

ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS
MESTRADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

RODRIGO VACARI COIMBRA

**USO DO MÉTODO SIMPLIFICADO DE CARGAS (SLM – IEC 61400-2) E DO ESPECTRO DE
CARGAS DE FADIGA PARA ESTIMATIVA DE VIDA EM PÁS DE AEROGERADORES DE
PEQUENO PORTE**

Porto Alegre

2019

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica
do Rio Grande do Sul

Ficha Catalográfica

C679u Coimbra, Rodrigo Vacari

Uso do método simplificado de cargas (SLM - IEC 61400-2) e do espectro de cargas de fadiga para estimativa de vida em pás de aerogeradores de pequeno porte / Rodrigo Vacari Coimbra . – 2019.

107 p.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Dos Santos.

1. Pás. 2. Aerogerador de pequeno porte. 3. Compósito de fibra de vidro. 4. Estimativa de vida à fadiga. 5. Espectro de ventos. I. Dos Santos, Carlos Alexandre. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecária responsável: Salete Maria Sartori CRB-10/1363



**USO DO MÉTODO SIMPLIFICADO DE CARGAS (SLM – IEC 61400-2)
E DO ESPECTRO DE CARGAS DE FADIGA PARA ESTIMATIVA DE
VIDA EM PÁS DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE**

RODRIGO VACARI COIMBRA

ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

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

Porto Alegre

Agosto, 2019



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**USO DO MÉTODO SIMPLIFICADO DE CARGAS (SLM – IEC 61400-2)
E DO ESPECTRO DE CARGAS DE FADIGA PARA ESTIMATIVA DE
VIDA EM PÁS DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE**

RODRIGO VACARI COIMBRA

ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

ORIENTADOR: PROF. DR. Carlos Alexandre dos Santos

Dissertação realizada 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.

**Porto Alegre
Agosto, 2019**



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**USO DO MÉTODO SIMPLIFICADO DE CARGAS (SLM - IEC
61400-2) E DO ESPECTRO DE CARGAS DE FADIGA PARA
ESTIMATIVA DE VIDA EM PÁS DE AEROGERADORES DE
PEQUENO PORTE**

CANDIDATO: RODRIGO VACARI COIMBRA

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS - ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA

DR. MOISÉS DE MATTOS DIAS - FEEVALE

DRA. ELEANI MARIA DA COSTA - PGETEMA - PUCRS

PUCRS

Campus Central
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 32 - Sala 507 - CEP: 90619-900
Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625
E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br
www.pucrs.br/politecnica

*“Somente um bom mestre
permanece sendo um eterno
aprendiz.”
(Gandhi)*

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, que tornaram tudo possível, fazendo o impossível.

À empresa Fratelli, por disponibilizar o material de estudo.

À HP por conceder bolsa de estudo e possibilitar o desenvolvimento do trabalho.

Ao Gabriel Cirilo Simioni, técnico do LAB-Eólica por todos os ensinamentos e auxílios, não medindo esforços para realizar este projeto.

Ao Pedro Araldi, estagiário do LAB-Eólica, pelas conversas e pelo apoio.

Ao Josselin Filiol, estagiário do LAB-Eólica, pelo empenho empregado junto a mim nesta empreitada.

Ao Prof. Sérgio Boscato Garcia, por sanar todas as dúvidas, sempre informando fontes para pesquisas.

Por fim, ao meu orientador Prof. Carlos Alexandre dos Santos, idealizador deste projeto, que me auxiliou indicando fontes de conhecimento e direcionando minhas atividades.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	7
AGRADECIMENTOS.....	8
SUMÁRIO	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS.....	14
LISTA DE QUADROS	15
LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS	16
RESUMO.....	19
ABSTRACT.....	20
1. INTRODUÇÃO	21
2. OBJETIVOS	25
2.1. Objetivos Específicos	25
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
3.1. Forças Atuantes nas Pás de Aerogeradores	26
3.2. Materiais Empregados nas Pás.....	30
3.2.1. Compósitos	30
3.2.2. Fibra de Vidro	32
3.2.3. Compósitos Reforçados por Fibras Contínuas e Descontínuas.....	32
3.2.4. Poliamida 6.6	34
3.2.5. Poliamida Reforçada com Fibra de Vidro.....	36
3.3. Estimativa de Vida à Fadiga	38
3.3.1. Método Simplificado de Cargas (SLM).....	41
3.3.2. Cálculo do Número de Ciclos.....	46
4. METODOLOGIA APLICADA.....	48
4.1. Características da Pá	48
4.2. Ensaio Mecânicos	50
4.2.1. Ensaio de Resistência à Tração	50
4.2.2. Ensaio de Flexão	53
4.2.3. Ensaio de Dureza.....	57

4.3. Análises das Superfícies de Fratura após Ensaios.....	58
4.4. Estimativa da Vida em Fadiga	59
4.4.1. Coleta de Dados de Vento	59
4.4.2. Cálculo de Parâmetros para o Método de Epaarachchi.....	59
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5.1. Caracterização do Compósito das Pás	64
5.1.1. Resistência à Tração	64
5.1.2. Resistência à Flexão.....	67
5.1.3. Dureza	68
5.2. Superfícies de Fratura.....	69
5.3. Análise dos Ventos	74
5.4. Estimativa da Vida a Fadiga	76
6. CONCLUSÕES	80
7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	82
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
9. ANEXOS	87
Anexo A – Ensaios Mecânicos.....	87
Anexo B – Superfícies de Fratura	96
Anexo C – Planilha desenvolvida com equações do MSC.	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Aerogeradores instalados em área rural no Complexo Eólico Pontal da Enerplan, Viamão, RS.....	22
Figura 1.2. Micrografia de uma amostra fraturada de poliamida reforçada com fibra de vidro.	23
Figura 1.3. Exemplo de curva de fadiga.	24
Figura 3.1. Esquema de rotor de aerogerador de pequeno porte com três pás.	27
Figura 3.2. Fluxo de vento em torno de um perfil aerodinâmico.....	28
Figura 3.3. Turbina eólica de sustentação e interação vento-pás.	29
Figura 3.4. Tendência de movimento através das forças atuantes sobre a pá.	29
Figura 3.5. Classificação dos compósitos segundo Ashby [2007].	31
Figura 3.6. Classificação dos compósitos quanto à disposição das fibras.	31
Figura 3.7. Relação entre comprimento da fibra e resistência do compósito.	34
Figura 3.8. Esquema da obtenção da poliamida 6.6.	35
Figura 3.9. Área fraturada de uma amostra de poliamida reforçada com fibra de vidro.	36
Figura 3.10. Deposição do tecido de fibra de vidro em um molde de pá de aerogerador de grande porte.	37
Figura 3.11. Distribuição de <i>Weibull</i> para dados de velocidade de vento em m/s.....	39
Figura 3.12. Influência do fator de forma na distribuição de <i>Weibull para velocidades de ventos</i>	40
Figura 4.1. Fluxograma da metodologia empregada na pesquisa.....	48
Figura 4.2. Rotor com três pás, modelo Multi-Wing 3WTR.	49
Figura 4.3. Fotografia da pá Multi-Wing 3WTR como recebida.....	49

Figura 4.4. Imagem obtida por microscópio ótico (250x), comprovando as fibras aleatórias.....	50
Figura 4.5. Regiões de onde foram extraídos os corpos de prova.	51
Figura 4.6. Processo de fabricação dos corpos de prova.	51
Figura 4.7. Corpo de prova para tração, dimensões em mm.	52
Figura 4.8. Corpos de prova para ensaio de tração.	52
Figura 4.9. Representação esquemática do ensaio de flexão a 3 pontos.	54
Figura 4.10. Corpo de prova para flexão, dimensões em mm.....	54
Figura 4.11. Imagem obtida durante realização do ensaio de flexão a 3 pontos.	55
Figura 4.12. Método da reta tangente para cálculo do módulo de elasticidade.	56
Figura 4.13. Região da pá onde foi extraída a amostra para o ensaio de dureza.	57
Figura 4.14. Realização do ensaio de dureza em durômetro Bareiss Shore D.	58
Figura 4.15. Detalhe da raiz da pá.	63
Figura 5.1 Gráfico Força x Deslocamento do ensaio de resistência à tração.	65
Figura 5.2. Corpo de prova fraturado após ensaio de tração.	66
Figura 5.3. Gráfico Força x Deslocamento obtido do ensaio de flexão.	67
Figura 5.4. Corpo de prova após ensaio de flexão.....	68
Figura 5.5. Relação entre escalas de dureza Shore.	69
Figura 5.6. Amostras para ensaio de MEV.....	70
Figura 5.7. Imagem MEV da superfície fraturada na amostra ensaiada em tração...	70
Figura 5.8. Detalhe da região fraturada no ensaio de tração.	71
Figura 5.9. Detalhe da fratura em tração, com medida de diâmetro da fibra de vidro.	71

Figura 5.10. Imagem MEV da superfície fraturada na amostra ensaiada em flexão.	72
Figura 5.11. Detalhe da região fraturada no ensaio de flexão.....	72
Figura 5.12. Detalhe da fratura em flexão, com medida de diâmetro da fibra de vidro.	73
Figura 5.13. Distribuição de Weibull para o espectro de velocidades de vento.	75
Figura 5.14. Distribuição de Weibull para velocidades de vento com destaque para o segmento utilizado para o cenário de condição crítica.	76
Figura 5.15. Distribuição de <i>Weibull</i> para razões de tensão.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Composições típicas de fibras de vidro (em percentual) e propriedades mecânicas.	32
Tabela 3.2. Propriedades mecânicas da PA 6.6.	35
Tabela 3.3. Propriedades mecânicas de referência para poliamida com fibra de vidro.	37
Tabela 4.1. Principais características da pá Multi-Wing 3WTR.	49
Tabela 4.2. Avaliação dos dados de velocidades de ventos coletados do projeto SONDA (período 05/2009 a 05/2011).	60
Tabela 4.3. Informações para cálculos pelo Método Simplificado de Cargas (SLM).	61
Tabela 5.1 Dimensões dos corpos de prova (CP) pré-ensaio de tração.	64
Tabela 5.2. Resultados dos ensaios de tração.	65
Tabela 5.3. Dimensões dos corpos de prova (CP) pré-ensaio de flexão.	67
Tabela 5.4. Resultados dos ensaios de resistência à flexão.	67
Tabela 5.5. Resultados dos ensaios de dureza Shore D.	68
Tabela 5.7. Informações obtidas do INPE.	74
Tabela 5.8. Probabilidade dos dados de vento.	74
Tabela 5.9. Parâmetros determinados para estimativa de vida a fadiga.	76
Tabela 5.10. Valores de força e tensão para cada velocidade de vento.	77
Tabela 5.11. Razões de tensões.	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.2. Lista de símbolos para a Equação 3.4.	42
Quadro 3.3. Lista de símbolos para a Equação 3.5.	42
Quadro 3.4. Condições de operação do aerogerador sendo o SLM [IEC 61400-2, 2013].	43
Quadro 3.5. Lista de símbolos para a Equação 3.7.	44
Quadro 3.6. Lista de símbolos para a Equação 3.8.	44
Quadro 3.7. Lista de símbolos para a Equação 3.9.	44
Quadro 3.8. Equações para cálculo de tensões equivalentes.....	45

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

A	Área	m ²
A _t	Área transversal	m ²
A _{sup}	Área da superfície superior da pá	m ²
b	Largura do corpo de prova	m
c	Parâmetro de escala	
C _s	Coeficiente de sustentação	
CG	Centro de gravidade	
d	Espessura do corpo de prova	m
D _i	Diâmetro interno	m
D _e	Diâmetro externo	m
E	Módulo de elasticidade	Pa
E _c	Módulo de elasticidade do compósito	Pa
E _{ma}	Módulo de elasticidade da matriz	Pa
E _{ref}	Módulo de elasticidade do reforço	Pa
EDS	Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy	
F	Força	N
F _a	Força de arrasto	N
F _e	Força de empuxo	N
F _{eq}	Força equivalente	N
F _f	Força máxima no ensaio de flexão	N
f(V)	Função probabilidade de distribuição de velocidade de vento	
f(R _t)	Função probabilidade de distribuição de razão de tensão	
f _{ref}	Frequência de referência	
F _s	Força de sustentação	N
F _{total}	Força total atuante na pá	N
F _{vi}	Força para uma velocidade de vento no instante i	N
F _z	Força centrífuga da raiz da pá (eixo Z)	N
g	Aceleração da gravidade	m ² /s
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional (<i>Intern. Electrotechnical Commission</i>)	
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais	
I _x	Momento polar de inércia no eixo x	m ⁴

I_y	Momento polar de inércia no eixo y	m^4
k	Parâmetro de forma	
l_0	Comprimento inicial	m
L	Comprimento da pá	m
L_f	Distância entre suportes no ensaio de flexão	m
m	Massa	kg
m_B	Massa da pá	kg
m_i	Módulo tangente inicial (inclinação da reta tangente)	°
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura	
M_x	Momento fletor em x	N.m
M_y	Momento fletor em y	N.m
n	Número de pás	
N_c	Número de ciclos	
N_{proj}	Rotação nominal de projeto	rpm
$N_{máx}$	Rotação máxima	rpm
P	Potência	W
PA 6.6	Poliamida 6.6	
P_{proj}	Potência de projeto	W
Q_{proj}	Torque de projeto	N.m
R	Raio do rotor: da ponta da pá ao centro do cubo	m
R_f	Velocidade do cilindro aplicador no ensaio de flexão	m/s
R_t	Razões de tensões para cálculo de distribuição	
R_{cg}	Distância entre o CG e o eixo do rotor	m
r_e	Raio externo	m
r_i	Raio interno	m
SLM	Método Simplificado de Cargas	
SONDA	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais	
T	Número de horas do ano	h
TSR	Tip Speed Ratio – razão de ponta de pá	
V	Velocidade do vento	m/s
V_{ma}	Fração volumétrica da matriz	%
V_{ref}	Fração volumétrica do reforço	%
W	Módulo de inércia da seção transversal	m^3
V_i	Velocidade do vento no instante i	m/s

V_m	Média da velocidade do vento	m/s
V_{proj}	Velocidade do vento de projeto	m/s
Z	Taxa de resistência superficial no ensaio de flexão	mm/mm/min
α	Ângulo de incidência do vento na pá	°
Δl	Alongamento	m
ε	Deformação específica	adimensional
ρ	Massa específica	kg/m ³
η	Eficiência de transmissão	%
λ_{proj}	Razão da ponta da pá	
σ	Resistência à tração	MPa
σ_f	Resistência à flexão	MPa
σ_{eq}	Tensão equivalente	MPa
σ_{vi}	Tensão para velocidade do vento no instante i	MPa
σ_z	Tensão na direção Z	MPa
σ_M	Tensão média na pá	MPa
$\omega_{N,proj}$	Velocidade tangencial de rotação do rotor de projeto	rad/s

RESUMO

COIMBRA, Rodrigo Vacari. **Uso do Método Simplificado de Cargas (SLM – IEC 61400-2) e do Espectro de Cargas de Fadiga para Estimativa de Vida em Pás de Aerogeradores de Pequeno Porte.** Porto Alegre. 2019. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

A vida útil de pás de aerogeradores empregados para geração de energia elétrica a partir dos ventos está diretamente relacionada com a sua capacidade de resistir à fadiga, pois em condições normais de funcionamento as pás estarão sujeitas a cargas cíclicas em função das variações das velocidades dos ventos e, conseqüentemente, das solicitações mecânicas. O presente trabalho teve como objetivo estimar o número de ciclos que podem levar a fadiga pás de aerogeradores de pequeno porte, utilizando o Método Simplificado de Cargas (SLM) proposto pela norma IEC 61400-2 e o espectro de cargas de fadiga em função das velocidades dos ventos proposto por Epaarachchi (2002). A metodologia consistiu inicialmente em caracterizar pás construídas em material compósito de poliamida e fibra de vidro em relação à estrutura e propriedades mecânicas (tração, flexão e dureza). Dados de ventos do estado do Rio Grande do Sul coletados no período entre Maio/2009 e Maio/2011 pelo INPE – Projeto SONDA foram compilados aplicando a distribuição probabilística de *Weibull*. O Método Simplificado de Cargas foi empregado para converter dados dos ventos em forças atuantes nas pás. O método proposto por Epaarachchi foi utilizado para determinar o espectro de cargas de fadiga em função dos ventos a que as pás estão submetidas e, assim, estimar o número de ciclos necessários para ocorrer a falha por fadiga. Com os resultados obtidos nos ensaios de tração, flexão e dureza, os dados dos ventos convertidos em termos de solicitações mecânicas e a aplicação da metodologia de estimativa de vida à fadiga, foi possível simular dois cenários diferentes: (a) um considerando condição normal de operação (todo o espectro de ventos) e outro (b) considerando a condição crítica de operação (ventos entre 2 m/s e 5 m/s). Para o cenário em condições normais foi estimado um número de 1.554.832 ciclos até a falha, enquanto no cenário crítico a falha ocorrerá para 996.812 ciclos.

Palavras-Chaves: Pás, Aerogerador de Pequeno Porte, Compósito de Fibra de Vidro, Estimativa de Vida à Fadiga, IEC 61400-2, Espectro de Ventos.

ABSTRACT

COIMBRA, Rodrigo Vacari. **Using the Simple Load Method (SLM - IEC 61400-2) and the Fatigue Load Spectrum to Estimate the Life of Small Wind Turbine Blades**. Porto Alegre. 2019. Master. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The life of small wind turbine blades applied for electrical energy generation using wind is directly related to its fatigue resistance. Under normal condition operation blades are exposed to cyclic loads as a function of wind velocity variation and, consequently, different mechanical solicitation. The present work aims to estimate the number of cycles inducing fatigue in small wind turbine blades applying the Simple Load Method (SLM) as recommend by IEC 61400-2 standard and the fatigue load spectrum proposed by Epaarachchi (2002). The methodology consisted firstly in characterizing polyamide reinforced fiber glass composite blades in relation to their structures and mechanical properties (tensile strength, bend strength and hardness). Wind data collected in Rio Grande do Sul from May/2009 to May/2011 by INPE – “SONDA Project” were compiled using Weibull’s probabilistic distribution. SLM was applied to convert wind data into load acting on the blades. Epaarachchi’s method was used to determine the fatigue load spectrum as a function of wind velocity and estimate the number of cycles inducing fatigue failure. With results from tensile, bend and hardness tests, wind data converted into mechanical solicitation and the application of life cycle fatigue method, it was possible to estimate two scenarios: (a) Under normal operation (overall wind spectrum) and (b) under critical operation (wind data in the range of 2 m/s to 5 m/s). In the normal scenario the total cycles until the fatigue failure was of 1,554,832 whereas in the critical scenario the failure occurs of 996,812 cycles.

Key-words: Blade, Small Wind Turbine, Reinforced Fiber Glass Composite, Fatigue Life Cycle, IEC 61400-2, Fatigue Loading Spectrum.

1. INTRODUÇÃO

A humanidade tem utilizado o vento para o seu benefício por milhares de anos. Ao longo dos tempos, o vento tem sido usado para mover embarcações, moer grãos, bombear água, entre outras funções. Ainda no século IXX, o vento passou a ser utilizado para gerar energia elétrica, porém até a década de 1960, a energia eólica foi pouco utilizada para este fim em função da abundância de fontes fósseis como o carvão e petróleo, que eram amplamente utilizadas. A partir dos anos 70 com a crise do petróleo, o crescimento da geração de energia elétrica por fontes renováveis foi impulsionado e desde então apresenta grande ascensão.

Entre as diversas fontes renováveis geradoras de energia elétrica, a energia eólica traz muitos benefícios, pois é considerada limpa, com baixos níveis de impacto ambiental na sua instalação e de fácil operação. A utilização dessa fonte de energia também se justifica para aplicações em lugares isolados, onde a partir de um aerogerador é possível gerar eletricidade mesmo estando longe das grandes redes de transmissão. Um exemplo desta utilização é o Complexo Eólico Pontal da Enerplan em Viamão, RS, na região de Águas Claras (Figura 1.1). Este parque eólico inaugurado em meados de 2017 utiliza 25 aerogeradores e tem capacidade para produzir 59,8 MW, atendendo uma região até então com dificuldades de fornecimento de energia elétrica pelas redes de distribuição das concessionárias do estado.

Os aerogeradores variam na potência de poucos Watts, considerados de pequeno porte, até aerogeradores de grande porte, produzindo Mega Watts. A norma IEC 61400-2 [IEC 61400-2, 2013] define um aerogerador de pequeno porte como tendo uma área de varredura do rotor menor que 200 m², o que corresponde aproximadamente a potências inferiores a 50 kW. Por outro lado, o maior aerogerador fabricado atualmente, em termos de área de varredura, é o VESTAS V174-9.5 de 9,5 MW. Este aerogerador possui rotor de 174 metros e área de varredura de 23.779 m² [www.mhivestasoffshore.com]. Porém, o maior aerogerador em termos de potência é o VESTAS V164-10.0 de 10,0 MW, sendo o único aerogerador comercializado no

mundo que atinge dois dígitos de MW de potência. No início deste ano a GE Renewable Energy iniciou testes em um protótipo que deve assumir o posto de maior aerogerador fabricado. O modelo Haliade-X de 12 MW possui rotor de 220 metros e área de varredura de 38.000 m². Os testes do protótipo estão previstos para os próximos 5 anos, porém a empresa pretende iniciar sua comercialização em 2021 [www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine]. Os princípios operacionais básicos são os mesmos para aerogeradores de qualquer tamanho [WOOD, 2011].



Fonte: www.osul.com.br.

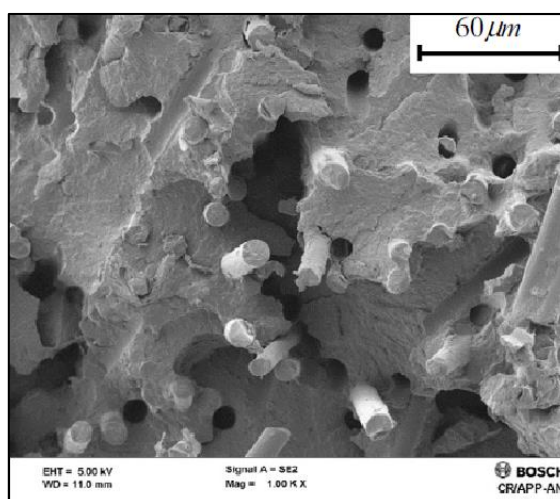
Figura 1.1. Aerogeradores instalados em área rural no Complexo Eólico Pontal da Enerplan, Viamão, RS.

A energia eólica, juntamente com a solar, são as fontes de geração de energia elétrica que mais crescem no Brasil, o que viabiliza estudos nessa área. É de grande importância uma análise minuciosa do comportamento das pás dos aerogeradores e dos parâmetros geométricos, porque estas representam 15% a 20 % do custo total do aerogerador e tem relação direta com a potência, tornando um dos componentes mais importantes deste equipamento [GOMES, 2016].

As pás são os perfis aerodinâmicos responsáveis pela interação com o vento, convertendo parte de sua energia cinética em trabalho mecânico, podendo ser fabricadas em madeira (as primeiras a serem utilizadas), metais leves e resinas poliméricas reforçadas com fibra de vidro, de aramida ou de carbono [CUSTÓDIO, 2009].

Na energia eólica, como nos demais setores relacionados a geração de energia elétrica, pesquisas envolvendo materiais têm aumentado exponencialmente nos

últimos anos, pois estes estão diretamente relacionados com a eficiência do equipamento, bem como sua durabilidade. Em relação às pás dos aerogeradores, buscam-se materiais mais leves e mais resistentes, com processos de fabricação mais simples. Inserido neste contexto, as propriedades dos materiais devem ser estudadas para garantir um bom desempenho. Dentre os materiais utilizados na confecção das pás dos atuais aerogeradores, pode-se citar o compósito de poliamida reforçada com fibra de vidro, o qual é o foco deste trabalho. A Figura 1.2 mostra exemplo de micrografia de uma amostra fraturada deste compósito, onde é possível observar as fibras de seção circular distribuídas na matriz polimérica.



Fonte: Belmonte (2016).

Figura 1.2. Micrografia de uma amostra fraturada de poliamida reforçada com fibra de vidro.

A determinação de algumas características mecânicas dos materiais das pás demanda procedimentos e ensaios extremamente demorados e dispendiosos, e em especial, ensaios e testes para determinar propriedades de fadiga. Além do tempo necessário, o grande número de amostras e corpos de prova acarretam em custos também elevados. Aliado aos fatores citados anteriormente, agrega-se a escassez de laboratórios especializados que realizam tais análises, impondo dificuldades na obtenção destas propriedades.

Um ensaio de fadiga consiste em fixar a base da pá e aplicar força de forma cíclica à outra extremidade, a ponta. Nesse ensaio controla-se a frequência de ciclo, a força aplicada e amplitude do movimento. Dados de força, deformação e número de ciclos são coletados para analisar a evolução da falha por fadiga na pá. O ensaio terá êxito com a ruptura da pá, onde as tensões aplicadas estão abaixo do limite de

escoamento do material. Esse ensaio pode durar meses até que a pá fracture. Após a fratura, é obtido o ponto da curva de fadiga do material (tensão x número de ciclos) para a tensão aplicada. Para obter o curva de fadiga do material é necessário realizar diversos ensaios com diferentes tensões, onde é encontrado cada ponto da curva. Um exemplo de curva de fadiga é mostrado abaixo na Figura 1.3.

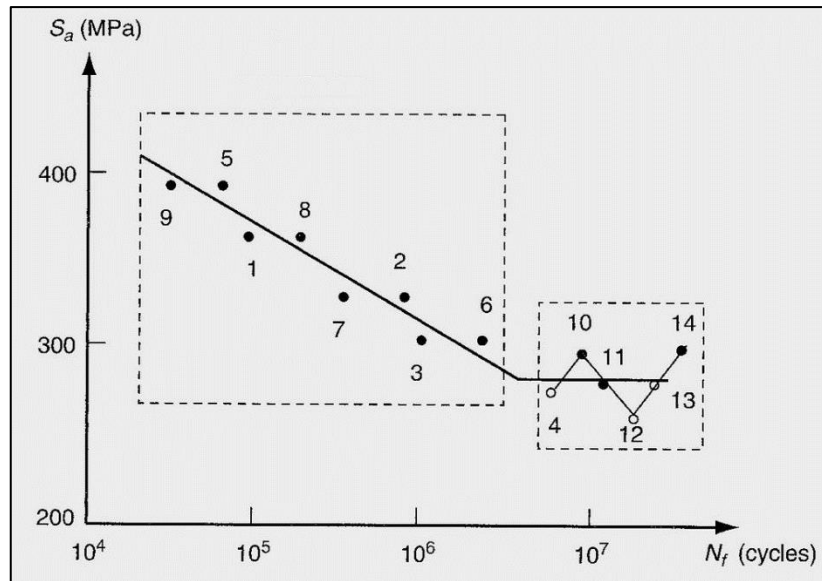


Figura 1.3. Exemplo de curva de fadiga.

A utilização de metodologias de estimativa de vida à fadiga empregando propriedades mecânicas obtidas em ensaios estáticos, inseridas em modelos experimentais ou empíricos de previsão de número de ciclos para ocorrência da falha por fadiga, tem despertado o interesse de pesquisadores que atuam nesta temática. Assim, o presente trabalho objetiva contribuir nesta direção, aplicando metodologia propostas para conversão de dados de ventos em esforços mecânicos atuantes nas pás de aerogeradores em conjunto com um método de estimativa de número de ciclos para falha por fadiga, permitindo assim prever mesmo que de uma forma aproximada a durabilidade das pás em condições específicas de uso.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é estimar a vida útil à fadiga de pás de aerogerador de pequeno utilizando modelos teóricos propostos pela norma IEC 61400-2 (Método Simplificado de Cargas - SLM) [IEC 61400, 2013] e por Epaarachchi (Espectro de Cargas) [EPAARACHCHI, 2002] acoplados a dados de ventos coletados no estado do Rio Grande do Sul e propriedades mecânicas determinadas para o material das pás, definindo-se assim o número máximo de ciclos que pode acarretar a falha por fadiga.

2.1. Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- Determinação das propriedades mecânicas do material das pás para implementação nos modelos teóricos;
- Coleta e tratamento de dados dos ventos no estado do Rio Grande do Sul para determinação da distribuição probabilidade de *Weibull* e correlação com esforços atuantes nas pás;
- Determinação de número de ciclos necessários para induzir a falha por fadiga utilizando o Método Simplificado de Cargas (SLM) e o Espectro de Cargas de Fadiga para dois cenários: (a) em condições normais de regime de ventos e (b) para a condição mais crítica em termos de regime de ventos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os avanços na tecnologia de sistemas de energia eólica têm exigido a padronização dos principais componentes das turbinas eólicas, e entre os principais fatores considerados, destacam-se a redução de custos e aumento de durabilidade. Por consequência, a normalização indica grandes volumes de produção e métodos de fabricação, bem como métodos de ensaio estrutural e normas de projeto [KONG, 2005].

