



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO  
CEARÁ**

**IFCE CAMPUS MARACANAÚ**

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**JOSÉ VALDIR VIDAL JÚNIOR**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO DESALINHAMENTO DAS FIBRAS DE  
REFORÇO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS PÁS DE  
AEROGERADORES**

**MARACANAÚ**

**2022**

JOSÉ VALDIR VIDAL JÚNIOR

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO DESALINHAMENTO DAS FIBRAS DE  
REFORÇO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS PÁS DE  
AEROGERADORES

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus* Maracanaú , como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Frederico dos Santos Matos.

MARACANAÚ

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Instituto Federal do Ceará - IFCE  
Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- V648 Vidal Júnior, José Valdir.  
Estudo da influência do desalinhamento das fibras de reforço nas propriedades mecânicas das pás de aerogeradores / José Valdir Vidal Júnior. - 2022.  
54 f. : il.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Energias Renováveis, Campus Maracanaú, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Francisco Frederico dos Santos Matos .
1. Desalinhamento. 2. Elementos finitos. 3. Fibras de reforço. 4. Propriedades mecânicas. I. Título.  
CDD 620.91
-

JOSÉ VALDIR VIDAL JÚNIOR

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO DESALINHAMENTO DAS FIBRAS DE  
REFORÇO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS PÁS DE  
AEROGERADORES

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus Maracanaú*, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

Aprovada em 16/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Francisco Frederico dos Santos Matos (Orientador)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

---

Prof. Dr. Francisco Nélio Costa Freitas  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

---

Prof. Dr. José Bruno Rego de Mesquita  
Faculdade Terra Nordeste - FATENE

À minha esposa Márcia e nossos filhos  
Davi e Artur,  
à minha mãe Sebastiana,  
ao meu pai Valdir e à minha irmã Juliana.

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal do Ceará (IFCE), pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

À empresa Aeris Energy na figura dos gestores Cassio Penna, Vitor Santos, Daniel Carlos e Arthur Eugênio por ter suportado meu trabalho, e fornecido materiais, equipamentos e mão de obra para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao laboratório de ensaios do Senai Maracanaú, e ao departamento de engenharia mecânica da Unifor pela preciosa ajuda com a cessão das máquinas de tração para a realização dos ensaios mecânicos.

Ao meu orientador Dr. Francisco Frederico pela disciplina e rigor acadêmico cobrados que geraram a motivação necessária, e pela atenção desprendida na realização deste trabalho.

Aos colegas da Aeris pelas sugestões e conhecimentos repassados, em especial, aos engenheiros Bruno Moreira pela fabricação dos laminados base usados para fabricação dos corpos de prova e Pedro Galvani pelo conhecimento repassado na operação do FEMAP®.

A minha família que me deu o suporte emocional ao longo dessa jornada, e sobretudo a Deus que nos dá todas as coisas.

## RESUMO

A utilização de compósitos é uma realidade no contexto atual da engenharia, em especial, para viabilizar a expansão da exploração da energia eólica. Essa expansão se dá graças a possibilidade de uso desses materiais na fabricação de pás dos aerogeradores cada vez maiores. Tais componentes são submetidos a altas cargas, se considerarmos apenas seus próprios pesos. Apesar da tecnologia envolvida na operação dessas máquinas, a fabricação das pás é realizada de forma manual, o que implica em maiores riscos de falhas de manufatura. Dentre esses riscos, destaca-se o desalinhamento das fibras de reforço. O presente trabalho tem como objetivo determinar a influência do desalinhamento longitudinal das fibras de reforço em um compósito de plástico reforçado com fibra de vidro. Para tanto, foi usado um laminado compósito fabricado com fibras de vidro majoritariamente unidirecionais e resina epóxi. Para simular um defeito de fabricação desse componente, foram preparadas amostras com as fibras propositalmente desalinhadas. Essas amostras foram submetidas a ensaio de tração para verificação da influência desse desalinhamento nas suas propriedades mecânicas. Os valores encontrados foram submetidos ao teste U de *Mann-Whitney* que comparou a dependência entre a resistência mecânica observada e o posicionamento da fibra de reforço. Os resultados estatísticos apresentaram uma condição de não-dependência entre essas variáveis para as amostras analisadas nos ensaios de tração, ou seja, a resistência mecânica não é influenciada pelo desvio da fibra nas condições estudadas nesse trabalho. Para as simulações feitas no FEMAP®, as diferenças também não foram lineares revelando não haver correlação entre resistência e desalinhamento no contexto desse estudo, ou seja, desalinhamentos da fibra de até 10° são aceitáveis e não causam risco de falha ao produto final. A comparação entre os resultados empíricos e computacionais também não indicaram diferenças significativas quando equiparados pelo teste U de *Mann-Whitney*.

**Palavras-chaves:** Desalinhamento. Elementos finitos. Fibras de reforço. Propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

The use of composites is a reality in the current engineering context, especially to enable the expansion of wind energy exploration. This expansion allows using these materials for manufacturing wind turbine blades. Such components are subjected to high mechanical loads if we consider only their own weight. Despite the technology applied in the operation of these machines, the production of the rotor blades is carried out manually, which implies risks at their manufacturing. Among these risks, the misalignment of the reinforcing fibers stands out. The present work aims to determine the influence of fiber misalignment on the strength of a composite material. We used a laminate made with mostly unidirectional glass fibers and epoxy resin in this work. The fibers were purposely misaligned concerning their parallelism to simulate a manufacturing defect on that component. We submitted these samples to a tensile test to verify the influence of this misalignment on their mechanical properties. The values found were submitted to the Mann-Whitney U test, which compared the dependence between the observed mechanical strength and the positioning of the reinforcing fiber. The statistical results showed a condition of non-dependence between these variables for the samples analyzed in the tensile tests, that is, the mechanical strength is not influenced by the fiber deviation under the conditions studied in this work. For the FEMAP<sup>®</sup> simulations, the differences were also not linear, revealing no correlation between strength and misalignment in the context of this study, so to speak, fiber misalignments of up to 10° in relation to the established 0°. The comparison between empirical and computational results also did not indicate significant differences when compared by the Mann-Whitney U test.

**Keywords:** Misalignment. Finite elements. Reinforcement fibers. Mechanical Properties.



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	Justificativa .....	13
1.2	Objetivos .....	15
1.3	Escopo do trabalho .....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	16
2.1	Materiais compósitos .....	16
2.2	Resina epóxi .....	17
2.3	Reforço de fibra de vidro .....	18
2.4	Processo de fabricação do laminado .....	21
2.5	Análise por elementos finitos .....	22
2.6	Análise estatística dos dados .....	24
2.7	Revisão bibliográfica .....	25
3	METODOLOGIA .....	12
3.1	Simulação computacional .....	12
3.1.1	Definição do material ortotrópico .....	14
3.1.2	Inserindo as propriedades do material no FEMAP .....	14
3.1.3	Definindo a sequência das camadas .....	15
3.2	Ensaio de tração .....	15
3.2.1	Confecção dos corpos de prova .....	17
3.2.2	Preparação dos corpos de prova .....	17
3.2.3	Análise estatística dos dados .....	19

3.3 Fluxograma da metodologia.....	20
4 RESULTADOS.....	22
4.1 Simulação computacional .....	23
4.2 Ensaio de tração dos corpos de prova .....	26
4.2.1 Teste U <i>Mann-Whitney</i> comparação entre as amostras de 0° e 5° .....	28
4.2.2 Teste U <i>Mann-Whitney</i> comparação entre as amostras de 0° e 7,5° .....	28
4.2.3 Teste U <i>Mann-Whitney</i> comparação entre as amostras de 0° e 10° .....	29
4.3 Comparação entre a simulação computacional e as amostras ensaiadas em laboratório...	30
5 DISCUSSÕES.....	30
REFERÊNCIAS.....	31

