para que o inversor de frequência, Figura 4.16(b), mantenha os valores corretos de tensão e corrente que alimentam o motor elétrico.



(a) sistema de controle e aquisição de dados



(b) inversor de frequência

Figura 4.16. Detalhes do (a) sistema de aquisição de dados e (b) inversor de frequência.

Os níveis de carga baseada na tensão do ponto mais crítico da pá são pré-determinados e utilizados posteriormente nos ensaios com o auxílio de equacionamento da norma IEC 61400-2. A Figura 4.17 trata-se da conexão entre o datalogger e o computador através de uma porta RS 232 e a tela do sistema supervisorio Figura 4.17(b), onde os dados são mostrados em tempo real.



(a) sistema de controle e aquisição de dados



(b) sistema supervisorio

Figura 4.17. Detalhes do (a) sistema de aquisição de dados e (b) inversor de frequência.

4.4. Ensaio Experimentais Estáticos

Foram realizados ensaios de flexão até a ruptura de uma das pás do aerogerador. O objetivo foi coletar dados de deslocamento pela força aplicada através de um gráfico para avaliar a capacidade de flexão do componente.

O equipamento utilizado foi a própria bancada para ensaios dinâmicos, sendo a pá fixada em sua extremidade e flexionada por um cabo de aço montado a $2/3$ da distância da extremidade até a ponta, no caso, 1,8 m de comprimento, em função das forças aerodinâmicas se concentram em sua maior parte nesta região, conforme mostra a Figura 4.18.

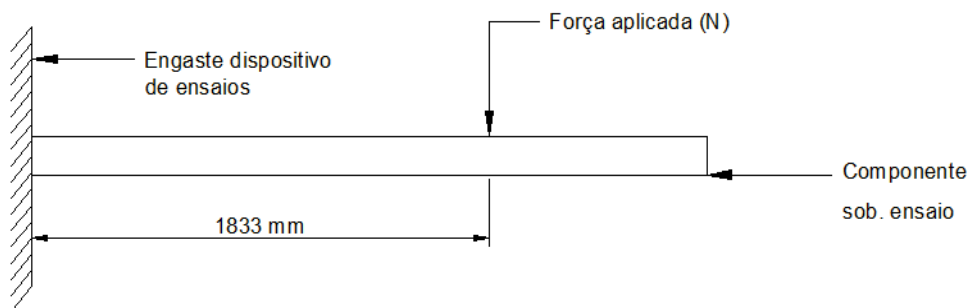
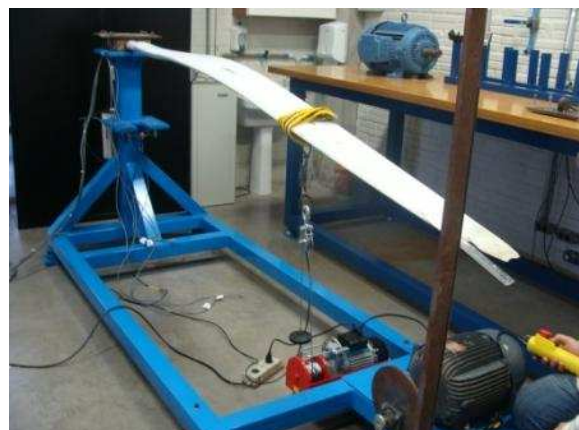


Figura 4.18 Ponto de aplicação da carga.

Na Figura 4.19 é mostrada a ligação entre o cabo de aço puxado pela talha elétrica, no centro a célula de carga para controle e monitoramento das forças aplicadas na pá, que por sua vez é fixada no comprimento determinado pela Figura 4.18.



(a) Aplicação e medição de cargas



(b) Medição de deslocamento

Figura 4.19 Ensaio de flexão experimental estático.

Conforme as cargas introduzidas pelo dispositivo (talha elétrica) provocavam flexão, o deslocamento que ocorria na ponta da pá foi registrado através de uma escala (mm) fixada em uma haste montada na bancada de ensaios como mostrada na Figura 4.20 (a), possibilitando relacionar o valor da força (N) medida pela célula de carga com a variação do deslocamento devido a flexão. A medição da força foi feita por uma célula de carga do fabricante HBM com capacidade 2000 N e limite de segurança de 150%.



(a) Medição da amplitude de flexão



(b) Dispositivo aplicador de cargas

Figura 4.20. Detalhes dos componentes de aplicação de carga e medição do ensaio experimental estático.

4.4.1. Ensaio para medição de deflexão

Consiste na aplicação de uma carga equivalente ao peso da própria com intuito de comparar os resultados obtidos da deflexão experimental com dados teóricos baseados nas propriedades mecânicas do material, com o objetivo de verificar se há ou não similaridade entre os resultados experimentais, desta forma, calibrou o equipamento de ensaios como um todo para a realização dos testes dinâmicos.

Foram medidos os deslocamentos provocados pelas forças aplicadas de 49N e 117N no sentido longitudinal ao longo do eixo da pá, próximos aos pontos onde estão fixados os extensômetros, conforme Figura 4.21.

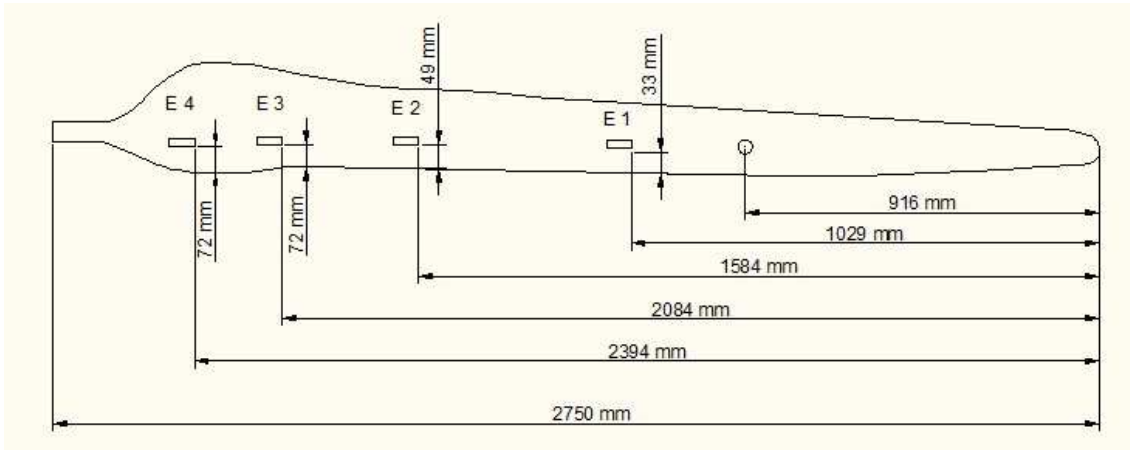


Figura 4.21 Ensaio experimental estático.

O ponto de aplicação de carga é $2/3$ a partir da extremidade. A carga foi mensurada com célula de carga marca HBM com capacidade 500 N e limite de segurança de 150%. A diferença da distância da pá sem aplicação de carga, ou seja, posicionada em linha neutra medida a partir de uma régua acoplada à bancada de ensaios, foi medida a deflexão com o uso de um paquímetro da marca Mitutoyo com 0,01 mm de resolução e utilizada como dado de entrada. O experimento montado para o ensaio com a régua acoplada ao dispositivo e o posicionamento da célula de carga junto ao local onde foi aplicada a força são mostrados na Figura 4.22.



Figura 4.22. Medição de deslocamento devido a flexão.

4.5. Procedimento para Determinação das Cargas e Número de Ciclos

O método simplificado de cargas (SLM) originalmente tem como principal objetivo o cálculo de cargas a partir de alguns parâmetros comuns a aerogeradores de pequeno porte para ser usado como base para previsão de número de ciclos até algum modo de falha (vida em fadiga), em conjunto com a degradação através de outros mecanismos tais como forças giroscópicas e efeito de rajadas de vento.

Este trabalho se deterá em termos da utilização do equacionamento respectivo ao caso de fadiga descrito na norma IEC 61400-2, como o primeiro passo onde ocorre especificamente a degradação localizada nas pás de aerogeradores pela ação normal da utilização através do tempo, não levando em consideração outros mecanismos que podem levar o rotor a um desgaste antecipado. Estes efeitos atuam conjuntamente sobre o restante da máquina e também contribuem para a diminuição de sua vida útil. Conforme equações apresentadas na seção 2.2.2, a formulação que diz respeito aos esforços sofridos pelas pás devido ao desgaste por fadiga requer os seguintes parâmetros mostrados na Tabela 4.1 para definição dos esforços aplicados pelo dispositivo no desenvolvimento parcial do conjunto de solicitações.

Tabela 4.1. Dados básicos da turbina eólica Enersud modelo Verne555.

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Comprimento da Pá	R	m	2,700
Número de Pás	n	n/a	3,000
Rotação nominal (projeto)	N_{proj}	rpm	250,000
Massa da Pá	m	kg	12,000
Distância CG e Eixo Rotor	R_{cog}	m	0,880
Área Transversal Pá	At	m^2	0,008
Momento Polar de Inércia (x)	W_x	m^3	3,17E-07
Momento Polar de Inércia (y)	W_y	m^3	2,98E-06
Eficiência	η	n/a	0,630
Potência	P	kW	6,000
Velocidade do Vento	V_i	m/s	13,000
Velocidade Projetada	V_{proj}	m/s	13,000

4.5.1 Metodologia de Cargas pelo Método Simplificado

Esta secção mostra as equações utilizadas e os resultados numéricos obtidos relativos às forças e momentos sobre a turbina eólica em estudo (Figura 4.2) para converter estes parâmetros em tensões equivalentes. Os parâmetros de operação básicos são: a potência de projeto P_{proj} , a velocidade do vento de projeto em que opera o aerogerador V_{proj} , e a velocidade angular n_{proj} . Estes parâmetros são intrínsecos às pás, e têm o intuito de aperfeiçoar o desempenho aerodinâmico e converter o máximo de vento em potência elétrica. Os parâmetros seguintes são fornecidos pelo fabricante das pás e estão contidos na Tabela 4.1, a média de velocidade de vento é V_m [m/s], velocidade do vento de referência V_{ref} [m/s]. A razão de ponta de pá de projeto λ_{proj} foi calculada usando a Equação 4.2 e inserindo o valor do raio do aerogerador, que para este caso é 2,7 m:

$$\lambda_{proj} = \frac{R \cdot \pi \cdot \omega_{proj}}{30 \cdot V_m \cdot 1,4} \quad (4.2)$$

Outro parâmetro necessário para cálculo do torque projetado para um aerogerador em operação é a eficiência do seu sistema de transmissão. No caso de aerogeradores de pequeno porte, em sua grande maioria, este sistema se reduz na ligação direta entre o cubo e o eixo do gerador, portanto, para máquinas acima de 20 kW admite-se um valor fixo de eficiência η de 0,7. Para aerogeradores abaixo de 20 kW segue a Equação 4.3 que calcula a eficiência no caso estudado.

$$\eta = 0,005 \cdot P_{proj} \quad (4.3)$$

O valor do torque projetado é encontrado a partir da potência de projeto P_{proj} , rotação nominal de projeto ω_{proj} e o valor da eficiência, que para o caso da máquina estudada deve ser calculado utilizando a Equação 4.4. O torque

projetado será usado como requisito para o cálculo da razão de ponta de pá *TSP*.

$$Q_{proj} = \frac{30.P_{proj}}{\eta.\pi.\omega_{proj}} \quad (4.4)$$

A força centrífuga F_Z é obtida unicamente dos dados básicos, os quais são fornecidos pelo fabricante de turbinas eólicas. São eles: a massa de uma das pás $m_{pá}$, a distância entre o centro de gravidade e o eixo do rotor R_{cog} , e a rotação nominal de projeto ω_{proj} :

$$F_Z = 2.m_{pá}.R_{cog}.\omega_{proj}^2 \quad (4.5)$$

A flexão no eixo x consiste no momento fletor que ocorre entre as pás, ou seja, é a força atuante que promove a aproximação ou afastamento paralelamente ao rotor. Este tipo de esforço é bastante atenuado na forma como são realizados os testes práticos em banca, no entanto, é uma componente integrante do conjunto de equações que compõem o método simplificado de cargas. A obtenção do momento fletor no eixo x se dá pelos dados básicos associados com torque de projeto Q_{proj} calculado.