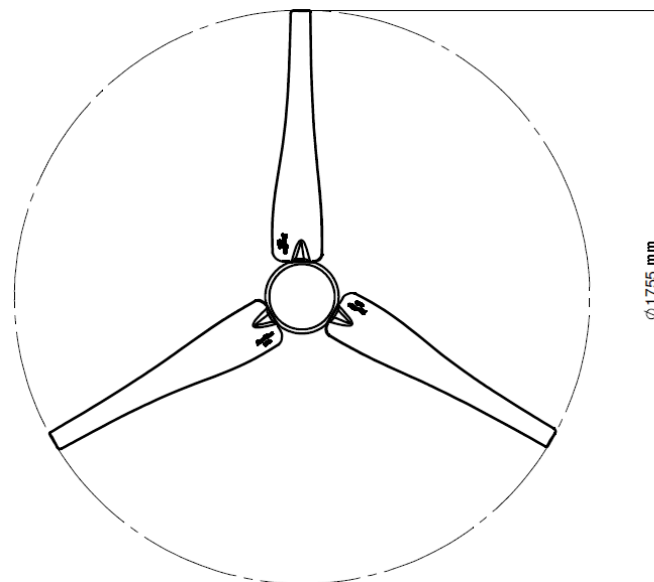
Dentre esses componentes estão as pás dos aerogeradores, fabricadas em materiais compósitos de variados tipos e composições. Os polímeros reforçados têm alcançado boa inserção no mercado, pois possuem boas propriedades e boa relação custo x benefício. Porém, diferentemente dos materiais já conhecidos e com propriedades catalogadas, os compósitos necessitam de estudos específicos de caracterização para cada material, considerando as variáveis: composição entre matriz e reforço, tipo de reforço, orientação do reforço, aderência do reforço à matriz, entre outros. Esses fatores alteram as propriedades do material e, por isso, faz-se necessário estudos que o caracterizem.

Os compósitos aplicados aos aerogeradores são estudados quanto à fadiga, pois nessa aplicação é o fator determinante para vida útil. A fadiga está relacionada com o esforço cíclico, quando a carga aplicada no material é variável e contínua. Conforme PANG [2013], *“Carregamentos cíclicos são capazes de causar a falha de um elemento estrutural em níveis de tensões inferiores ao limite de resistência do material”*. O limite de tensão à fadiga e a tensão máxima dependem das propriedades do material, bem como dos fatores de segurança adotados.

3.1. Forças Atuantes nas Pás de Aerogeradores

Em um aerogerador, o rotor é o responsável por realizar a transmissão de movimento do vento para o eixo do gerador elétrico. Sendo essa uma das partes mais

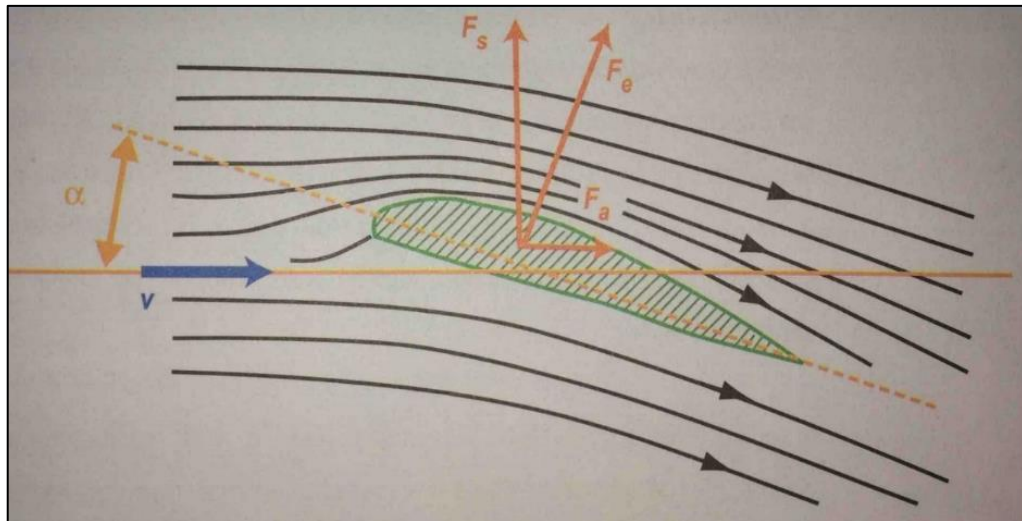
estudadas no mundo da energia eólica, devido apresentar muitas variáveis aerodinâmicas e por ser onde ocorre a maioria dos efeitos de vibração, bem como efeitos de fadiga na pá. Além disso, pode-se citar a dificuldade de controle da velocidade do rotor para ventos extremos e condições adversas como nevascas, furacões e calor intenso. Na atualidade, há uma busca incessante por maior rendimento nas pás de aerogeradores utilizados para micro geração de energia. Esses aerogeradores apresentam poucos, ou nenhum, sistema de controle de velocidade e de ângulo de inclinação da pá. Esse fator gera baixo rendimento na conversão da energia cinética do vento em energia mecânica a ser transmitida ao eixo do gerador elétrico. Na Figura 3.1 é mostrado um exemplo de rotor de pequeno porte.



Fonte: adaptado de www.multi-wing.com.

Figura 3.1. Esquema de rotor de aerogerador de pequeno porte com três pás.

As forças aerodinâmicas geradas em um perfil de pás são resultantes da diferença de pressão, existente pela diferença de velocidade do fluxo de ar nas duas superfícies do perfil. A Figura 3.2 ilustra o fluxo de vento passando por um perfil aerodinâmico, onde é gerada a força aerodinâmica resultante. As forças F_s e F_a são componentes da força aerodinâmica ou de empuxo (F_e) e são chamadas de força de sustentação (F_s) e de arrasto (F_a), respectivamente.



Fonte: Custódio, 2009.

Figura 3.2. Fluxo de vento em torno de um perfil aerodinâmico.

O vento (V) incide sobre a pá com um ângulo (α) em relação à pá, variando sua velocidade, o que pela segunda lei de Newton, implica no surgimento de uma força de empuxo (F_e) [CUSTÓDIO, 2009].

A força de sustentação (F_s) pode ser determinada por meio da Equação 3.1:

$$F_s = \frac{1}{2} \rho V^2 C_s A_{sup} \quad (3.1)$$

onde: F_s : força de sustentação (N);

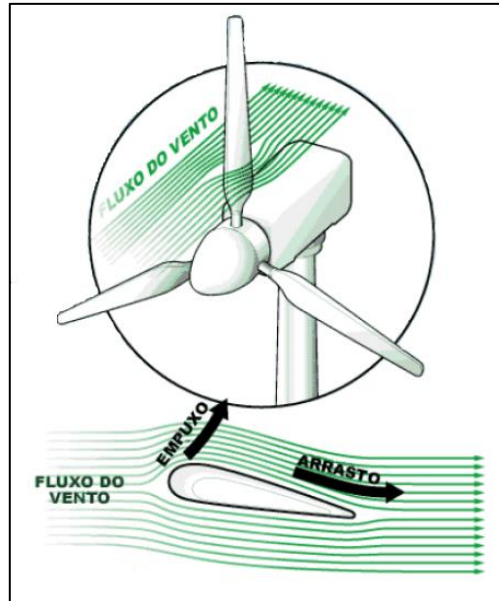
ρ : massa específica do ar (kg/m^3);

V : velocidade do vento (m/s);

C_s : coeficiente de sustentação (adimensional);

A_{sup} : área da superfície superior da pá (m^2).

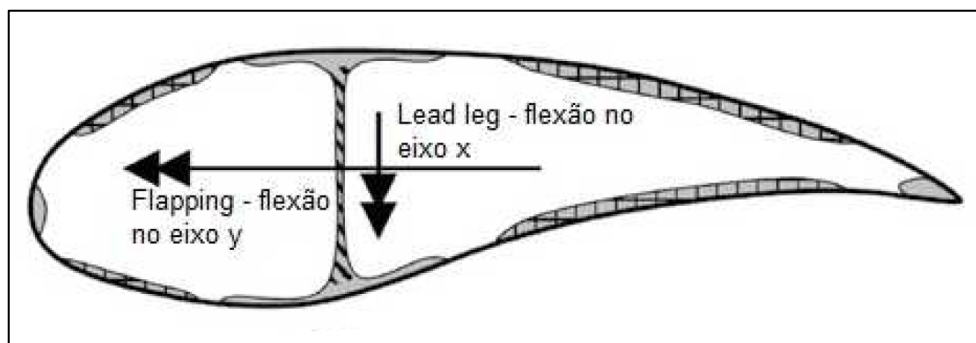
Este tipo de perfil é utilizado em turbinas eólicas de sustentação. A Figura 3.3 mostra um exemplo de turbina de sustentação, ilustrando a interação existente entre o vento incidindo com as pás, gerando as componentes de empuxo e de arrasto.



Fonte: www.awea.org

Figura 3.3. Turbina eólica de sustentação e interação vento-pás.

Além das componentes das forças citadas anteriormente, também estão presentes na pá as forças gravitacionais e de inércia. Essas forças ocorrem em função da massa das pás, rotação e gravidade, e contribuem para o total das forças atuantes. Uma combinação de forças aerodinâmicas, gravitacional e inercial leva ao mesmo tempo a dois movimentos significativos, conforme esquematizado na Figura 3.4: *flapping*, sendo o movimento de flexão da pá para fora do seu plano de rotação, causado fundamentalmente pela variação do fluxo de vento, e o *lead-leg*, sendo essencialmente causada pela rotação da pá em funcionamento, em função do seu campo gravitacional [EPAARACHCHI, 2002]. Esses movimentos dependem da forma do perfil e são calculados pelo momento fletor da região afetada pela força atuante.



Fonte: adaptado de Hayman B. (2008).

Figura 3.4. Tendência de movimento através das forças atuantes sobre a pá.

3.2. Materiais Empregados nas Pás

A pesquisa na área de materiais sempre foi alvo de interesse no projeto de qualquer produto. O homem tem a característica de buscar por materiais adequados há milhares de anos. Quando a energia eólica era utilizada para moer grãos, utilizavam-se pás de madeira, muitas vezes revestidas com couro. Com o surgimento dos “moinhos de bombeio americano”, por volta do ano 1890, tendo como finalidade bombear água, as pás passaram a ser geralmente de materiais metálicos, como alumínio e chapas de aço. Posteriormente, a energia eólica passou a ser utilizada para geração de energia elétrica, necessitando assim de materiais mais leves e capazes de atingir maiores velocidades de rotação. As pás totalmente de madeira ganharam espaço, mas logo foram substituídas por materiais compósitos como polímeros reforçados com fibras. Atualmente, a utilização de fibra de vidro com resina epóxi ou poliamida abrange grande parte do mercado. Esses materiais incorporam ótimas propriedades e trazem muitos benefícios para o setor da energia eólica.

3.2.1. Compósitos

Compósito pode ser definido como uma mistura física de dois ou mais componentes denominados fases, gerando um material multifásico. As fases devem ser quimicamente diferentes e separadas por uma interface distinta. Frequentemente os materiais compósitos são constituídos por apenas duas fases. A fase em maior percentagem é denominada matriz, a qual é contínua e envolve a outra fase, neste caso chamada de fase dispersa. As propriedades finais destes compósitos são decorrentes das propriedades das fases constituintes, de suas quantidades relativas, da geometria da fase dispersa e da interface entre a matriz e fase dispersa [WIEBECK, H., HARADA, 2005].

Os compósitos podem ser classificados em três grandes grupos: compósitos reforçados por partículas, compósitos reforçados por fibras e compósitos estruturais, como indicado na Figura 3.5. Quando a fase dispersa é constituída por partículas com dimensões semelhantes em todas as direções (equiaxial), o compósito é denominado reforçado por partículas. Compósitos reforçados por fibras ocorrem quando a fase dispersa possui uma de suas dimensões (comprimento) muito maior que as demais (diâmetro, largura ou espessura), possuindo o formato de uma fibra. Já os compósitos

estruturais são combinações de compósitos e materiais homogêneos [ASHBY, 2007].

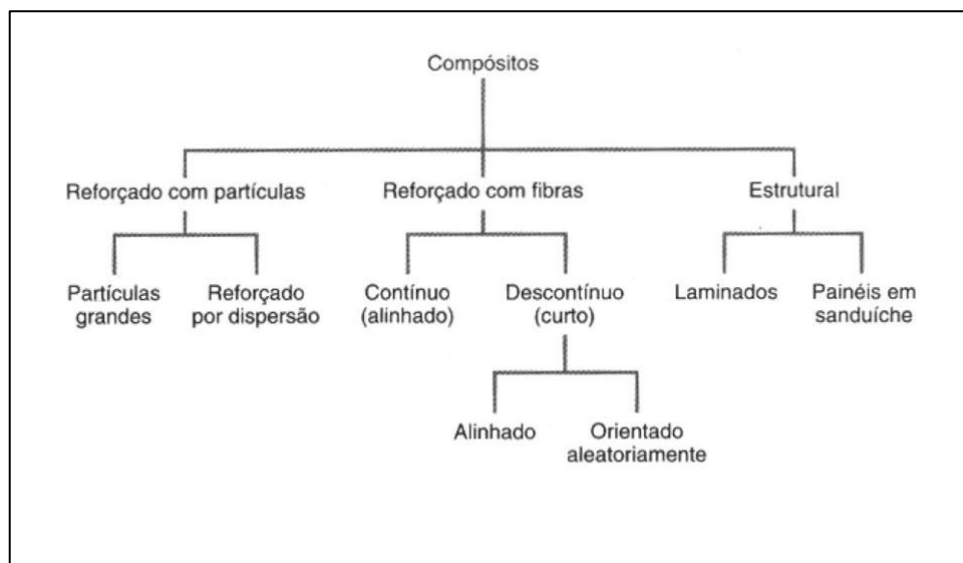
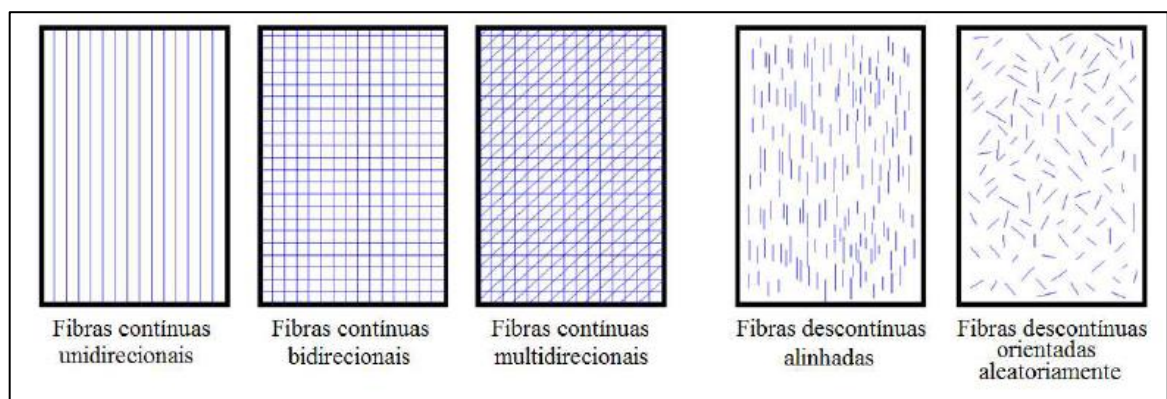


Figura 3.5. Classificação dos compósitos segundo Ashby [2007].

Os compósitos fibrosos possuem como fase dispersa uma fibra, geralmente de seção transversal circular, em que o comprimento é muito maior que o diâmetro. Esses geralmente possuem baixa densidade, elevada rigidez e alta resistência mecânica, o que justifica sua grande utilização comercial. As aplicações se justificam principalmente para reduzir densidade e manter resistência e durabilidade dos produtos. As fibras podem ser cerâmicas, metálicas, poliméricas ou naturais, podendo estar dispersas na da matriz de forma contínua, descontínua, orientada ou aleatória conforme demonstrado na Figura 3.6. [WIEBECK, H., HARADA 2005].



Fonte: adaptado de WIEBECK, H., HARADA (2005).

Figura 3.6. Classificação dos compósitos quanto à disposição das fibras.

3.2.2. Fibra de Vidro

A fibra de vidro é a carga de reforço mais utilizada em compósitos, principalmente para os compósitos de matriz polimérica. Esta ampla aplicação é justificada pelo seu baixo custo quando comparado a outras fibras e porque possui boa resistência à tração, a oxidação e excelente inércia química. Como desvantagem, a fibra de vidro possui baixa resistência à fadiga quando incorporada aos compósitos, é relativamente abrasiva e pode desgastar os equipamentos durante seu processamento, principalmente quando os compósitos são processados por extrusão ou injeção, algumas propriedades podem ser vistas na Tabela 3.1. Essas fibras são constituídas em maior proporção por sílica (aproximadamente entre 50 % a 60 % de SiO₂) e outros óxidos, tais como óxidos de cálcio, boro, sódio, alumínio e ferro. A proporção de sílica e dos demais componentes influenciará na resistência mecânica da fibra de vidro [GRIZZO, 2009]. Os tipos e as composições mais comuns para fibras de vidro podem ser vistos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Composições típicas de fibras de vidro (em percentual) e propriedades mecânicas.

Fibras	Constituintes							Densidade (g/m ³)	Resistência à tração (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	B ₂ O ₃			
Tipo A	72,0	1,0	8,0	4,0	14,0	-	-	2,50	3,0	69
Tipo C	64,6	4,1	13,4	3,3	8,5	1,1	4,7	2,49	3,3	69
Tipo E	55,2	14,5	18,7	4,6	0,3	0,2	6,5	2,54	3,5	72
Tipo S	64,4	25,0	-	10,3	0,3	-	-	2,48	4,6	86

Fonte: adaptado de OKSMANN, K (2009) e GRIZZO (2009).

A fibra de vidro mais utilizada é a fibra tipo E (*electrical glass*). Este tipo de fibra é responsável por mais de 80 % da produção comercial. É uma fibra com boas propriedades e possui baixo custo quando comparado aos outros tipos de fibra.

3.2.3. Compósitos Reforçados por Fibras Contínuas e Descontínuas

Nos compósitos reforçados com fibras contínuas, as fibras suportam quase a totalidade da tensão recebida pelo compósito. Nesse caso, a matriz tem a função de manter as fibras unidas e protegidas do meio ambiente. Como mostrado na Figura

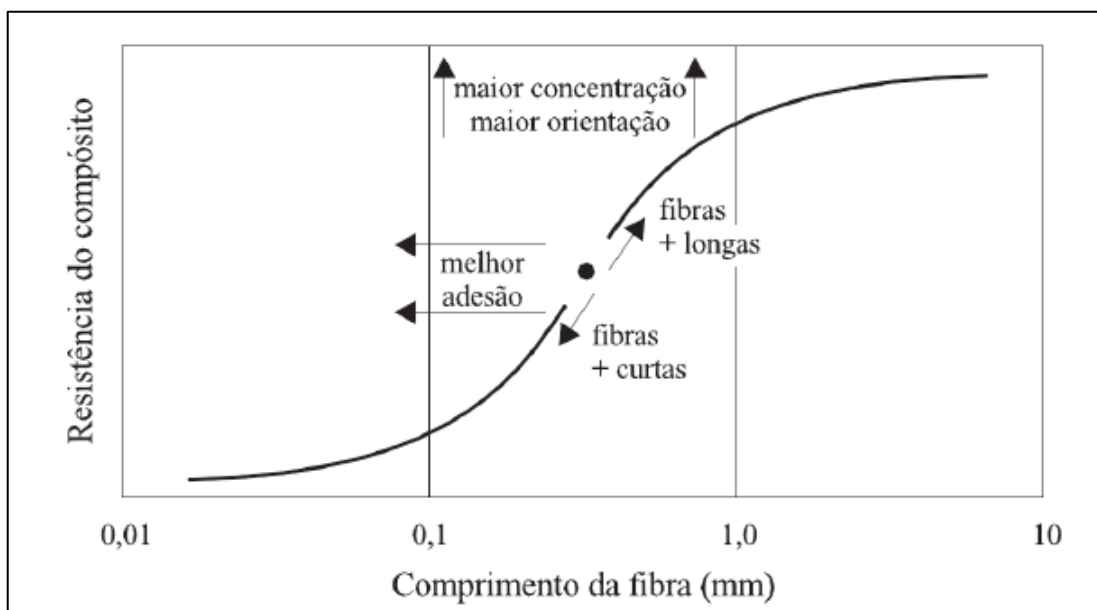
3.6, as fibras podem estar alinhadas de forma unidirecional, bidirecional ou multidirecional. As propriedades desses compósitos estão fortemente relacionadas com as propriedades mecânicas da fibra utilizada, da forma como ela está disposta e da aderência à matriz. Embora seja possível adquirir boas propriedades como alta resistência mecânica, esses compósitos não são indicados para produção em larga escala devido aos métodos de produção que, normalmente, são manuais e/ou com baixa capacidade produtiva.

Os compósitos com fase dispersa de fibras descontínuas (segmentadas) possuem resistência mecânica inferior quando comparados aos de fibra contínua. No entanto, são mais versáteis quanto ao processo de produção. Esses compósitos podem ser fabricados por processos como injeção ou extrusão, o que permite produção em larga escala, relacionando-os à custos menores dos produtos. Como nos compósitos de fibra contínua, as propriedades dos compósitos de fibra descontínua também dependem das propriedades mecânicas das fibras utilizadas, porém possuem maior relação com o comprimento da fibra, com a adesão da mesma à matriz e à fração volumétrica das fibras. Assim, a matriz além de suportar as fibras, deve transmitir à elas a tensão recebida pelo compósito. A Figura 3.7 demonstra esse comportamento onde é relacionado a resistência mecânica do compósito com o comprimento das fibras. A curva é deslocada horizontalmente para a esquerda e verticalmente para cima quanto melhor a adesão das fibras à matriz e quanto maior a concentração de fibras, respectivamente. No caso de um aumento no grau de orientação, em compósitos com orientação definida, a curva também se desloca verticalmente para cima.

Segundo Dibenedetto [DIBENEDETTO, 2001], o mecanismo de reforço mecânico promovido por fibras e demais cargas depende da estabilidade da região interfacial entre matriz polimérica e a superfície da carga. Esta estabilidade é função da magnitude da adesão entre a fase dispersa e a matriz. Portanto, para um compósito fibroso a adesão influencia diretamente nas propriedades mecânicas do material, entre estas a resistência à fadiga.

Os materiais compósitos, por não serem isotrópicos, acumulam danos não localizados. Uma fratura ocorre por múltiplas fissuras macroscópicas, onde realizando uma análise microscópica, o acúmulo de danos, que inclui a ruptura da matriz, ruptura da fibra, delaminação e ruptura transversal da lamina, pode ocorrer de forma independente ou por meio da interação entre fibra e matriz.

O mecanismo de fadiga em compósitos fibrosos consiste em quatro estágios: nucleação do dano local devido à carga cíclica (geralmente em locais de alta intensidade de tensão), nucleação de microtrincas, propagação estável da trinca devido à carga cíclica e propagação local da trinca, que depende da orientação da fibra, da ductilidade da matriz e do grau de adesão interfacial. Uma baixa adesão resulta em baixa resistência mecânica, onde a energia absorvida na fratura aumenta por dissipação de energia durante o processo de descolamento da fibra (puxamento da fibra – “fiber pullout”).



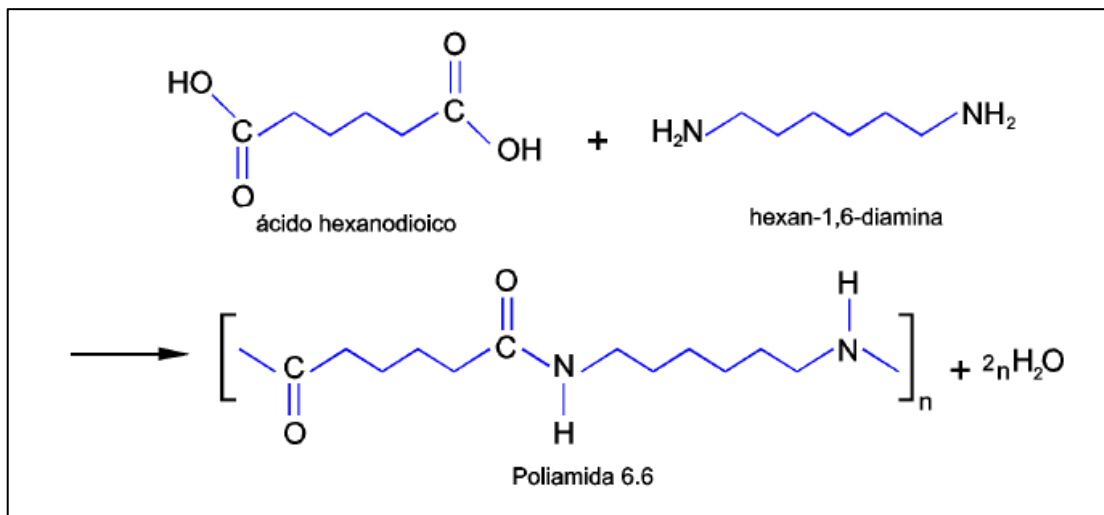
Fonte: adaptado de LOPES, P. E., SOUZA (1999).

Figura 3.7. Relação entre comprimento da fibra e resistência do compósito.

3.2.4. Poliamida 6.6

O surgimento da poliamida 6.6 (PA 6.6) foi no ano de 1935 na empresa norte americana *DuPont*, por meio de pesquisas coordenadas pelo Dr. Wallace Hume Carothers. As pesquisas tinham o objetivo principal de desenvolver uma fibra sintética para aplicação têxtil que pudesse substituir a seda natural. Esse objetivo foi alcançado e, em 1940, inicia-se a produção desse novo fio na unidade da *DuPont* em Seaford, Delaware, com a designação comercial de *nylon*. Além das aplicações têxteis, a PA 6.6 é um dos polímeros de engenharia mais utilizados comercialmente em produtos moldados, tanto em produtos obtidos puramente da poliamida como em compósitos reforçados, como é o caso do reforço com fibra de vidro. Isso é devido às suas ótimas

propriedades mecânicas, baixo coeficiente de atrito, boa resistência a intempéries, facilidade de processamento e pela capacidade de ser reciclada. A poliamida 6.6 é caracterizada pelo grupo funcional amida (CONH) e é obtida pela polimerização em etapas partindo do ácido hexanodióico e da hexan-1,6-diamina, exemplificado na Figura 3.8. Como visto, a poliamida 6.6 é formada por dois monômeros, onde cada um possui seis átomos de carbono, de onde surge sua denominação PA 6.6. Por possuírem grupos funcionais amida espaçados regularmente, são polímeros polares e cristalizam com alta atração intermolecular, formando pontes de hidrogênio entre cadeias. Este comportamento justifica as propriedades mecânicas elevadas da PA 6.6, porque pontes de hidrogênio são ligações intermoleculares fortes.



Fonte: adaptado de WIEBECK, H., HARADA (2005).

Figura 3.8. Esquema da obtenção da poliamida 6.6.

As propriedades encontradas para a PA 6.6 são mostradas na Tabela 3.2. Os valores foram obtidos através de site de fornecedor.

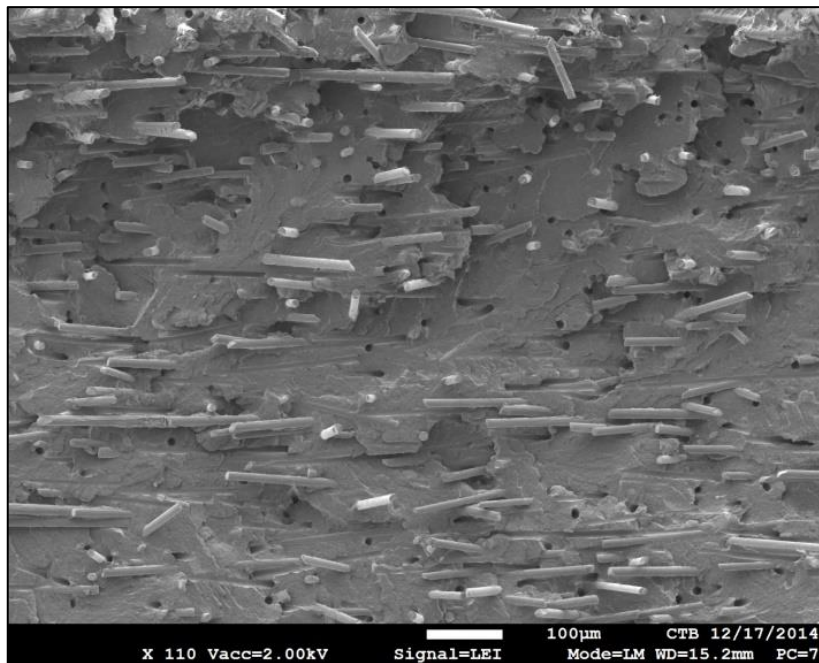
Tabela 3.2. Propriedades mecânicas da PA 6.6.

Propriedades Mecânicas	Valores
Resistência à tração (MPa)	86
Alongamento à ruptura - tração (%)	30
Módulo de elasticidade - tração (MPa)	3200
Resistência à flexão (MPa)	86
Módulo de elasticidade - flexão (MPa)	4500
Dureza (Shore D)	80

Fonte: adaptado de www.ensingerplastics.com.

3.2.5. Poliamida Reforçada com Fibra de Vidro

Assim como os demais plásticos de engenharia, a poliamida incorpora reforços e aditivos com a finalidade de melhorar suas propriedades. A fibra de vidro é o reforço tradicional das poliamidas. Ao longo das últimas décadas, compósitos de matriz polimérica reforçadas com fibra de vidro foram bem aceitos como materiais de engenharia para aplicações automobilísticas, industriais e navais [NETO, F. L., 2006]. A Figura 3.9 apresenta a imagem obtida por micrografia eletrônica de varredura (MEV) de uma amostra de PA 6.6 reforçada com fibra de vidro.



Fonte: www.centexbel.be.

Figura 3.9. Área fraturada de uma amostra de poliamida reforçada com fibra de vidro.