## LISTA DE FIGURAS

1.1. Defeito de ondulação ( <i>waviness</i> ) vista de uma secção transversal de um laminado de fibra + resina.....	13
1.2. Indicativo da direção longitudinal da pá (Direção X ou 0°).....	14
1.3. Desalinhamento longitudinal não ondulatório da fibra vista de topo de um desenho de um laminado de fibra + resina.....	14
2.1. Esquema da estrutura molecular característica de um polímero termorrígido.....	18
2.2 – Esquema das possíveis distribuições do reforço no compósito em função dos parâmetros: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação do reforço.....	19
2.3 – Esquema da classificação de reforços em compósitos.....	20
2.4 – Exemplo de alinhamento das fibras na fabricação de um tecido -45/90/+45/90/0°.....	21
2.5. Posicionamento de reforços sobre o molde.....	21
2.6. Colocação do plano de infusão.....	22
2.7 – Discretização pelo Método dos Elementos Finitos para uma estrutura contínua utilizando elementos triangulares.....	23
3.1. Propriedades mecânicas laminado fibra de vidro com matriz epoxídica.....	30
3.2. Amostra configurada no Femap®.....	30
3.3. Alteração da direção da fibra: a) Figura com suas fibras de reforço orientadas na direção de aplicação do esforço de tração. b) Figura com suas fibras desalinhadas em relação à direção do esforço de tração.....	33
3.4. Ensaio de tração na Unifor.....	33
3.5. Fabricação dos corpos de prova.....	34
3.6 Representação 2D do corpo de prova .....	36
3.7 Amostra pronta para ensaio de tração.....	36

3.8 Diagrama análise computacional.....	37
3.9 Diagrama ensaio de tração.....	38
3.10 Diagrama análise dos resultados.....	39
4.1: Comparação entre as deformações totais dos quatro laminados.....	40
4.2: Comparação entre as amostras considerando a tensão aplicada na camada 1 de +45°.....	41
4.3: Comparação entre as amostras considerando a tensão aplicada na camada 2 de -45°.....	41
4.4: Comparação entre as amostras considerando a tensão aplicada na camada 3 de 0°.....	42
4.5: Comparação entre as amostras considerando a tensão aplicada na camada 4 de 0°.....	42

## LISTA DE TABELAS

2.1 Quadro resumo: Análise de artigos correlacionados com a pesquisa de mestrado.....	29
3.1 Requisitos geométricos para amostra de tração de compósitos.....	35
4.1 Resumo dos valores obtidos na simulação computacional.....	43
4.2 Resultados amostras em MPa para os ensaios de tração.....	44

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda energética tem crescido fortemente com o avanço e descobertas da humanidade. Com isso, a geração de energia elétrica torna-se um desafio para nações e empresas. Além disso, o advento das mudanças climáticas e a necessidade de reduzir a dependência fóssil imprimem uma pressão sobre a sociedade para mudar suas fontes de geração, majoritariamente fósseis (VOLKAN, 2019).

Como destaque entre as fontes renováveis de geração de eletricidade está a energia eólica ou dos ventos. Esse tipo de fonte vem sendo aproveitada em diversas partes do planeta (IRENA, 2019), e tem-se revelado uma fonte que une eficiência energética com custos competitivos uma vez que sua demanda proporcionou a produção dos componentes dos aerogeradores numa escala atrativa, em termos de custo unitário (IRENA, 2019) resultando na implantação de diversos parques eólicos.

Nesse cenário, tem-se os grandes parques eólicos com máquinas com potência nominal na ordem de megawatts, normalmente instalados em locais ermos, geralmente onde há uma condição de vento mais regular e constante.

Nesse contexto, as pás dos aerogeradores, elementos responsáveis por capturar a energia cinética do vento, sofrem acentuado esforço mecânico durante sua operação (PETER, 2012). Esse componente que é, basicamente, o produto da composição entre fibra de vidro e resina epóxi tem papel fundamental no desempenho dessas máquinas.

Considerando essa condição, deve-se destacar que as pás dos aerogeradores estão entre os itens de maior relevância, no tocante a problemas de campo em aerogeradores (CHEN, 2018). Ainda segundo Chen (2018), existem cerca de 700.000 pás instaladas mundialmente e, em média, ocorrem aproximadamente 3.800 incidentes de falha nessas pás todos os anos.

Sendo um material que possui fibras de reforço como elementos estruturais mais relevantes, a pá é fabricada de forma que se tenha o melhor alinhamento possível entre essas fibras, assim, é importante assegurar que seus ângulos de direção garantam a devida resistência mecânica projetada (SEBAYE *et al*, 2020).

## 1.1 Justificativa

O desalinhamento em fibras na manufatura de compósitos estruturais tem sido estudado extensivamente em relação a problemas comumente chamados de ondulação, *waviness*, em inglês, (Adams *et al.*, 1994; Avery *et al.*, 2004; Barros, 2009; Chan, 1994; Garnich *et al.*, 2005; Highsmith, 1992; Joyce, 1997; Kluger, 2002; Wang, 2001;). A Figura 1.1 mostra a característica desse defeito. Esse tipo de falha promove efeitos prejudiciais às propriedades mecânicas do componente, o que pode comprometer o desempenho geral dos aerogeradores que utilizam as pás como uma de suas principais estruturas (SEBAYE *et al*, 2020).

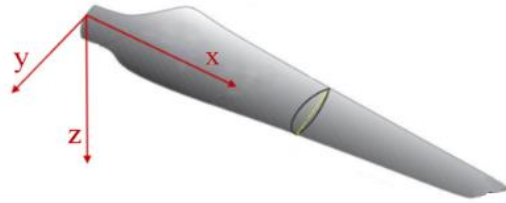
Figura 1.1. Defeito de ondulação (*waviness*) vista de uma secção transversal de um laminado de fibra + resina.



Fonte: Barros (2009).

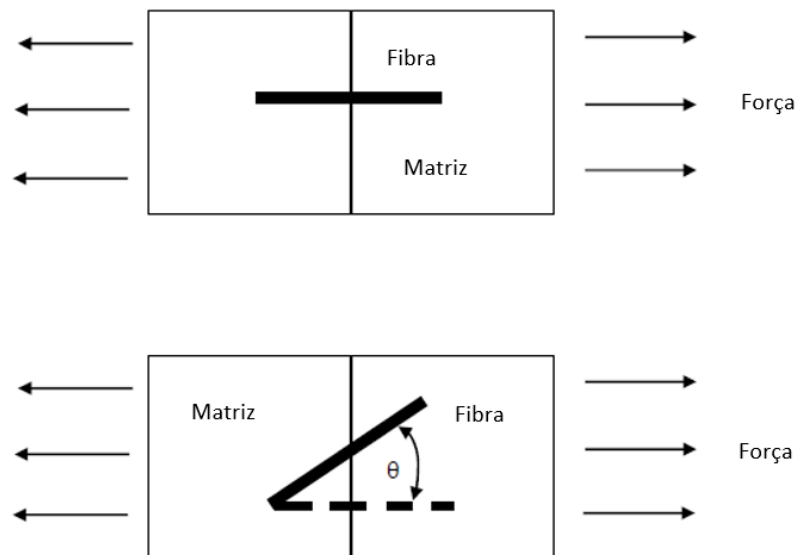
Em função do extensivo material acadêmico encontrado para o defeito de ondulação, percebeu-se, então, uma lacuna teórica para o estudo do efeito do desalinhamento longitudinal não ondulatório da fibra de reforço dentro do plano do laminado. Por direção longitudinal foi considerada a direção do comprimento da pá, conforme indicado na direção “X” da figura 1.2 que nesse trabalho foi chamada também de direção  $0^\circ$ , e que foi considerada a direção de referência para todas as comparações que se seguiram. Segundo Mishnaevsky *et al* (2017), os materiais compósitos são muito sensíveis, ainda que a pequenos desalinhamentos em suas fibras de reforço considerando essa abordagem, ou seja, em desalinhamentos no mesmo plano do laminado sem a ondulação da fibra de reforço. A Figura 1.3 ilustra o conceito desse tipo de desalinhamento.