$$M_x = \frac{Q_{proj}}{n_{pás}} + 2.m_{pá}.R_{cog}.g \quad (4.6)$$

O momento fletor no eixo y é uma das variáveis de maior interesse, pois calcula os esforços na direção principal de incidência do vento, direção a qual são flexionadas as pás avaliadas na bancada de testes descrita no item 4.3. Para cálculo do valor do momento M_y é utilizada a razão de ponta de pá anteriormente encontrada λ_{proj} com o torque de projeto Q_{proj} pelo número de pás que compõem o rotor, conforme Equação 4.7.

$$M_y = \frac{Q_{proj} \cdot \lambda_{proj}}{n_{pás}} \quad (4.7)$$

A síntese das tensões sofridas pelo rotor é simplificada em termos da tensão equivalente sofrida pelo mesmo. A obtenção das forças é feita a partir da tensão equivalente pela soma dos esforços em todas as direções. No caso, as forças de giro do rotor (força centrífuga) promove os esforços de arrancamento sobre o cubo sobre a variável F_Z , os outros dois esforços são os momentos fletores comentados anteriormente M_x e M_y divididos individualmente pela área da superfície transversal crítica A_{transv} e momentos polares de inércia W_x e W_y .

$$\sigma_{Eq} = \frac{F_Z}{A_{transv}} + \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \quad (4.8)$$

A força total $F_{total(n)}$ é calculada pela soma dos dois momentos fletores principais M_x e M_y dividido pela distância de aplicação da carga no ensaio dinâmico que é aproximadamente 1,8m.

$$F_{total(n)} = \frac{M_{Total}}{R_G} \quad (4.10)$$

Para obtenção da força em função do regime de vento F_{vi} utiliza-se $F_{total(n)}$ pela velocidade do vento no instante selecionado sobre velocidade que ocorre com maior frequência.

$$F_{vi} = F_{total(n)} \left(\frac{V_i}{V_n} \right)^2 \quad (4.11)$$

Os valores mostrados na Tabela 4.2 são os dados de entrada da Tabela 4.1 convertidos através das equações deste item, e mostrados de forma mais abrangente na secção 2.2.2.

Tabela 4.2. Parâmetros obtidos a partir dos dados de entrada da turbina eólica Enersud.

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Velocidade de rotação projeto	ω_{nom}	<i>rad / s</i>	26,18
Distância aplicação da carga	R_g	<i>m</i>	1,80
Razão de ponta de pá (TSR)	λ_{proj}	<i>n / a</i>	1,77
Torque Projetado	Q_{proj}	<i>N.m</i>	363,78
Força centrífuga (eixo z)	F_z	<i>N</i>	66,33
Flexão (eixo x)	M_x	<i>N.m</i>	328,24
Flexão (eixo y)	M_y	<i>N.m</i>	214,90
Cálculo da tensão equivalente	σ_{eq}	<i>MPa</i>	1107,54
Força equivalente	F_{eq}	<i>N</i>	3,30
Força total	F_{total}	<i>N</i>	301,74

As Equações 4.2 a 4.11 correspondem ao cálculo tanto ao nível de força quanto ao nível de tensões equivalentes. Na Tabela 4.3 estes valores estão expressos em termos de forças e tensão equivalente.

Tabela 4.3. Valores de força e tensão equivalente.

$V_i (m/s)$	$\sigma_{vi} (MPa)$	$F_{vi} (N)$
5	186,19	81,16186
6	268,12	116,8731
7	364,94	159,0773
8	476,66	207,7744
9	603,28	262,9644

Já a Tabela 4.4 mostra o resultado da multiplicação das forças equivalentes dos ventos de 5 a 9m/s pelas respectivas razões de tensões que vão de R0,4 a R0,8. Esses resultados combinados posteriormente serão os dados de entrada para os ensaios dinâmicos para níveis de tensões variados.

Tabela 4.4. Valores de razões de tensão para realização do ensaio cíclico.

$V_i (m/s)$	$R 0,4 (N)$	$R 0,5 (N)$	$R 0,6 (N)$	$R 0,7 (N)$	$R 0,8 (N)$
5	32,46	40,58	48,70	56,81	64,93
6	46,75	58,44	70,12	81,81	93,50
7	63,63	79,54	95,45	111,35	127,26
8	83,11	103,89	124,66	145,44	166,22
9	105,19	131,48	157,78	184,08	210,37

4.5.2. Metodologia para Espectro de Freqüência

São abordados a seguir as metodologias baseadas nas funções distribuição de Weibull para concepção do espectro de velocidades e determinação de número de ciclos, para cada velocidade de vento em conjunto com as razões de tensões que foram associadas para definir os parâmetros de ensaio. A análise estatística das velocidades de vento é feita de maneira usual por uma distribuição de Weibull. Para a obtenção dos dados e posterior construção do gráfico é necessária a obtenção dos parâmetros de escala e obtidos através da série de dados de velocidade do vento e suas respectivas ocorrências. A função densidade de distribuição de Weibull é descrita no item 2.4.1. O fator de escala c tem unidade da velocidade em (m/s) e é relacionado com a velocidade média V_m . O fator de forma k é adimensional e é relacionado com a variância (σ^2) da velocidade do vento em torno da velocidade média. A Figura 4.23 mostra de forma gráfica a função de Weibull $f(v)$ pela velocidade dos ventos.

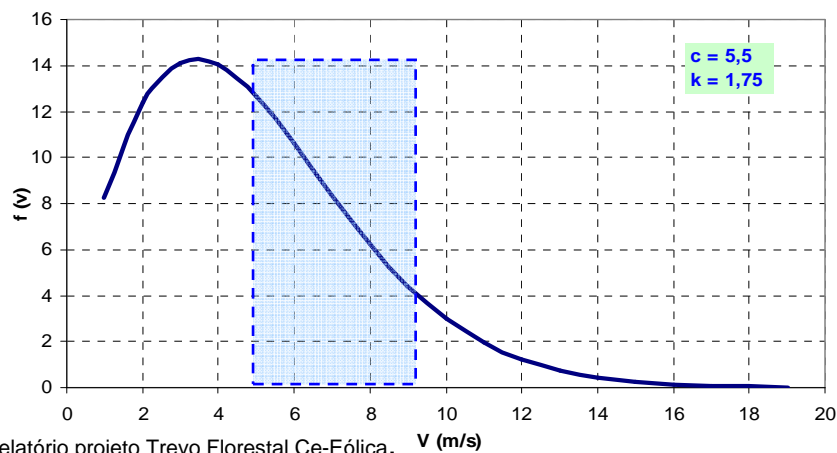


Figura 4.23. Distribuição da velocidade do vento para uma região do RS medida a 15m do solo.

A Figura 4.24 mostra de forma mais objetiva a distribuição de Weibull para a velocidade de vento aplicada sobre as razões de tensões (R). Portanto, é observada a relação da porcentagem do número de ciclos pela razão de tensão, sendo possível identificar quais as cargas mais frequentes expressa em função da porcentagem do número de ciclos.

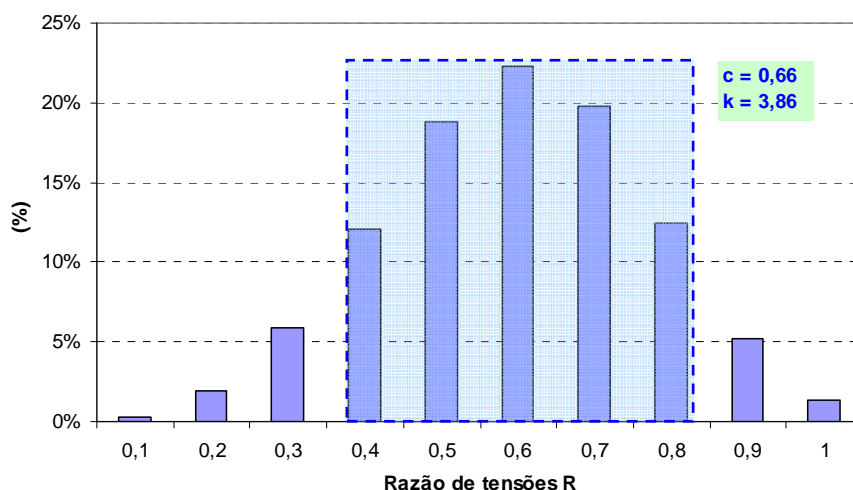


Figura 4.24. Espectro de cargas – razão de tensões em porcentagem.

Na coluna da direita da Tabela 4.5 encontram-se as velocidades do vento em m/s e na coluna da esquerda são as velocidades do vento multiplicados pela distribuição de velocidades para os regimes de vento que foram utilizados como dados de entrada, onde estes fatores são expressos de forma percentual. Os valores dos fatores de forma e escala podem ser calculados a partir de alguns métodos descritos na literatura, contudo foram utilizados para obtenção dos mesmos o método iterativo conforme ALÉ, J. A. V.; et. al. 2010 para o local do Rio Grande do Sul onde foram coletados os dados de vento, que serviram como base para posterior cálculo das razões de tensão. O valor do fator de forma $k=1,75$ e o valor do fator de escala é $c=5,5$.

Assim como a Tabela 4.5, a Tabela 4.6 também é constituída a partir de dados da distribuição de Weibull, no entanto os parâmetros modificados são as razões de tensões localizadas na coluna da direita. Os resultados da multiplicação desses fatores estão na coluna da esquerda, sendo utilizados posteriormente para o equacionamento e obtenção do número de ciclos.

Os valores dos coeficientes de Weibull calculados para c e k são respectivamente 0,66 e 3,86 em função da literatura existente para aerogeradores de dimensões similares utilizares estes parâmetros .

Tabela 4.5. Função distribuição de Weibull para velocidades de vento.

Vel. (m/s)	Weibull (%)
1	8,27
2	12,37
3	14,11
4	14,02
5	12,67
6	10,63
7	8,38
8	6,25
9	4,43
10	2,99
11	1,94
12	1,20
13	0,72
14	0,41
15	0,23
16	0,12
17	0,06
18	0,03
19	0,01
SOMA	98,82

Tabela 4.6. Função distribuição de Weibull para razão de tensões (R).

Razão de tensões	Weibull f (R)
0,1	0,0026
0,2	0,0190
0,3	0,0585
0,4	0,1208
0,5	0,1877
0,6	0,2229
0,7	0,1973
0,8	0,1240
0,9	0,0518
1,0	0,0133
SOMA	0,9980

Os dados contidos nas Tabelas 4.5 e 4.6 são variáveis de entrada principais que satisfazem a expressão, ainda necessitando das variáveis f_{ref} e T . A Equação 4.13 fornece separadamente o número de ciclos, necessitando

repetir o cálculo para cada razão de tensão (R). A declaração de variáveis também é mostrada no Quadro 4.5

$$N_c = (f_{ref} T) \left(\sum_{V_{min}}^{V_{max}} f(v) \sum_{R_{min}}^{R_{max}} f(R) \right) \quad (4.13)$$

Quadro 4.5. Declaração de variáveis Equação 4.13.

Incógnita	Descrição	Unidades
f_{ref}	Freqüência de referência para fadiga (0,05)	Hz
T	Número de horas do ano	horas
$f(v)$	Distribuição de Weibull para velocidade de vento	n/a
$f(R)$	Distribuição de Weibull para razão de tensões	n/a

No equacionamento para atingir o número de ciclos para cada condição expressa na tabela de resultados foi utilizado como referência a freqüência no valor de 0,5Hz ou 180 ciclos/hora, e o número total aproximado de horas no ano é 8760h. Este equacionamento relacionado a distribuição de velocidades de vento em um determinado local no estado do Rio Grande do Sul, e ainda a partir do percentual do número de ciclos em função das razões de forças foram calculados a partir da Equação 4.13. Os parâmetros listados na Tabela 4.7 são a relação do número de ciclos pela razão de tensões, fazem parte dos dados de entrada para o ensaio de esforços cíclicos.