Como em todo compósito, a poliamida reforçada com fibra de vidro é proporcionalmente afetada quanto às propriedades mecânicas quando alteram-se as as proporções dos materiais constituintes do compósito. Em especificações de fabricantes desse material é possível encontrar valores esperados para as propriedades mecânicas. Na Tabela 3.3 são apresentadas algumas propriedades mecânicas esperadas para o compósito de poliamida reforçada com 20%, 25% e 30% de fibra de vidro.

Tabela 3.3. Propriedades mecânicas de referência para poliamida com fibra de vidro.

Propriedades mecânicas	Percentual de fibra de vidro na matriz		
	20 %	25 %	30 %
Resistência à tração (MPa)	60 - 80	80 - 120	120 - 180
Alongamento à ruptura	4% - 6%	2% - 4%	1,5% - 3%
Módulo de elasticidade (GPa)	1,0 - 2,0	2,0 - 6,0	4,0 - 12,0
Resistência à flexão (MPa)	140 - 160	150 - 180	160 - 190

Fonte: adaptado de www.ensingerplastics.com.

A fabricação desse compósito, em um contexto geral, trata-se de um tecido de fibra de vidro envolto por uma matriz polimérica dentro de um molde com o formato do perfil desejado. Existem métodos que consistem em inserir o tecido de fibra no molde e, manualmente, ir depositando o polímero para que este cubra a camada de fibra, fazendo isso várias vezes até obter o formato do molde, como demonstrado na Figura 3.10. Entretanto, também existem moldes que permitem a injeção de polímero e muitos fabricantes fazem desta forma, facilitando e tornando o processo mais rápido. No método de fabricação de injeção, o material pode ser injetado juntamente com a fibra de vidro e, neste caso, o tamanho das fibras de vidro deverá ser pequeno o suficiente para permitir a passagem das fibras pela injetora. Dependendo do modelo, a pá fabricada pode ser maciça ou oca, com longarina ou sem, com fibras orientadas ou não, conforme aplicação e projeto do fabricante.



Fonte: www.diariodepernambuco.com.br.

Figura 3.10. Deposição do tecido de fibra de vidro em um molde de pá de aerogerador de grande porte.

3.3. Estimativa de Vida à Fadiga

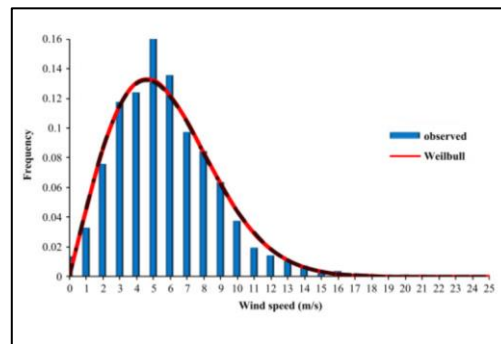
A fadiga é uma falha que ocorre em estruturas submetidas a tensões dinâmicas e variáveis. Sob tais circunstâncias, é possível ocorrer uma falha sob um nível de tensão consideravelmente inferior ao limite de resistência à tração ou ao limite de escoamento para uma carga estática. O termo fadiga é empregado porque esse tipo de falha ocorre normalmente após um longo período sob tensões repetidas ou ciclos de deformação [SMITH, 2012].

É um fenômeno complexo, de intenso caráter estatístico e depende de diversos fatores como: carregamento, geometria, microestrutura do material, processos de fabricação, tensões residuais, acabamento superficial, tratamentos superficiais, defeitos e fatores ambientais (temperatura, umidade, etc.) [TAKAHASHI, 2014]. Geralmente pás de turbinas eólicas são desenvolvidas para uma vida útil de 20 anos. Antes de um novo modelo de pá ser colocado em serviço, a integridade estrutural deve ser verificada para assegurar a vida útil da pá. No estágio de desenvolvimento de uma pá de aerogerador, uma análise estrutural abrangente é realizada para assegurar que a estrutura pode suportar todas as cargas. A vida útil de uma pá é ditada pela fadiga do material e um método de análise de fadiga adequado deve ser realizado durante o estágio de desenvolvimento para estimar a vida útil à fadiga. O principal inconveniente é a inexistência de um espectro de carga de fadiga adequado. Para turbinas eólicas de grande porte existe um espectro de cargas de fadiga chamado *WISPER/WISPERX* que pode ser utilizado. Infelizmente, este espectro que foi desenvolvido a partir de dados operacionais obtidos de turbinas eólicas de grande porte e não é aplicável para aerogeradores de pequeno porte devido a diferença de tamanho e parâmetros operacionais [WOOD, 2011].

Por isso, dentre as metodologias disponíveis, este trabalho baseia-se na referência do método desenvolvido por Epaarachchi [EPAARACHCHI, 2002]. Neste método é apresentado como desenvolver um espectro de cargas de fadiga, por meio de dados de velocidade de vento coletados e parâmetros do aerogerador de pequeno porte em estudo. Segundo Epaarachchi, a análise de vida à fadiga de uma pá de pequeno porte pode ser dividida em três categorias: 1 - Desenvolvimento de espectro de carga de fadiga; 2 - Propriedades do material e comportamento à fadiga; 3 - Máquina de ensaio e procedimentos de ensaio.

O desenvolvimento de espectro é baseado nos dados de vento coletados de

uma estação meteorológica, situada em local estratégico para o estudo. No método, a variável utilizada é a velocidade do vento *versus* a frequência com que essa velocidade ocorre em determinado período. Os dados de velocidade coletados são tratados por meio da distribuição de *Weibull* que fornece uma curva de probabilidade, onde cada valor de velocidade de vento possui uma probabilidade de ocorrência, como exemplifica a Figura 3.11.



Fonte: adaptado de AKDAG & DINLER (2009).

Figura 3.11. Distribuição de *Weibull* para dados de velocidade de vento em m/s.

A função probabilidade de distribuição de *Weibull* é dada pela Equação 3.2:

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (3.2)$$

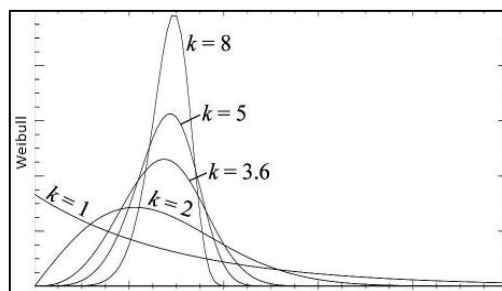
onde: $f(V)$: função probabilidade de distribuição da velocidade do vento;

V : velocidade do vento (m/s);

k : parâmetro de forma (adimensional);

c : parâmetro de escala (m/s).

A constante k representa a grandeza e uniformidade das velocidades médias de vento do local. Assim, um local com velocidades médias baixas ou com grande variação de velocidade terá um valor de k menor. Essa constante afeta na forma da distribuição conforme mostra a Figura 3.12. 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].



Fonte: adaptado de AKDAG & DINLER (2009).

Figura 3.12. Influência do fator de forma na distribuição de *Weibull* para velocidades de ventos.

Uma das características que torna a distribuição de *Weibull* uma das funções probabilísticas mais utilizadas para análise de dados de vento, é que a partir da medição da velocidade do vento em uma determinada altura, é possível ajustar os parâmetros para outros valores de altura.

De acordo com a metodologia proposta por Epaarachchi [EPAARACHCHI, 2002], conhecendo o espectro de velocidade do vento e substituindo valores de tensão equivalentes a cada velocidade de vento, os ciclos causadores de fadiga podem ser estimados.

Para calcular as cargas do ensaio foi utilizado o Método Simplificado de Cargas (SLM), descrito na norma IEC 61400-2 [IEC 61400-2, 2013], que tem como objetivo o cálculo da força relativa a cada velocidade de vento, a partir de alguns parâmetros comuns à aerogeradores. “Estes parâmetros são utilizados como base para previsão do número de ciclos até uma falha” [CHAGAS FILHO, 2011]. Os parâmetros necessários para conversão em tensões equivalentes são mostrados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1. Principais parâmetros de um aerogerador.

Parâmetro	Símbolo	Unidade
Comprimento da pá	L	m
Número de pás	n	n/a
Rotação nominal de projeto	N_{proj}	rpm
Massa da pá	m_B	kg
Distância entre CG e eixo do rotor	R_{cg}	m
Área transversal da pá	A_t	m^2
Momento polar de inércia em x	I_x	m^4
Momento polar de inércia em y	I_y	m^4
Eficiência de transmissão	η	%
Potência	P	W

Velocidade do vento no instante <i>i</i>	V_i	m/s
Velocidade do vento de projeto	V_{proj}	m/s

Fonte: adaptado de IEC 61400-2 [IEC 61400-2, 2013]

A partir desses parâmetros é possível calcular a força total atuante na pá (F_{total}) que será utilizada para o cálculo das tensões equivalentes. As tensões referentes à velocidade do vento são decompostas em razões, para posteriormente, junto com a distribuição de *Weibull*, calcular o número de ciclos a ser aplicados em ensaio. Normalmente são utilizados os valores de 40%, 50%, 60%, 70% e 80% de F_{total} . A F_{total} é calculada pela soma dos dois momentos fletores principais M_x e M_y (calculados pelo método SLM) dividido pela distância de aplicação da carga durante o ensaio (R_{cg}), como mostra a Equação 3.3.

$$F_{total} = \frac{M_{total}}{R_{cg}} \quad (3.3)$$

3.3.1. Método Simplificado de Cargas (SLM)

Na equação mostrada acima, os momentos fletores são encontrados através do Método Simplificado de Cargas (SLM). O SLM é descrito na norma IEC 61400-2 [IEC 61400-2, 2013] que especifica métodos de ensaios para turbinas eólicas de pequeno porte. Para tipos específicos e configurações de turbinas eólicas, as cargas podem ser definidas utilizando um método simplificado de equações. Os requisitos para que seja possível utilizar esse método são os listados a seguir:

- eixo horizontal;
- rotor com duas ou mais pás;
- pás cantilever (em balanço);
- cubo rígido (sem oscilação).

A turbina pode ter o rotor configurado a favor ou contra o vento, pode ter operação em velocidade constante ou variável, pode ter passo (*pitch*) fixo ou mecanismo para passo variável. Para o cálculo simplificado de carga, usa-se os seguintes parâmetros de entrada:

- rotação nominal de projeto (N_{proj});
- velocidade do vento de projeto (V_{proj}), ($V_{proj} = 1,4 \times V_m$);
- média da velocidade do vento (V_m);

- torque de projeto (Q_{proj});
- rotação máxima (N_{max}).

A Equação 3.4 define a relação entre a razão de ponta de pá (λ_{proj}) e a rotação nominal do rotor (N_{proj}).

$$\lambda_{proj} = \frac{R \cdot \pi \cdot N_{proj}}{30 \cdot V_m \cdot 1,4} \quad (3.4)$$

Quadro 3.2. Lista de símbolos para a Equação 3.4.

Incógnita	Descrição	Unidades
λ_{proj}	Razão da ponta de pá	n/a
N_{proj}	Rotação nominal do projeto	RPM
R	Raio do rotor	m
V_m	Média da velocidade do vento	m/s

Considerando a máquina instalada e a carga nominal elétrica conectada, a potência de projeto (P_{proj}) é determinada em função da velocidade nominal de projeto do rotor (N_{proj}). O torque de projeto (Q_{proj}) pode ser encontrado utilizando a Equação 3.5.

$$Q_{proj} = \frac{30 \cdot P_{proj}}{\eta \cdot \pi \cdot N_{proj}} \quad (3.5)$$

Quadro 3.3. Lista de símbolos para a Equação 3.5.

Incógnita	Descrição	Unidades
Q_{proj}	Torque do rotor (projeto)	N.m
N_{proj}	Rotação nominal do projeto	RPM
P_{proj}	Potência de projeto	W
η	Eficiência de transmissão	%

Considerando turbinas de pequeno porte, a eficiência de transmissão pode ser calculada conforme a Equação 3.6 se $P_{proj} \leq 20 \times 10^3$ W:

$$\eta = 0,6 + 0,000005 \times P_{proj} \quad (3.6)$$

Porém, se a potência de projeto for superior a 20 kW ($P_{proj} > 20 \times 10^3 \text{ W}$), deve-se usar $\eta = 0,7$, para a eficiência de transmissão.

A norma especifica condições de carga e situações de projeto diferentes. Considerando essas especificações, deve-se escolher um método de cálculo de cargas entre dez possíveis, de A a J. As condições e a referência com cada método de cálculo simplificado de cargas são apresentados no Quadro 3.4. Esse quadro possui uma classificação com as letras “F” e “U”, onde “F” refere-se a análises de fadiga, utilizados em esforços abaixo da força máxima de ruptura do material. A letra “U” se refere a análises que excedem o limite de ruptura.

Quadro 3.4. Condições de operação do aerogerador sendo o SLM [IEC 61400-2, 2013].

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
Transporte e montagem	I	Carregamento de vento em modo de espera (exposição máxima)	U
Manutenção e reparo	J	Indicado pelo fabricante	U

Fonte: adaptado de IEC 61400-2 [IEC 61400-2, 2013]

Sendo assim, as equações apresentadas a seguir são referentes a condição “A” que representa a operação normal da turbina eólica, pois é o único método que permite análises de fadiga do material. Para esse caso é utilizado um intervalo de valores de cargas constantes, tanto para o eixo quanto para as pás. Na análise de fadiga, os intervalos devem ser considerados como valores de pico a pico, podendo desconsiderar os valores médios. A condição “A” (Operação normal) é considerada quando a turbina eólica está em funcionamento, está conectada a uma carga elétrica

e está balanceada, isto é, quando o rotor não apresenta derivações enquanto está em rotação. Para o cálculo das cargas em pás utilizam-se as seguintes equações:

$$\Delta F_z = 2 \cdot m_B \cdot R_{cg} \cdot \omega_{N,proj}^2 \quad (3.7)$$

Quadro 3.5. Lista de símbolos para a Equação 3.7.

Incógnita	Descrição	Unidades
ΔF_z	Força centrífuga da raiz da pá (eixo - z)	N
R_{cg}	Distância do centro de gravidade ao centro do rotor	m
$\omega_{N,proj}$	Velocidade tangencial do rotor de projeto	rad/s
m_B	Massa da pá	kg

$$\Delta M_x = \frac{Q_{proj}}{n} + 2 \cdot m_B \cdot g \cdot R_{cg} \quad (3.8)$$

Quadro 3.6. Lista de símbolos para a Equação 3.8.

Incógnita	Descrição	Unidades
ΔM_x	Momento fletor (<i>lead-lag</i>) na raiz da pá (eixo - x)	N.m
R_{cg}	Distância do centro de gravidade ao centro do rotor	m
Q_{proj}	Torque do rotor (projeto)	N.m
n	Número de pás	n/a
m_B	Massa da pá	kg
g	Aceleração da gravidade	m/s ²

$$\Delta M_y = \frac{Q_{proj} \cdot \lambda_{proj}}{n} \quad (3.9)$$

Quadro 3.7. Lista de símbolos para a Equação 3.9.

Incógnita	Descrição	Unidades
ΔM_y	Momento fletor (<i>flapwise</i>) na raiz da pá (eixo - y)	N.m
λ_{proj}	Razão da ponta de pá	n/a
Q_{proj}	Torque do rotor (projeto)	N.m
n	Número de pás	n/a

Essas cargas representam a análise de fadiga em pás de aerogeradores de

pequeno porte considerando a condição normal de operação, pois as cargas que provocam fadiga em pás de aerogeradores são normalmente observadas próxima ao cubo ou na junção da pá ao cubo. O cálculo das tensões é o equivalente a combinação das cargas centrífugas F_z e os momentos fletores M_x e M_y .

Após o cálculo de cargas, deve ser considerado o cálculo das tensões em todos os componentes que suportam cargas no sistema. As tensões calculadas a partir das forças e momentos individuais, considerando um caso de projeto, devem ser combinados para encontrar tensões equivalentes. As tensões equivalentes resultantes devem ser comparadas com os valores das tensões do material utilizado no projeto.

No cálculo de tensões equivalentes os seguintes fatores devem ser considerados:

- Variações de tensão no componente;
- Concentradores de tensão;
- Magnitude e direção da aplicação das cargas resultantes;
- Variações das dimensões dos componentes;
- Superfície do componente, rugosidade ou tratamento superficial;
- Tipo de carregamento (Tensão, flexão, torção, etc.);
- Efeitos de fabricação como: soldagem, usinagem, fundição, etc.

As equações para cálculo das tensões equivalentes podem ser visualizadas no Quadro 3.8, onde é mostrada cada equação para diferentes regiões da pá e tipos de sollicitação.

Quadro 3.8. Equações para cálculo de tensões equivalentes.

Solicitação	Raiz circular da pá	Raiz retangular da pá	Eixo do rotor
Carga axial	$\sigma_z = \frac{F_z}{A}$	$\sigma_z = \frac{F_z}{A}$	$\sigma_{x-eixo} = \frac{F_{x-eixo}}{A_{eixo}}$
Flexão	$\sigma_M = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{W}$	$\sigma_M = \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y}$	$\sigma_{M-eixo} = \frac{M_{eixo}}{W_{eixo}}$
Cisalhamento	Desprezível	Desprezível	$\tau_{M-eixo} = \frac{M_{eixo}}{2 \times W_{eixo}}$
Combinação (carga axial + flexão)	$\sigma_{eq} = \sigma_z + \sigma_m$	$\sigma_{eq} = \sigma_z + \sigma_m$	$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_{x-eixo} + \sigma_{M-eixo})^2 + 3 \times \tau_{M-eixo}^2}$

Obtendo o valor de tensão equivalente, pode-se calcular os valores de tensão para cada velocidade de vento utilizando a Equação 3.11. Para isso é necessário o cálculo da velocidade de projeto, que pela norma IEC 61400-2 [IEC 61400, 2013] pode ser calculada pela Equação 3.10, onde V_m é a velocidade média do vento:

$$V_{proj} = 1,4V_m \quad (3.10)$$

$$\sigma_{vi} = \sigma_{eq} \left(\frac{V_i}{V_{proj}} \right)^2 \quad (3.11)$$

onde: σ_{vi} : Tensão para velocidade de vento instantânea (MPa);

σ_{eq} : Tensão equivalente (MPa);

V_i : Velocidade do vento instantânea (m/s);

V_{proj} : Velocidade do vento de projeto (m/s).

No caso do cálculo da força, utiliza-se a mesma equação mostrada acima, porém os com valores de F_{total} (Equação 3.3). A equação resultante para o cálculo da força das velocidades de vento é a mostrada abaixo.

$$F_{vi} = F_{total} \left(\frac{V_i}{V_{proj}} \right)^2 \quad (3.12)$$

onde: F_{vi} : Força equivalente para velocidade instantânea (N);

3.3.2. Cálculo do Número de Ciclos

O método de Epaarachchi [EPAARACHCHI, 2002] envolve a utilização do resultado do Método Simplificado de Cargas (as razões de tensão equivalente a cada velocidade de vento) para o cálculo do número de ciclos. Para isso, a distribuição probabilística de *Weibull* é aplicada nas velocidades de vento, como também nas razões de tensão calculadas. Posteriormente, os valores são inseridos na Equação 3.13 que resulta no número de ciclos, onde é possível estimar a vida à fadiga.

$$N_c = f_{ref} \cdot T \cdot \left(\sum_{V_{min}}^{V_{max}} f(V) \sum_{R_{t,min}}^{R_{t,max}} f(R_t) \right) \quad (3.13)$$

onde: N_c : Número de ciclos;

f_{ref} : Frequência de referência;

T: Número de horas do ano;

$f(V)$: Distribuição de Weibull para velocidades de vento;

$f(R_t)$: Distribuição de Weibull para razão de tensões.

Essa equação é a chave do método desenvolvido por Epaarachchi [EPAARACHCHI, 2002], pois relaciona os dados de vento com os dados de tensão atuantes na pá para estimar a vida útil do componente. No caso de testes em bancada, utiliza-se o número de ciclos para aplicar as tensões de ensaio em frequência desejada.

4. METODOLOGIA APLICADA

A metodologia empregada no trabalho consistiu de etapas sequenciais de ensaios, análises e estimativas, conforme apresentado no fluxograma resumido da Figura 4.1, que serão detalhadas a seguir.

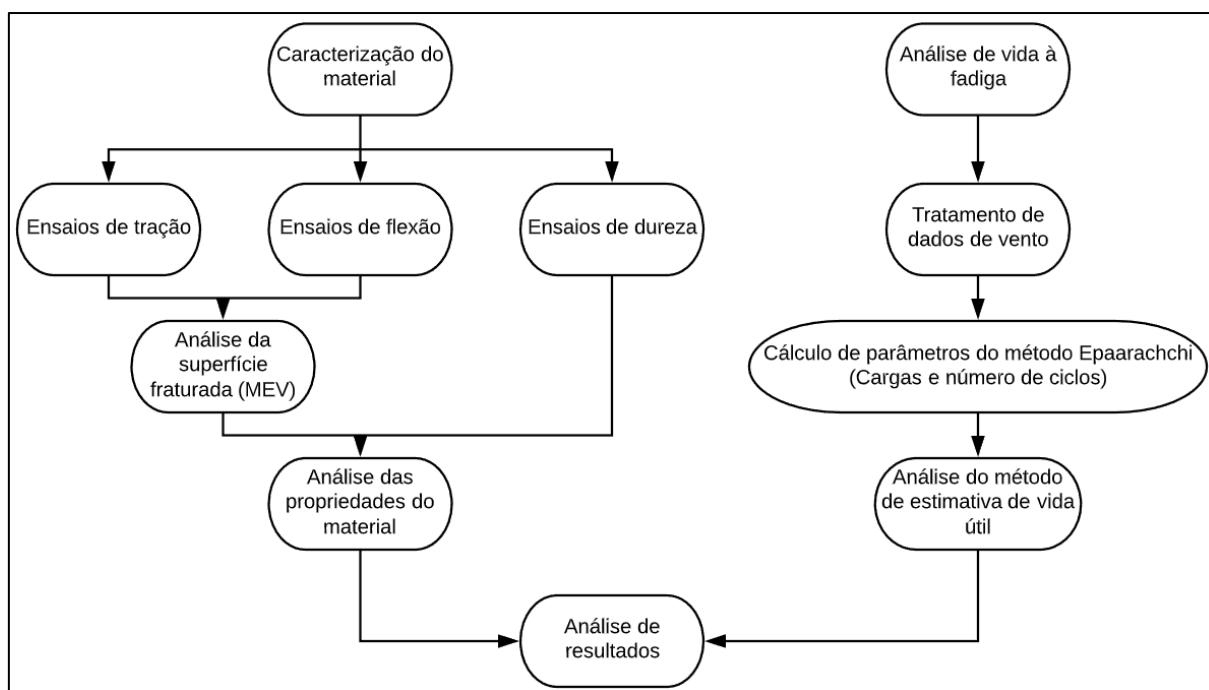


Figura 4.1. Fluxograma da metodologia empregada na pesquisa.

4.1. Características da Pá

O material estudado foi a pá *MultiWing* série *3WT* que foi doada para o LAB-Eólica pela empresa *Fratelli*, fabricante de aerogeradores de pequeno porte situada em Santa Rosa, Rio Grande do Sul. A Figura 4.2 mostra o rotor montado, conforme fornecido pela empresa.



Fonte: www.multi-wing.com

Figura 4.2. Rotor com três pás, modelo Multi-Wing 3WTR.

As principais características da pá são apresentadas no Tabela 4.1, e a Figura 4.3 apresenta uma imagem da pá como recebida. Como pode-se observar, a pá foi fornecida sem pintura superficial.

Tabela 4.1. Principais características da pá Multi-Wing 3WTR.

Fabricante	Multi-Wing
Modelo	3WTR
Comprimento	0,88 m
Material	Poliamida reforçada com fibra de vidro 25 % fr. vol.



Figura 4.3. Fotografia da pá Multi-Wing 3WTR como recebida.

4.2. Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos foram utilizados para obter as propriedades mecânicas do material em estudo. Para a realização destes ensaios foram extraídos corpos de prova da pá, cujos detalhes são apresentados a seguir.

Como referência para extração dos corpos de prova, visto que o material se trata de um compósito, uma amostra do material foi levada a microscópio a fim de verificar a orientação das fibras de vidro na matriz. Como visto no item 3.2.1, a orientação das fibras interfere na resistência do material. A pá em estudo é fabricada por injeção, onde ambos os materiais constituintes (poliamida e fibra de vidro) são injetados no molde de uma única vez. Desta forma, as fibras de vidro não possuem orientação definida na matriz, chamada de aleatória, o que possibilita a extração de corpos de prova em qualquer direção. A imagem resultante da análise por microscópio ótico com 250 vezes de aumento (Figura 4.4), mostra que o compósito possui fibras aleatórias e heterogêneas, isto é, de comprimentos diversos.

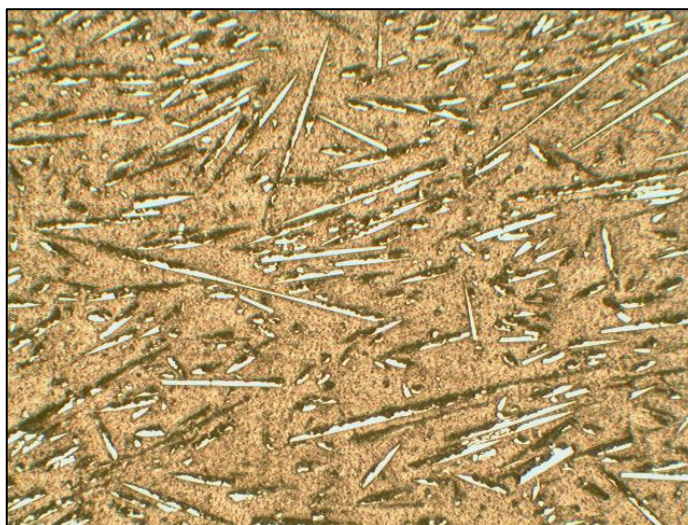
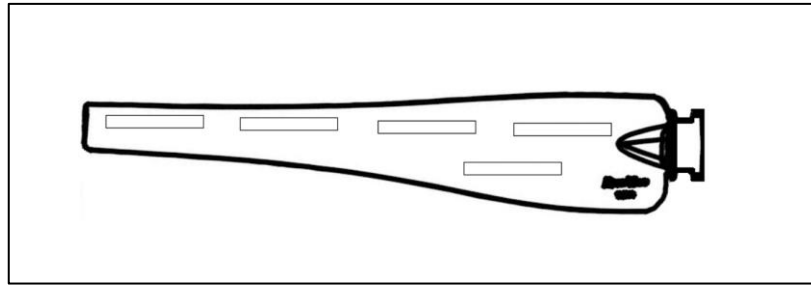


Figura 4.4. Imagem obtida por microscópio ótico (250x), comprovando as fibras aleatórias.

4.2.1. Ensaio de Resistência à Tração

Para a realização dos ensaios de resistência à tração foram retirados cinco corpos de prova do material das pás, todos no mesmo sentido e de diferentes regiões, como pode ser visto na Figura 4.5.



Fonte: adaptado de www.multi-wing.com.

Figura 4.5. Regiões de onde foram extraídos os corpos de prova.

Para obter os corpos de prova a pá foi, primeiramente, usinada retirando cinco segmentos de onde os corpos de prova foram extraídos e, posteriormente, foram confeccionados em uma máquina de corte a *laser*. A pá foi segmentada utilizando uma serra fita e cada parte foi desbastada por uma fresa até suas faces estarem planas e aptas a serem levadas ao corte à *laser*. Ambos os processos podem ser visualizados na Figura 4.6.



(a)



(b)

Figura 4.6. Processo de fabricação dos corpos de prova.

Como embasamento para forma, dimensões e quantidade de corpos de prova foi utilizada a norma NBR 9622 [ABNT NBR 9622] que descreve de maneira detalhada o procedimento do ensaio à tração. Optou-se pelo corpo de prova apresentado na Figura 4.7, pois a norma o referencia como o corpo de prova adequado a ensaiar materiais rígidos com baixos alongamentos à ruptura. Esse é o caso da poliamida reforçada com fibra de vidro, um material que apresenta ruptura com baixo alongamento quando ensaiado a tração.

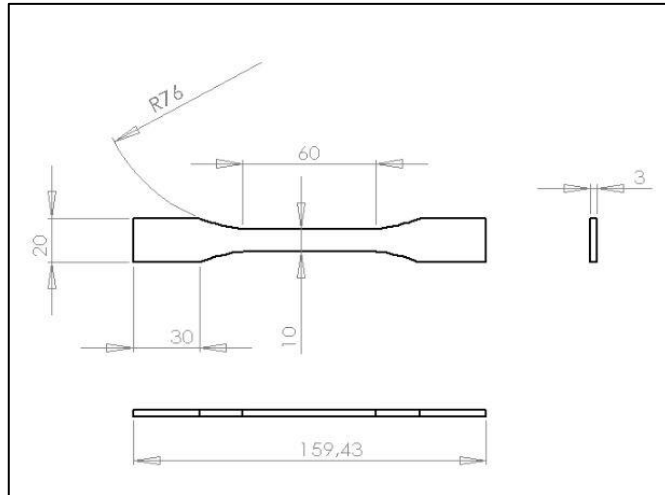


Figura 4.7. Corpo de prova para tração, dimensões em mm.