Figura 1.2. Indicativo da direção longitudinal da pá (Direção X ou  $0^\circ$ ).



Fonte: Forghani (2015).

Figura 1.3. Desalinhamento longitudinal não ondulatório da fibra. Vista de topo de um desenho de um laminado de fibra + resina.



Fonte: Stangler (2016).

Dessa forma, esta oportunidade acadêmica, concernente ao conhecimento do impacto do desalinhamento de fibras de reforço nas propriedades mecânicas de um plástico reforçado com fibra de vidro, incentivou a realização desse estudo, que buscou contribuir de forma prática com o processo de manufatura de compósitos estruturais utilizados em pás para aerogeradores, reforçando a relevância desse parâmetro para a qualidade desse componente do aerogerador.



## 1.2 Objetivos

Como objetivo geral, pretende-se avaliar a influência do desalinhamento longitudinal das fibras de reforço em um compósito destinado a fabricação de pás para aerogeradores. Para atingi-lo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar a influência de diferentes ângulos de desvio da fibra de reforço ( $5^\circ/7,5^\circ/10^\circ$ ) por meio de simulações utilizando a técnica de análise dos elementos finitos.
- Realizar ensaios mecânicos de tração em corpos de prova fabricados em plástico reforçado com fibras majoritariamente unidirecionais de vidro ( $0^\circ$  da direção da pá).
- Realizar ensaios mecânicos de tração variando o ângulo das fibras de reforço das amostras em  $5^\circ/7,5^\circ/10^\circ$  para verificar a influência dessa variação na resistência mecânica do material.
- Comparar os resultados físicos e computacionais para efeito de avaliação das diferenças de resultados.

## 1.3 Escopo do trabalho

Além deste tópico de Introdução, o assunto deste trabalho está estruturado em outros 5 tópicos. O Tópico 2 introduz os conceitos básicos dos materiais e processos relativos aos compósitos, e uma apresentação da técnica dos elementos finitos. O Tópico 3 apresenta a metodologia aplicada na execução dos ensaios mecânicos das amostras de material compósito, bem como, na análise computacional com o uso do FEMAP<sup>®</sup>. O Tópico 4 demonstra os resultados obtidos com os ensaios mecânicos e análise computacional. Todas as conclusões são apresentadas no Tópico 5.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Materiais compósitos

O compósito é “qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa de todas as fases que o constitui, de tal modo que seja obtida uma melhor combinação de propriedades” (CALLISTER, 2014). Esses materiais são bastante flexíveis em seu uso, trabalhando assim, nas mais variadas aplicações. É conceituado pela integração básica de dois materiais, reforço e matriz. A união de ambos os materiais fornece características superiores quando comparados com cada material isoladamente (SANJAY, 2002), (MATTHEW, 2000), (VALERY, 2001).

Materiais compósitos oferecem uma relação resistência-peso muito favorável para aplicações estruturais (SANJAY, 2002). Como exemplo, uma estrutura compósita pode substituir dez ou mais peças de metal convencionais. Isso pode impactar positivamente o ciclo de manufatura e os custos envolvidos (MICHAEL, 1988). Nesse trabalho os materiais avaliados são classificados como compósitos poliméricos. Os principais elementos desse tipo de compósito são:

- Matriz polimérica, classificada em termorrígida ou termoplástica, cuja função é a transferência dos esforços pelo alinhamento, e proteção das fibras contra abrasão e decomposição ambiental. Este elemento está diretamente vinculado à resistência, à compressão e ao cisalhamento do compósito. A matriz confere também rigidez ao conjunto compósito (MASTEMBERG, 2004).

- Reforço, que pode ser constituído por partículas, fibras picadas ou contínuas. Neste estudo são utilizadas fibras contínuas. Este componente é, prioritariamente, responsável pela resistência mecânica aos esforços, principalmente, de tração e fadiga.

Devido ao material compósito ser constituído por dois ou mais componentes, há diferentes formas de combinações. Por esse fato, os compósitos são trabalhados em engenharia para obter propriedades específicas, como rigidez, resistência, tolerância a danos, resistência à corrosão, condutividade térmica, apenas como exemplos, considerando sempre sua aplicação especial (MASTEMBERG, 2004; SHACKELFORD, 2008).

Uma propriedade de grande relevância nestes materiais é a relação resistência/peso, na qual os reforços de fibras de carbono têm demonstrado alto desempenho. A fibra de carbono, por exemplo, mostra uma relação de resistência/peso 4 a 5 vezes maior que a do alumínio (MASTEMBERG, 2004; SHACKELFORD, 2008).

Esses materiais são classificados como compósitos poliméricos avançados ou estruturais (NOGUEIRA *et al.*, 1999; ELLIS, 1993), quando a junção do reforço contínuo e da matriz polimérica concedem ao compósito baixos valores de massa específica, por exemplo de 1,2 a 3,0 g/cm<sup>3</sup>, e altos valores de resistência mecânica e rigidez, por exemplo, resistência à tração de 700 MPa e 2500 MPa em compósitos reforçados com fibras de vidro e carbono, respectivamente.

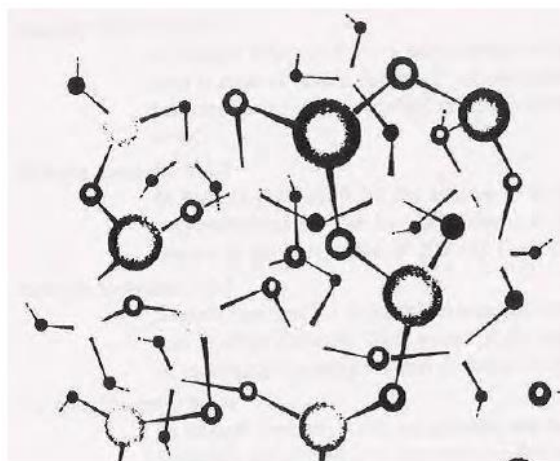
## **2.2 Resina epóxi**

As resinas epóxi (igualmente nomeadas como epoxídicas), poliéster, poliamida e éster-vinílica são as matrizes poliméricas comumente utilizadas na fabricação de materiais compósitos. Nesse trabalho, no qual estudamos a aplicação de compósitos para fins estruturais é trabalhada somente a matriz polimérica do tipo epóxi.

Como elemento de matriz compósita, as resinas epóxi são termofixos de alto desempenho que possuem pelo menos dois grupos epóxi terminais, chamados de grupos oxirano ou etoxilina, por molécula. Essas matrizes são matérias-primas em vários setores industriais, como o eletroeletrônico, de embalagem, construção civil e transporte (LEE; NEVILE, 1968).

As resinas epóxi são transformadas em polímeros termorrígidos por meio de um processo conhecido com reação de cura, devido a ação de agentes de cura, denominados de endurecedores. A palavra cura é usada para apresentar o processo no qual reagentes, isto é, um grupo epóxi e um agente de cura, são convertidos de um elemento de baixa massa molar em uma rede repleta de ligações cruzadas (Figura 2.1) e de mais elevada massa molar (MAY, 1988; SHACKELFORD, 2008). Esse processo de evolução das cadeias moleculares dá-se em função da presença de monômeros polifuncionais. Após o tratamento térmico, a resina termorrígida não pode mais ser fundida.

Figura 2.1. Esquema da estrutura molecular característica de um polímero termorrígido.



Fonte. Shackelford, (2008).