Tabela 4.7. Obtenção do número de ciclos relacionando velocidade do vento e razão de tensões.

		Razão de tensões					Total
		0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
Velocidade do vento (m/s)	5	24137	37496	44519	39409	24769	170329
	6	20255	31464	37358	33070	20784	142931
	7	15962	24795	29440	26061	16379	112637
	8	11899	18484	21946	19427	12210	83966
	9	8432	13099	15553	13768	8653	59505
Total						569368	

4.6. Realização dos Ensaios de Fadiga

Conforme metodologia apresentada no item 4.5, a soma do conjunto de cargas em função do número de ciclos estes por sua vez multiplicados pelas razões de tensões mínimas e máximas variando entre R 0,4 a R 0,8 para velocidades de vento de 5 até 9 m/s, obteve-se a Tabela 4.8 que de forma simplificada é a combinação das Tabelas 4.4 e 4.17. A Tabela 4.8 norteia todo o procedimento de ajustes de parâmetros para os ensaios cíclicos na fase onde são avaliadas diferentes condições de velocidade do vento.

Na Figura 4.25 é possível visualizar graficamente os dados presentes na Tabela 4.8, ilustrando desta forma a relação de proporção entre o número de ciclos e as razões de tensão, mostrando também o efeito relacionado com a força aplicada no ensaio. Este comportamento demonstra que para a razão R0,6 está concentrado o maior número de ciclos para o regime de ventos, e que a intensidade da força aplicada aumenta quando aumenta a velocidade do vento.

Tabela 4.8. Parâmetros ajustados para os ensaios dinâmicos cíclicos.

		Razão de tensões (R)					
		0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
Ventos (m/s)	5	Nº de ciclos	24137	37496	44519	39409	24769
		Força (N) max.	81,2				
		min.	32,5	40,6	48,7	56,8	64,9
	6	Nº de ciclos	20255	31464	37358	33070	20784
		Força (N) max.	116,9				
		min.	46,75	58,44	70,12	81,81	93,50
	7	Nº de ciclos	15962	24795	29440	26061	16379
		Força (N) max.	159,1				
		min.	63,6	79,5	95,4	111,4	127,3
	8	Nº de ciclos	11899	18484	21946	19427	12210
		Força (N) max.	207,8				
		min.	83,1	103,9	124,7	145,4	166,2
	9	Nº de ciclos	8432	13099	15553	13768	8653
		Força (N) max.	263,0				
		min.	105,2	131,5	157,8	184,1	210,4

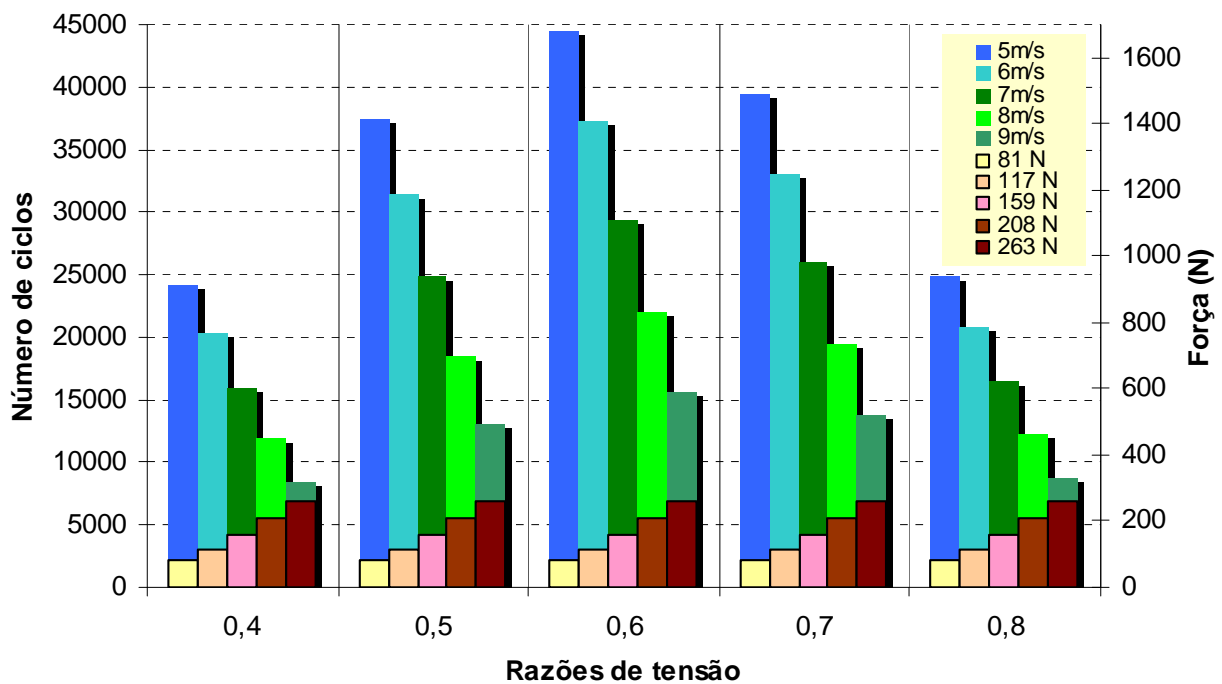


Figura 4.25. Variáveis de entrada para ensaio de esforços cíclicos

Em termos de ajuste do equipamento é possível através da célula de carga controlar a intensidade de aplicação de cargas fazendo a leitura das mesmas instantaneamente no programa supervisorio instalado no PC (Figura 4.15), descrito na secção 4.3.1. A intensidade das cargas é proporcional a amplitude do deslocamento obtido através do oblongo helicoidal usinado no volante do dispositivo oscilador, conforme mostrado na Figura 4.26(b). Portanto, quanto mais próximo ao centro de giro do volante, menores os valores de carga e quanto mais afastado, maiores serão as cargas aplicadas na pá. Ainda, para o ajuste dos valores máximos e mínimos segundo as razões de tensão determinadas pela tabela de ensaios (Tabela 4.8) é necessário transladar a barra roscada do braço de aplicação de cargas mostrada na Figura 4.26(a). Toda operação deve ser acompanhada pela tela do programa supervisorio para inserção correta dos valores.



(a) Posicionamento da amplitude



(b) Ajuste da amplitude

Figura 4.26. Posicionamento dos extensômetros ao longo da pá.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Ensaio de Tração e Flexão

5.1.1. Curvas Tensão-Deformação

No gráfico da Figura 5.1 são apresentados os resultados dos ensaios de tração descritos no item 4.2.1, os quais mostram as curvas entre força (N) e alongamento (mm) para os corpos de prova retirados da pá do aerogerador do fabricante Enersud modelo verne555 para as seis amostras testadas, conforme norma NBR 9622 para materiais plásticos, onde somente quatro foram válidos por romperem na área calibrada do corpo de prova.

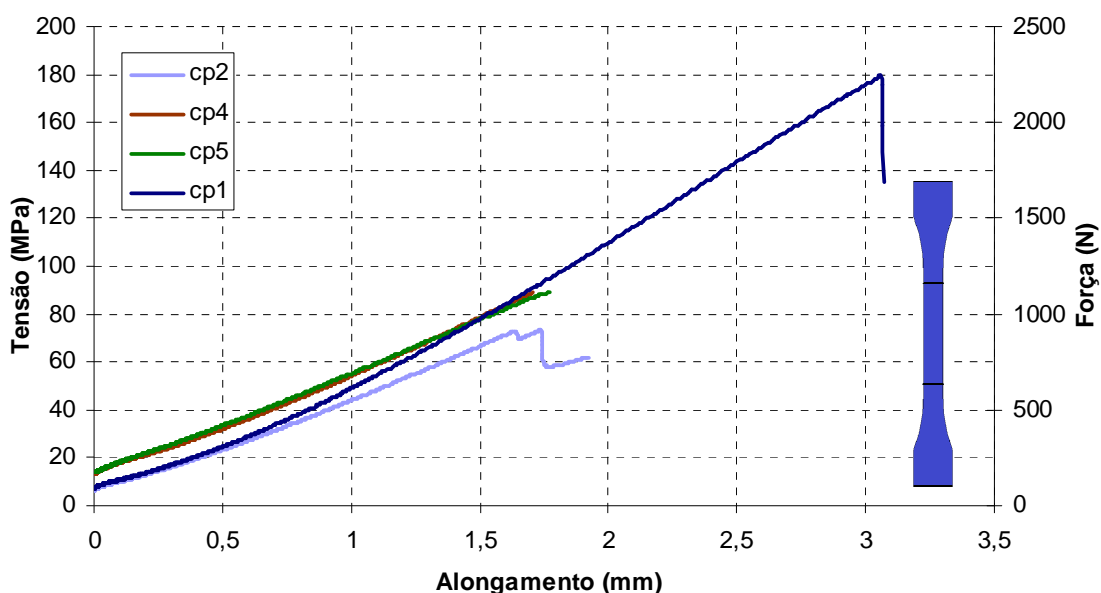


Figura 5.1. Gráfico Força (N) x Alongamento (mm) para os corpos de prova 1, 2, 4,5 ensaiados a tração.

Baseado nos resultados evidenciados nas curvas força (N) por alongamento (mm), o equacionamento utilizado para cálculo do módulo (E) para o material compósito foi detalhado na secção 3.3.1.

A Tabela 5.1 mostra dados de (E) para os diversos corpos de prova ensaiados e sua média, compondo o valor global utilizado como parâmetro de propriedade mecânica. Conforme recomendado pela norma NBR 9622, o ensaio foi composto por seis corpos de prova, dos quais 4 romperam dentro da parte calibrada, condição que valida o ensaio, no entanto, observa-se uma diferença no ponto de ruptura do corpo de prova 1 em relação aos demais, o que pode ser atribuído ao escorregamento das garras no momento inicial do ensaio. Entretanto, os dados fornecidos pelo corpo de prova 1 foram utilizados para compor a média global do módulo de elasticidade e está na mesma ordem de grandeza encontrada na Tabela 3.1 da secção 3.2.

Tabela 5.1. Dados de módulo de elasticidade para corpos de prova em ensaio de tração.

	$F(N)$	$l_0 (mm)$	$A (mm^2)$	$\Delta l (mm)$	$E (GPa)$	$E \text{ médio (GPa)}$	$\sigma_u (MPa)$	$\sigma_u \text{ médio (MPa)}$
CP1	399	50	13,5	0,5	2,9		166	
CP2	309	50	13,5	0,5	2,2	2,5	73	105
CP4	336	50	13,5	0,5	2,4		89	
CP5	304	50	13,5	0,5	2,2		89	

O gráfico da Figura 5.2 é relacionado com o ensaio de flexão em três pontos citado na secção 4.2.2, e mostra a curva força (N) e o deslocamento ou deflexão em (mm). Para esta curva força por deslocamento observa-se um exemplo de resultado do ensaio onde é possível identificar a aplicação da pré-carga, a região de comportamento elástico, a região de comportamento plástico e a posterior fratura. O valor médio para a força de escoamento foi de 1500 N e para a força de início da fratura de 1650 N. Os corpos de prova apresentaram um deslocamento total médio de 11 mm.

O valor encontrado para a tensão de ruptura da pá Enersud para o ensaio de flexão foi em média de aproximadamente 105 MPa.