Como referência para o corte, foi criado um arquivo compatível com o *software* da máquina de corte à *laser*, primeiramente desenhado em *SolidWorks®*, considerando as dimensões do corpo de prova. Porém, tendo em vista a temperatura do corte à *laser* e a sensibilidade dos polímeros à essa interferência, no dimensionamento do corpo de prova foi mantido propositalmente uma sobra de 1 mm em todas as faces. Assim, posteriormente ao corte, os corpos de prova foram lixados manualmente até atingirem as dimensões padronizadas pela norma de referência do ensaio. Desta forma, evitou-se que uma superfície possivelmente degradada pela temperatura do corte à *laser* interferisse no resultado do ensaio. A Figura 4.8 mostra os corpos de prova finalizados que foram levados à ensaio no Laboratório de Materiais (LAMAT) da PUCRS, na máquina Shimadzu modelo AG-IS//IC/EZGraph.

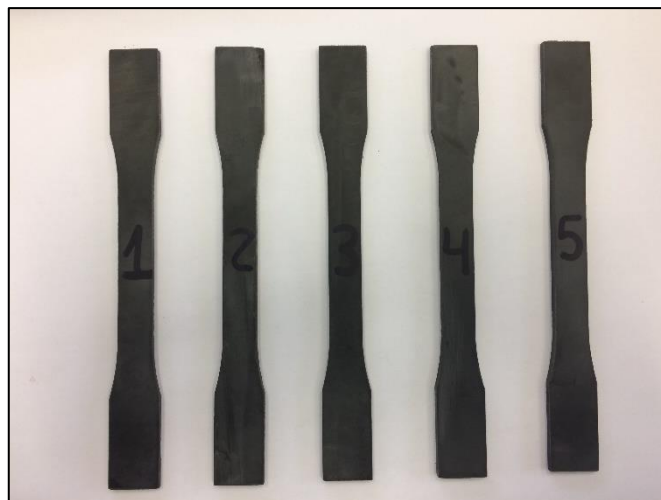


Figura 4.8. Corpos de prova para ensaio de tração.

A velocidade de ensaio normatizada e utilizada foi de 5 mm/min. Para realizar o ensaio, cada amostra foi medida em sua parte calibrada para obter referências de comparação com as amostras após o ensaio. Foi demarcada uma distância de referência, para que fosse possível observar o alongamento da amostra após a realização do ensaio. A amostra foi posicionada alinhando seu eixo com as garras da máquina de tração, que foram fechadas de forma a assegurar a fixação sem deformar o corpo de prova. A força aplicada e a deformação do corpo de prova são medidos pela máquina de ensaio. Esses valores são utilizados para determinar as propriedades do material, quando estudado o comportamento em tração. Para calcular os valores de deformação total, utiliza-se a variação dos comprimentos iniciais e finais das amostras em relação ao comprimento inicial.

A propriedade que fornece indicação de rigidez do material é o módulo de elasticidade. Essa propriedade depende fundamentalmente das forças das ligações interatômicas, e fornece informações quanto a capacidade do material deformar elasticamente. O cálculo dessa propriedade foi baseado na Equação 4.1, onde a força F é a força máxima da região elástica da curva de ensaio.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \times l_0}{A_t \times \Delta l} \quad (4.1)$$

onde: E: Módulo de elasticidade (Pa);

σ : Resistência à tração (Pa);

ε : Deformação específica (adimensional);

F: Força (N);

l_0 : Comprimento inicial (m);

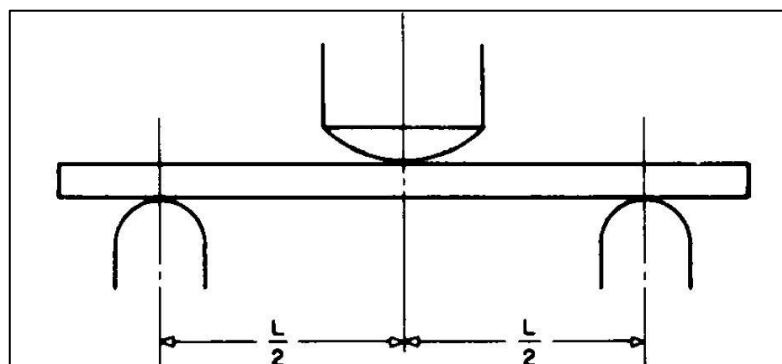
Δl : Alongamento (m);

A_t : Área da seção transversal (m²).

4.2.2. Ensaio de Flexão

O procedimento para o ensaio de flexão foi baseado na norma ASTM D 790-03 [ASTM D 790], a qual prevê a determinação de propriedades à flexão de polímeros reforçados ou não. O método utiliza um sistema de carregamento de cargas aplicadas na amostra apoiada em três pontos, conforme o esquemático apresentado na Figura

4.9. A amostra sendo uma barra de seção transversal retangular é repousada sobre dois suportes e recebe a aplicação de força por meio de um cilindro que se desloca com velocidade constante durante o ensaio.



Fonte: adaptado de ASTM D 790

Figura 4.9. Representação esquemática do ensaio de flexão a 3 pontos.

De forma a evitar concentrações de forças que venham a influenciar na amostra ensaiada, tanto os suportes quanto o aplicador de força devem ser cilíndricos. O raio do cilindro indicado pela norma para os suportes e para o aplicador é de 5 mm, porém não é mandatório. Os corpos de prova foram retirados da pá em estudo, das regiões mostradas na Figura 4.5, as quais coincidem com as regiões do onde foram extraídos os corpos de prova de tração. O processo de fabricação dos corpos de prova utilizado foi o mesmo descrito anteriormente. O corpo de prova foi elaborado para respeitar uma proporção de 16:1 entre comprimento e espessura, pois a norma prevê essa proporção entre os suportes para materiais poliméricos reforçados. O desenho técnico do corpo de prova pode ser visto na Figura 4.10, sendo a espessura do corpo de prova de 4 mm e o vão entre suportes, para a proporção de 16:1, de 64 mm.

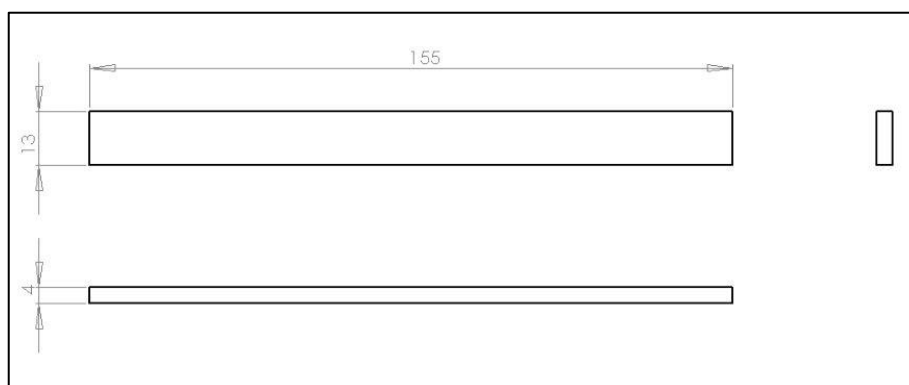


Figura 4.10. Corpo de prova para flexão, dimensões em mm.

Cinco corpos de prova foram confeccionados nas dimensões do projeto e mensurados para obter suas condições prévias ao ensaio. Os corpos de prova foram levados a ensaio na máquina Shimadzu modelo AG-IS/II/IC/EZGraph, conforme ilustrado na imagem da Figura 4.11. Na realização dos ensaios foi utilizado um cilindro aplicador com o raio de 5 mm e os suportes com raio de 10 mm. Para a determinação da velocidade de ensaio, a norma determina o cálculo utilizando a Equação 4.2.

$$R_f = \frac{Z \times L_f^2}{6 \times d} \quad (4.2)$$

onde: R_f : Velocidade do cilindro aplicador (mm/min);

L_f : Distância entre os suportes (mm);

d : Espessura do corpo de prova (mm);

Z : Taxa de resistência superficial da amostra (mm/mm/min), sendo que Z deve ser 0,01.

Desta forma, a velocidade de ensaio calculada foi de 1,7 mm/min e foi aplicada de forma constante em toda a duração do ensaio. Antes de iniciar o ensaio, a amostra foi posicionada de forma que ficasse alinhada com o cilindro aplicador sobre o meio do corpo de prova.

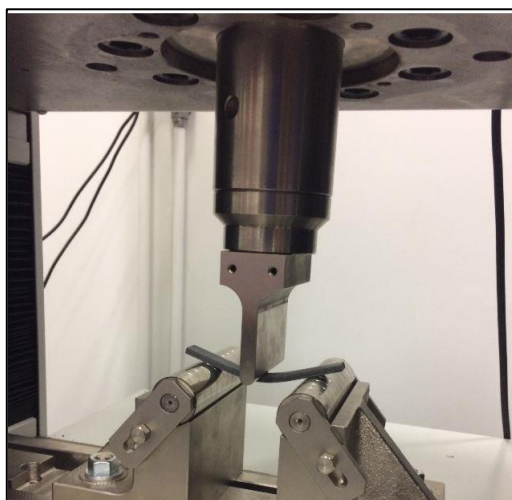


Figura 4.11. Imagem obtida durante realização do ensaio de flexão a 3 pontos.

Para o cálculo das propriedades do material, a norma determina uma sequência de equações que serão demonstradas a seguir. A resistência a flexão pode ser

calculada utilizando a Equação 4.3, quando a amostra está apoiada entre dois pontos e recebe carga no ponto médio:

$$\sigma_f = \frac{3.F_f.L_f}{2.b.d^2} \quad (4.3)$$

onde: σ_f : Resistência à flexão (MPa);

F_f : Força máxima do ensaio (N);

L_f : Distância entre pontos de apoio da amostra (mm);

b : Largura da amostra (mm);

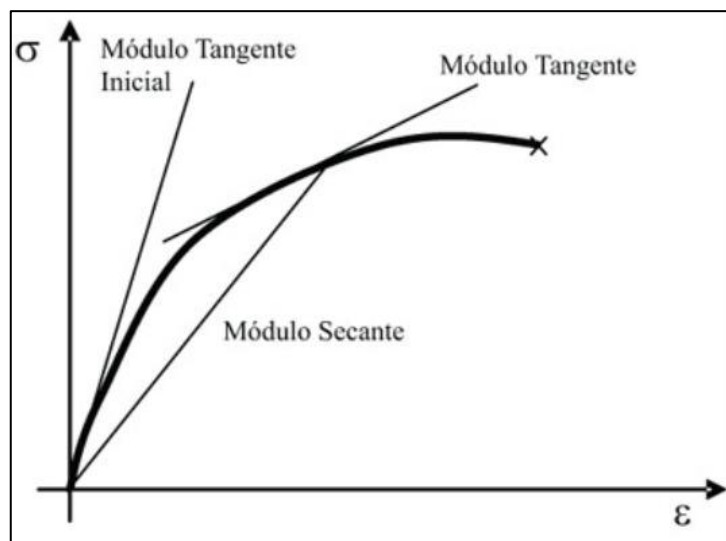
d : Espessura da amostra (mm).

O módulo de elasticidade é a proporção, dentro do limite elástico, da tensão com a deformação correspondente. É calculado utilizando a Equação 4.4 e a inclinação da reta tangente a curva tensão *versus* deformação da região elástica (inicial), conforme mostra a Figura 4.12.

$$E = \frac{L_f^3.m_i}{4.b.d^3} \quad (4.4)$$

onde: E : Módulo de Elasticidade (Pa);

m_i : Módulo tangente inicial (inclinação da reta tangente em graus).



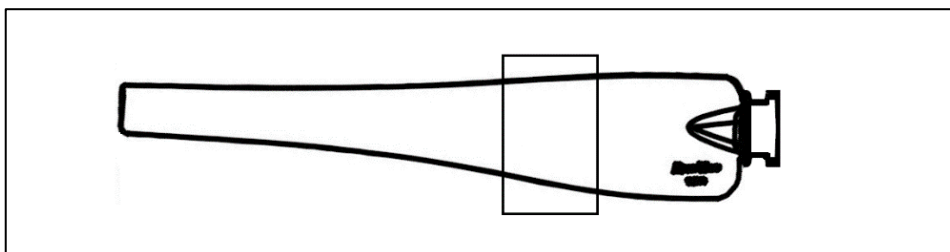
Fonte: adaptado de www.revistaeeep.com.

Figura 4.12. Método da reta tangente para cálculo do módulo de elasticidade.

4.2.3. Ensaio de Dureza

As medições de dureza foram realizadas de acordo com a norma ASTM D 2240 – 15 [ASTM D 2240], que padroniza ensaios de dureza Shore em polímeros. Essa norma descreve métodos para doze tipos de durômetros (A, B, C, D, DO, E, M, O, OO, OOO, OOO-S e R), que devem ser utilizados conforme o material a ser ensaiado. Os métodos permitem medições de dureza com base nos recuos iniciais e finais após um período determinado de aplicação de força por meio de um indentador. Para esse ensaio foi escolhido o método Shore D por ser adequado a ensaiar polímeros termoplásticos rígidos.

A amostra a ser ensaiada foi retirada da pá estudada conforme mostra a Figura 4.13. Para obter as superfícies planificadas e submeter ao ensaio no durômetro, foi necessário usinar a amostra por meio de uma fresa, dando acabamento superficial com lixamento manual.



Fonte: adaptado de www.multi-wing.com.

Figura 4.13. Região da pá onde foi extraída a amostra para o ensaio de dureza.

A amostra após o acabamento superficial mediu 12 mm de espessura, o que está conforme a norma, que recomenda uma espessura mínima de 6 mm. O procedimento inicia com o posicionamento do durômetro em local plano para ser calibrado e realizar o ensaio. A calibração é realizada com amostras de comparação que acompanham o equipamento e possuem dureza conhecida. Também o durômetro é testado para verificar se está realizando as medições dentro da escala, de 0 a 100. O durômetro utilizado para o ensaio, no Laboratório de Química da PUCRS, possuía certificado de calibração e pode ser visualizado na Figura 4.14. A aplicação do ensaio é realizada posicionando a amostra no equipamento, logo abaixo do indentador, onde por meio de uma alavanca se dá início ao processo de ensaio. A alavanca aciona o mecanismo atuador e de controle que reporta o resultado do ensaio em um display

LCD.



Figura 4.14. Realização do ensaio de dureza em durômetro Bareiss Shore D.

Foram realizadas 10 medições em cada face da amostra, respeitando o afastamento linear de 6 mm entre as aplicações do indentador e o afastamento de 12 mm do limite da amostra conforme parametrizado pela norma.

4.3. Análises das Superfícies de Fratura após Ensaios

As amostras dos ensaios de tração e flexão foram levadas a análise de superfície de fratura por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV). O ensaio foi realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálises da PUCRS. Para realização das análises, as amostras foram metalizadas para possibilitar a captação de imagem do equipamento. Também foi realizado uma análise de composição do material via micro sonda EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*). Durante a análise da região fraturada foi observado o comportamento do polímero e da fibra de vidro para as fraturas de tração e flexão. Foram observadas imagens com ampliações de até 6.000 vezes.

4.4. Estimativa da Vida em Fadiga

A seguir será detalhado o procedimento adotado para análise da estimativa da vida à fadiga, considerando as características dos ventos do estado do Rio Grande do Sul e as características da pá analisada, bem como a utilização do Método Simplificado de Cargas (SLM) da norma IEC 61400-2 [IEC 61400, 2013] e o espectro de cargas em fadiga proposto por Epaarachchi [EPAARACHCHI, 2002].

4.4.1. Coleta de Dados de Vento

Os dados de vento foram coletados pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) durante o projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais). O Projeto SONDA utilizou uma estação anemométrica instalada a 489 metros de altitude em relação ao nível do mar, em São Martinho da Serra, no estado do Rio Grande do Sul. O período de coleta de dados foi de 2 anos, entre maio de 2009 e maio de 2011. Os dados foram tratados de forma que pudessem ser inseridos em uma distribuição probabilística, chamada de distribuição de *Weibull* conforme detalhado no Item 3.3. Esta distribuição fornece a probabilidade de ocorrência para cada velocidade de vento. Nesse período, o sensor registrou mais de 100.000 dados de velocidade de vento, realizando medições com intervalos de 10 minutos. A velocidade média do vento para a região foi de 3,32 m/s e a velocidade máxima foi de 17 m/s. Os dados utilizados no presente trabalho foram adquiridos do site do projeto: <http://sonda.ccst.inpe.br/>.

4.4.2. Cálculo de Parâmetros para o Método de Epaarachchi

A partir dos dados de vento coletados conforme o item anterior, foi realizado um tratamento dos dados para invalidar erros de medições. Casos de erro de medição representaram 1,7 % do volume de dados coletados, conforme mostra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Avaliação dos dados de velocidades de ventos coletados do projeto SONDA (período 05/2009 a 05/2011).

Dados coletados	Dados com erro	Percentual de erro	Dados válidos
105120	1738	1,7%	103382

Os dados válidos foram inseridos na função probabilidade de *Weibull*, conforme detalhado no item 3.3, resultando uma curva de probabilidade de ocorrência para cada velocidade de vento conforme determinado pela Equação 3.2. O valor do parâmetro de forma k , utilizado na equação, foi baseado na literatura [Atlas Eólico, GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, 2014], que classifica valores de k para todas as regiões do estado do Rio Grande do Sul. Para a região estudada, onde os dados foram coletados, o valor indicado é $k = 2$.

A variável c é calculada pela Equação 4.5, onde $V_m = 3,32$ m/s. A partir desta equação foi encontrado o valor para $c = 3,75$.

$$c = \frac{V_m}{\frac{1}{1+k}} \quad (4.5)$$

A distribuição de *Weibull* foi gerada para todo o intervalo de dados, considerando a amplitude de velocidades coletadas. Porém, serão considerados dois cenários de análise. O primeiro cenário (a) considera a operação normal do aerogerador e todo o espectro de ventos resultantes da distribuição de *Weibull* é aplicado ao método de Epaarachchi para análise de vida à fadiga e número de ciclos. O segundo cenário (b) considera uma condição crítica de operação e utiliza apenas os valores mais significativos da distribuição. Desta forma, considerando a aplicabilidade do aerogerador e o método utilizado por Epaarachchi, na análise de vida e cálculo de número de ciclos, será aplicado um cenário mais propício a falha por fadiga.

No método desenvolvido por Epaarachchi [EPAARACHCHI, 2002], que foi inicialmente proposto e validado para condições de ensaios de fadiga em bancadas experimentais, as forças aplicadas à pá durante o ensaio são fracionadas em razões. Desta forma, assegura-se que o material está sendo ensaiado abaixo do limite de escoamento, na região de deformação elástica. Para compor o cálculo de número de ciclos de ensaio, na equação proposta por Epaarachchi (Equação 3.13), é necessário inserir a probabilidade de ocorrência de cada razão de tensão. Portanto, juntamente

com a probabilidade dos dados de velocidade de vento, é realizado outra distribuição de *Weibull*, porém desta vez do intervalo de frações de razões de tensões.

As razões utilizadas no método são 40%, 50%, 60%, 70% e 80% da força total (Equação 3.3). Assim, para o cálculo de probabilidade de *Weibull* o intervalo considerado foi: 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 e 1,0 para as razões de tensão. Desta forma, a equação de *Weibull* fornece uma curva densidade com a probabilidade de cada fração de razão de tensão.

Possuindo a probabilidade para os dados de vento e para as razões de tensão, aplica-se na Equação 3.13 de número de ciclos, como.

$$N_c = f_{ref} \cdot T \cdot \left(\sum_{V_{min}}^{V_{max}} f(v) \sum_{R_{t,min}}^{R_{t,max}} f(R_t) \right) \quad (3.13)$$

onde f_{ref} é a frequência a ser utilizada na análise em ciclos/hora. A frequência utilizada foi de 180 ciclos/hora, equivalente a 0,05 Hz, pois segundo Epaarachchi esse é um valor máximo recomendado para analisar materiais poliméricos, visando evitar o aquecimento do material. O valor de T é 8760 h, representa a quantidade de horas em um ano. Os somatórios de $f(v)$ e $f(R_t)$ são referentes aos resultados das distribuições de *Weibull* para dados de vento e razões de tensões, respectivamente.

O último parâmetro do método Epaarachchi é o cálculo das forças de aplicação em ensaio. As forças são calculadas pelo Método Simplificado de Cargas (SLM), detalhados no item 3.3.1. Para realizar os cálculos conforme o método SLM é necessário caracterizar o aerogerador. As informações necessárias foram fornecidas pelo fabricante ou obtidas através de medições. Essas informações estão detalhadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Informações para cálculos pelo Método Simplificado de Cargas (SLM).

Parâmetros	Símbolo	Unidade	Valor
Comprimento da pá	L	m	0,88
Número de pás	n	n/a	3
Rotação nominal (projeto)	N_{proj}	rpm	400
Rotação nominal (projeto)	$\omega_{N,proj}$	rad/s	41,89
Massa da pá	m_B	kg	1
Distância entre CG e eixo do rotor	R_{cg}	m	0,32
Área transversal pá	A_t	m ²	0,053486

Potência	P	kW	0,25
Velocidade média do vento	V_m	m/s	3,32
Aceleração da gravidade	g	m/s ²	9,81

Utilizando o Método Simplificado de Cargas, a primeira equação utilizada é a Equação 3.4 apresentada no item 3.3.1 para cálculo da razão da ponta de pá, TSR. Posteriormente é realizado o cálculo do torque de projeto, considerando o aerogerador conectado a carga elétrica, para a potência de projeto $P = 0,25$ kW. Para isso utiliza-se a Equação 3.5. Conforme já citado, sendo a potência do aerogerador inferior a 20 kW, a eficiência de transmissão deve ser calculada através da Equação 3.6.

Após calculados os parâmetros de potência e eficiência do aerogerador, devem ser calculadas as forças e momentos que dependem do modo de operação do aerogerador. Nesse estudo foi empregado o modo de operação normal por ser o único que permite análises de fadiga e, portanto, é o método aplicado por Epaarachchi. Para calcular a força centrífuga atuante na pá, é utilizada a Equação 3.7. Conhecendo a força atuante sobre a pá, é necessário o cálculo dos momentos fletores resultantes dos movimentos de *flapping* e *lead-leg*. O movimento de *flapping* gera um momento fletor no eixo y, enquanto o movimento de *lead-leg* gera um momento fletor no eixo x (Equações 3.8 e 3.9).

Após o cálculo da força e dos momentos fletores, aplica-se a Equação 4.6 para o cálculo da tensão equivalente. Essa equação é apresentada no Quadro 3.8 e foi escolhida porque a pá em estudo possui raiz circular.

$$\sigma_{eq} = \frac{F_z}{A} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{W} \quad (4.6)$$

Entretanto, primeiramente é necessário calcular o módulo de inércia da seção transversal (W). O módulo de inércia é calculado conforme o formato da raiz da pá, neste caso, a raiz é circular, na forma de um anel, como mostra a Figura 4.15.



Figura 4.15. Detalhe da raiz da pá.

O módulo de inércia para essa forma pode ser encontrado por meio da Equação 4.7.

$$W = \frac{\pi(r_e^4 - r_i^4)}{4r_e} \quad (4.7)$$

onde: W: Módulo de inércia da seção transversal (m³);

r_e: Raio externo (m);

r_i: Raio interno (m).

A tensão equivalente fracionada em razões de tensão é parâmetro de entrada para o ensaio de estimativa de vida útil proposto por Epaarachchi, bem como o número de ciclos até a fratura por fadiga (N_c), conforme visto anteriormente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados experimentais e teóricos obtidos conforme a metodologia descrita anteriormente.

5.1. Caracterização do Compósito das Pás

Neste tópico serão apresentados os resultados dos ensaios do material, a citar: ensaio de resistência à tração, ensaio de resistência à flexão e ensaio de dureza.

5.1.1. Resistência à Tração

Previamente aos ensaios, as cinco amostras foram mensuradas visando obter referências para uma posterior análise das deformações. Essas informações são mostradas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Dimensões dos corpos de prova (CP) pré-ensaio de tração.

Dimensões pré-ensaio (mm)	CP01	CP02	CP03	CP04	CP05
Espessura	3,12	3,17	3,02	3,07	3,15
Largura na região calibrada	10,01	10,04	10,09	10,04	10,02
Comprimento na região calibrada	60,01	60,02	60,01	60,00	60,03
Comprimento total	160,07	159,99	160,14	160,10	160,08

Foram realizados cinco ensaios de resistência à tração até a ruptura, conforme descrito no item 4.2.1. Dos cinco ensaios realizados, foram validados apenas quatro, pois uma das amostras não fraturou na área calibrada. A Figura 5.1 exemplifica o gráfico resultante do ensaio executado.

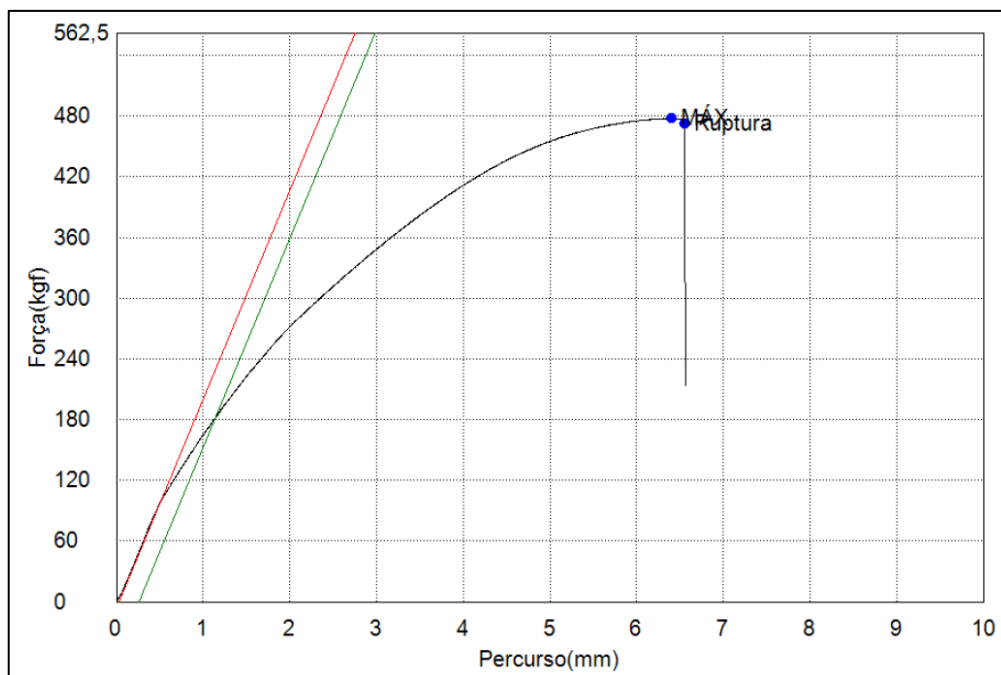


Figura 5.1 Gráfico Força x Deslocamento do ensaio de resistência à tração.

Baseado nos resultados obtidos nos ensaios foram calculadas as propriedades à tração do material, as quais são apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Resultados dos ensaios de tração.

Propriedades	CP2	CP3	CP4	CP5	Min	Max	Média	Desvio
Resistência à tração (MPa)	109,3	96,5	104,5	86,8	86,8	109,3	99,3	8,5
Deformação (%)	5,70	4,30	5,51	4,84	4,30	5,70	5,09	0,5
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,42	5,36	3,07	2,89	2,89	5,36	3,68	0,9

Nos resultados apresentados é possível notar que a deformação do material foi semelhante para todos os corpos de prova, sendo a média 5,09 %. Conforme informações obtidas de fornecedores desse material, o valor esperado para poliamida reforçada com 25 % de fibra de vidro é entre 2 % e 4 % de deformação para o ensaio de tração (conforme apresentado na Tabela 3.3), portanto, nos experimentos realizados a deformação foi maior que o esperado. Porém, isso é justificado principalmente pelo método de fabricação e comprimento das fibras. Na referência, os materiais fabricados possuíam fibras mais longas, o que garante maior rigidez ao material e, portanto, menor deformação. No caso do material ensaiado, a pá é injetada com uma mistura de poliamida e fibra de vidro de pequeno comprimento. Essa característica pode contribuir para uma maior deformação enquanto solicitada por

tração. Já os resultados de limite de resistência à tração e módulo de elasticidade ficaram dentro do esperado, conforme mostrado na Tabela 3.3. Para a resistência a tração eram esperados valores entre 80 MPa e 120 MPa e para o módulo de elasticidade entre 2 GPa e 6 GPa.

Uma amostra da região fraturada após ensaio de tração foi levada à análise da superfície por MEV. Um exemplo de corpo de prova após fratura pode ser visto na Figura 5.2.



Figura 5.2. Corpo de prova fraturado após ensaio de tração.

Sabendo que o módulo de elasticidade esperado para a fibra de vidro é 72 GPa (Tabela 3.1) e para a PA6.6 é 3,2 GPa (Tabela 3.2), foi aplicada a regra das misturas dos compósitos à esta propriedade. A Equação 4.7 é aplicada a compósitos particulados e foi aplicada porque o compósito em estudo não possui tamanho de fibra regular, é heterogêneo e, devido ao método de fabricação, a maior parte das fibras possuem comprimento muito pequeno.

$$E_c = \frac{E_{ma}E_{ref}}{V_{ma}E_{ref} + V_{ref}E_{ma}} \quad (4.7)$$

onde: E_c : Módulo de Elasticidade do compósito (GPa);

E_{ma} : Módulo de Elasticidade da matriz (GPa);

E_{ref} : Módulo de Elasticidade do reforço (GPa);

V_{ma} : Fração volumétrica da matriz (adimensional);

V_{ref} : Fração volumétrica do reforço (adimensional).

O resultado para o módulo de elasticidade partindo da Equação 4.7 foi de 4,2

GPa, enquanto o resultado experimental médio foi de 3,68 GPa.