Várias propriedades mecânicas essenciais da resina epóxi, por exemplo, módulo e carga máxima de ruptura em cisalhamento, estão ligadas fortemente com a composição química e a energia interna do polímero. No entanto, essas correlações estão delimitadas à resposta estritamente elástica da resina curada, abaixo de sua temperatura de transição vítrea (MAY, 1988; SHACKELFORD, 2008).

Os polímeros amorfos, que é a caracterização para sistemas de resina epóxi depois da polimerização, são compostos de macromoléculas com composições não-ordenadas. Quando submetidos a temperaturas mais baixas, esses polímeros possuem características vítreas e a temperaturas mais elevadas têm característica viscoelástica. A transição entre estas duas possibilidades têm como indicação a classificada como temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ). Nessa condição acontece um aumento da mobilidade das macromoléculas, tendo como resultado o relaxamento do material, sem, todavia, demonstrar mudanças na sua integridade estrutural (ORTIZ, 2008; ROCHA, 2009).

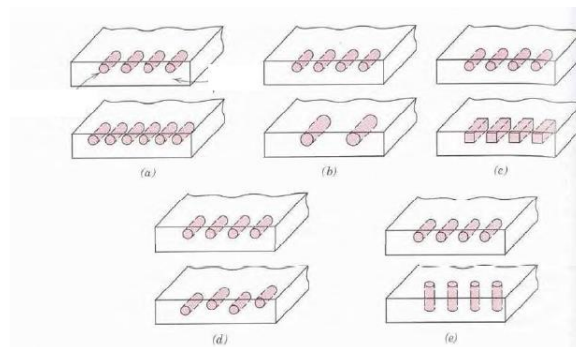
### 2.3 Reforço de fibra de vidro

As características estruturais de um compósito são função prioritariamente do tipo de reforço aplicado, da sua proporção em volume no material, da orientação da fibra, e o quão efetivamente o material é aplicado (MAY, 1988; SHACKELFORD, 2008). Geralmente, o reforço é utilizado para garantir a resistência aos esforços, e ainda, mais elevados valores de

rigidez e de resistência à tração ao material. O reforço, tratando-se de compósitos estruturais, é constituído de fibras contínuas que podem ser de diferentes materiais, por exemplo, fibras de vidro, carbono e aramida.

Os compósitos possuem ainda classificação conforme propriedades do reforço aplicado, de acordo com o apresentado na Figura 2.2. Esta classificação envolve os parâmetros: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação do reforço.

Figura 2.2 – Esquema das possíveis distribuições do reforço no compósito em função dos parâmetros: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação do reforço.



Fonte: Shackelford (2008).

A classificação do reforço pode também ocorrer de acordo com a sua disposição na matriz, conforme a Figura 2.3 (ANCELOTTI, 2006; SHACKELFORD, 2008).

- Particulados: alta rigidez, baixa resistência, baixa tenacidade;
- Fibras curtas (descontínuas): alta rigidez, baixa resistência, baixa tenacidade;
- Fibras longas (contínuas): alta rigidez, alta resistência, alta tenacidade.

Figura 2.3 – Esquema da classificação de reforços em compósitos.

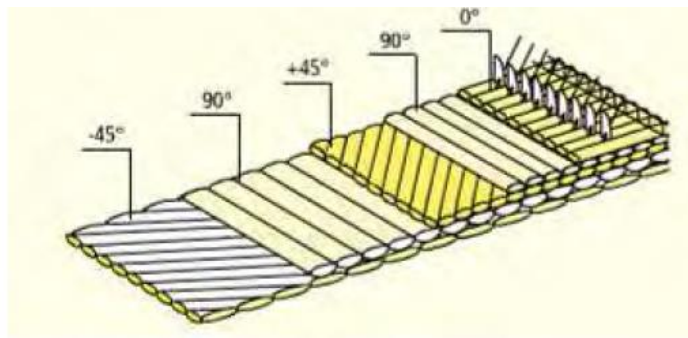


Fonte: Ancelotti Jr. (2006).

O reforço de fibra contínua pode ser conseguido comercialmente no formato de rolos de cabos com vários tipos de filamentos contínuos, por exemplo, 3.000, 9.000 ou 12.000 filamentos, fitas unidirecionais ou como tecidos, com o esquema dos filamentos em duas, três e até quatro direções e diferentes gramaturas.

O material mais tradicionalmente aplicado como reforço na fabricação de compósitos poliméricos é a fibra de vidro. O tipo classificado como *E-glass* é o mais utilizado. O componente mais importante deste tipo de fibra é a sílica, ou  $\text{SiO}_2$ , dióxido de silício (MASTEMBERG, 1994; MAY, 1988). O vidro é um material amorfo e a fabricação de filamentos de fibra de vidro engloba a mistura de produtos de rochas (areia, caulim e colmanita) a 1600 °C fabricando o vidro fundido. Este líquido é forçado por uma fieira com furos de pequenos diâmetros (na escala de micrometros) sendo, ao mesmo tempo, resfriado (SAERTEX, 2009). Após isso, o filamento é trabalhado em vários arranjos, fitas e tecidos. A Figura 2.4 apresenta um exemplo de distribuição das fibras em tecido.

Figura 2.4 – Exemplo de alinhamento das fibras na fabricação de um tecido  $-45/90/+45/90/0^\circ$ .



Fonte: Saertex (2009).

## 2.4 Processo de fabricação do laminado

Os laminados que compõem as pás eólicas são fabricados pelo processo de infusão a vácuo. Esse processo, basicamente, consiste em submeter a resina e o molde a uma diferença de pressão que direciona a resina para o contato com as fibras e demais materiais de reforço. As etapas básicas desse processo são as seguintes:

- Primeiramente, os materiais de reforço são colocados sobre o molde conforme definido no plano de *layup* que é a sequência de disposição das fibras e demais materiais no molde conforme projeto da pá (Figura 2.5).

Figura 2.5. Posicionamento de reforços sobre o molde.



Fonte: Autor.

- Após a deposição de todos os materiais de reforço, um plano de infusão é colocado sobre eles e o molde para garantir o fluxo da resina de forma a permitir que todos os materiais de reforço sejam impregnados pela resina que servirá como matriz. O plano de infusão é

composto, basicamente, por um plástico de vácuo e materiais de condução de resina como canaletas e malhas de plástico (Figura 2.6).

Figura 2.6. Colocação do plano de infusão.



Fonte: Autor.

- Finalmente, quando todo o material de reforço é impregnado pela resina, um processo de aquecimento do molde é acionado para acelerar a cura da matriz polimérica do laminado que é verificada por meio da medição da transição vítrea da resina, conhecida como  $T_g$  (*glass transition*).

## 2.5 Análise por elementos finitos

A análise por elementos finitos é um método para resolver equações diferenciais que consiste em discretizar o sistema sob análise em vários elementos (AVELINO, 2013). Os elementos possuem nós que se deslocam com a aplicação de carregamento e podem fornecer respostas sobre o fenômeno que se está estudando. A análise por elementos finitos pode ser aplicada em diversas áreas da engenharia, como por exemplo, problemas estruturais (BATHE, 2014).