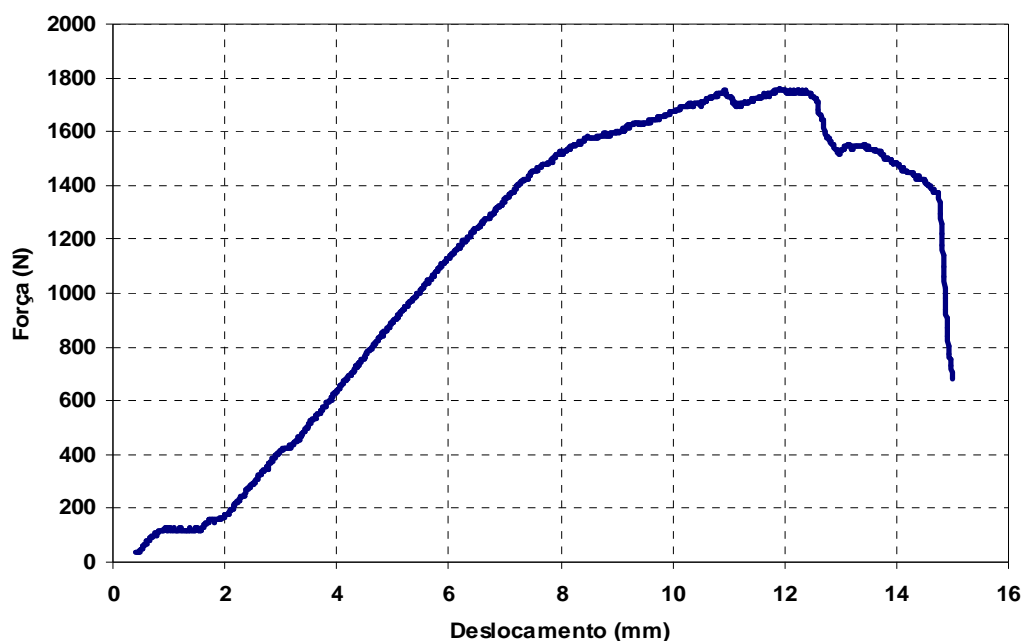
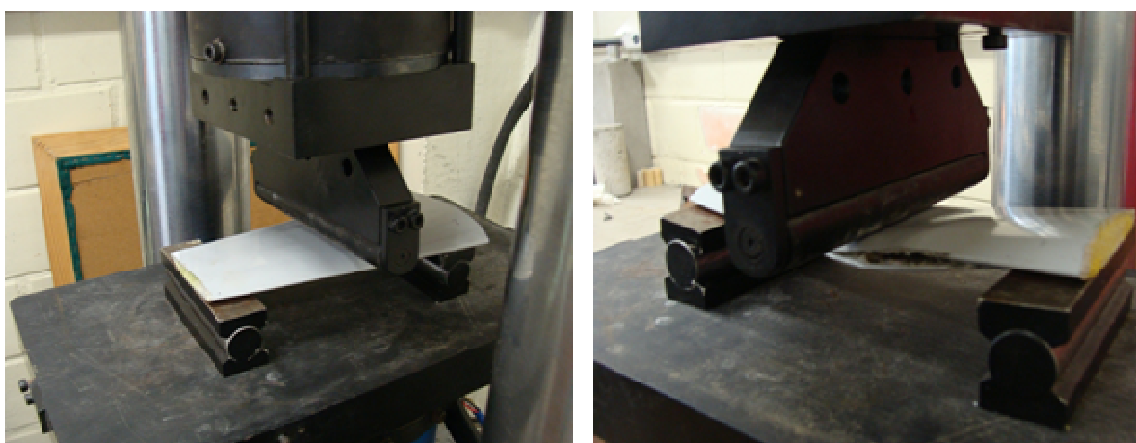


Figura 5.2. Gráfico força (N) x deslocamento para corpo de prova ensaiado a flexão.

Conforme imagens obtidas durante a realização dos ensaios, destacam-se os instantes de início de aplicação da carga (Figura 5.3(a) e o momento da ruptura do corpo de prova (Figura 5.3(b)). Observaram-se fraturas primeiramente nas laterais seguida por fraturas na parte superior em contato com o punção.



(a) Início da aplicação de carga.

(b) Momento da ruptura do corpo de prova.

Figura 5.3. Imagens obtidas durante realização dos ensaios de flexão estática.

5.1.2. Superfície de Fratura dos C.P ensaiados em Tração

A seguir nas Figuras 5.4 a 5.6 são mostradas as imagens dos corpos de prova com as respectivas superfícies de fratura. Uma das características observadas no ensaio foi à ruptura dos corpos de prova no ângulo de 45° , ou seja, no mesmo sentido o qual é colocada a fibra na matriz do material, demonstrando que o descolamento ou ruptura ocorre na interface fibra-matriz.

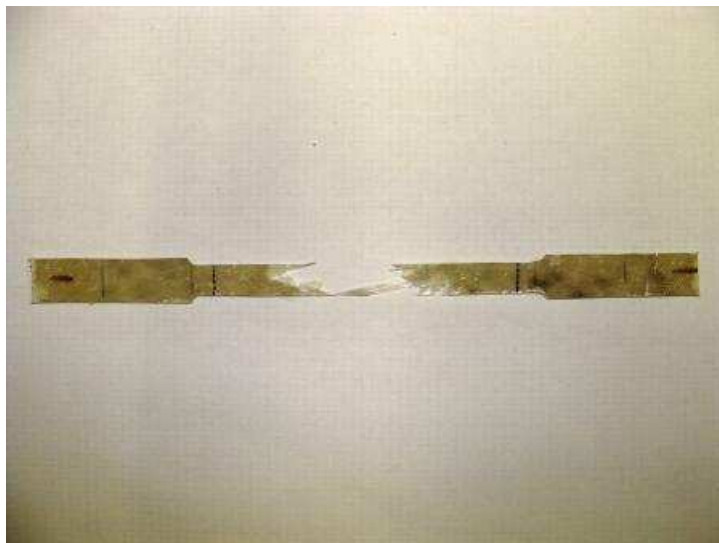


Figura 5.4. Região de ruptura para corpo de prova 1.

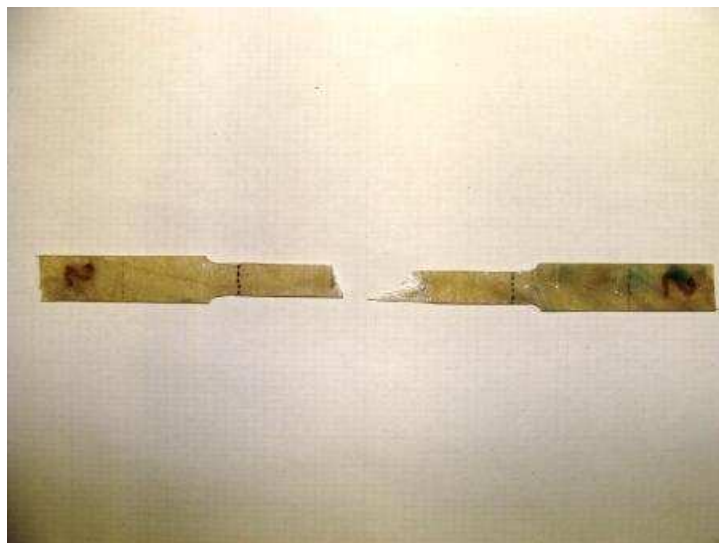


Figura 5.5. Região de ruptura para corpo de prova 2.

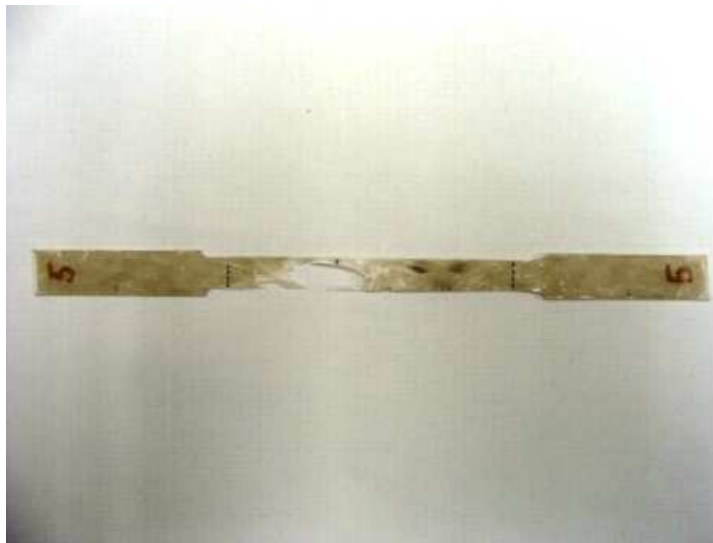


Figura 5.6. Região de ruptura para corpo de prova 5

5.2. Ensaio Experimentais Estáticos da Pá até Limite de Ruptura

5.2.1. Calibração do Sistema

Os resultados para os ensaios estáticos de deflexão estão apresentados na forma das Tabelas 5.2 a 5.5 e também representados graficamente nas Figuras 5.7 e 5.8. Foi observada semelhança no comportamento à flexão dos resultados experimentais entre as amostras da turbina eólica Enersud utilizada nos ensaios estáticos do presente trabalho, assim como nos resultados obtidos na literatura (Epaarachchi, 2002), evidenciando que as propriedades mecânicas dos materiais são próximas, apresentando mesma ordem de grandeza em relação aos resultados gráficos.

Tabela 5.2. Parâmetros obtidos a partir dos dados de entrada da turbina eólica Enersud.

Aplicação de força 49 N a 2553 mm		
extensômetro	posição	deflexão
G1	1720	19,7
G2	1165	6,0
G3	666	1,3
G4	355	0

Tabela 5.3. Parâmetros obtidos a partir dos dados de entrada da turbina eólica Enersud.

Aplicação de força 49 N a 1850 mm		
extensômetro	posição	deflexão
G1	1720,5	12,2
G2	1165,5	4,4
G3	666	1,0
G4	355,2	0

Conforme gráfico da Figura 5.7 é possível observar que no ponto onde a pá tem comprimento de 1000 mm sua deflexão é próxima de 5 mm tanto para a carga aplicada a uma distância de 1850 mm partindo da extremidade onde é montada no cubo, quanto 2553 mm partindo do mesmo ponto.

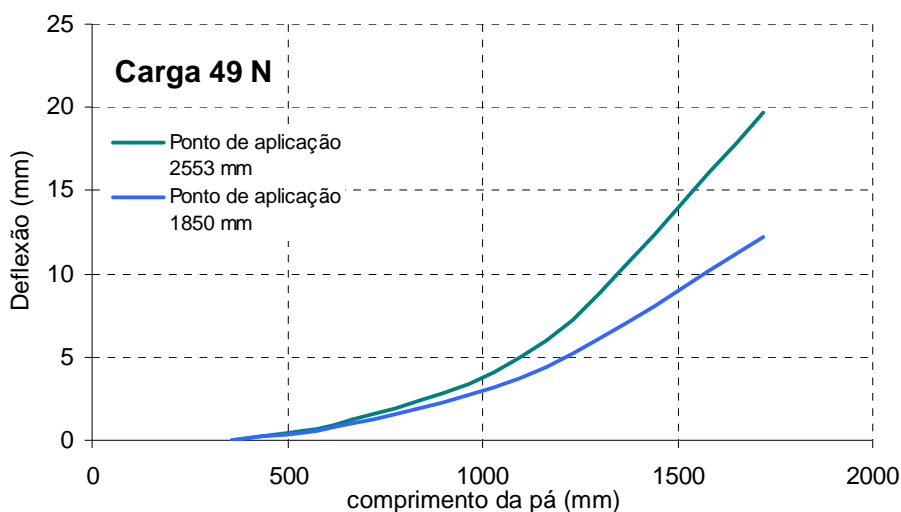


Figura 5.7. Gráfico Força (N) x Alongamento (mm) para a pá 1.

Tabela 5.4. Parâmetros obtidos a partir dos dados de entrada da turbina eólica Enersud.

Aplicação de força 117 N a 2553 mm		
extensômetro	posição	deflexão
G1	1720	49,2
G2	1165	14,8
G3	666	2,9
G4	355	0,9

Tabela 5.5. Parâmetros obtidos a partir dos dados de entrada da turbina eólica Enersud.