5.1.2. Resistência à Flexão

Os ensaios de flexão foram aplicados à cinco corpos de prova, dimensionados conforme orienta a norma ASTM D 790-03. As medidas dos corpos de prova, previamente ao ensaio podem ser vistas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Dimensões dos corpos de prova (CP) pré-ensaio de flexão.

Dimensões pré-ensaio (mm)	CP01	CP02	CP03	CP04	CP05
Espessura	3,97	4,0	3,98	4,06	3,98
Largura	13,0	13,10	12,86	12,90	12,96
Comprimento	154,80	154,80	155,51	154,60	154,70

Após os ensaios, foram extraídos os gráficos, conforme exemplo da Figura 5.3. Os resultados obtidos possibilitaram as análises das propriedades do material quando solicitado à flexão. As propriedades são apresentadas na Tabela 5.4.

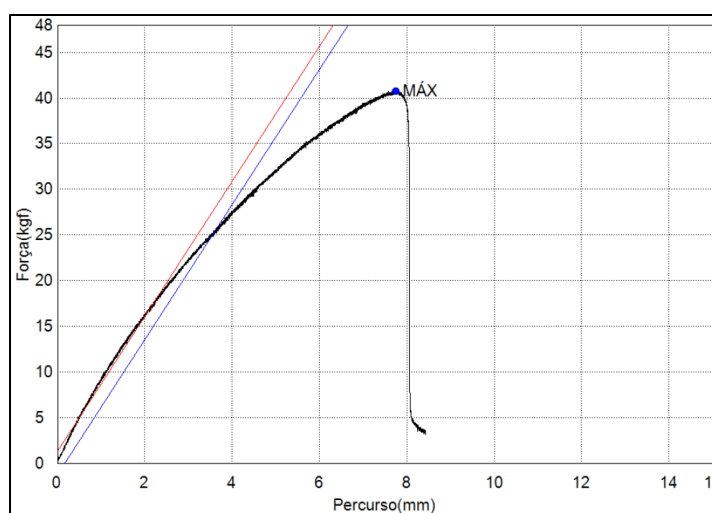


Figura 5.3. Gráfico Força x Deslocamento obtido do ensaio de flexão.

Tabela 5.4. Resultados dos ensaios de resistência à flexão.

Propriedades	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Min	Max	Média	Desvio
Deslocamento máximo (mm)	8,17	8,86	7,76	7,93	7,61	7,61	8,86	8,07	0,4
Deformação (%)	4,70	5,20	4,50	4,70	4,30	4,30	5,20	4,68	0,3
Resistência à flexão (MPa)	187,5	188,9	188,5	186,8	180,8	180,8	188,9	186,5	2,9
Mód. Elasticidade (flexão, GPa)	4,02	3,64	4,17	3,96	4,18	3,64	4,18	3,99	0,2

Nos resultados dos ensaios realizados para resistência à flexão, nota-se o módulo de elasticidade com valores muito próximos aos encontrados nos ensaios de resistência a tração (média de 3,68 GPa). No entanto, a resistência do material para flexão foi superior que a resistência à tração. Esse comportamento pode estar relacionado com a disposição das fibras na matriz, uma vez que o reforço atua como distribuidor de tensões, o material se torna mais resistente considerando a direção que recebe a aplicação de tensão. Um fator a considerar é que o ensaio de flexão é composto por regiões de movimentos distintos, compressão na parte superior da amostra e tração na parte inferior. Assim, o comportamento do compósito (matriz + reforço) entre essas regiões pode levar a tensões mais elevadas.

Uma amostra da região fraturada do corpo de prova foi levada a análise de superfície. Um exemplo do corpo de prova após o ensaio pode ser visto na Figura 5.4.



Figura 5.4. Corpo de prova após ensaio de flexão.

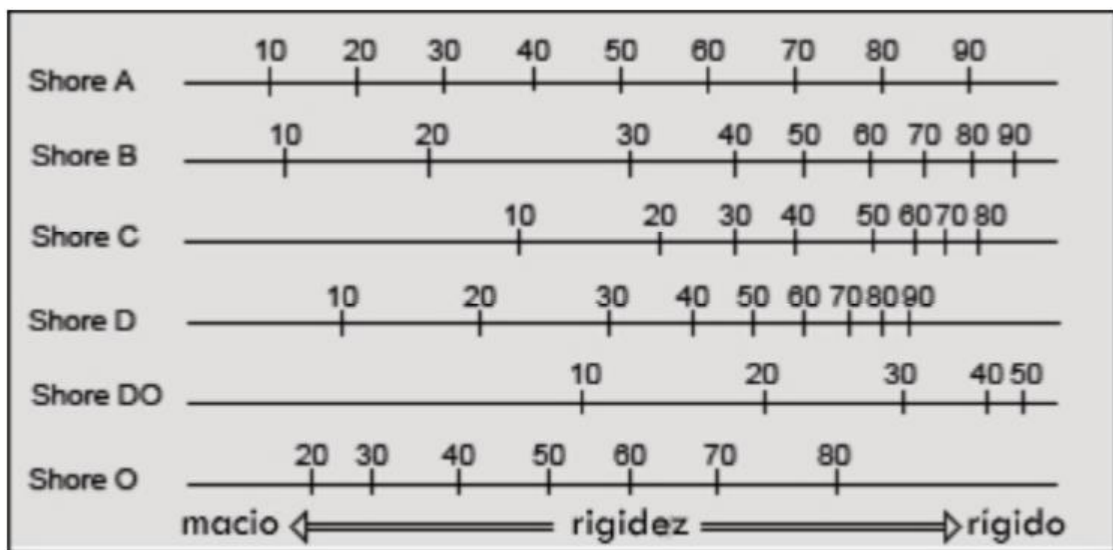
5.1.3. Dureza

Como descrito no item 4.2.3, foi retirada uma amostra do material da pá e submetida a ensaios de dureza Shore D. Os ensaios foram executados nas duas faces das amostras, totalizando dez medições em cada face, sendo os valores médios apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Resultados dos ensaios de dureza Shore D.

Medições	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Min	Max	Med	Med(A + B)
Superfície A	76,1	74,4	73,7	73,3	74,2	74,7	74,5	74,6	75,2	74,6	73,3	76,1	74,5	75,2
Superfície B	76,7	76,6	75,2	75,9	76,2	75,9	74,7	75,6	75,8	75,9	74,7	76,7	75,9	

Os resultados obtidos apresentaram grande uniformidade. A superfície A com média de dureza Shore D = 74,5, apresentou desvio padrão de 0,72, enquanto a superfície B com média de dureza Shore D = 75,9 apresentou desvio padrão de 0,56. O valor médio considerando ambas superfícies ensaiadas foi de 75,2 na escala de dureza Shore D. A Figura 5.5 apresenta a relação entre escalas de dureza Shore, onde é possível identificar que o material tende a rígido.



Fonte: www.intertecequip.com.br.

Figura 5.5. Relação entre escalas de dureza Shore.

Conforme a referência apresentada na Tabela 3.2, no item 3.2.4, a dureza esperada para poliamida 6.6 é de 80 na escala Shore D. Considerando os resultados apresentados, pode-se dizer que o reforço de fibra de vidro não influenciou para a dureza do compósito, pois a média dos resultados é muito próxima da dureza esperada para a matriz.

5.2. Superfícies de Fratura

Os corpos de prova, após ensaios de tração e flexão, foram levados a análise de superfície da região fraturada. Foram analisadas por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV) com sonda EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*). As amostras preparadas para o ensaio de MEV, podem ser visualizadas na Figura 5.6.

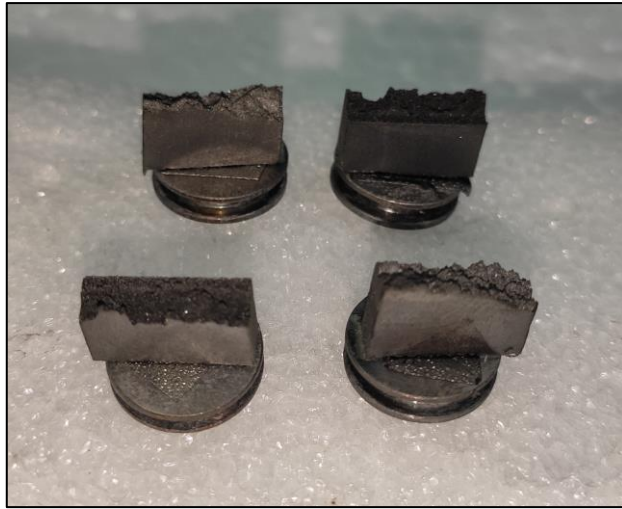


Figura 5.6. Amostras para ensaio de MEV.

A seqüência das Figuras 5.7 a 5.9 são referentes a imagens obtidas da superfície fraturada durante o ensaio de tração.

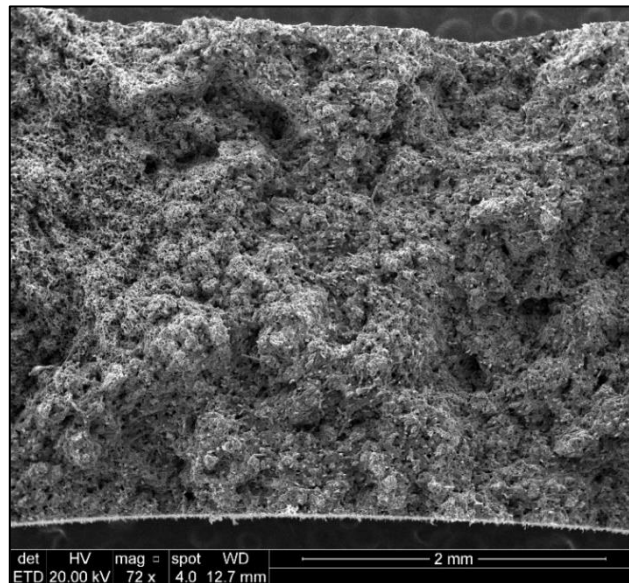


Figura 5.7. Imagem MEV da superfície fraturada na amostra ensaiada em tração.

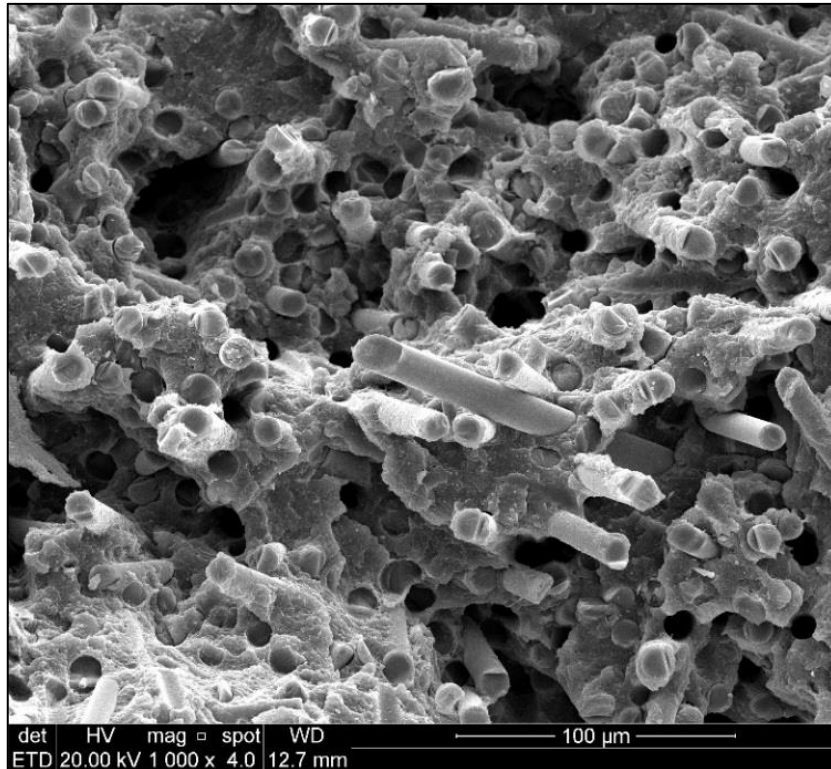


Figura 5.8. Detalhe da região fraturada no ensaio de tração.

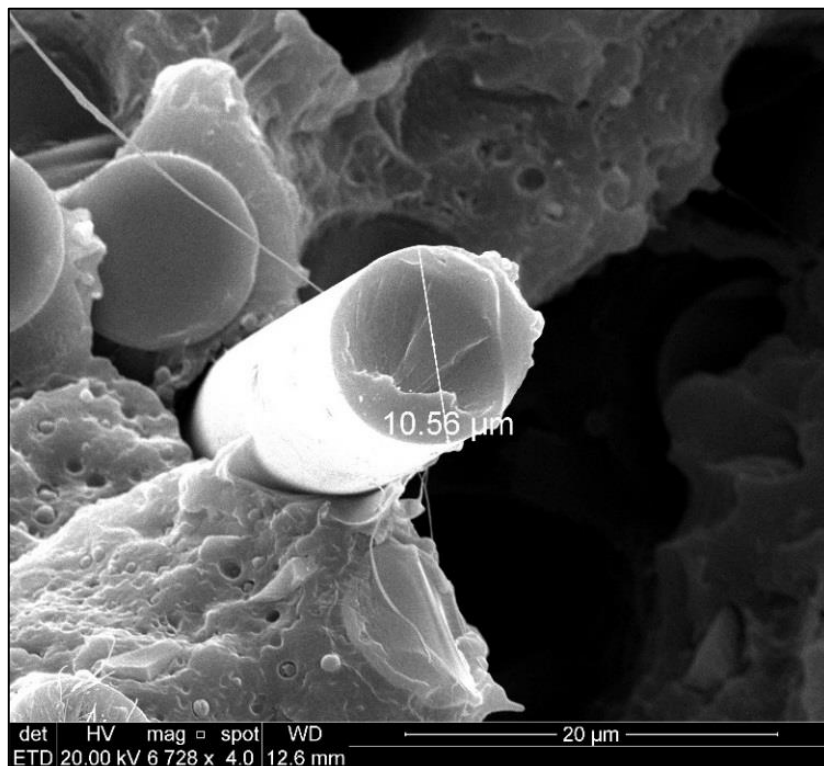


Figura 5.9. Detalhe da fratura em tração, com medida de diâmetro da fibra de vidro.

Da mesma forma que para tração, as imagens das Figuras 5.10 a 5.12 mostram a superfície fraturada para o ensaio de flexão.

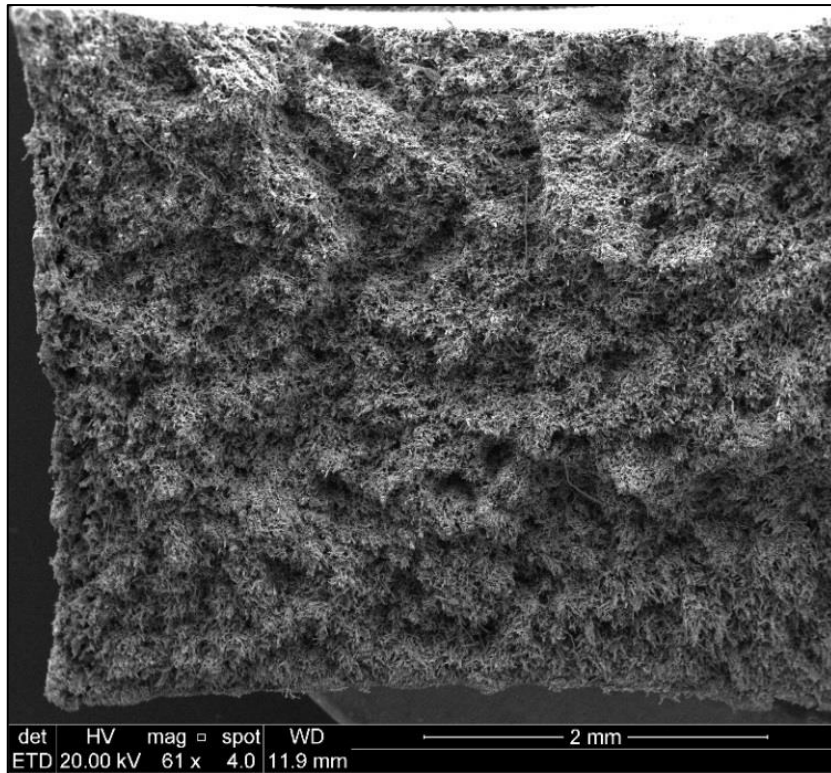


Figura 5.10. Imagem MEV da superfície fraturada na amostra ensaiada em flexão.

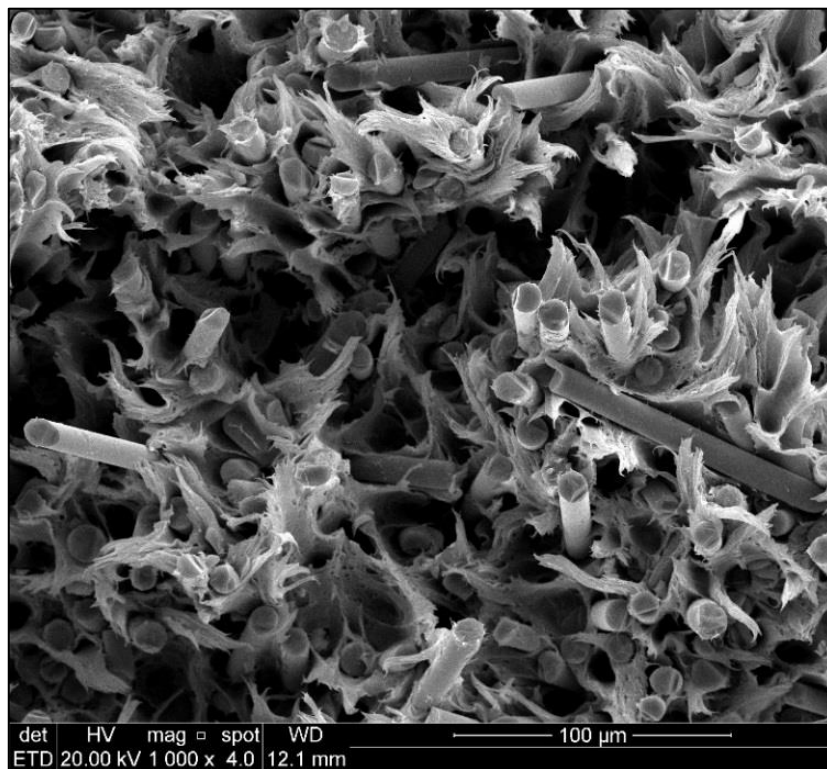


Figura 5.11. Detalhe da região fraturada no ensaio de flexão.

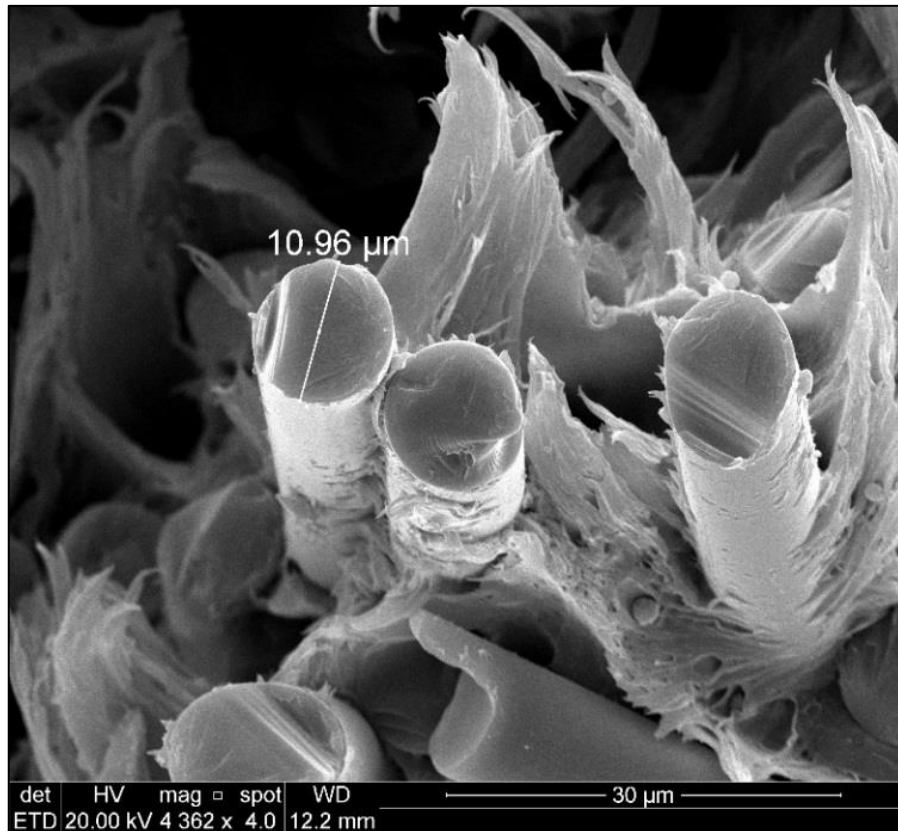


Figura 5.12. Detalhe da fratura em flexão, com medida de diâmetro da fibra de vidro.

Nas imagens acima é possível notar regiões de “*pull-out*” (região onde há descolamento da fibra da matriz). Isso ocorre quando não há boa adesão do reforço, enfraquecendo o compósito e, assim, acelerando a fratura.

Observando as imagens obtidas, a amostra ensaiada em tração apresenta menor deformação da matriz polimérica quando comparada com as imagens da amostra após ensaio de flexão. Isso pode ser notado pela deformação do polímero na região fraturada. A fratura da amostra do ensaio de tração é, de uma forma geral, mais frágil e apresenta planos de propagação na matriz.

A fibra de vidro apresentou fratura frágil, o que é característica desse material. Pelas imagens de MEV, pode-se observar o diâmetro da fibra desse compósito, de aproximadamente 10,5 μm .

5.3. Análise dos Ventos

Os dados coletados do site do INPE possuíam informações de data, hora e velocidades dos ventos a 25 metros de altura e a 50 metros de altura. Para as análises não foram considerados os valores de velocidade a 25 metros de altura, pois a 50 metros as condições de vento se aproximam das velocidades de aplicação do aerogerador em estudo. A Tabela 5.7 apresenta um exemplo dos dados inseridos em planilha previamente ao tratamento, como foram coletados do site.

Tabela 5.7. Informações obtidas do INPE.

ANO	DATA	VEL 25m	VEL 50 m
2009	01/05/2009 00:00	2,528	3,252
2009	01/05/2009 00:10	2,244	3,047
2009	01/05/2009 00:20	2,254	3,054
2009	01/05/2009 00:30	2,358	3,286
2009	01/05/2009 00:40	2,25	3,147
2009	01/05/2009 00:50	2,277	3,093
2009	01/05/2009 01:00	2,073	3,112
2009	01/05/2009 01:10	2,342	3,381
2009	01/05/2009 01:20	2,297	3,241
2009	01/05/2009 01:30	2,457	3,139
2009	01/05/2009 01:40	2,565	3,118
2009	01/05/2009 01:50	2,692	3,392
2009	01/05/2009 02:00	2,666	3,147
2009	01/05/2009 02:10	2,793	3,202
2009	01/05/2009 02:20	2,853	3,404

Do volume original de dados foram removidos 1,7 % de dados inválidos (dados zerados ou com valores inconsistentes). Para isso, foi aplicado um filtro nos valores de velocidade e foram removidos valores com erro de leitura do sensor. Os dados válidos (103.382 dados) foram aplicados na distribuição probabilística de *Weibull*, conforme método descrito no item 4.4.1. A Tabela 5.8 apresenta os resultados obtidos da função densidade para cada velocidade de vento.

Tabela 5.8. Probabilidade dos dados de vento.

Velocidade (m/s)	Número de ocorrências	Frequência	Weibull
0	1022	1,0%	0
1	8294	8,0%	0,132302391
2	20375	19,7%	0,213829078
3	30119	29,1%	0,224874294
4	27588	26,7%	0,182378256
5	12238	11,8%	0,120306833
6	2897	2,8%	0,066098481

7	621	0,6%	0,030631688
8	116	0,1%	0,01206447
9	39	0,0%	0,004058064
10	28	0,0%	0,001169626
11	16	0,0%	0,00028955
12	20	0,0%	6,16749E-05
13	2	0,0%	1,13182E-05
14	3	0,0%	1,79137E-06
15	1	0,0%	2,44728E-07
16	2	0,0%	2,88775E-08
17	1	0,0%	2,94475E-09
Total	103382	99,9%	0,988077792

A velocidade média calculada (V_m) foi de 3,32 m/s e a velocidade máxima encontrada foi de 17 m/s. Os dados de percentual de frequência e distribuição de *Weibull* foram plotados, o que resultou no gráfico mostrado na Figura 5.14.

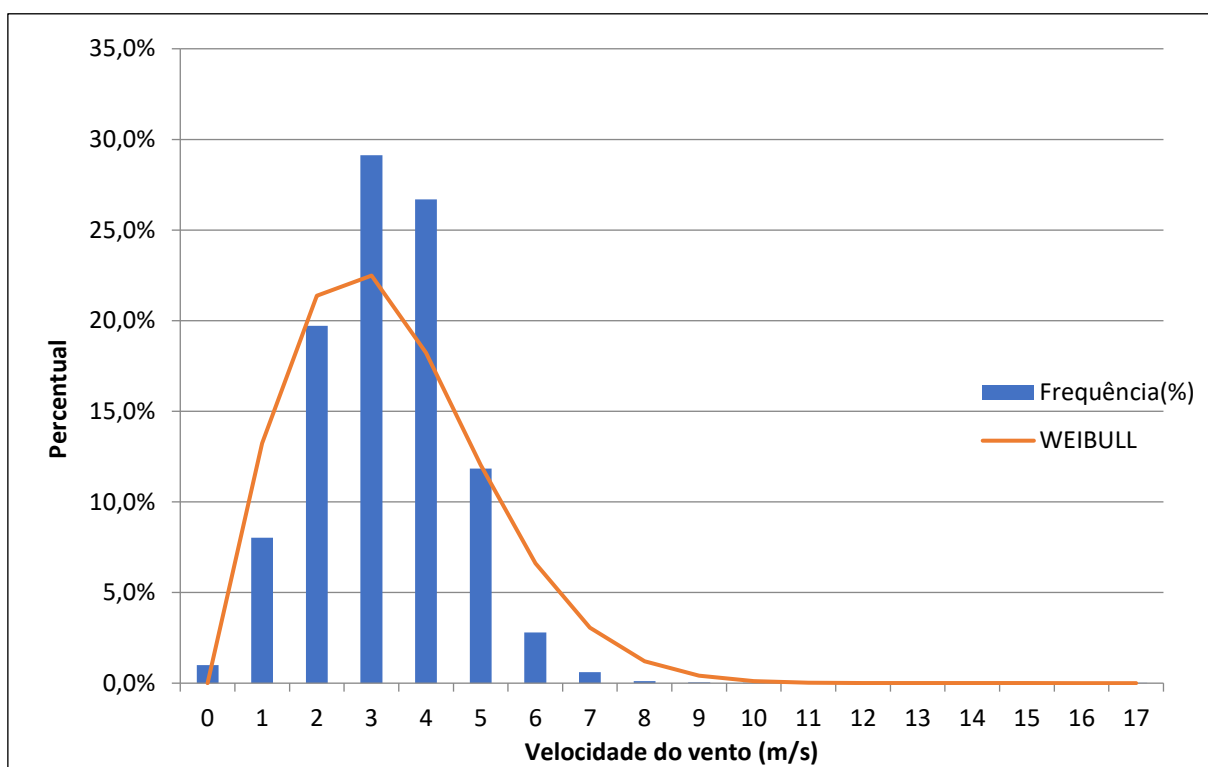


Figura 5.13. Distribuição de Weibull para o espectro de velocidades de vento.

Os valores do parâmetro de forma k e parâmetro de escala c utilizados para essa distribuição são 2 e 3,75, respectivamente. O valor de k foi encontrado na literatura Atlas Eólico [ATLAS EÓLICO, Governo do estado do Rio Grande do Sul, 2014] e o valor de c foi calculado pela Equação 4.5. Observando os resultados, nota-se que as velocidades de 2 m/s a 5 m/s possuem maior concentração de densidade.

Isso é devido aos ventos médios da região ($V_m = 3,32 \text{ m/s}$). Como pode ser visto na Figura 5.14, para as velocidades 2 m/s e 3 m/s a distribuição de *Weibull* resultou em probabilidades superiores a 20 %, sendo os maiores valores da distribuição.

No método Epaarachchi não é utilizado todo o espectro de ventos, e apenas uma fração do espectro é aplicado aos cálculos, considerando o cenário mais favorável a falhas (cenário de condição crítica). Neste trabalho foi realizada uma análise considerando o cenário de condição crítica e também uma análise considerando um cenário de condição normal de operação (todo o espectro). Para o cenário de condição crítica, o espectro de ventos foi segmentado conforme a Figura 5.15, pois considera os maiores valores dentro da distribuição. No cenário de condição normal de operação toda a distribuição é considerada.