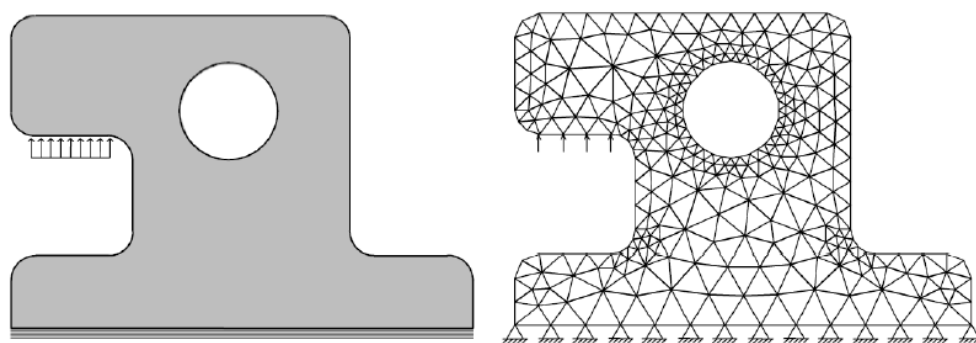
O método por elementos finitos é uma simulação que auxilia na validação estrutural de componentes, e deve ser verificado com cautela levando em consideração vários fatores que podem fazer com que os resultados sejam muito diferentes da realidade. O tipo e tamanho da malha, a definição do local de aplicação das forças e restrições devem ser rigorosamente analisados para que se tenha resultados satisfatórios (AVELINO, 2013).

Conforme Azevedo (2003), o método por elementos finitos tem como objetivo definir o “estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores”.

Este método é uma técnica computacional usada na solução aproximada de uma gama de problemas reais de engenharia, considerando domínios sujeitos a condições de contorno. Dessa forma, o domínio é subdividido em subdomínios (elementos) que resultam na solução aproximada, partindo da aplicação de funções de interpolação (MADENCI; GUVEN, 2015).

De acordo com Martha (2017), em estruturas contínuas, ou seja, que não são constituídas por barras, os elementos finitos (subdomínios) são normalmente triângulos ou quadriláteros, dessa forma, o apanhado dessas subdivisões chamado malha de elementos finitos e a solução direta são apresentadas por valores dos deslocamentos nos nós (vértices) da malha. Na Figura 2.7 é demonstrada uma estrutura contínua discretizada.

Figura 2.7 – Discretização pelo Método dos Elementos Finitos para uma estrutura contínua utilizando elementos triangulares.



Fonte: Martha (2017).

De acordo com Cook (1995), a equação que conduz as análises em um sistema contínuo é a mesma que trata os outros elementos. Dessa forma, o que este método executa é seguir de um sistema com infinitos graus de liberdade (contínuo) para um sistema já discretizado, que

possuirá finitos graus, e conseguirá ser tratado por um sistema de equações, sejam lineares ou não.

Para garantir o uso adequado desse método são necessários *softwares* que operam a solução para o elemento sob análise, com a possibilidade de aplicação em várias áreas. Um desses *softwares* é o FEMAP®/NASTRAN® havendo também outros, como o ANSYS® e o ABAQUS®, por exemplo. Nesse trabalho foi utilizado o FEMAP® devido possuir biblioteca voltada especificamente para materiais compósitos, e também uma versão *Student*, ou seja, gratuita.

O FEMAP® é um *software* de simulação usado em engenharia para resolução de problemas por meio do método por elementos finitos. É usado para modelar uma resposta que apresente o comportamento estrutural do elemento estudado. “Além disso, o FEMAP® fornece uma poderosa visualização e avaliação de resultados gráficos e orientados a dados.” (SIEMENS, 2022).

## 2.6 Análise estatística dos dados

O teste U de *Mann-Whitney* é utilizado como comparação entre duas amostras independentes sempre que elas têm poucos dados ou não obedecem a uma distribuição normal. Assim, é considerado um teste não paramétrico, diferentemente do seu similar, o teste t de *Student*, utilizado quando a amostra é grande o suficiente e segue a distribuição normal (TESTE MANN, 2022).

A variável U é a estatística de contraste usada no teste de Mann-Whitney e é definida da seguinte forma:

$$U = \text{mín}(U_a, U_b)$$

O que significa que U é o menor dos valores entre  $U_a$  e  $U_b$ , aplicado a cada grupo. As variáveis  $U_a$  e  $U_b$  são definidas e calculadas de acordo com as seguintes fórmulas (TESTE MANN, 2022):

$$U_a = N_a \cdot N_b + [N_a(N_a + 1)/2] - R_a$$

$$U_b = N_a \cdot N_b + [N_b(N_b + 1)/2] - R_b$$

Onde, os valores  $N_a$  e  $N_b$  são os tamanhos das amostras, respectivamente e, por outro lado,  $R_a$  e  $R_b$  são as somas das faixas de cada amostra no grupo.

Supõe-se que o  $U$  teórico siga uma distribuição normal  $N$  com parâmetros dados exclusivamente pelo tamanho das amostras:

$$N[(N_a.N_b)/2], \sqrt{N_a.N_b[(N_a + N_b + 1)/12]}$$

Para comparar a variável  $U$  obtida experimentalmente, com a  $U$  teórica é necessário fazer uma alteração da variável. Passa da variável experimental  $U$  ao seu valor padronizado, que será chamado  $Z$ , para poder fazer a comparação com a de uma distribuição normal padronizada. A alteração da variável é a seguinte:

$$Z = [U - (N_a.N_b)/2] / \sqrt{N_a.N_b[(N_a + N_b + 1)/12]}$$

Para a alteração da variável, foram utilizados os parâmetros da distribuição teórica para  $U$ . Dessa forma, a nova variável  $Z$ , que é uma combinação entre o  $U$  teórico e o  $U$  experimental, é contrastada com uma distribuição normal padronizada  $N(0,1)$ . Os critérios de comparação abaixo são utilizados para validar o estudo:

Se  $Z \leq Z_\alpha \Rightarrow$  a hipótese nula  $H_0$  é aceita

Se  $Z > Z_\alpha \Rightarrow$  a hipótese nula  $H_0$  é rejeitada

Os valores críticos padronizados  $Z_\alpha$  dependem do nível de confiança necessário, e para um nível de confiança  $\alpha = 0,95 = 95\%$ , que é o mais usual, o valor crítico  $Z_\alpha = 1,96$  (TESTE MANN, 2022).

## 2.7 Revisão bibliográfica

Foram analisados artigos relacionados com as seguintes palavras chave: desalinhamento (*misalignment*) + fibra (*fyber*) + elementos finitos (*finite elements*) + propriedades mecânicas (*mechanical properties*) nos repositórios Scielo, Science direct, Google acadêmico e CAPES.

O trabalho de Mandell *et al* (2002) buscou mostrar a influência do desalinhamento tipo ondulação que se manifesta ao longo da espessura do laminado do compósito. Já os trabalhos de Costa *et al* (2016), Pavan (2008) e Alves (2018) pesquisaram as propriedades mecânicas de laminados compósitos diversificando os materiais (fibra/matriz), porém, não consideraram eventuais defeitos nesses laminados.

Leitão *et al* (2006) pesquisaram sobre o desalinhamento longitudinal das fibras, contudo, esses desvios possuíam valores acima dos  $10^\circ$ , o que representou uma abordagem diferente da proposta nesse trabalho, ou seja, entender a influência de desvios com valores mais baixos, e que são mais prováveis de acontecer no processo real de manufatura.

Wisnon (1990) discorreu sobre o efeito do desalinhamento das fibras, porém, sob o efeito de tensões compressivas, diferentemente do que propõe esse trabalho, que estudou o efeito das tensões de tração sob laminados com desalinhamento em suas fibras de reforço.

Sebaye *et al* (2020) discutiu sobre o efeito do desalinhamento das fibras sob ação de tensões de compressão e tração, no entanto, sua pesquisa trabalha apenas a análise computacional desses efeitos. Nenhum ensaio mecânico em amostras de laminado foi feito. Esse trabalho de mestrado realizou as duas análises (computacional e mecânica) no intuito de buscar a comparação entre ambas.

Costa *et al* (2016) propôs a análise da fibra de algodão como elemento de reforço ao compósito. Esse material foi avaliado computacionalmente variando-se a fração volumétrica de sua presença no laminado entre 20 e 40%. Os modelos analisaram a capacidade de resistência à tração em função dessa fração da fibra no composto. No entanto, não houve a avaliação do efeito do desvio da fibra em nenhuma circunstância, portanto, esse trabalho diferencia-se nesse quesito em relação a essa referência estudada.