Aplicação de força 117 N a 1850 mm		
extensômetro	posição	deflexão
G1	1720	28,7
G2	1165	9,8
G3	666	2,1
G4	355	0,6

Já o gráfico da Figura 5.8 compreende os mesmos pontos de aplicação de forças adaptados da literatura, porém utiliza a força de 117 N que é equivalente a massa da pá em estudo nos ensaios estáticos e dinâmicos realizados para esta dissertação. Correlacionando com os gráficos existentes na literatura, observa um comportamento a flexão proporcional ao longo do comprimento da pá, o que além de evidenciar a similaridade das propriedades mecânicas do material, também atesta o adequado funcionamento do sistema de medição e aquisição de dados.

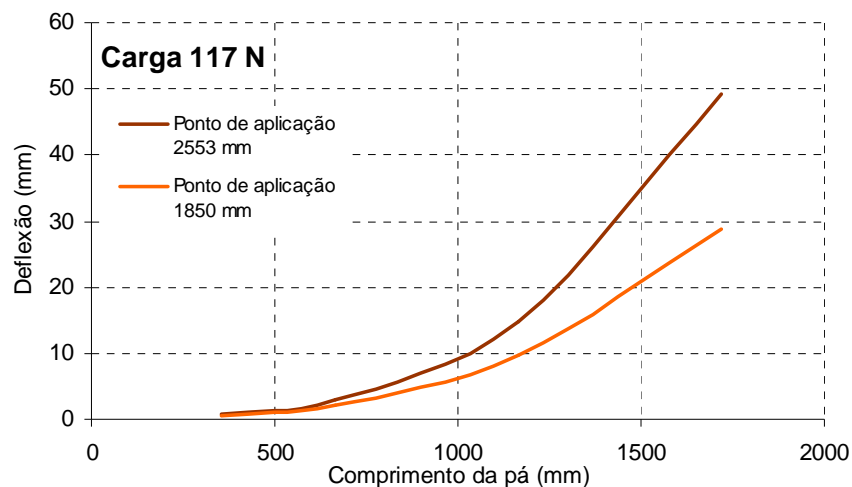


Figura 5.8. Gráfico Força (N) x Alongamento (mm) para pá 1.

Também foi realizado ensaio estático de flexão até a ruptura para entender o comportamento do material conforme descrito no item 4.4. Nas Figuras 5.9(a) e 5.9(b) são mostrados os pontos de ruptura do material assim como sua flexão máxima.



(a) Deflexão máxima antes da ruptura

(b) Ponto de ruptura (descolamento das faces)

Figura 5.9. Pá submetida a ensaio estático.

A Figura 5.10 representa graficamente a curva da força (N) em função da deflexão (mm) traçada a partir da Tabela 5.6. Na qual também é possível obter a tensão de ruptura (MPa) do material, dividindo o valor da força aplicada no ponto da curva onde o material começa a sair do regime de deformação elástica para o regime de deformação plástica.

Tabela 5.6. Dados coletados no ensaio de flexão da pá.

Ensaio de flexão (ruptura)			
Deflexão (mm)	Carga (N)	Deflexão (mm)	Carga (N)
25	0,9215		
70	100	427	796
96	152	458	845
122	203	487	896
147	251	550	950
173	301	539	994
202	355	575	1052
223	395	622	1050
254	454	653	1100
278	502	605	1150
309	557	634	1204
326	593	666	1254
355	655	695	1305
377	695	650	1360
405	746	700	1420

O motivo o qual a função do gráfico da Figura 5.10 não parte da deflexão zero ao contrário da força aplicada é devido ao deslocamento inicial provocado na pá ser exercido pela própria força peso do componente ensaiado.

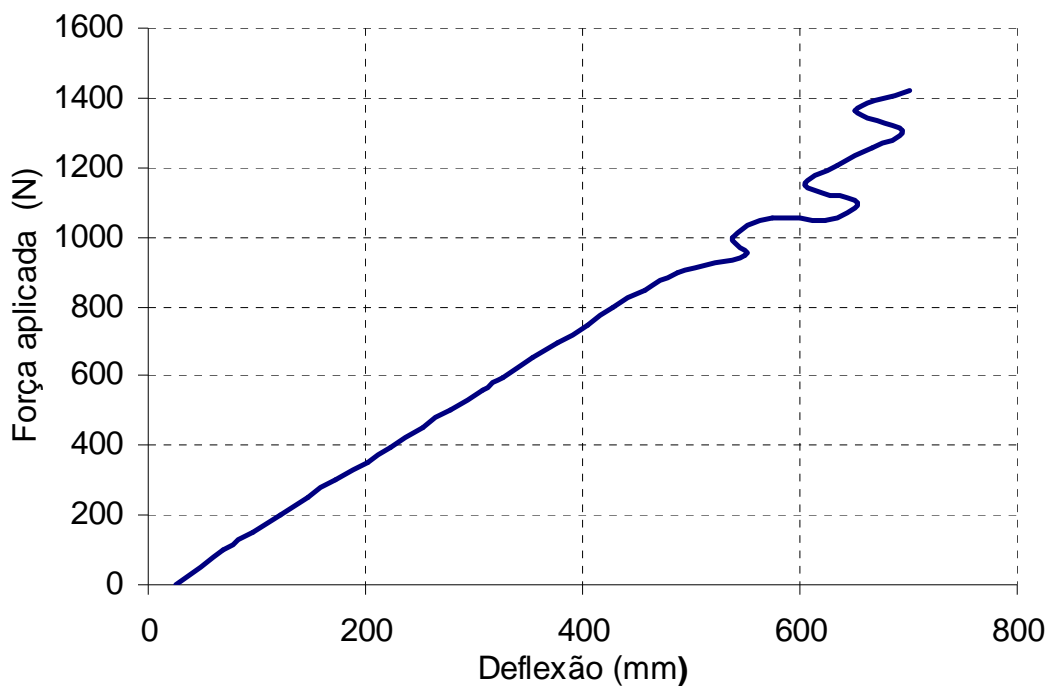


Figura 5.10. Força aplicada pela deflexão até a fratura.

5.3. Ensaio de Fadiga

5.3.1. Ciclo Variável em Função da Frequência de Ventos no RS

Os gráficos são construídos separadamente a partir dos dados da velocidade dos ventos, portanto também são analisados separadamente pelo critério de velocidade dos ventos. Os resultados são visualizados a partir dos gráficos para 5,6,7,8 e 9m/s. Os mesmos são obtidos a partir de linhas de tendência para cada extensômetro e célula de carga. Como os ensaios consistiram na combinação de cinco razões de tensões por cinco velocidades de vento, foram realizados vinte e cinco blocos de testes, os quais compartilham da mesma metodologia. Por questão de simplicidade será

apresentada graficamente nesta secção apenas o primeiro bloco, o restante dos resultados em termos de valores serão apresentados na forma de tabelas.

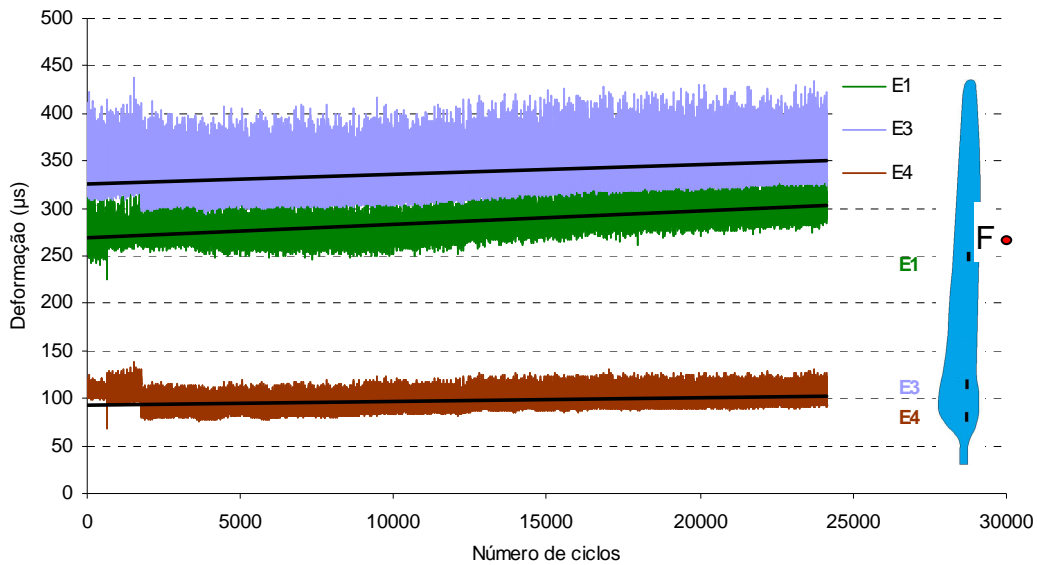


Figura 5.11. Sinais de deformação coletados dos extensômetros.

As Figuras 5.11 e 5.12 mostram um dos gráficos das quais foram obtidas as equações de linhas de tendência mostrada na Tabela 5.7 para obtenção das linhas de tendência e posterior construção dos gráficos para as diferentes velocidades de vento analisadas.

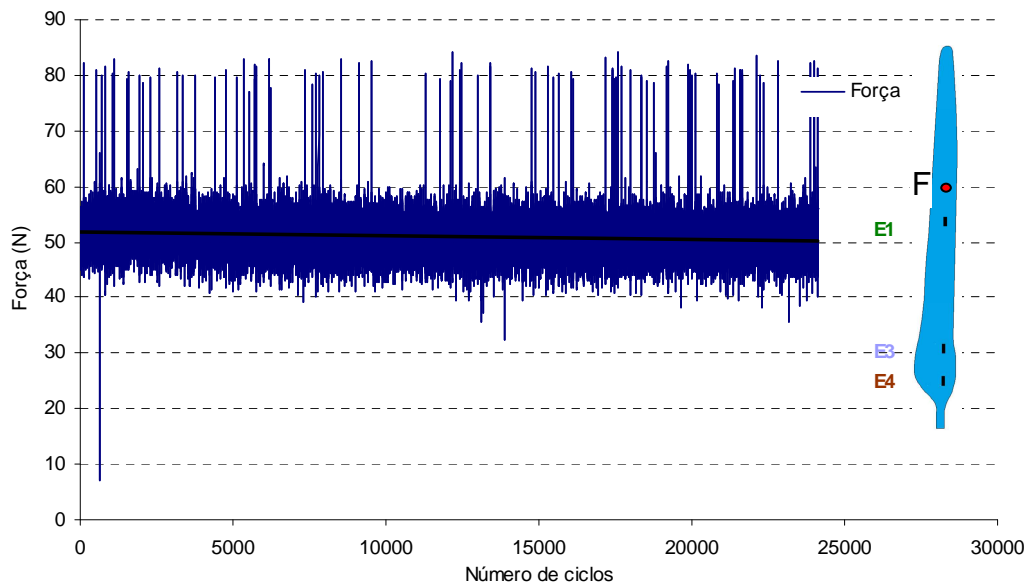


Figura 5.12. Sinal da força aplicada coletada da célula de carga.

Tabela 5.7. Dados coletados no ensaios de cíclicos.

Razão	R 0,4
Nºciclos	24137
Força	$y = -7E-05x + 51,945$
E1	$y = 0,0014x + 268,29$
E3	$y = 0,001x + 325,15$
E4	$y = 0,0004x + 92,724$

Nas Figuras de 5.13 a 5.17 são visualizados os gráficos finais das solicitações sofridas pela pá em função da velocidade do vento. Apenas para o gráfico com cargas equivalente a velocidade de vento de 5m/s são mostradas na Tabela 5.8 as equações que determinam as linhas de tendência do gráfico da Figura 5.13.

Tabela 5.8. Dados coletados no ensaio cíclico para velocidade de 5m/s.