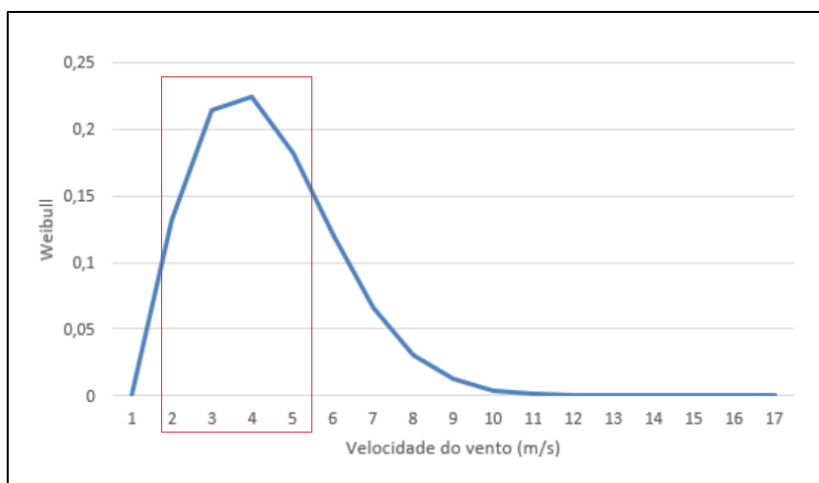


Figura 5.14. Distribuição de Weibull para velocidades de vento com destaque para o segmento utilizado para o cenário de condição crítica.

5.4. Estimativa da Vida a Fadiga

A estimativa de vida à fadiga inicia com a aplicação do Método Simplificado de Cargas (SLM) apresentado no item 3.3.1. A caracterização da pá e do aerogerador é necessária para obter os dados de entrada para as equações, sendo estas apresentadas no item 4.4.2. Os resultados obtidos da sequência de equações desse método podem ser vistos na Tabela 5.9.

Tabela 5.9. Parâmetros determinados para estimativa de vida a fadiga.

Parâmetros	Equação	Símbolo	Unidade	Valor
Velocidade Projetada	Eq. 3.10	V_{proj}	m/s	4,65
Velocidade de Rotação Projeto	$2\pi/60 \times N_{proj}$	$\omega_{N,proj}$	rad/s	41,89

Eficiência	Eq. 3.6	η	%	0,60
Parâmetro de Projeto (TSR)	Eq. 3.4	λ_{proj}	n/a	7,91
Torque Projetado	Eq. 3.5	Q_{proj}	N.m	9,95
Força Centrifuga (eixo z)	Eq. 3.7	F_z	N	1122,94
Momento Fletor (eixo x)	Eq. 3.8	M_x	N.m	9,59
Momento Fletor (eixo y)	Eq. 3.9	M_y	N.m	26,22
Módulo de Inércia	Eq. 4.7	W	m ³	1,35E-05
Tensão equivalente	Eq. 4.6	σ_{eq}	MPa	2,08
Força equivalente	$\sigma_{eq} \times A$	F_{eq}	N	111052,79
Força total	Eq. 3.3	F_{total}	N	61,22

Utilizando a Equação 3.11 da tensão para velocidades de vento instantâneas e a Equação 3.12 para forças de velocidades de vento instantâneas, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 5.10. Estes dados são utilizados para aplicação do método Epaarachchi, pois referencia o esforço do material a cada velocidade de vento do espectro. O método Epaarachchi utiliza valores de razão das tensões calculadas em intervalos de 10 %. Portanto, os valores acima foram fracionados em razões de tensão conforme mostra a Tabela 5.11.

Tabela 5.10. Valores de força e tensão para cada velocidade de vento.

Vi (m/s)	σ_{vi} (MPa)	Fvi (N)
1,00	0,10	2,83
2,00	0,38	11,34
3,00	0,86	25,50
4,00	1,54	45,34
5,00	2,40	70,85
6,00	3,46	102,02
7,00	4,71	138,86
8,00	6,15	181,37
9,00	7,78	229,54
10,00	9,61	283,39
11,00	11,63	342,90
12,00	13,84	408,07
13,00	16,24	478,92
14,00	18,84	555,43
15,00	21,62	637,62
16,00	24,60	725,47
17,00	27,78	818,98

Tabela 5.11. Razões de tensões.

Vi (m/s)	R 0,1 (MPa)	R 0,2 (MPa)	R 0,3 (MPa)	R 0,4 (MPa)	R 0,5 (MPa)	R 0,6 (MPa)	R 0,7 (MPa)	R 0,8 (MPa)	R 0,9 (MPa)	R 1,0 (MPa)
1,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
2,00	0,04	0,08	0,12	0,15	0,19	0,23	0,27	0,31	0,35	0,38
3,00	0,09	0,17	0,26	0,35	0,43	0,52	0,61	0,69	0,78	0,86
4,00	0,15	0,31	0,46	0,62	0,77	0,92	1,08	1,23	1,38	1,54

5,00	0,24	0,48	0,72	0,96	1,20	1,44	1,68	1,92	2,16	2,40
6,00	0,35	0,69	1,04	1,38	1,73	2,08	2,42	2,77	3,11	3,46
7,00	0,47	0,94	1,41	1,88	2,35	2,83	3,30	3,77	4,24	4,71
8,00	0,62	1,23	1,85	2,46	3,08	3,69	4,31	4,92	5,54	6,15
9,00	0,78	1,56	2,34	3,11	3,89	4,67	5,45	6,23	7,01	7,78
10,00	0,96	1,92	2,88	3,84	4,81	5,77	6,73	7,69	8,65	9,61
11,00	1,16	2,33	3,49	4,65	5,81	6,98	8,14	9,30	10,47	11,63
12,00	1,38	2,77	4,15	5,54	6,92	8,30	9,69	11,07	12,46	13,84
13,00	1,62	3,25	4,87	6,50	8,12	9,75	11,37	12,99	14,62	16,24
14,00	1,88	3,77	5,65	7,53	9,42	11,30	13,19	15,07	16,95	18,84
15,00	2,16	4,32	6,49	8,65	10,81	12,97	15,14	17,30	19,46	21,62
16,00	2,46	4,92	7,38	9,84	12,30	14,76	17,22	19,68	22,14	24,60
17,00	2,78	5,56	8,33	11,11	13,89	16,67	19,44	22,22	25,00	27,78

A análise de vida à fadiga é determinada em número de ciclos, e para isso a Equação 3.13 é utilizada. Nessa equação utiliza-se o somatório das distribuições de *Weibull* do espectro de vento, bem como da distribuição de *Weibull* aplicada a razão de tensões. Portanto, assim como no item anterior, para as razões de tensões também foi aplicada a distribuição de *Weibull* considerando dois cenários. Um deles segmentando apenas os resultados mais significativos da função densidade, que foi aplicado ao cenário de operação crítica (mostrado na Figura 5.16). O outro cenário, chamado de condição normal de operação, utilizou toda curva de probabilidade da distribuição.

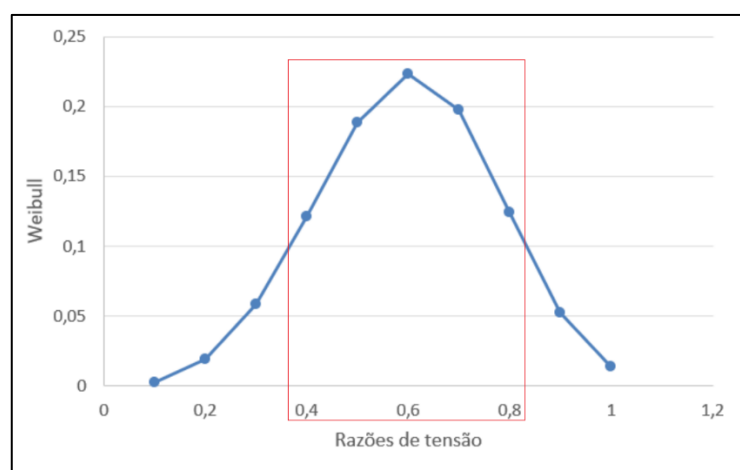


Figura 5.15. Distribuição de *Weibull* para razões de tensão.

Aplicando os dados de distribuição de *Weibull* de todo o espectro de ventos e de tensões (cenário de operação normal – “a”) na Equação 3.13, o número de ciclos obtidos foi de 1.554.832. Considerando o cenário (b) para condições críticas de operação, os espectros de ventos e tensões foram aplicados à Equação 3.13, de

forma segmentada, onde resultou 996.812 ciclos.

6. CONCLUSÕES

As principais conclusões extraídas a partir da metodologia empregada e dos resultados obtidos foram:

- as propriedades mecânicas obtidas experimentalmente mostraram boa concordância com os valores encontrados na literatura. Os valores demonstraram que as propriedades estão coerentes para o tipo de compósito (PA 6.6 reforçado com 25 % de fibra de vidro). No ensaio de tração o valor médio da resistência à tração foi de 99,3 MPa, o que está conforme os valores encontrados em especificações do material, que informaram um intervalo entre 80 MPa e 120 MPa. Para o Módulo de Elasticidade o valor médio resultante dos ensaios de tração foi de 3,68 GPa, o que também está conforme o intervalo encontrado nas especificações do material (2 GPa a 6 GPa). Para o ensaio de flexão os valores se aproximaram dos valores especificados por fabricantes. Nos testes realizados a resistência à flexão média encontrada foi 186,5 MPa, enquanto na referência foi encontrado valores até 180 MPa. A diferença entre o valor teórico e o obtido experimentalmente foi de 3,6 %. O Módulo de Elasticidade médio calculado a partir do ensaio de flexão foi de 3,99 GPa, o que representa uma diferença de 8 % quando comparado com o resultado obtido pelo ensaio de tração.

- o espectro de cargas desenvolvido pela coleta de dados de vento pode ser aplicado à análises de fadiga, conforme proposto por Epaarachchi. Como descrito anteriormente, os aerogeradores de pequeno porte não possuem um espectro de cargas de fadiga conhecido. O espectro de cargas *WISPER/WISPERX* utilizado em muitos testes de pás de aerogeradores, é aplicável apenas para pás de aerogeradores de grande porte. Portanto, esse trabalho buscou no método desenvolvido por Epaarachchi comprovar o desenvolvimento de um espectro de cargas através de dados de velocidade de vento e de parâmetros do aerogerador. Os resultados obtidos revelaram que o método é aplicável a aerogeradores de pequeno porte e possibilita

análises quanto a vida à fadiga do material da pá. Foram utilizados 103.382 dados de velocidade de vento para elaborar o espectro de cargas. A velocidade média foi de 3,32 m/s para a região estudada, enquanto a velocidade máxima foi de 17 m/s. A maior concentração de dados está entre as velocidades 2 m/s e 5 m/s, pois dos 103.382 dados coletados, 90.320 dados estão distribuídos entre essas velocidades. Utilizando o Método Simplificado de Cargas foi realizado o cálculo das forças atuantes na pá para desenvolvimento do espectro de tensões. A força centrífuga calculada (F_z) foi de 1122,9 N e os momentos fletores M_x e M_y encontrados foram 9,59 N.m e 26,22 N.m, respectivamente. A força (F_{total}), utilizada para cálculo da tensão equivalente, foi de 61,22 N. A tensão equivalente (σ_{eq}) calculada foi de 2,08 MPa que é o parâmetro de entrada para o cálculo das tensões para cada velocidade de vento. Sendo assim, com base no espectro desenvolvido é possível obter a tensão atuante para cada velocidade. Na velocidade máxima do espectro, 17 m/s, a tensão resultante foi de 27,78 MPa. Para a velocidade média ($\cong 3$ m/s), a tensão resultante foi de 0,86 MPa;

- a estimativa de vida em número de ciclos é afetada pelo espectro de cargas. No presente trabalho foi desenvolvido dois cenários de análise de vida do material. O cenário (a) considerando a condição normal de operação e o cenário (b) considerando a condição mais crítica de operação. No cenário (a) todo o espectro desenvolvido foi empregado, considerando toda a amplitude de velocidades dos dados coletados. Neste cenário o regime de ventos é mais amplo e possui mais variações. Aplicando a fórmula do método desenvolvido por Epaarachchi, neste cenário, obteve-se uma estimativa de vida de 1.554.832 ciclos. No entanto, para o cenário (b) apenas as velocidades com maior frequência foram empregadas. Nos dados analisados as velocidades entre 2 m/s e 5 m/s representaram 87,3 % do volume de dados coletados. Portanto, apenas a distribuição para esse intervalo de velocidades foi considerada na estimativa de vida à fadiga no cenário (b). Por ser um intervalo com menor variação e mais intensidade de dados, é chamado de condição crítica. A estimativa de vida à fadiga para o cenário (b) resultou em 996.812 ciclos. Comparando as análises dos cenários (a) e (b) temos uma redução de 35,8 % na vida útil quando aplicada a condição crítica ao material.

7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como propostas para a continuidade da pesquisa, destacam-se:

- comparar os dados teóricos estimados para a vida à fadiga com valores obtidos em ensaios cíclicos realizados em pás em aparato experimental disponível no Lab-Eólica da PUCRS;
- analisar condições de ventos para outras regiões do país determinando seus espectros e distribuições;
- estimar a vida à fadiga para estas condições;
- analisar a resistência à fadiga do material das pás em ensaios cíclicos normatizados.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEGAS, Fabiano D.; PEÑA, Gustavo de M.; ALÉ, Jorge A. V.; SIMIONI, Gabriel C. Power curve of small wind turbine generators: Laboratory and field testing. RIO 3 – World Climate & Energy Event: 2003, Rio de Janeiro, Brasil.

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.

ASHBY, M. F., JONES, D. R. H. Engenharia de materiais - Volume II, 1º ed. Rio de Janeiro: Elsevier; 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Plásticos - Determinação das propriedades mecânicas à tração: Método de ensaio, NBR 9622, São Paulo, 1986. 12p.

ASTM D 790. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM D 790 – 03. 2003. 11p.

ASTM D 2240. Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness. ASTM D 2240 – 15. 2016. 13p.

BELMONTE, Enrico; DE MONTE, Matthias; HOFFMANN, C. J.; QUARESIMIN, Marino. Damage mechanisms in a short glass fiber reinforces polyamide under fatigue loading. International Journal of Fatigue, v. 94, 145-157, Janeiro, 2016.

BURTON, Tony; SHARPE, David; JENKINS, Nick; BOSSANYI, Ervin. Wind Energy Handbook. 8ª ed. Chichester: WILEY, 2008. 617p.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 817p.

CHAGAS FILHO, João Gilberto Astrada. Análise de fadiga em pás de aerogeradores de pequeno porte. Porto Alegre. 2011. 136p. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

CORBUS, D.; MEADORS, M. Small wind research turbine. Golden: NREL, 2005. 171p (Technical Report NREL/TP-500-38550).

CUSTÓDIO, Ronaldo dos S. Energia eólica para produção de energia elétrica. ISBN 978-85-87083-09-8. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009. 280p.

EPAARACHCHI, J. Ananda. 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. Newcastle. 2002. 338p. Ph.D. Thesis. University of Newcastle, Australia.

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.

GOMES, Maurício Miranda. Análise dinâmica de um modelo de pá de turbina eólica. Brasília. 2016. 61p. Trabalho de conclusão de curso. Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília UnB, Brasil.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Desenvolvimento e Promoção do Investimento. Atlas Eólico. Porto Alegre: SDPI: AGDI, 2014. 116p.

GRIZZO, L. H. Desenvolvimento de PVC reforçado com fibras de vidro longas para fabricação de produtos moldados. Dissertação. Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2009.

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

IEC 61400-2, Part 2: Design requirements for small wind turbines – International Standard, International Electro Technical Commission, 2013.

KIRSCH, Josua. Design of a small wind turbine for electric power generation (1-5kW). Toowoomba. 2009. 118p. Dissertação. Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, Australia.

KONG, C.; BANG, J.; SUGIYAMA, Y. Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life. Energy, v. 30, 2101–2114, 2005.

LOPES, P. E., SOUZA, J. A. D. Influência das condições de processamento nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com fibras de vidro. Polimeros: Ciência e Tecnologia, v. jan/mar, p. 85-99, 1999.

NETO, F. L., PARDINI, L. C. Compósitos estruturais - Ciência e tecnologia, 1ª ed. Edgard Blücher LTDA; 2006.

OKSMANN, K., MATHEW, A. P., LÅNGSTRÖM, R., NYSTRÖM, B., JOSEPH, K. The influence of fibre microstructure on fibre breakage and mechanical properties of natural fibre reinforced polypropylene. Composites part A, v. 69, p. 1847-1853, 2009.

PANG, J. C., LI, Z. G., WANG, Z. F. General relation between tensile strength and fatigue strength of metallic materials. Materials Science and Engineering: A Volume 564, 1 March 2013, Pages 331-341.

SMITH, William F. Fundamentos de Engenharia e Ciências Dos Materiais. 5ª ed. Porto Alegre: Amgh Editora, 2012. 734p.

TAKAHASHI, B., X. Metodologia Moderna para Análise de Fadiga Baseada em

Elementos Finitos de Componentes Sujeitos a Fadiga Uni e Multiaxial. São Paulo. 2014. 338p. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.

WOOD, David. Small Wind Turbines: Analysis, Design, and Application. ISBN 978-1-84996-174-5. New York: Springer, 2011. 270p.

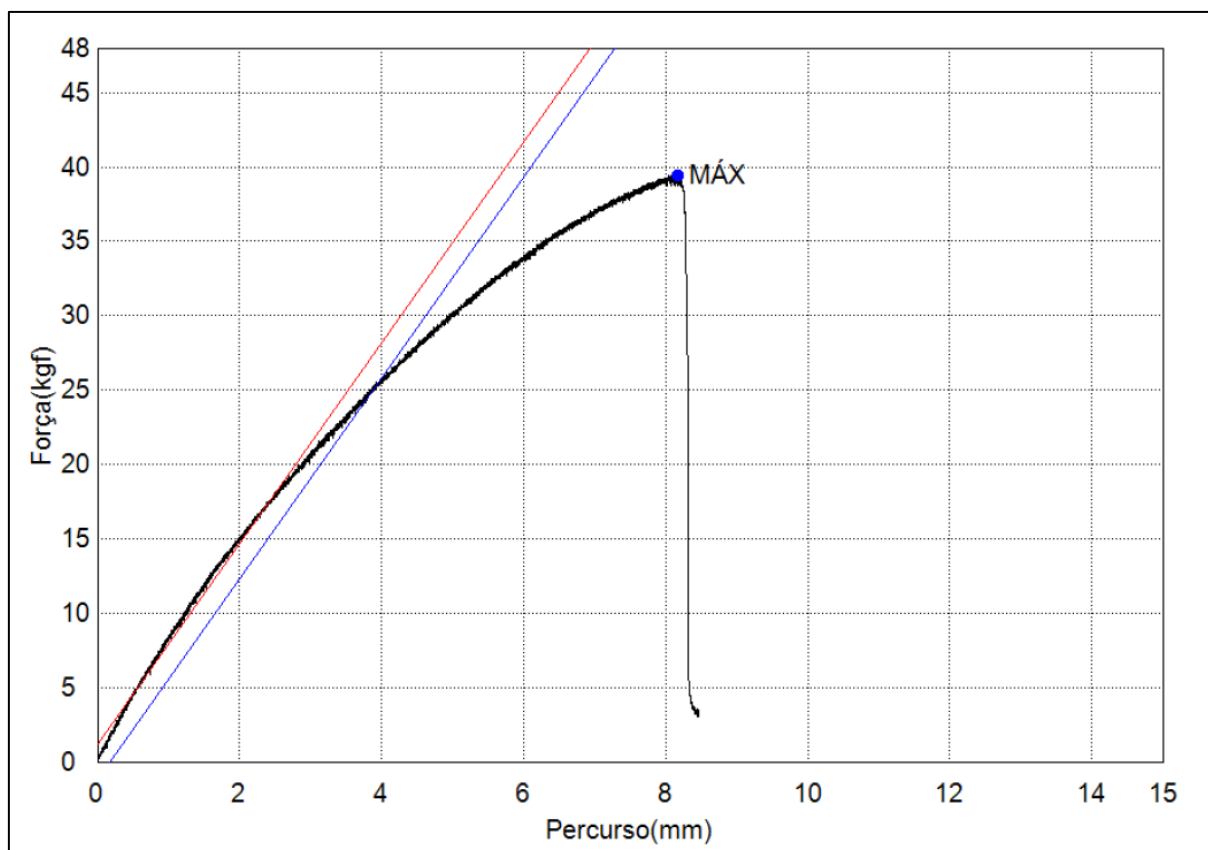
WIEBECK, H., HARADA, J. Plásticos de engenharia - Tecnologia e aplicações, 1° ed. São Paulo: Artliber; 2005.

DIBENEDETTO, A. T. Materials Science and Engineering, 302, p.74 (2001).

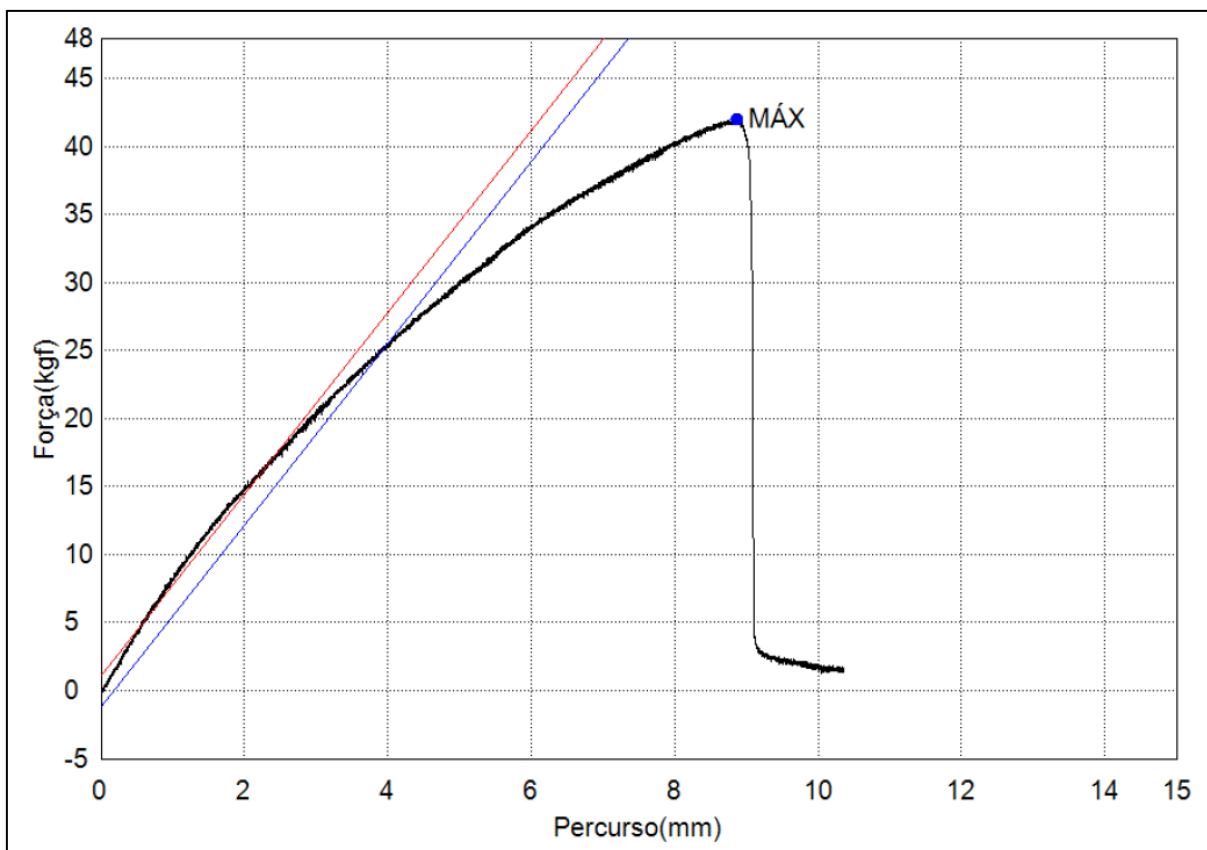
9. ANEXOS

Anexo A – Ensaio Mecânicos

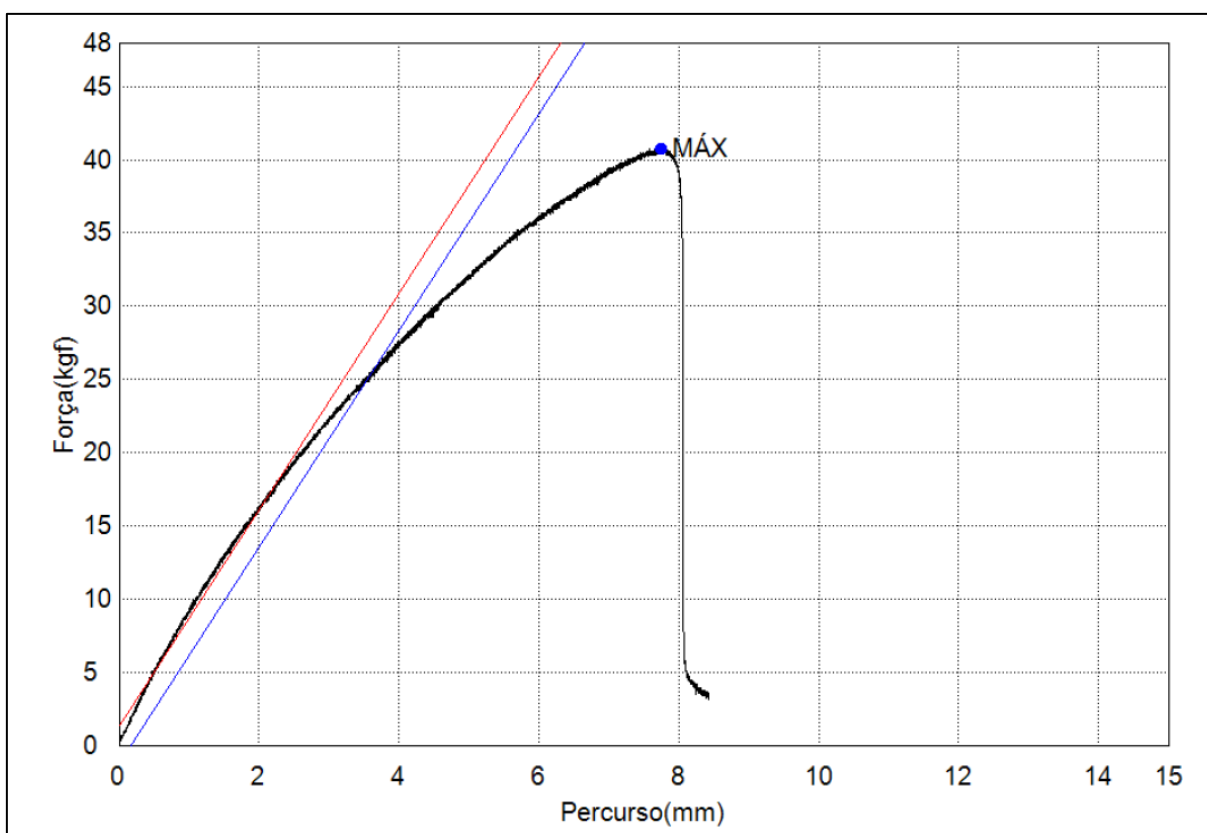
Resultado de ensaio do corpo de prova 1 (ensaio de flexão)



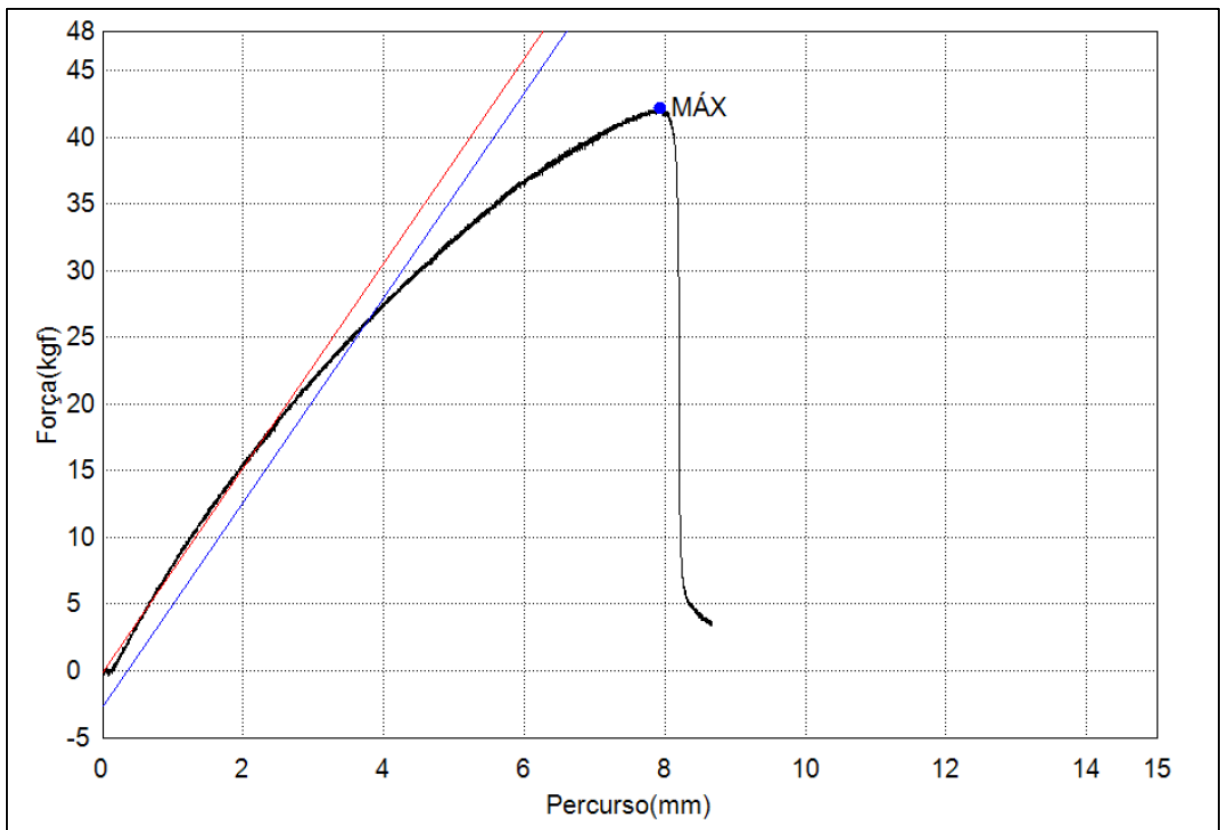
Resultado de ensaio do corpo de prova 2 (ensaio de flexão)