Pavan (2008) trabalhou questões relacionadas sobre a teoria dos danos aplicada aos materiais compósitos. Seu trabalho desenvolveu modelos que foram resolvidos pelo método dos elementos finitos. Experimentos foram realizados com o intuito de validar os modelos computacionais. Não houve aqui nenhuma análise que relacionasse os danos nos materiais compósitos com o desalinhamento das fibras.

Guimarães (2018) trabalhou a resistência de um compósito feito pela união de fibras de carbono curtas e longas. Essa constituição mostrou a viabilidade dessa proposta, em especial, porque ela propicia a avaliação da reciclagem de peças em carbono. Um modelo

computacional também foi criado para validar os testes experimentais. Novamente aqui, não é estudada a influência do alinhamento da fibra na resistência do material compósito.

Potter *et al* (2008) fez uma descrição dos principais defeitos relacionados com o posicionamento das camadas de reforço no laminado, no entanto, a análise concentrou-se mais em entender a configuração desses defeitos que propriamente suas consequências para a qualidade estrutural do componente.

Ahmadian *et al* (2018) discutiu sobre a modelagem computacional de um laminado e apresentou os resultados de suas análises, enfatizando a influência do desalinhamento da fibra no formato proposto por esse trabalho. No entanto, ele não fez experimentos que pudessem ser usados para validar os resultados numéricos.

Stangler (2016) estuda por meio de modelos matemáticos os efeitos do desalinhamento das fibras nas propriedades mecânicas do laminado. A estimativa teórica dessas propriedades, elaborada por meio de equações matemáticas, é validada através de resultados de ensaios de tração.

Kalantari *et al* (2017) avalia o efeito conjunto da influência do desalinhamento das fibras junto com a variação da espessura do laminado e do percentual de vazios no laminado. Essa análise permite concluir que o impacto da presença de vazios no laminado é mais influente que as outras duas variáveis, logo, a uma minimização do efeito do desalinhamento das fibras na performance do componente quando comparado a esse outro tipo de defeito.

Gama (2017) estudou os materiais compósitos utilizando o ensaio de tração como mecanismo de análise estrutural. A norma ASTM D3039 foi a referência nesses estudos, por esse motivo, ela também foi utilizada em meu trabalho como diretriz para as definições gerais do ensaio mecânico aqui utilizado.

Silva (2018) demonstrou a aplicação do FEMAP<sup>®</sup> como ferramenta computacional adequada ao estudo de materiais compósitos. Seu estudo avaliou a aplicação dessa ferramenta na análise de uma pá eólica completa considerando as cargas exercidas pela ação de vento à velocidade de 14m/s. A tabela 2.1 mostra um quadro resumo dos artigos estudados.

Tabela 2.1: Quadro resumo: Análise de artigos correlacionados com a pesquisa de mestrado.

Título	Autor(es)	Matriz	Tipo de fibra de reforço	Ferramenta de análise computacional utilizada	Propriedades mecânicas avaliadas	Análise dos trabalhos
EFFECTS OF FIBER WAVINESS ON COMPOSITES FOR WIND TURBINE BLADES	Mandell et al (2002)	Poliéster, vinil e epóxi	Vidro e carbono	Não informada	Tensões compressivas (buckling)	Desalinhamento em forma de onda, ou seja fora do plano do laminado
SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATÉRIAS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE ALGODÃO	Costa et al (2016)	Ácido Polilático (biopolímero) e polipropileno (termoplástico)	Algodão	Ansys	Este trabalho se detém a aplicabilidade de várias teorias de falhas investigadas, tais como: critério da máxima tensão e critério de Tsai-Wu.	Não considera o desalinhamento das fibras
Aplicação da teoria de dano na análise do comportamento de materiais compósitos	Pavan, R. Carlos (2008)	Polimérica	Vidro	N/A	Mecânica do dano contínuo	Não considera o desalinhamento das fibras
Avaliação das propriedades mecânicas de um compósito híbrido de matriz termoplástica PPS reforçado com fibras de carbono contínuas e descontínuas	Guimarães, F. Alves (2018)	Polimérica	Carbono	Ansys	Ensaio de tração/Cisalhamento/Compressão	Não considera o desalinhamento das fibras
CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS BOBINADOS EM DIVERSAS ORIENTAÇÕES DO REFORÇO	Eduardo da Silva Leitão <sup>1</sup> , Gerson Marinucci <sup>2</sup> , Osni de Carvalho <sup>1</sup> , Arnaldo H.P. de Andrade <sup>2</sup> (2006)	Polimérica	Carbono	N/A	Ensaio de tração	Desvios na orientação da fibra de reforço abaixo de 10° não foram estudados
The effect of fibre misalignment on the compressive strength of unidirectional carbon fibre/epoxy	M.R. WISNOM (1990)	Polimérica	Carbono	N/A	Tensão de compressão	Considerações apenas para tensões compressivas em fibras com desalinhamento

Variability, fibre waviness and misalignment in the determination of the properties of composite materials and structures	K. Potter *, B. Khan, M. Wisnom, T. Bell, J. Stevens (2008)	Polimérica	Carbono	N/A	Tensão de compressão	Trabalho com característica muito generalista sobre desalinhamento das fibras.
Computational micromechanics of the effect of fibre misalignment on the longitudinal compression and shear properties of UD fibre-reinforced plastics	T.A. Sebaye a,b,c,†, G. Catalanotti d, C.S. Lopes e,f, N. O'Dowd (2020)	Polimérica	Carbono	MEF	Tensão de compressão e tensão de torção	Trabalho foca apenas nos resultados computacionais do desalinhamento das fibras
Statistical Analysis of Fracture Strength of Composite Materials Using Weibull Distribution	M. Hüsnu DİRİKOLU, Alaattin AKTAS (2001)	Polimérica	Carbono	N/A	Tensão de tração	Trabalho define a distribuição de Weibull como a mais adequada para a análise estatística de compósitos
LEVANTAMENTO DAS PROPRIEDADES MECANICAS DE COMPÓSITOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA REFORÇADOS COM FIBRAS LONGAS DE BAMBU PELA ANALISE DE DISTRIBUIÇÃO ESTATISTICA DE WEIBULL*	Roberto Abreu Alencar <sup>1</sup> Santino Loruan Silvestre de Melo <sup>2</sup> Renardir Peixoto Maciel Junior <sup>3</sup> Enio Pontes de Deus <sup>4</sup> (2015)	Polimérica	Bambu	N/A	Tensão de tração	Trabalho define a distribuição de Weibull como a mais adequada para a análise estatística de compósitos
DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE WEIBULL APLICADA A COMPÓSITOS DE POLIETILENO RECICLADO/FIBRA VEGETAL DE SISAL*	Leonardo Carneiro Andrade <sup>1</sup> Santino Loruan Silvestre de Melo <sup>2</sup> Laudenor Amorim <sup>3</sup> Enio Pontes de Deus <sup>4</sup> (2017)	Polimérica	Sisal	N/A	Tensão de tração	Trabalho define a distribuição de Weibull como a mais adequada para a análise estatística de compósitos

Effects of shape and misalignment of fibers on the failure response of carbon fiber reinforced polymers	Hossein Ahmadian, Ming Yang, Anand Nagarajan & Soheil Soghrati (2018)	Polimérica	Carbono	MEF	Tensão de tração e compressão	Trabalho estuda exclusivamente os modelos computacionais sem realizar experimentos que validem os modelos
The Effects of Carbon Fiber Misalignment on Composite Material Strength	Luke Stangler (2016)	Polimérica	Carbono	N/A	Tensão de tração	Trabalho estuda exclusivamente os modelos matemáticos com realização de experimentos para validar os modelos
Effect of matrix voids, fibre misalignment and thickness variation on multi-objective robust optimization of carbon/glass fibre-reinforced hybrid composites under flexural loading	Mehdi Kalantari, Chensong Dong*, Ian J. Davies (2017)	Polimérica	Carbono/Vidro	N/A	Tensão de flexão	Trabalho estudo o efeito conjunto de 03 variáveis: desalinhamento da fibra, vazions no alminado e espessura da peça
ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA PÁ DE TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL, COM GEOMETRIA OTIMIZADA AERODINÂMICAMENTE E LONGARINA FABRICADA EM MATERIAL COMPOSTO	CAIO CÉSAR CAETANO SILVA (2018)	Polimérica	Carbono	MEF	Tensão de flexão	Trabalho avaliou a aplicação de um moldelo teórico de longarina tubular em uma pá eólica
ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE TENSÃO E FLEXÃO DE COMPÓSITOS SANDUÍCHE	DANIEL PEREIRA NUNES GAMA (2017)	Polimérica	Carbono/Vidro	N/A	Tensão de tração e flexão	Trabalho avaliou uma determinada composição de laminado por meio de ensaios de tração e flexão

Fonte: Autor.