Ciclo	Força	E1	E3	E4
24137	$y = -7E-05x + 51,9$	$y = 0,0014x + 268,2$	$y = 0,001x + 325,1$	$y = 0,0004x + 92,7$
37496	$y = 1E-05x + 59,9$	$y = 0,0018x + 256,3$	$y = 0,0015x + 373,5$	$y = 0,0008x + 71,8$
44519	$y = -2E-05x + 62,3$	$y = 0,0017x + 349,4$	$y = 0,0015x + 471,0$	$y = 0,0008x + 122,9$
39409	$y = 2E-06x + 67,3$	$y = 0,001x + 322,8$	$y = 0,0009x + 496,1$	$y = 0,0005x + 101,4$
24769	$y = -8E-06x + 71,7$	$y = -6E-05x + 391,9$	$y = 5E-05x + 574,3$	$y = 9E-05x + 131,9$

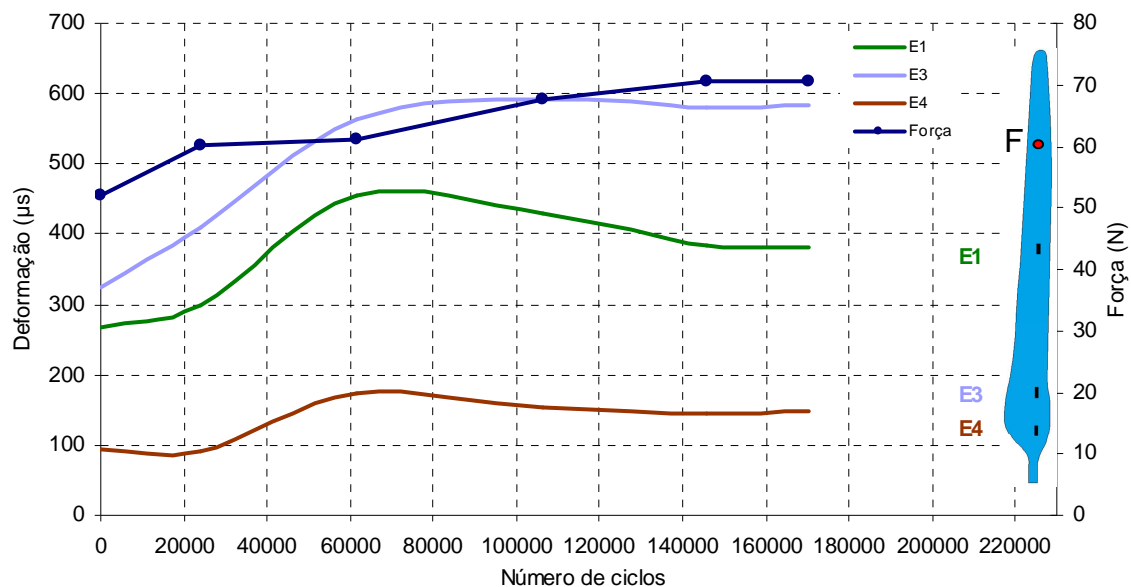


Figura 5.13. Gráfico das solicitações e deformações para ventos de 5m/s.

Após o tratamento dos sinais gerados nas vinte e cinco rodadas de testes realizadas para o espectro de tensões, nas quais se obteve cinco razões de tensões para cada velocidade de vento, foram obtidos os gráficos mostrados nas Figuras de 5.13 a 5.17. Observando por exemplo no gráfico da Figura 5.13 o extensômetro quatro mediu as menores deformações conforme esperado pois se encontra perto do ponto de engastamento. O extensômetro três (E3) apresentou maiores valores de deformação, desta forma vislumbra o ponto de maior curvatura da pá localizado entre o ponto de aplicação da carga e o extensômetro quatro. O extensômetro um (E1) apresenta valores médios de deformação, e sua linha de tendência localiza-se entre as linhas dos extensômetros três (E3) e quatro (E4) no gráfico da Figura 5.13. Visualizando isoladamente esta região da pá sem o auxílio dos gráficos é possível determinar que a amostra permanece praticamente reta na região onde está localizado o sensor.

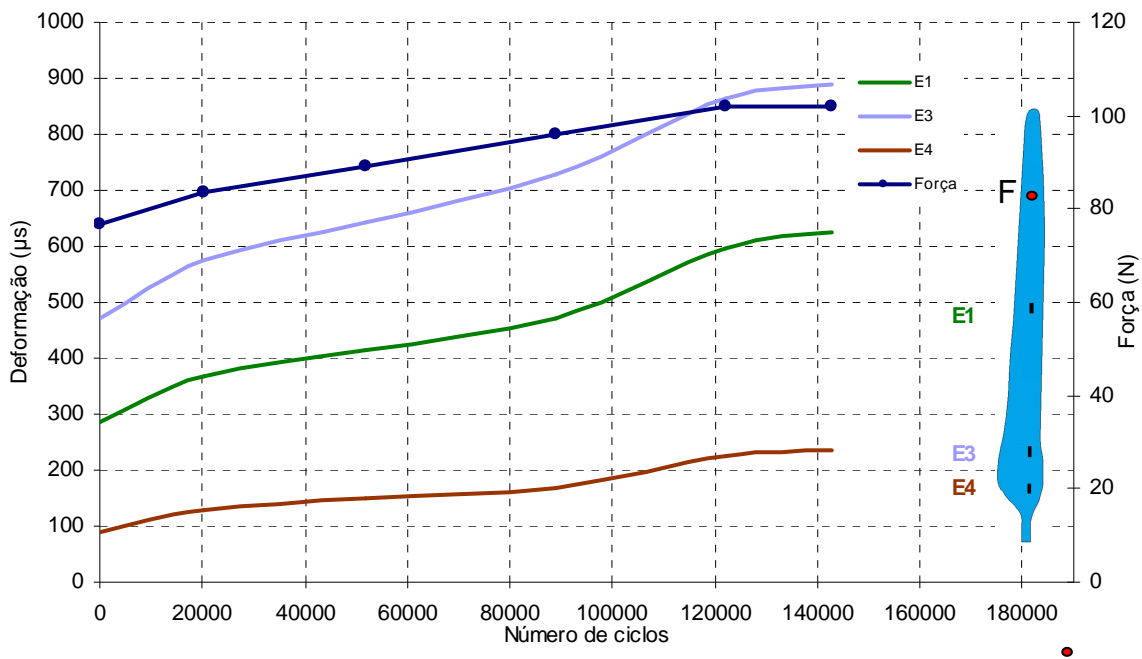


Figura 5.14. Gráfico das solicitações e deformações para ventos de 6m/s.

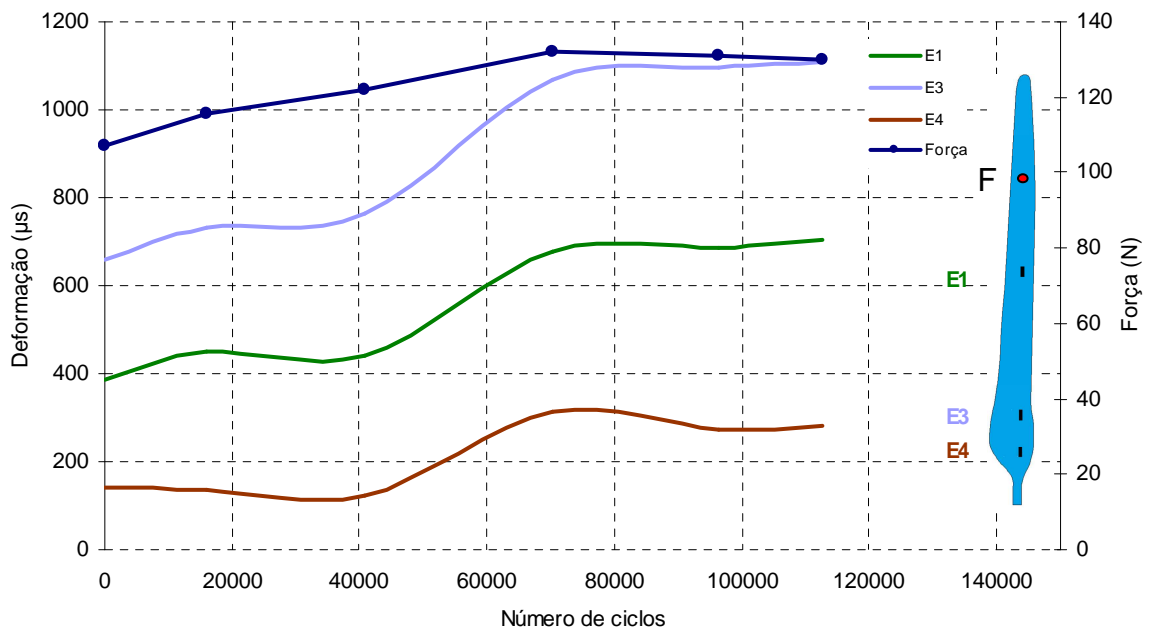


Figura 5.15. Gráfico das solicitações e deformações para ventos de 7m/s.

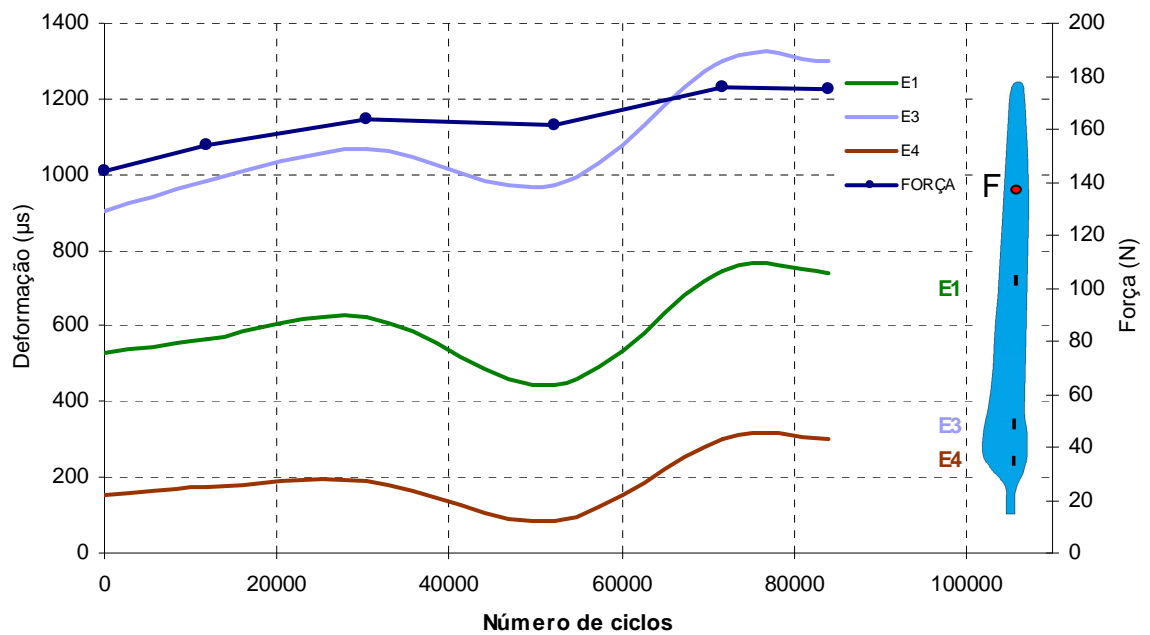


Figura 5.16. Gráfico das solicitações e deformações para ventos de 8m/s.