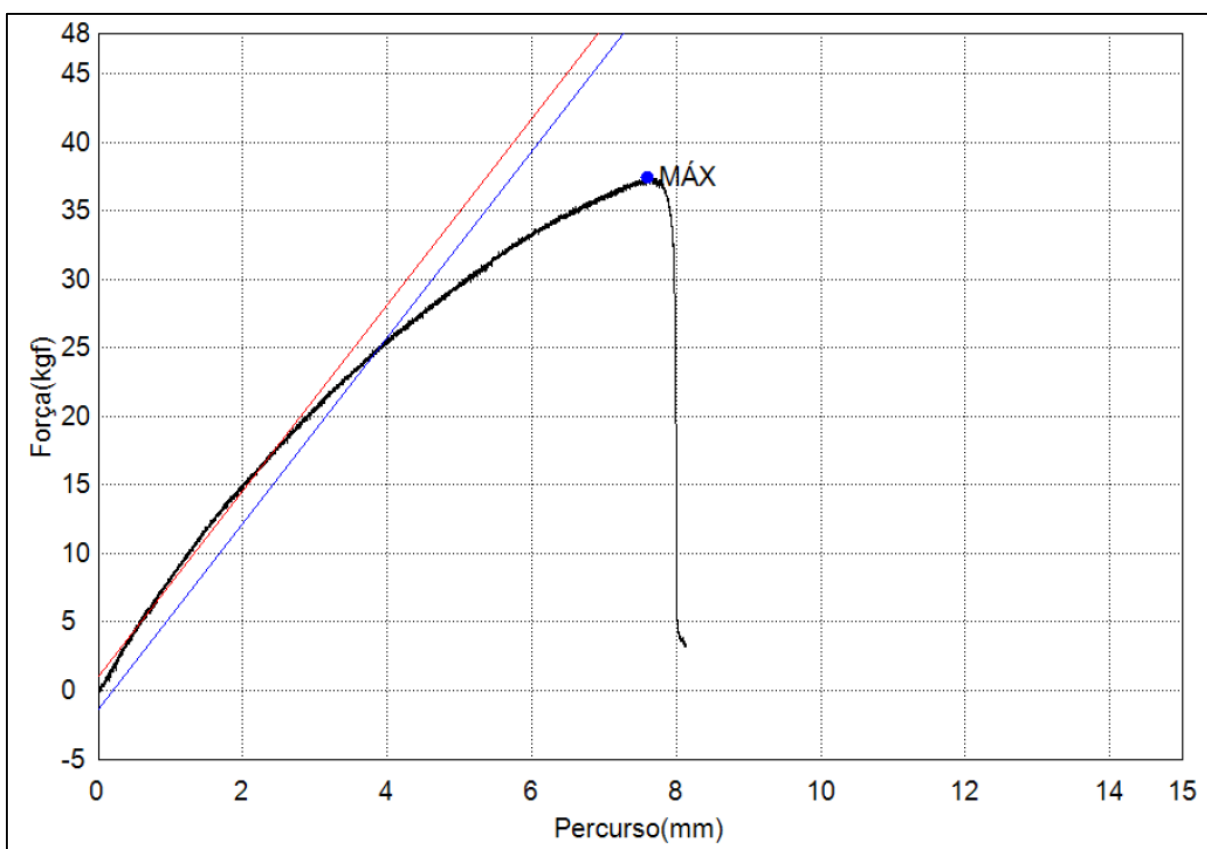
Resultado de ensaio do corpo de prova 3 (ensaio de flexão)



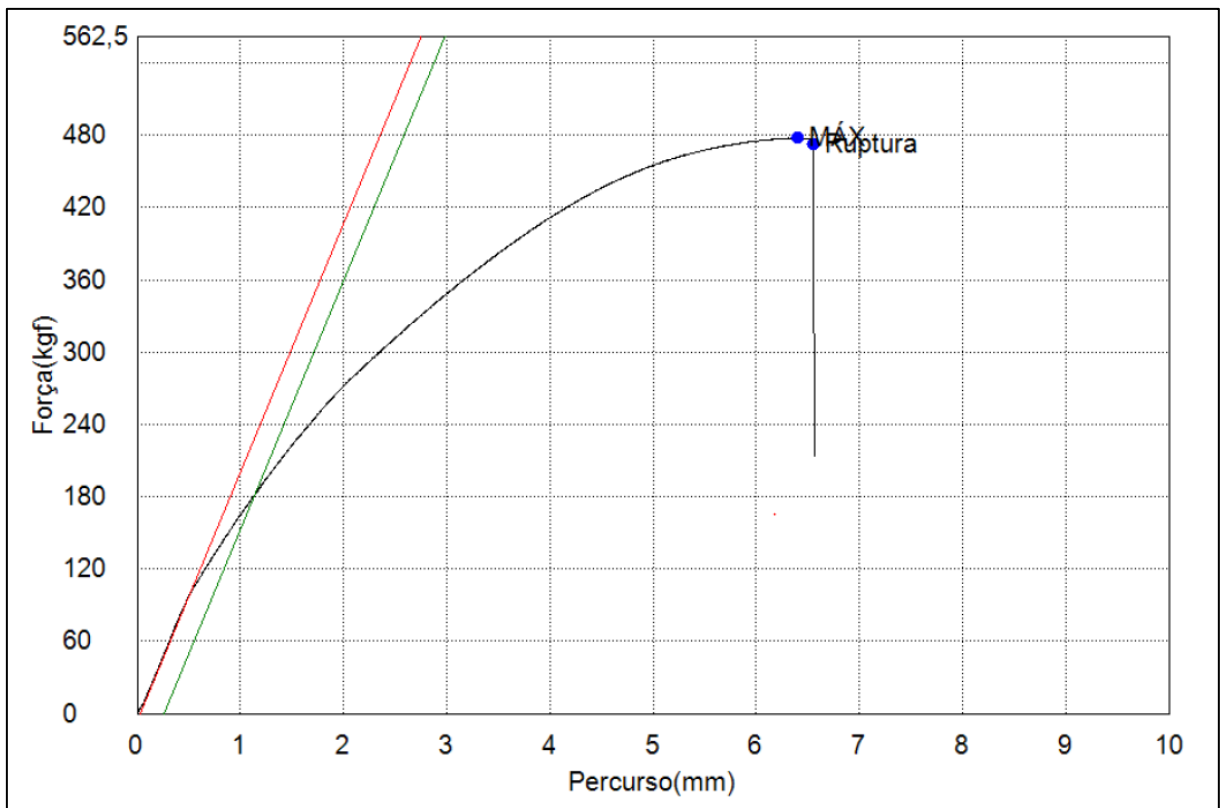
Resultado de ensaio do corpo de prova 4 (ensaio de flexão)



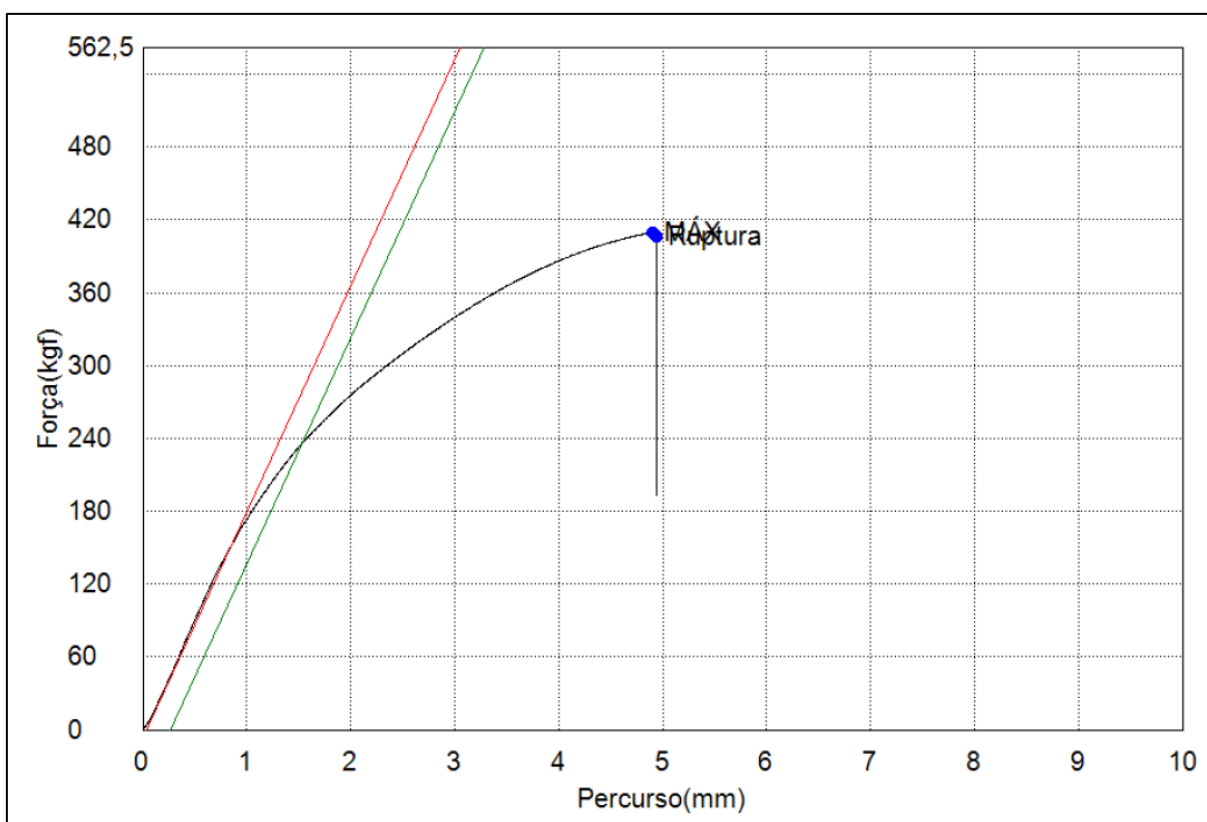
Resultado de ensaio do corpo de prova 5 (ensaio de flexão)



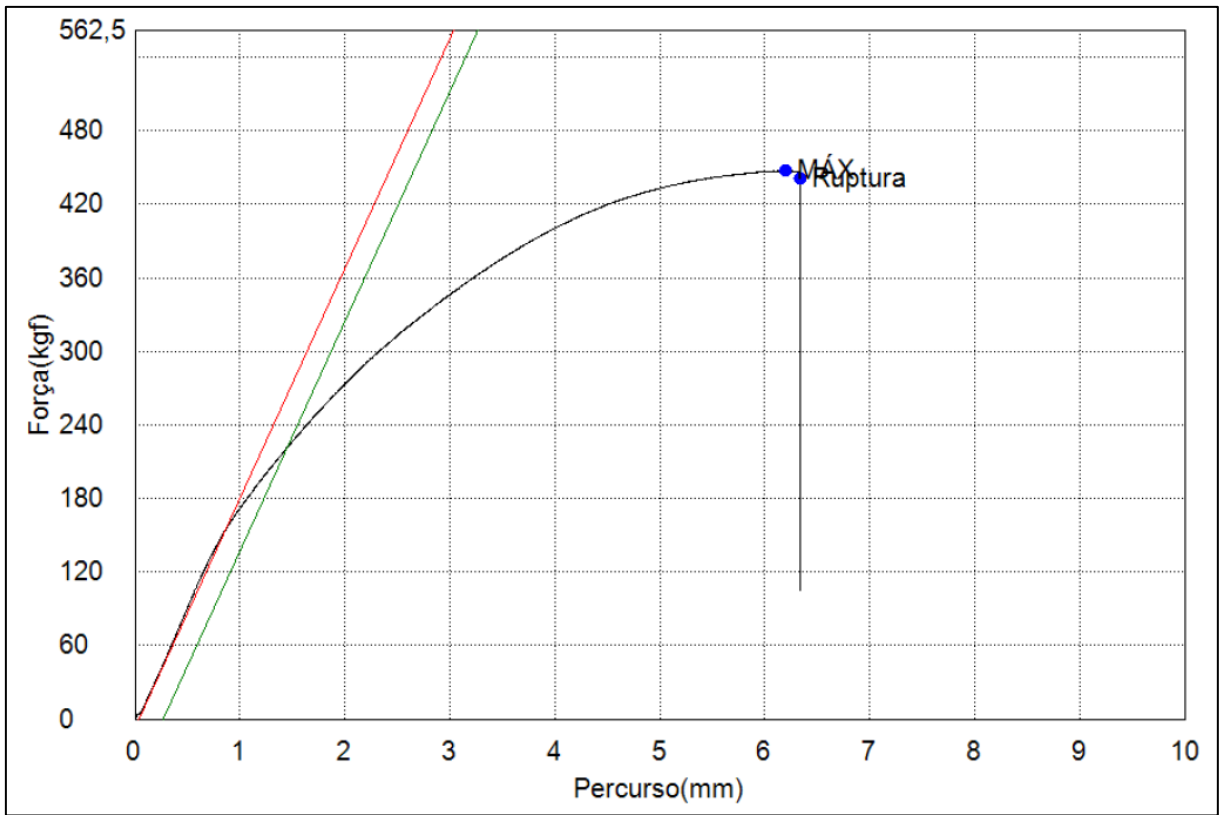
Resultado de ensaio do corpo de prova 2 (ensaio de tração)



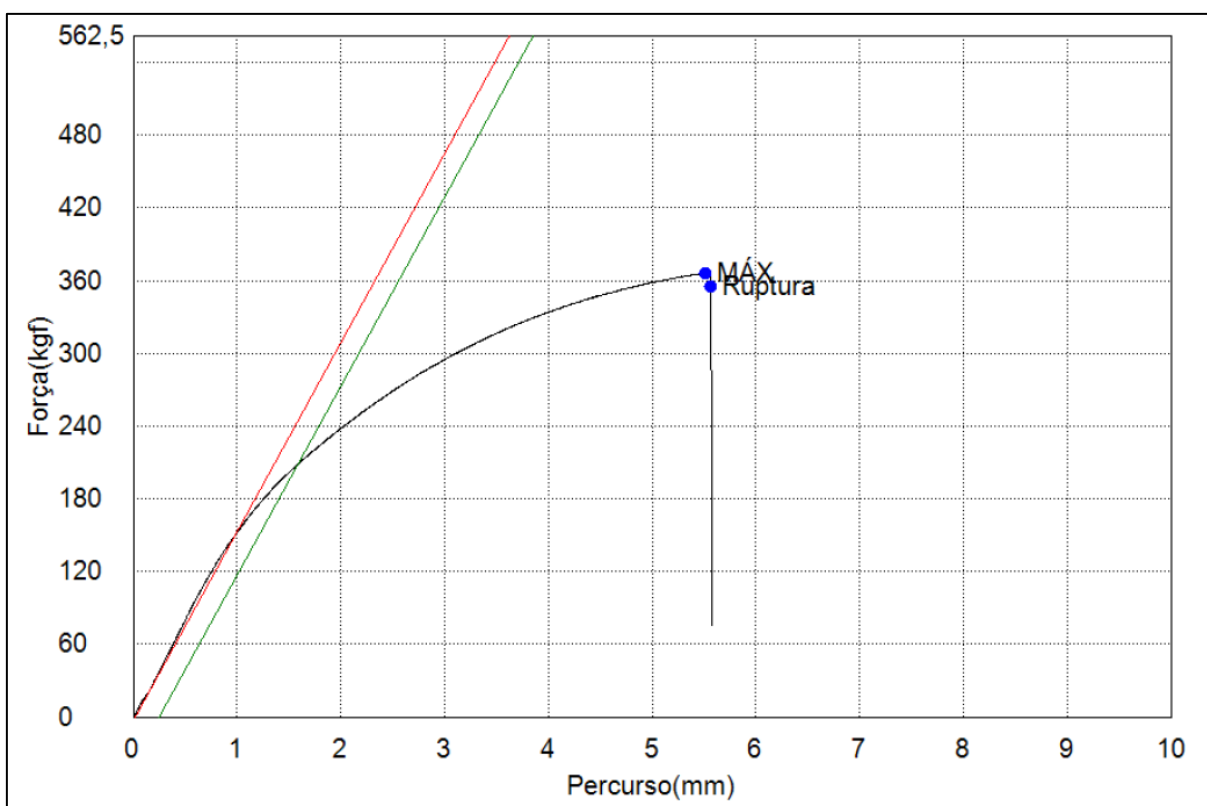
Resultado de ensaio do corpo de prova 3 (ensaio de tração)



Resultado de ensaio do corpo de prova 4 (ensaio de tração)

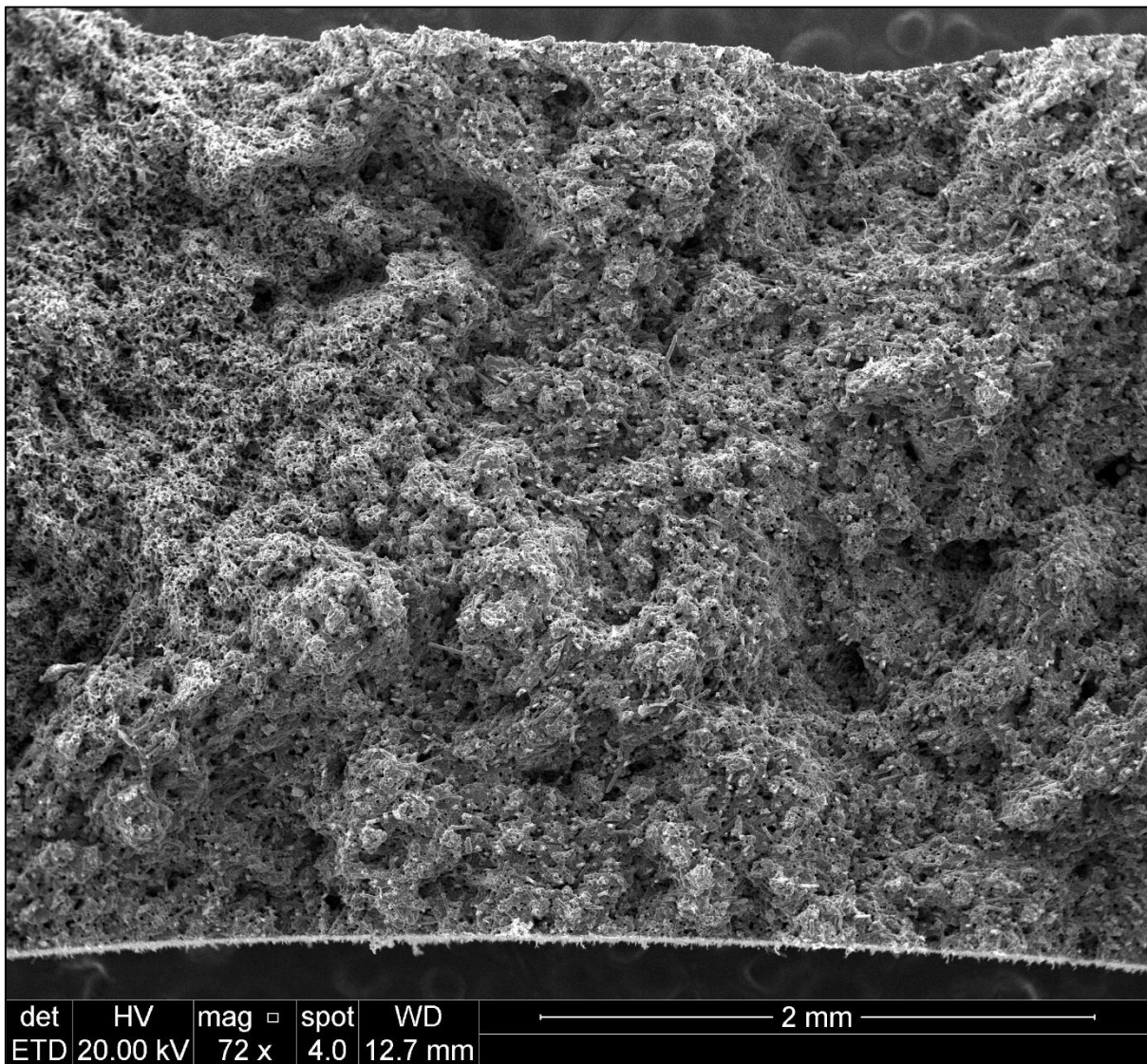


Resultado de ensaio do corpo de prova 5 (ensaio de tração)

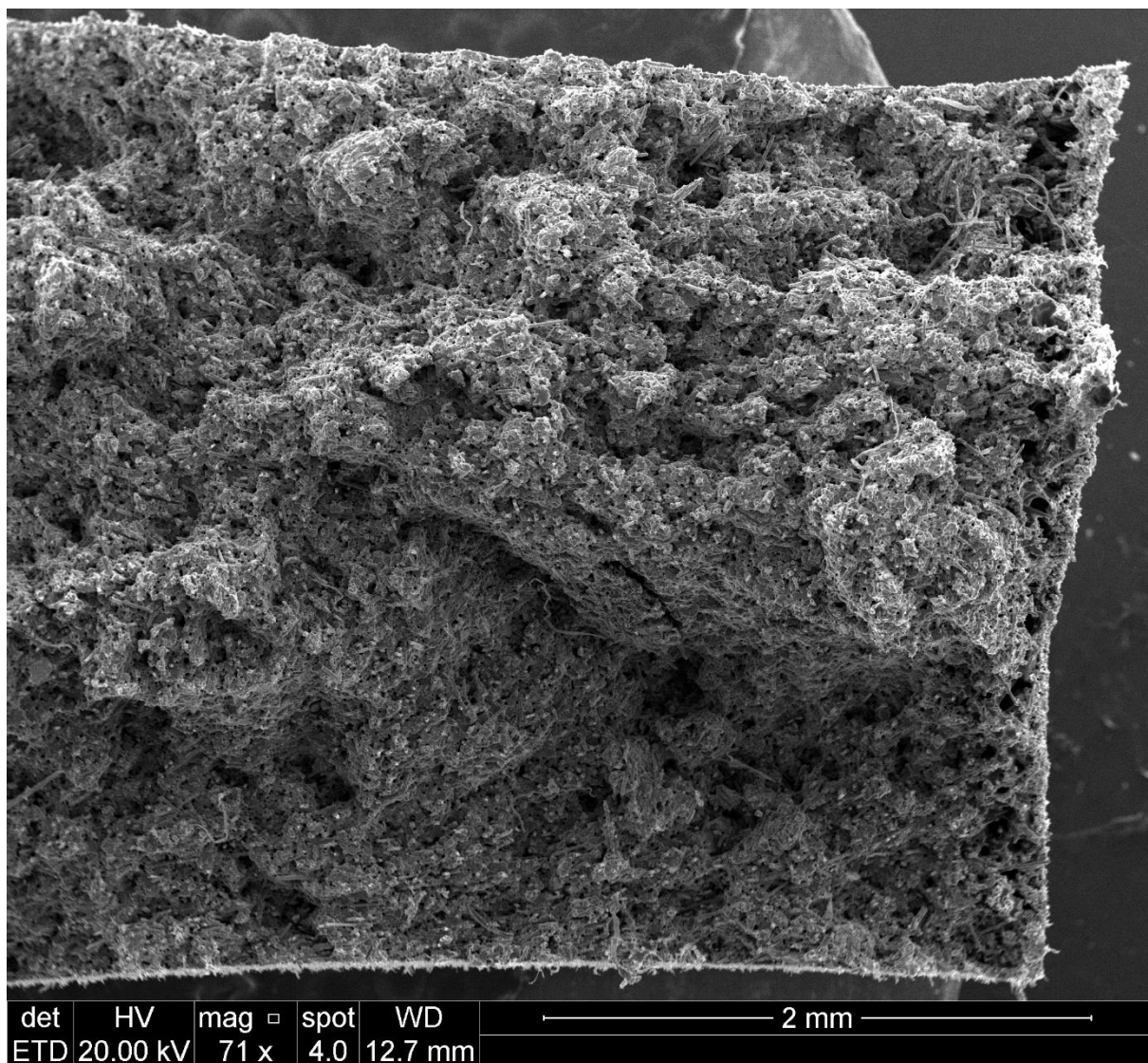


Anexo B – Superfícies de Fratura

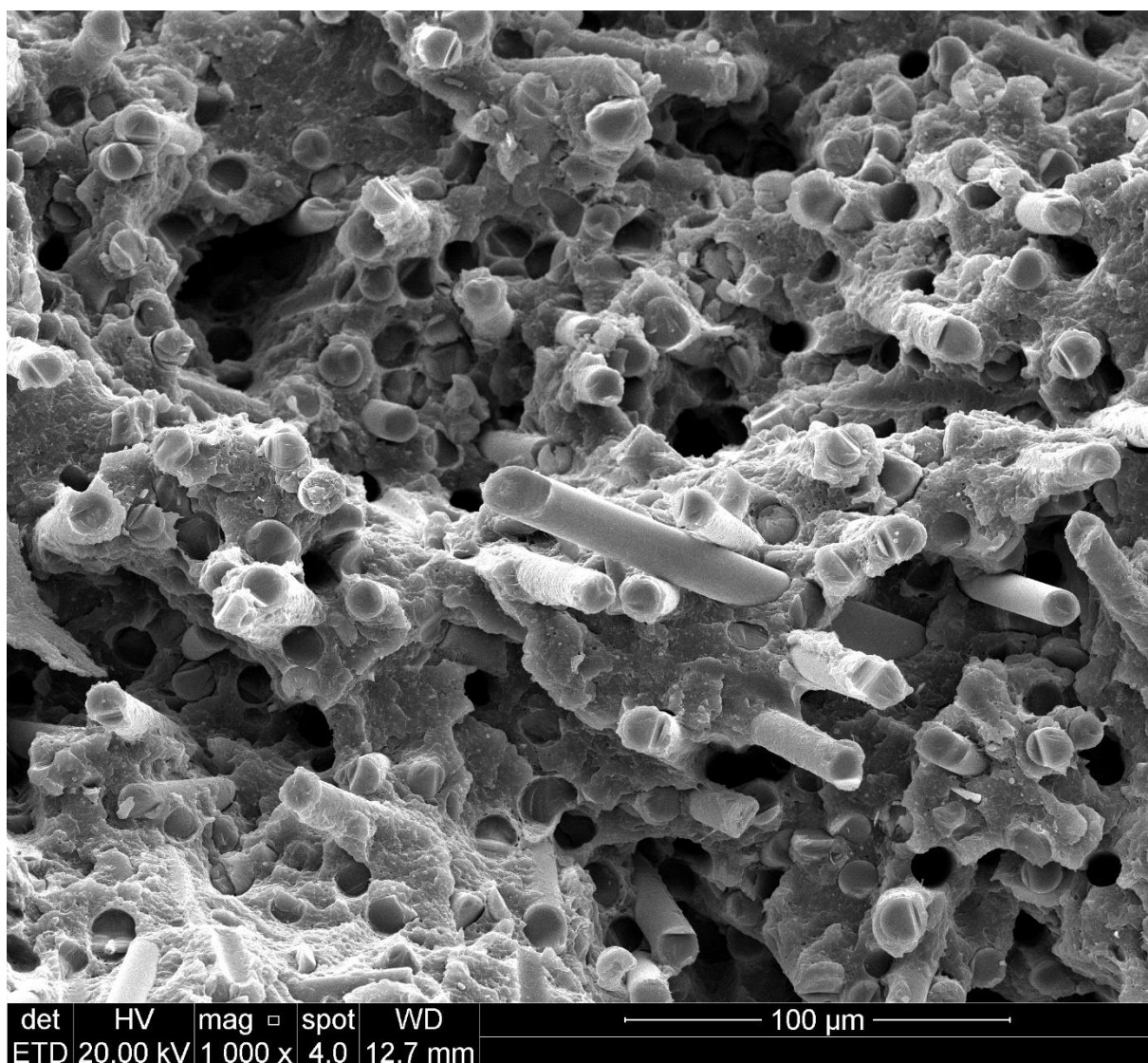
Amostra retirada de corpo de prova fraturado pelo ensaio de tração (1).