### 3 METODOLOGIA

A viabilidade desse projeto foi alcançada devido o apoio da empresa Aeris Energy por meio da cessão de todos os materiais, mão de obra e processos para fabricação das amostras de materiais compósitos, objetos desse estudo. Além disso, os laboratórios de ensaios mecânicos da Unifor e Senai Maracanaú permitiram o uso de suas instalações para a realização dos ensaios mecânicos necessários para obtenção dos resultados. O software utilizado na simulação computacional foi instalado em sua versão gratuita o que permitiu a análise dos modelos numéricos.

#### 3.1 Simulação computacional

Nesse estudo foi analisado um laminado simples de plástico reforçado com fibra de vidro submetido a uma tensão uniaxial (tração) utilizando o software FEMAP<sup>®</sup>. O objetivo da análise e simulação de fibra de vidro foi obter a tensão máxima que permitiu fazer as comparações propostas nesse trabalho, nesse caso, considerando os resultados de um ensaio de tração para uma simulação de um modelo em 2D ortotrópico.

Essa estrutura teve suas propriedades mecânicas teóricas retiradas de Jones (1999) conforme Figura 3.1. O software FEMAP<sup>®</sup> foi parametrizado para promover a máxima similaridade com os corpos de prova ensaiados mecanicamente. Foi estipulada uma carga de 45.000N considerando a tensão média de 600MPa (resultados de ensaios de tração) com uma respectiva área média de secção transversal de 75mm<sup>2</sup> das amostras físicas. Essa força foi alinhada sempre na direção 0° do modelo de modo a simular um esforço de tração, similar ao aplicado nas amostras físicas. Para cada modelo a parametrização do *layup* considerou o desvio de alinhamento das fibras para a verificação da influência desse parâmetro na resistência mecânica computacional do modelo.

Figura 3.1. Propriedades mecânicas laminado fibra de vidro com matriz epoxídica.

Propriedade	Material compósito reforçado unidirecionalmente			
	Vidro-Epóxi	Boron-Epóxi	Carbono-Epóxi	Kevlar®-Epóxi
$E_1$	54GPa	207GPa	207GPa	75GPa
$E_2$	18GPa	21GPa	5GPa	5,5GPa
$\nu_{12}$	0,25	0,3	0,25	0,34
$G_{12}$	9GPa	7GPa	2,6GPa	2,1GPa
$X_t$	1035MPa	1380MPa	1035MPa	1380MPa
$Y_t$	28MPa	83MPa	41MPa	28MPa
$S$	41MPa	124MPa	69MPa	44MPa
$X_c$	1035MPa	2760MPa	689MPa	276MPa
$Y_c$	138MPa	276MPa	117MPa	138MPa

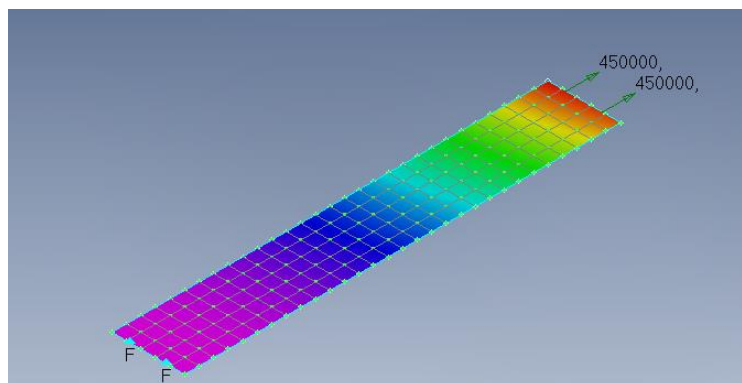
Fonte: Adaptado de Jones (1999).

O procedimento geral de simulação consiste, basicamente:

- Na criação da geometria computacional do corpo de prova;
- Na configuração das propriedades do material sob análise;
- Na definição de uma composição de malha de elementos finitos;
- No posicionamento do carregamento aplicado nos pontos de interesse, nesse estudo, esforços de tração;
- Na análise dos resultados

Uma visualização da geometria, malha e condições de contorno são apresentadas na figura 3.2.

Figura 3.2. Amostra configurada no Femap®.



Fonte: Autor.

Esse fluxo aplica-se à maioria das simulações, composto ou metálico, porém, existem quatro entidades ou características importantes nas quais os laminados compósitos são diferentes dos componentes metálicos convencionais. A modelagem de laminado composto lida com as seguintes modificações:

- Uma configuração de material ortotrópico / anisotrópico (tipicamente). Ou seja, não possui as mesmas propriedades em todas as direções.
- Os laminados têm uma configuração em camadas, portanto, uma parametrização de *layup* deve ser especificada com a espessura de cada camada e seus ângulos de orientação com um eixo de referência.
- Um tipo de elemento/propriedade que leve em consideração que a configuração em camadas deve ser usada.
- Especificação do eixo de referência (ângulo de referência do material).

### 3.1.1 Definição do material ortotrópico

Conforme Pardini (2016) as propriedades dos materiais ortotrópicos são diferentes nas direções longitudinal ( $E_1$  – Módulo de elasticidade na direção longitudinal ou  $0^\circ$ ) e transversal ( $E_2$  – Módulo de elasticidade na direção transversal ou  $90^\circ$ ). Dessa forma, a parametrização do software utilizado tanto das direções de referência quanto da indicação da característica ortotrópica do material é essencial para que os resultados obtidos na simulação representem corretamente um material composto ortotrópico.

### 3.1.2 Inserindo as propriedades do material no FEMAP

As propriedades do laminado são obtidas utilizando os valores teóricos disponíveis em Jones (1999). São utilizados os módulos de elasticidade nas direções  $0^\circ$  e  $90^\circ$  devido à ortotropicidade do material, além dos módulos de cisalhamento e coeficiente de Poisson.

Essas propriedades básicas permitem o cálculo das tensões envolvidas na simulação, e dessa forma, possibilitam a comparação planejada nesse trabalho.