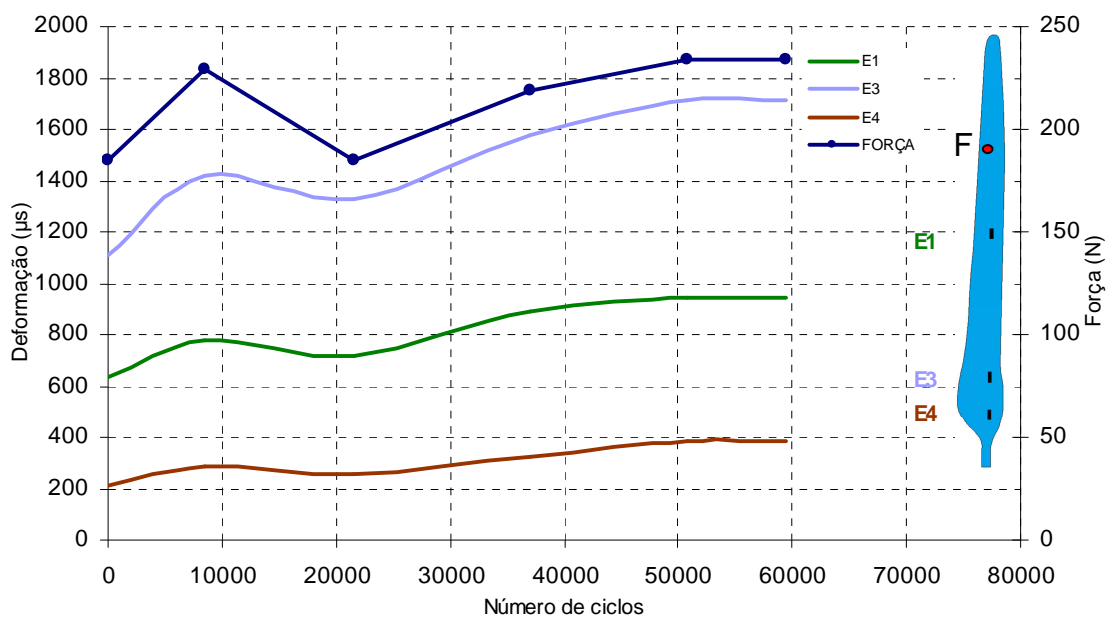


Figura 5.17. Gráfico das solicitações e deformações para ventos de 9m/s.

O gráfico da Figura 5.17 se diferencia dos demais gráficos por esboçar o que pode ser levado em conta como comportamento característico do material em início de fragilização da matriz, e que ocorre na região entre dez e vinte mil ciclos após todas as rodadas de testes que compreendem as velocidades de 5 a 9m/s. Este comportamento de aumento da força (F), está associado ao espectro de cargas que segundo a distribuição de ventos é submetida a número de ciclos menores. Em contrapartida, as diferenças entre as razões de tensões são as maiores aplicadas até então, o que faz aumentar as amplitudes e conseqüentemente as tensões e severidade do ensaio.

Esses fenômenos podem ser caracterizados como fadiga de baixo e alto ciclo respectivamente. A fadiga de alto ciclo, a qual foi aplicada nos ensaios de esforços contínuos conforme Figura 5.20, contém baixos níveis de tensão e está relacionada com a resistência elástica do material, o que corresponde às propriedades elásticas, tendo visto que as deformações empregadas durante a realização deste ensaio foram predominantemente elásticas, enquanto a fadiga de baixo ciclo referente aos ensaios da Figura 5.19 ocorre em altos níveis de tensão, e é caracterizada pela presença de deformação plástica.

Analisando os outros gráficos onde o número de ciclos é maior, entretanto a carga aplicada em função da distribuição de Weibull é menor, é possível observar que a força aumenta em todos eles de uma forma geral quando aumenta o número de ciclos, exceto, no gráfico da Figura 5.17 como mencionado anteriormente.

5.3.2. Ciclo Constante

A Figura 5.18 mostra o componente antes do início dos ensaios que somaram $3 \cdot 10^6$ ciclos para velocidades de vento de 6m/s com razões de tensões R 0,6 somado aos $6 \cdot 10^5$ ciclos de carga variável onde foram analisados os intervalos das razões de R0,4 a R0,8 somando um total de três milhões e quinhentos mil ciclos ensaiados para a amostra da Figura 5.19.



(a) Visão da extremidade da pá

(b) Visão aproximada

Figura 5.18. Região da extremidade da pá (raiz) antes dos ensaios dinâmicos.

Após as condições ensaiadas surgiram modificações da matriz na região da extremidade da pá, onde verificou-se através do comportamento dos extensômetros, quais são as áreas mais críticas em termos de valores de deformação.

Durante a execução das primeiras rodadas do teste com aplicação de tensões contínuas sobre a amostra, foi visualizado o aparecimento de pequenas bandas brancas alinhadas no sentido da fibra o que normalmente refere-se a cristalização do polímero gerado pela deformação elevada próximo

à fibra. Este fenômeno indica que o fenômeno ocorreu no sentido de arranjo da fibra na matriz, sugerindo delaminação ou descolamento entre fibra e matriz. Esse desgaste do material ocorreu entre os extensômetros 3 e 4, o que aliado com o comportamento demonstrado nos gráficos das Figuras 5.13 a 5.17 também sugere que a maior concentração de tensões ocorre neste local da amostra.



(a) Visão da extremidade da pá

(b) Visão aproximada

Figura 5.19. Região da extremidade da pá (raiz) após ensaios dinâmicos.

O gráfico da Figura 5.20 mostra as linhas de tendência obtidas a partir das médias dos sinais coletados pelos sensores, que através do SAD, medem a deformação tanto dos sensores instalados ao longo da amostra como pelo sensor de carga localizado no ponto onde elas são aplicadas.

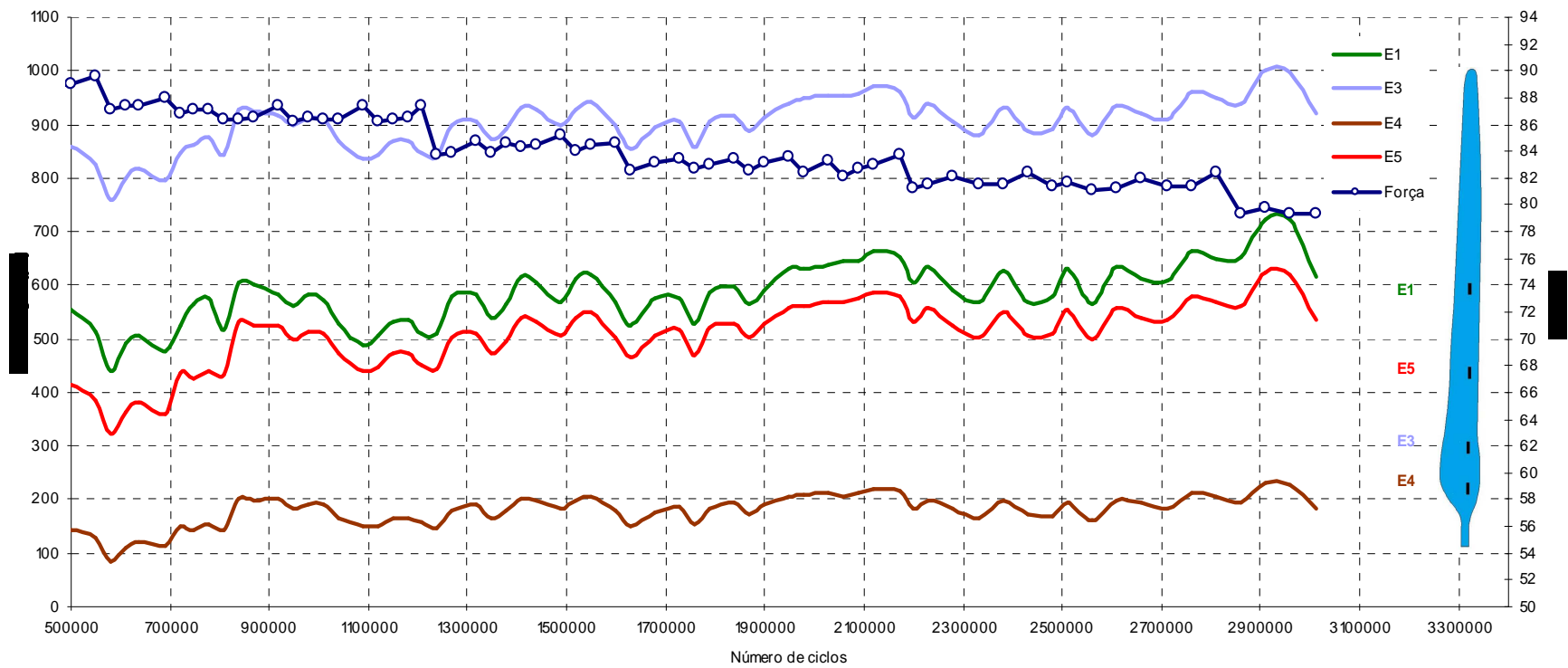


Figura 5.20. Deformação e força em função do tempo (número de ciclos)

É possível observar o decréscimo da força ao longo do ensaio comprovando a taxa de degradação do material. No entanto, verificando os valores onde foram ensaiados os primeiros ciclos comparado ao montante de $3,5 \cdot 10^6$, verifica-se aparentemente a estabilidade dos sinais, contudo, existe uma diferença de valores que poderia ser mais acentuada se houver um aumento de cargas e ciclos para verificações posteriores que poderiam ser feitas em ensaios futuros.

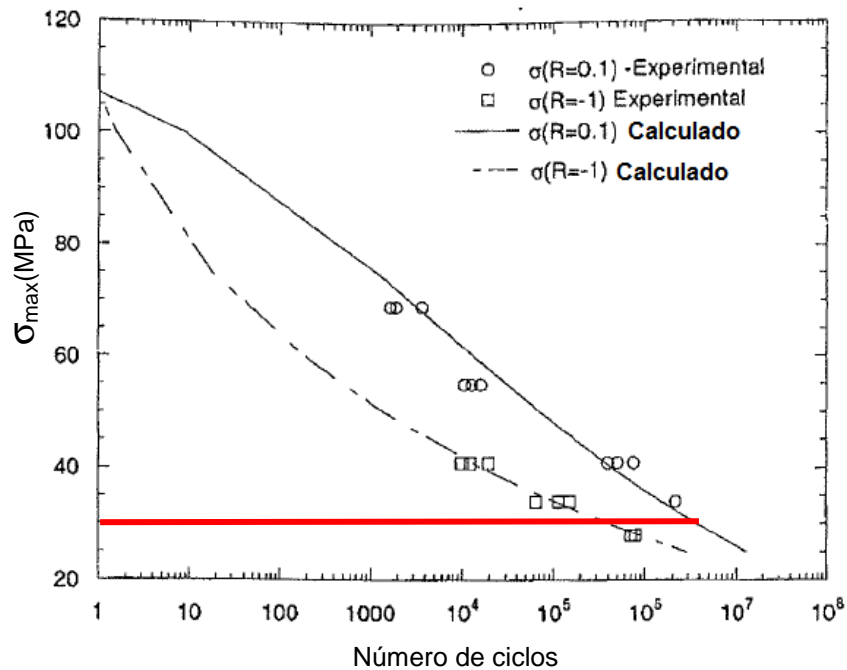
Para a rodada de testes com ciclo constante verificou-se que os valores de força são menores comparando-se aos ensaios variáveis, onde a leitura da força para ventos de 6m/s sempre esteve abaixo dos valores avaliados em ensaio estático.

Para a ordem de grandeza avaliada nos ensaios com cargas variáveis realizados até 10^5 ciclos, o material não apresentou modificação significativa, a não ser na última rodada com velocidade de ventos de 9m/s.

Observa-se que o material não fraturou para o valor de $3,5 \cdot 10^6$ ciclos que compreende a totalidade das rodadas de ensaio. Segundo a literatura (Epaarachchi, 2002) estima-se aproximadamente que um milhão de ciclos corresponde a um ano de um aerogerador em operação, portanto, é possível afirmar que a amostra resistiu a um período superior a três anos em campo, salvaguardando as diferenças climáticas existentes entre regiões onde os mesmos possam estar em funcionamento.