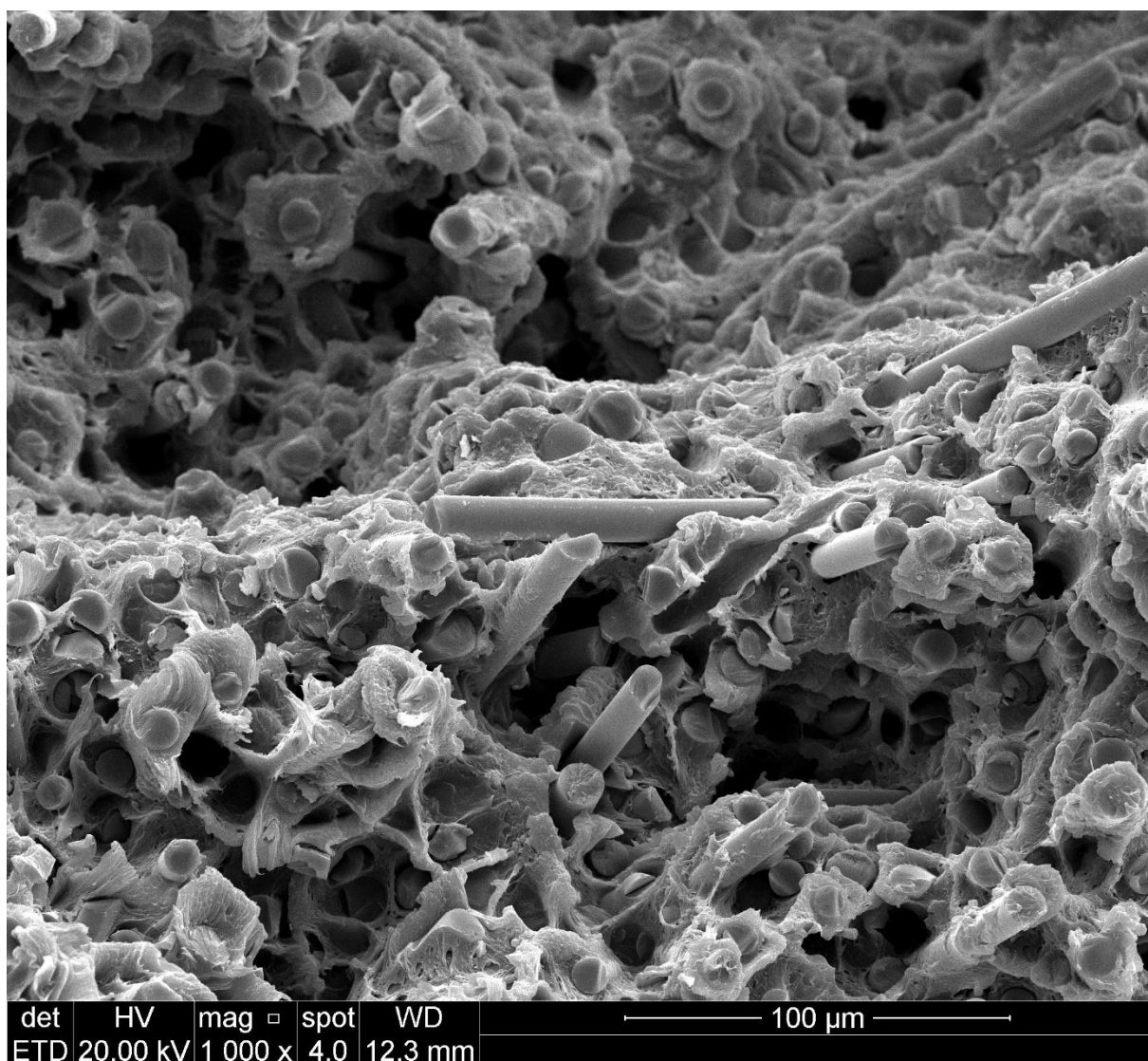
Amostra retirada de corpo de prova fraturado pelo ensaio de tração (2).



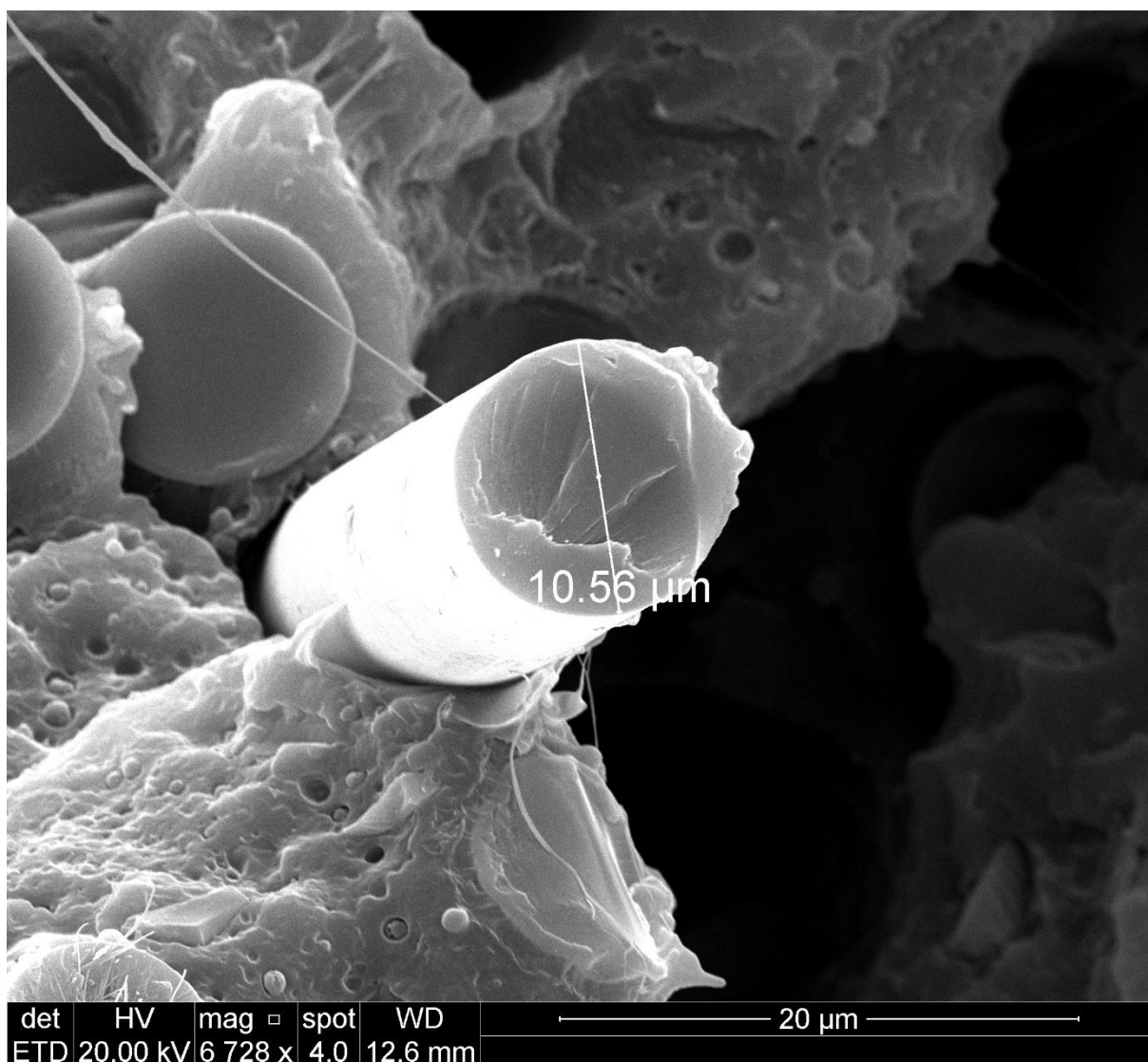
Amostra retirada de corpo de prova fraturado pelo ensaio de tração (3).



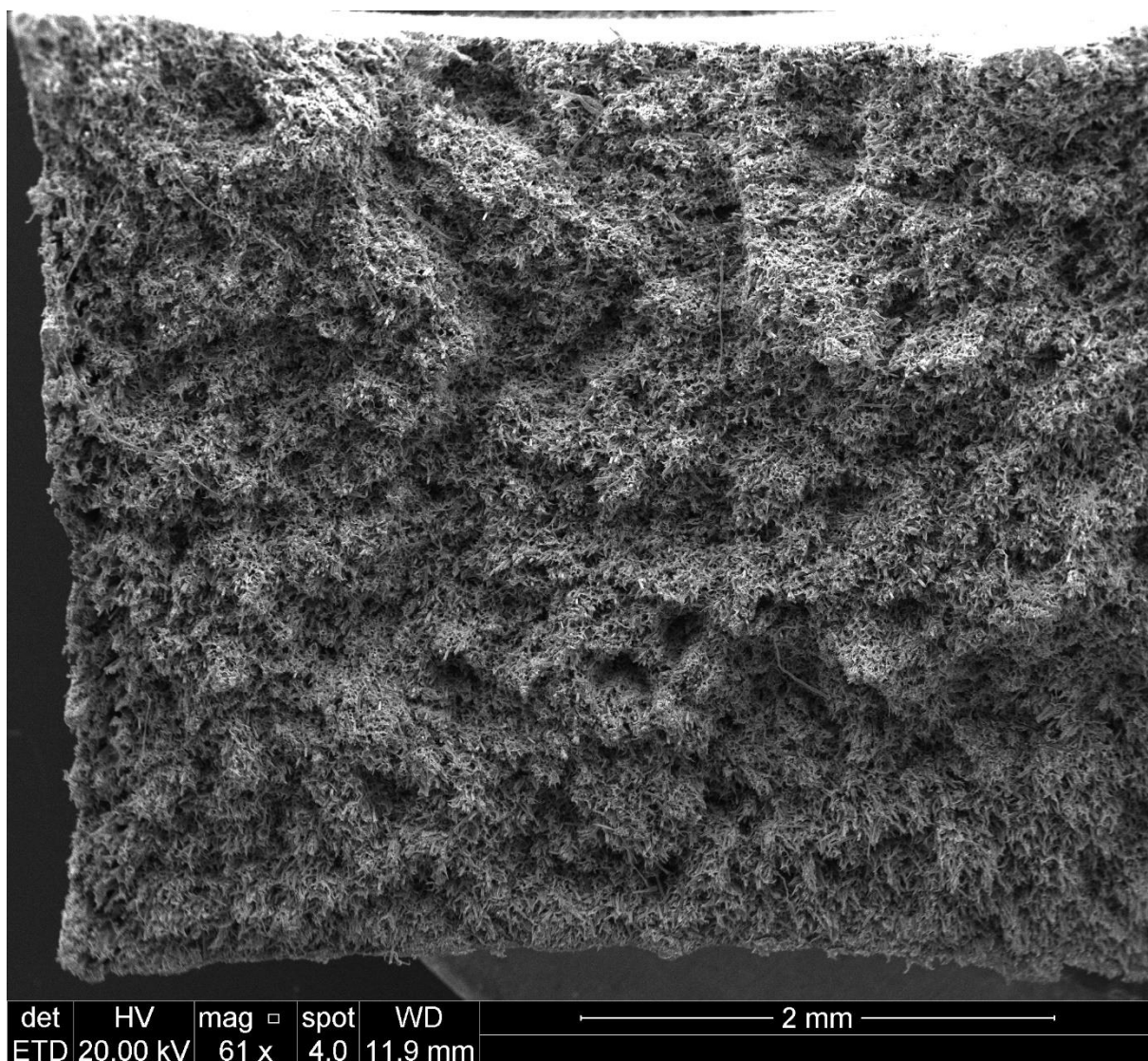
Amostra retirada de corpo de prova fraturado pelo ensaio de tração (4).



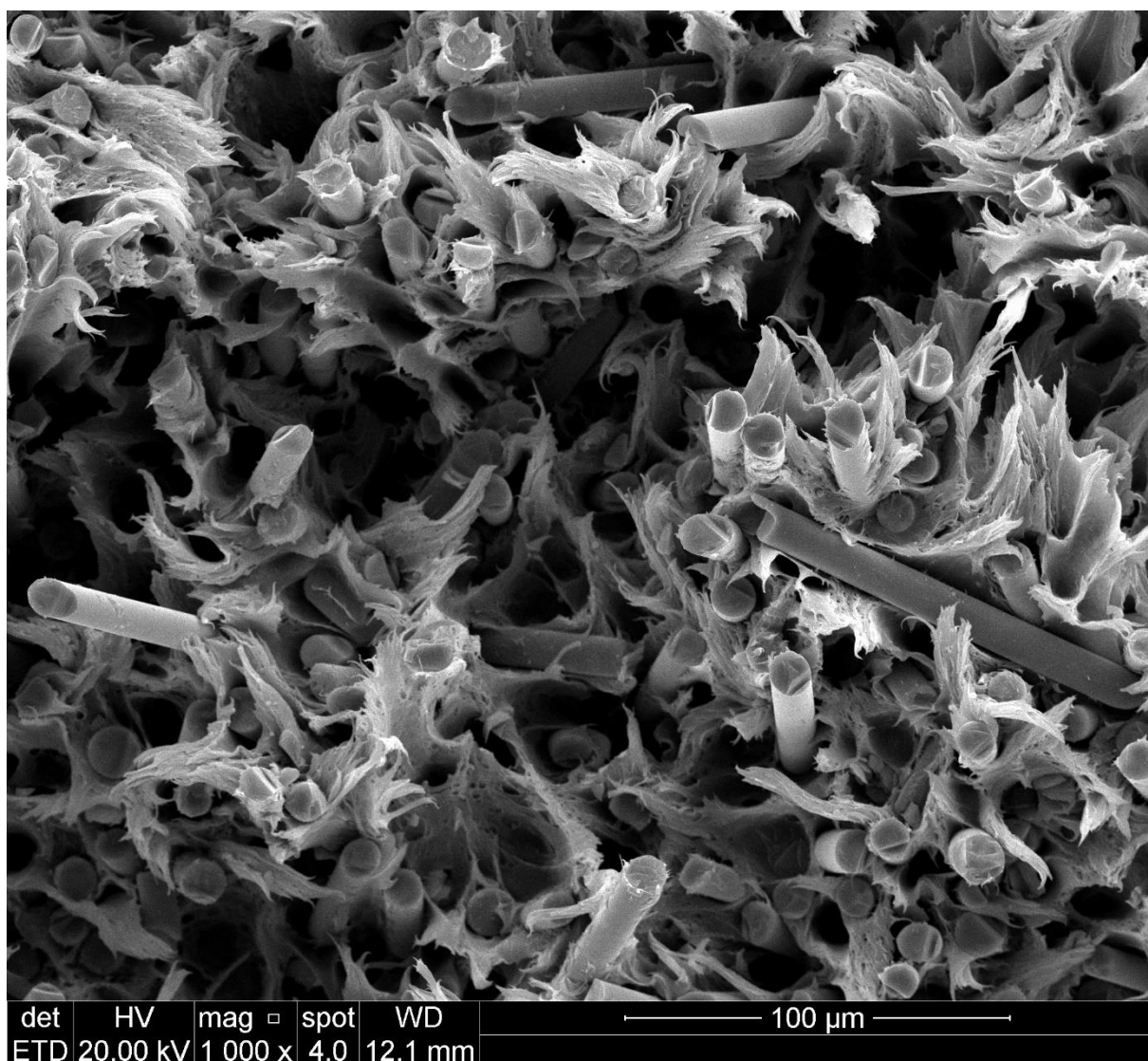
Amostra retirada de corpo de prova fraturado pelo ensaio de tração (5).



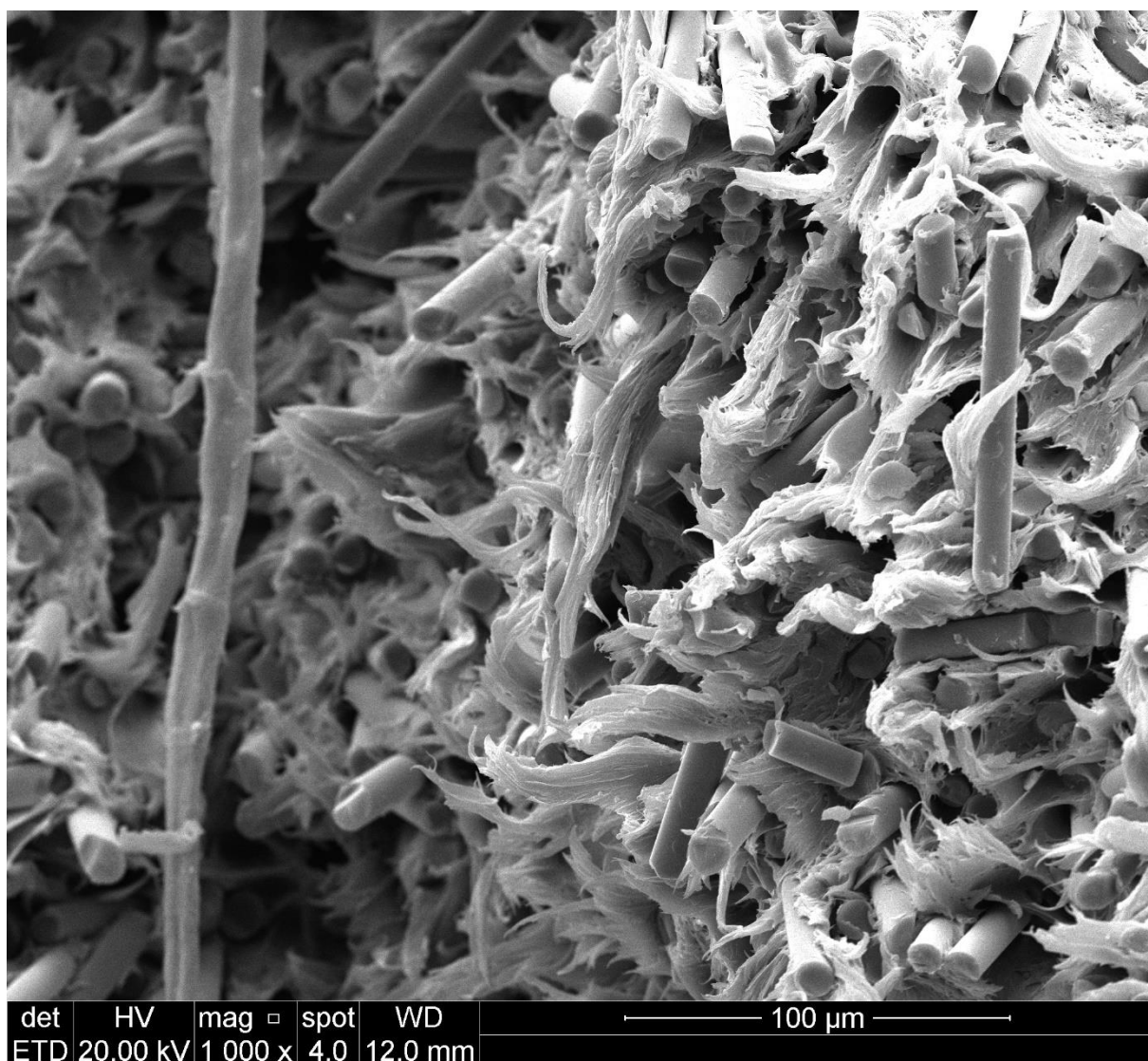
Amostra retirada de corpo de prova fraturado pelo ensaio de flexão (1).



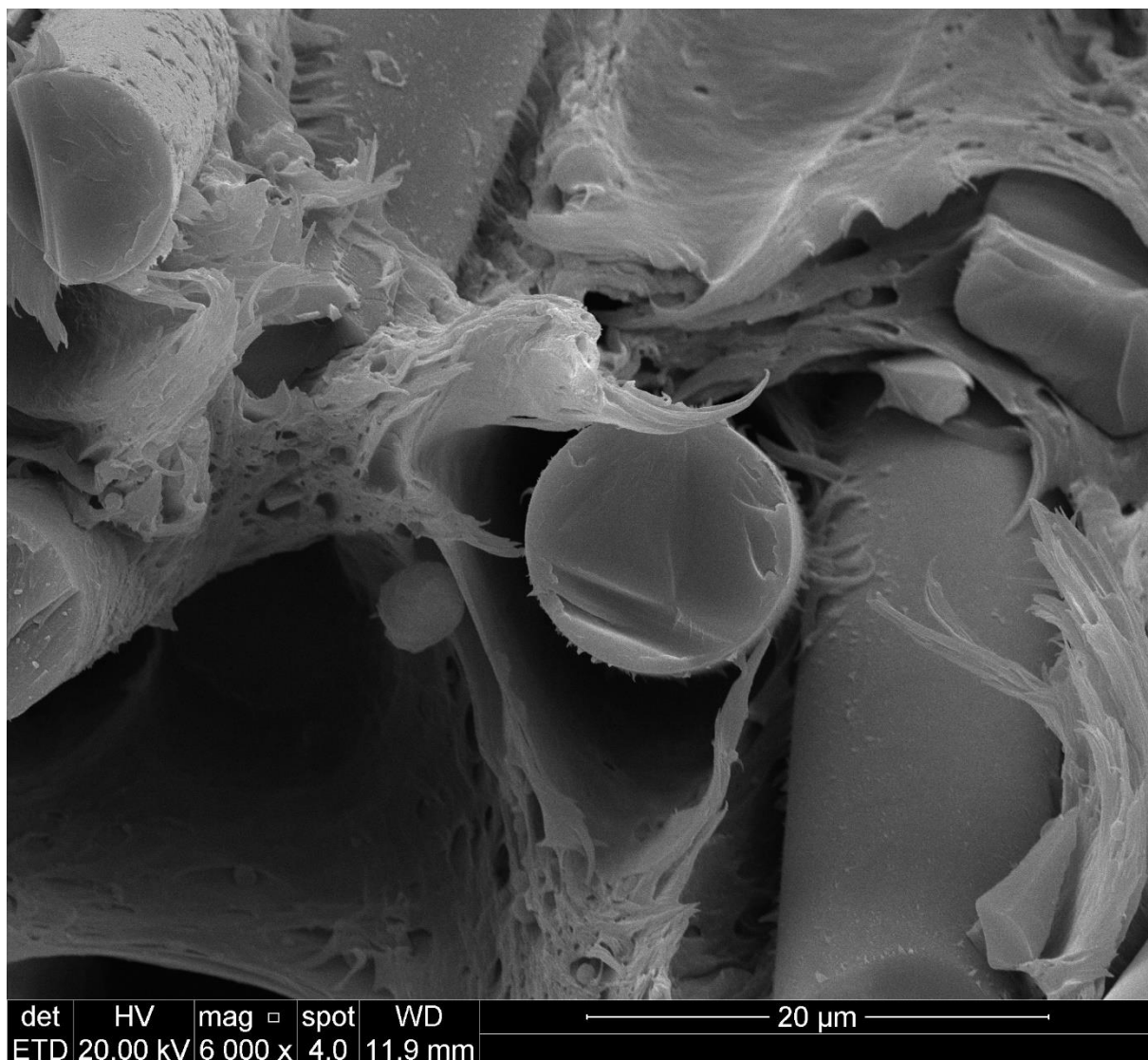
Amostra retirada de corpo de prova fraturado pelo ensaio de flexão (2).



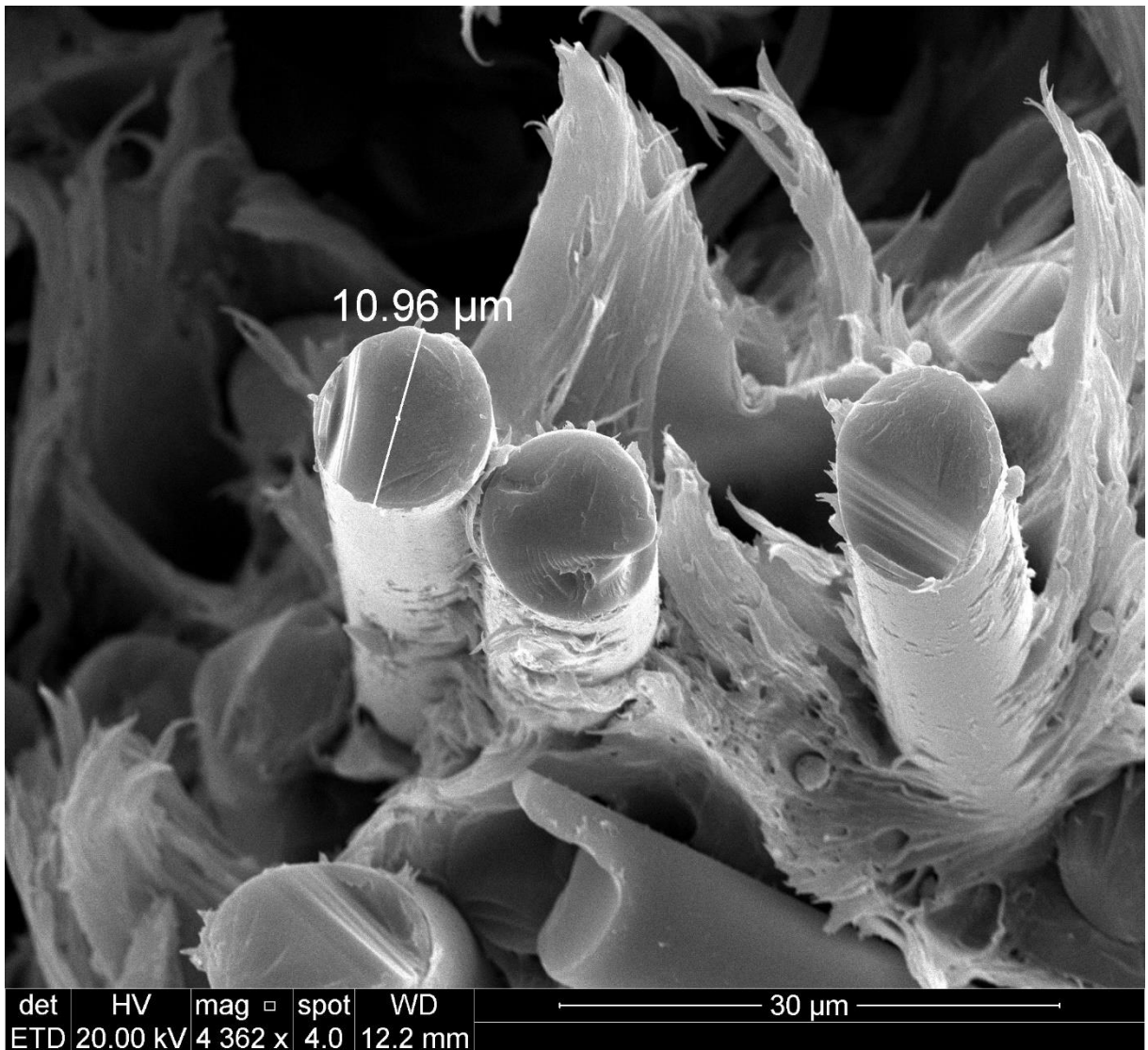
Amostra retirada de corpo de prova fraturado pelo ensaio de flexão (3).



Amostra retirada de corpo de prova fraturado pelo ensaio de flexão (4).



Amostra retirada de corpo de prova fraturado pelo ensaio de flexão (5).



Anexo C – Planilha desenvolvida com equações do MSC.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z		
1	PREENCHER APENAS OS CAMPOS EM AMARELO																											
2	Metodo simplificado de cargas																											
3	Parâmetros	Símbolo	Unidade	Valor																								
4	Comprimento da Pá	R	m	0,8775																								
5	Número de Pás	n	n/a	3																								
6	Rotação nominal (projeto)	n_design	rpm	400																								
7	Massa da Pá	m	kg	1																								
8	Distância CG e Eixo Rotor	Rcog	m	0,32																								
9	Area Transversal Pá	At	m ²	0,053486																								
10	Momento Polar de Inércia (G)	I	m ⁴	3,7596E-07																								
11	Distância / Eixo neutro	y	m	0,027675																								
12	Módulo de inércia	W	m ³	1,3585E-05																								
13	Eficiência	η	n/a	0,60																								
14	Potência	P	kW	0,25																								
15	Velocidade média do Vento	Vave	m/s	3,32																								
16	Velocidade Projetada	Vdesign	m/s	4,65																								
17	Velocidade de rotação projeto	ωnom	rad/s	41,89																								
18	Eficiência	η	n/a	0,60																								
19	Distância aplicação da carga	Rq	m	0,59																								
20	Parâmetro de Projeto (ISR)	Ipj(t)	n/a	7,91																								
21	Torque Projetado	Oproj	N.m	9,95																								
22	Força centrífuga (eixo z)	Fz	N	1122,94																								
23	Flexão (eixo x)	Mx	N.m	9,59																								
24	Flexão (eixo y)	Mly	N.m	26,22																								
25	Calculo da tensão equivalente	Seq	MPa	2,08																								
26	Força equivalente	Feq	N	111052,79																								
27	Força total	Ftotal	N	61,22																								
28																												
29																												
30																												
31																												

	R 0,4	R 0,5	R 0,6	R 0,7	R 0,8
	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)
	1,13	1,42	1,70	1,98	2,27
	4,53	5,67	6,80	7,93	9,07
	10,20	12,75	15,30	17,85	20,40
	18,14	22,67	27,20	31,74	36,27
	28,34	35,42	42,51	49,59	56,68
	40,81	51,01	61,21	71,41	81,61
	55,54	69,43	83,32	97,20	111,09

	R 0,4	R 0,5	R 0,6	R 0,7	R 0,8	R 0,9
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	0,15	0,19	0,23	0,27	0,31	0,35
	0,35	0,43	0,52	0,61	0,69	0,78
	0,62	0,77	0,92	1,08	1,23	1,38
	0,96	1,20	1,44	1,68	1,92	2,16
	1,38	1,73	2,08	2,42	2,77	3,11
	1,88	2,35	2,83	3,30	3,77	4,24
	2,46	3,08	3,69	4,31	4,92	5,54
	3,11	3,89	4,67	5,45	6,23	7,01
	3,84	4,81	5,77	6,73	7,69	8,65
	4,65	5,81	6,98	8,14	9,30	10,47
	5,54	6,92	8,30	9,69	11,07	12,46
	6,50	8,12	9,75	11,37	12,99	14,62
	7,53	9,42	11,30	13,19	15,07	16,95
	8,65	10,81	12,97	15,14	17,30	19,46
	9,84	12,30	14,76	17,22	19,68	22,14
	11,11	13,89	16,67	19,44	22,22	25,00

$$\sigma_{vi} = \sigma_{eq}(n) \left(\frac{V_i}{V_n} \right)^2$$

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



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Pró-Reitoria de Graduação
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar
Porto Alegre - RS - Brasil
Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564
E-mail: prograd@pucrs.br
Site: www.pucrs.br