Fundamentando na análise dos parâmetros de resistência do material em estudo, onde pode ser averiguado que os níveis de solicitação do mesmo não foram superiores a 25% dos valores da força de ruptura do material, que é de aproximadamente 1000 N, pode-se sugerir que as condições aplicadas nos ensaios dinâmicos utilizando força máxima ($F_{m\acute{a}x}$) de 263 N foram executadas em nível brando ou suave, o que pode ser levado em consideração numa análise de vida do material que para estes estágios de tensões, o mesmo poderia desenvolver o que pode ser chamado de uma vida quase infinita em fadiga. No entanto, para o momento é correto sugerir que o material tenha vida muito longa em fadiga, pois o comportamento citado é característica dos metais.

O gráfico da Figura 5.21 é uma curva característica de um material compósito com matriz de poliéster reforçado com fibra de vidro utilizado na literatura similar ao material utilizado nos ensaios realizados para esta dissertação. Como comentado anteriormente através desta ferramenta é possível ter uma ordem de grandeza para a durabilidade da amostra em número de ciclos, localizando no gráfico o local onde a força aplicada nos testes encontra ou não a curva característica do material.



Adaptado: (Epaarachchi, 2002).

Figura 5.21. Comportamento em fadiga de material compósito em matriz de poliéster reforçado com fibra de vidro (+45°-45°) fração volumétrica $V_f=0.38$ e tensão de ruptura $\sigma_f=107\text{MPa}$

6. CONCLUSÃO

- No âmbito da dissertação foi possível a realização com sucesso de ensaios estáticos tanto para tração quanto de flexão de corpos de prova com seus respectivos resultados
- Foi implementada uma bancada para ensaios de fadiga em pás de turbinas eólicas de pequeno porte.
- Foi aplicada uma metodologia para obter um espectro de cargas cíclicas utilizando dados de vento locais e razões de tensões obtidas a partir de cargas aerodinâmicas utilizando o equacionamentos da IEC -61400-2.
- Neste nível de solicitações não ocorreu falha das propriedades mecânicas na pá.
- Utilizando uma curva característica tensão-ciclos de material semelhante podemos estimar que com estes níveis de cargas a pá poderia projetar (estimar) uma vida útil apropriadas para funcionamento em aerogeradores de pequeno porte.

7. TRABALHOS FUTUROS

- Melhoria do sistema de coleta e aquisição de dados viabilizando testes ininterruptos. Dependendo do sistema implementado é possível avaliar um componente aerodinâmico para um elevado número de ciclos em curtos espaços de tempo reduzindo o número de *set up's*;
-
- Investigação das propriedades a fadiga do material em questão e construção de dispositivo push-pull;
-
- Construção de curva de fadiga para o material analisado para posterior estimativa de vida útil em conjunto com outros ensaios;
-
- Elaboração de software com equacionamento para previsão teórica de vida a fadiga a partir de dados do material.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEGAS, Fabiano Daher; PEÑA, Gustavo de Marsillac; ALÉ, Jorge Antonio Villar; SIMIONI, Gabriel Cirilo. Power Curve of Small Wind Turbine Generators - Laboratory and Field Testing. In: RIO 3 – WORLD CLIMATE & ENERGY EVENT, Rio de Janeiro. 2003.

AKDAG, Seyit A. DINLER, Ali. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications, Energy Conversion and Management, Volume 50, Issue 7, July 2009, Pages 1761-1766, ISSN 0196-8904.

ALÉ, Jorge Antonio Villar; PEÑA, Gustavo de Marsillac; ADEGAS, Fabiano Daher. Performance of Small Wind Turbines Generators. In: ISES 2003 SOLAR WORLD CONFERENCE, Gothenburg. 2003.

ALÉ, J. A.V., 2004. “Desenvolvimento de Turbina Eólica de Eixo Vertical”, Projeto Finep FNDCT/CT-ENERG.

ALÉ, Jorge Antonio Villar; ADEGAS, Fabiano Daher; SIMIONI, Gabriel Cirilo; “Methodologies for Power Curve Test of Small Wind Turbines”. In: WINDPOWER 2005 Conference and Exhibition, Denver, USA.

ALE, Jorge Antonio Villar, WENZEL, G. M., LOPEZ, Henrique Fioravanti. Estudo de Implementação de Sistema Eólico Predial para Geração de Energia em Porto Alegre. In: I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar: 2007, Fortaleza/CE.

ALE, Jorge Antonio Villar et al. Wind Resource and Environment Characteristics in South Coast of the State of Rio Grande do Sul. In: World Climate & Energy Event – Rio: 2009, Rio de Janeiro/RJ. 17 a 19 de mar.

ALÉ, J. A. V.; PEREIRA, A. L., Taller de Energia Eólica. Ministério de Energia Y Minas, 2002

ALÉ, J. A. V.; et. al., Wind Resource Description Evaluating a new Method of Determining The Weibull Parameters Near A Forestry Area. EWEC 2010.

ASHBY, M.F.E JONES, R.H. (1981), Engineering Materials . An Introduction to their Properties and Aplications , Pergamon Press, London.

BARROS, A.S. Estudo do Desalinhamento das Fibras nas Propriedades Mecânicas de Compósitos Estruturais de Pás Eólicas. São José dos Campos. 2010. 180p. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores. INPE. Brasil.

BRØNDSTED, P. LILHOLT, H. LYSTRUP, A. Ann. Rev. Mater. Res. 35, 505 (2005).

CIEMAT. Principios de conversión de la energia eólica. 4ª ed. Madrid, 2001. 500 p

CLAUSEN PD, WOOD DH. Research and development issues for small wind turbines. Renew Energy 1999; 16: 922–7.

CLAUSEN PD, WOOD DH. Recent Advances in Small Wind Turbine Technology. Wind Engineering volume 24, no. 3, 2000 P 189- 201

EPAARACHCHI Jayantha A, CLAUSEN Philip D. The development of a fatigue loading spectrum for small wind turbine blades. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2006; 94(4):207–23.

EPAARACHCHI, J. A. The Development and Testing of a New Fatigue Life Procedure for Small Composite Wind Turbine Blades Incorporating New Empirical Fatigue Life Prediction and Damage Accumulation Models for Glass Fibre Reinforced Plastics", Ph.D. Thesis presented to the University of Newcastle, Australia 2002

EPAARACHCHI, Jayantha A. and CLAUSEN, Philip D. Accelerated Full Scale Fatigue Testing of a Small Composite Wind Turbine Blade Using a Mechanically Operated Test Rig. In: Atrens, A., Boland, J. N., Clegg, R. and Griffiths, J. R. Structural Integrity and Fracture International Conference (SIF'04), Brisbane, Australia, (111-117). 26-29 September 2004.

GARCIA, Amauri et al. Ensaio dos Materiais. 2ª Ed. Campinas: LTC, 1999. 247p.

GARCÍA, F. H.; KREZINGER, A.; CAMEJO, E. ; ALE Jorge Antonio Villar; HECHAVARRÍA, F. Sistema fotovoltaico centralizado en comunidad rural el triunfo: características y resultados preliminares de comportamiento energético.. In: Congreso de Asades, 2007, San Luis, Argentina. Comunicaciones del XXX Congreso de Asades. Salta, Argentina: INENCO, 2007. p. 04.09-04.15.

GRIFFIN, D.A., ASHWILL T.D. Alternative Composite Materials for Megawatt-Scale Wind Turbine Blades: Design Considerations and Recommended Testing Journal of Solar Energy Engineering November 2003, Vol. 125

HAYMAN B. et al. Materials Challenges in Present and Future Wind Energy. Mrs Bulletin Volume 33 April 2008 Harnessing Materials for Energy 343-353

HUGHES, S. Wind Turbine Testing at NREL. National Renewable Energy Laboratory Sandia Blade Workshop 2008.

IEC 61400-23, Wind turbine generator systems – Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades.

IEC 1400-2, International Standard, International Electro Technical Commission, 1998

JURECZKO, M. PAWLAK, M. MEZYK, A. Optimization of wind turbine blades Journal of Materials Processing Technology 167 (2005) 463–471

KONG C, BANG J, SUGIYAMA Y. Structural investigation of composite wind Turbine blade considering various load cases and fatigue life. *Energy* 2005; 30(11–12):2101–2114.

MANDELL, J.F., D.D. SAMBORSKY, N.K. WAHL, and H. J. SUTHERLAND, “Testing and Analysis of Low Cost Composite Materials Under Spectrum Loading and High Cycle Fatigue Condition,” Conference Paper, *ICCM14*, Paper # 1811, SME/ASC, 2003, 10 p.

NIJSSEN, R.P.L. “Fatigue Life Prediction and Strength Degradation of Wind Turbine Rotor Blade Composites”. SAND2006-7810P Unlimited Release Printed October 2007.

PARASCHIVOIU, Ion; “Wind Turbine Design: with emphasis on Darrieus concept”, Ecole Polytechnique de Montreal, 2002, 438

PEREIRA, M. Monticelli. Um Estudo do Aerogerador de Velocidade Variável e Sua Aplicação para Fornecimento de Potência Elétrica Constante. Juiz de Fora. 2004. 83p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG - Brasil.

PETERSON, P. CLAUSEN, P.D. Timber for High Efficiency Small Wind Turbine Blades. *Wind Engineering* Volume 28, NO. 1, 2004 P–96 87.

SILVA, C. D., SERAPHIM, O. J. TEIXEIRA, N. M. Potencial eólico para bombeamento de água na fazenda lageado.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas.

SPERA, David A. 1994 - Wind turbine technology: fundamental concepts of wind turbine engineering. New York, NY: ASME, 1994. 638 p. : il.

WAHL, N.K. (2001) “Spectrum Fatigue Lifetime and Residual Strength for Fiberglass laminates,” Prepared by Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550 for the United States Department of Energy under Contract DE-FC02-91ER75681

WENZEL, G.M. Projeto Aerodinâmico de Pás de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal. Porto Alegre. 2007. 74p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

ANEXO A – TABELA COMPLETA - MSC

Método Simplificado de Cargas (detalhamento do item 4.5.1)

Vi (m/s)	σ_i (MPa)	R 0,4 (MPa)	R 0,5 (MPa)	R 0,6 (MPa)	R 0,7 (MPa)	R 0,8 (MPa)
5	186,20	74,48	93,10	111,72	130,34	148,96
6	268,13	107,25	134,06	160,88	187,69	214,50
7	364,95	145,98	182,47	218,97	255,46	291,96
8	476,67	190,67	238,33	286,00	333,67	381,33
9	603,28	241,31	301,64	361,97	422,30	482,63
10	744,79	297,92	372,40	446,88	521,35	595,83
11	901,20	360,48	450,60	540,72	630,84	720,96
12	1072,50	429,00	536,25	643,50	750,75	858,00
13	1258,70	503,48	629,35	755,22	881,09	1006,96
14	1459,79	583,92	729,90	875,88	1021,85	1167,83
15	1675,78	670,31	837,89	1005,47	1173,05	1340,63
16	1906,67	762,67	953,33	1144,00	1334,67	1525,33
17	2152,45	860,98	1076,22	1291,47	1506,71	1721,96

Vi (m/s)	Fi (N)	R 0,4 (N)	R 0,5 (N)	R 0,6 (N)	R 0,7 (N)	R 0,8 (N)
5	81,16	32,46	40,58	48,70	56,81	64,93
6	116,87	46,75	58,44	70,12	81,81	93,50
7	159,08	63,63	79,54	95,45	111,35	127,26
8	207,77	83,11	103,89	124,66	145,44	166,22
9	262,96	105,19	131,48	157,78	184,08	210,37
10	324,65	129,86	162,32	194,79	227,25	259,72
11	392,82	157,13	196,41	235,69	274,98	314,26
12	467,49	187,00	233,75	280,50	327,24	373,99
13	548,65	219,46	274,33	329,19	384,06	438,92
14	636,31	254,52	318,15	381,79	445,42	509,05
15	730,46	292,18	365,23	438,27	511,32	584,37
16	831,10	332,44	415,55	498,66	581,77	664,88
17	938,23	375,29	469,12	562,94	656,76	750,58