### 3.1.3 Definindo a sequência das camadas

A definição da sequência e característica de cada camada possui um menu específico no FEMAP<sup>®</sup>. Cada camada é inserida com a definição do ângulo de sua fibra de reforço. Nesse trabalho, o layup foi construído na seguinte sequência:

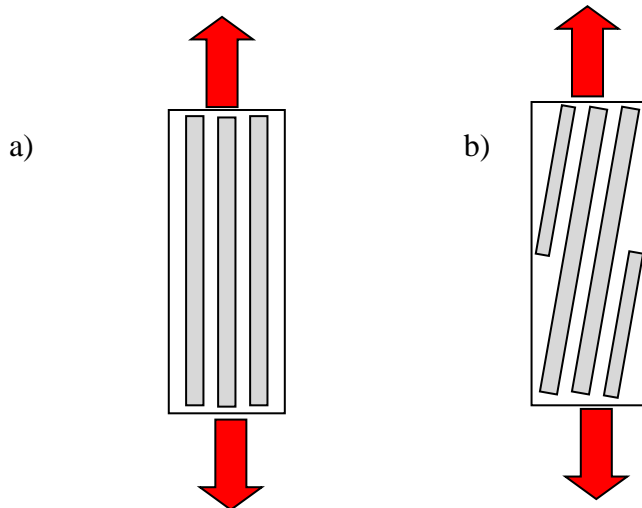
- Camada 1: +45°
- Camada 2: -45°
- Camada 3: 0°
- Camada 4: 0°

## 3.2 Ensaio de tração

A estrutura estudada foi composta por plástico reforçado com fibra de vidro com sentido majoritariamente longitudinal, ou seja, a 0° em relação a direção de aplicação da força. As amostras dos laminados são feitas de 2 camadas de fibra de vidro a 0° UD 970 g/m<sup>2</sup> - Owens, e 1 camada a ±45° de Biax 830 g/m<sup>2</sup> - Owens. A matriz é a resina epóxi MGS RIMR 035C – Olin. Os corpos de prova foram fabricados pelo método de infusão de resina epóxi. Um grupo de amostras foi ensaiado na direção 0°, e as demais amostras tiveram suas direções das fibras propositadamente alteradas (5°/7,5°/10°) para gerar uma redistribuição da força de tração aplicada durante os ensaios mecânicos conforme Figura 3.3.

As setas vermelhas indicam a direção do esforço de tração aplicado às amostras e os retângulos cinza a direção das fibras de reforço.

Figura 3.3. Alteração da direção da fibra: a) Figura com suas fibras de reforço orientadas na direção de aplicação do esforço de tração. b) Figura com suas fibras desalinhadas em relação à direção do esforço de tração.



Foi utilizada a norma ASTM D3039/D3039M – 14 - *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials* como referência para a realização dos ensaios de tração. Os testes foram feitos nos laboratórios de ensaios mecânicos do Senai-CE unidade Maracanaú, e no departamento de engenharia mecânica da universidade de Fortaleza – UNIFOR. Foram utilizadas as máquinas de tração EMIC modelo DL60000 com capacidade de 600KN (Laboratório Senai) e Instron modelo 4484 com capacidade para 150KN (Laboratório Unifor). A Figura 3.4 demonstra um exemplo de ensaio realizado na Unifor.

Figura 3.4. Ensaio de tração na Unifor.



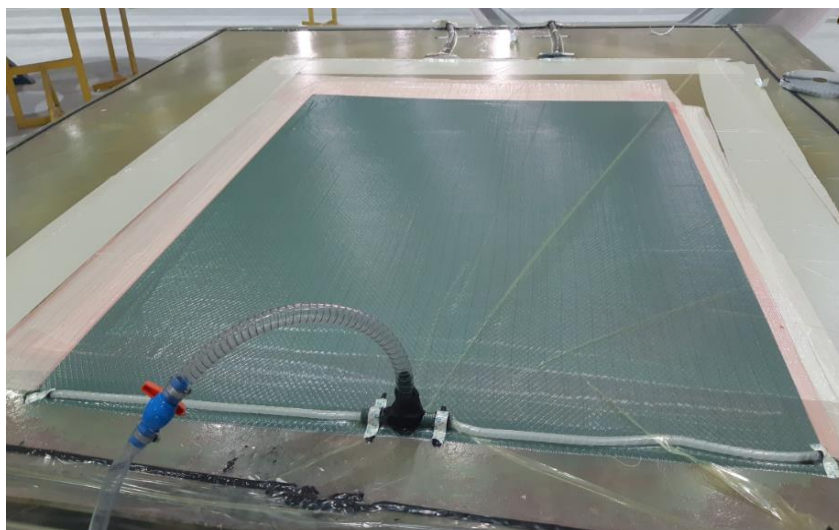
Fonte: Autor.

### 3.2.1 Confeção dos corpos de prova

As amostras foram fabricadas pelo método de infusão de resina à vácuo em parceria com a empresa Aeris Energy. Esse método garante a produção de um laminado vigoroso, de alta qualidade e com baixa taxa de imperfeições. Seu planejamento requer cuidados durante a produção, e são fatores decisivos para o êxito desse processo (GOVIGNON, 2008).

Na figura 3.5 é apresentado o esquema de infusão à vácuo utilizado na confecção do material utilizado para posterior confecção dos corpos de prova.

Figura 3.5. Fabricação dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

### 3.2.2 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados conforme definição da ASTM D3039/D3039M, e seguem o disposto na tabela 3.1:

Tabela 3.1: Requisitos geométricos para amostra de tração de compósitos.

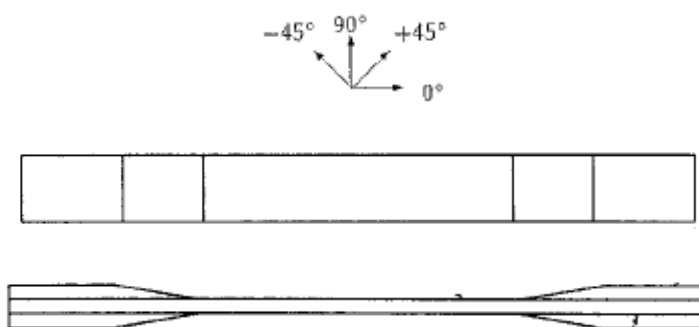
Parâmetro	Requisito
<b>Dimensões da amostra</b>	Secção retangular
Comprimento mínimo	Região de agarramento + 2x largura + comprimento do extensômetro
Largura	25mm <sup>A</sup>
Tolerância da largura	±1% da largura
Espessura	2mm <sup>A</sup>
Tolerância a espessura	±4% da espessura
Planeza	Plano sob leve pressão de um dedo
<b>Apoio do mordente</b>	
Material	Mesmo material da amostra
Orientação da fibra	Mesmo da amostra
Espessura	Mesmo da amostra
Tolerância	±1% da espessura do apoio
Ângulo de chanfro	5 a 90°
Degrau em relação ao corpo de prova	Suavisado

Fonte: ASTM D3039/D3039M – 14.

<sup>A</sup>Tabela 2 da ASTM D3039/D3039M – 14 para amostras unidirecionais 90°.

A figura 3.6 representa o esquema 2D do corpo de prova utilizado nesse trabalho para realização dos ensaios de tração. As dimensões descritas na tabela 2 aplicam-se a esse modelo. A Figura 3.7 apresenta as amostras prontas para os ensaios de tração.

Figura 3.6. Representação 2D do corpo de prova.



Fonte: ASTM D3039/D3039M – 14.

Figura 3.7. Amostra pronta para ensaio de tração.



Fonte: Próprio Autor.

### 3.2.3 Análise estatística dos dados

O teste U de *Mann-Whitney* foi utilizado como fundamento estatístico nesse trabalho. As amostras foram comparadas em grupos de dois ( $0^\circ$  com  $5^\circ$ ), ( $0^\circ$  com  $7,5^\circ$ ) e ( $0^\circ$  com  $10^\circ$ ), ou seja, os corpos de prova com fibras alinhadas na direção  $0^\circ$  do laminado foram sempre a referência. Buscou-se entender se havia correlação estatística entre as propriedades mecânicas dos laminados e a orientação de suas respectivas fibras de reforço.

A justificativa para utilização desse teste foi, ainda pelo fato de durante a experimentação ter havido a perda de amostras durante a preparação dos ensaios de tração (*setup* da máquina). Devido a impossibilidade de obtenção de novas amostras, as quantidades individuais por

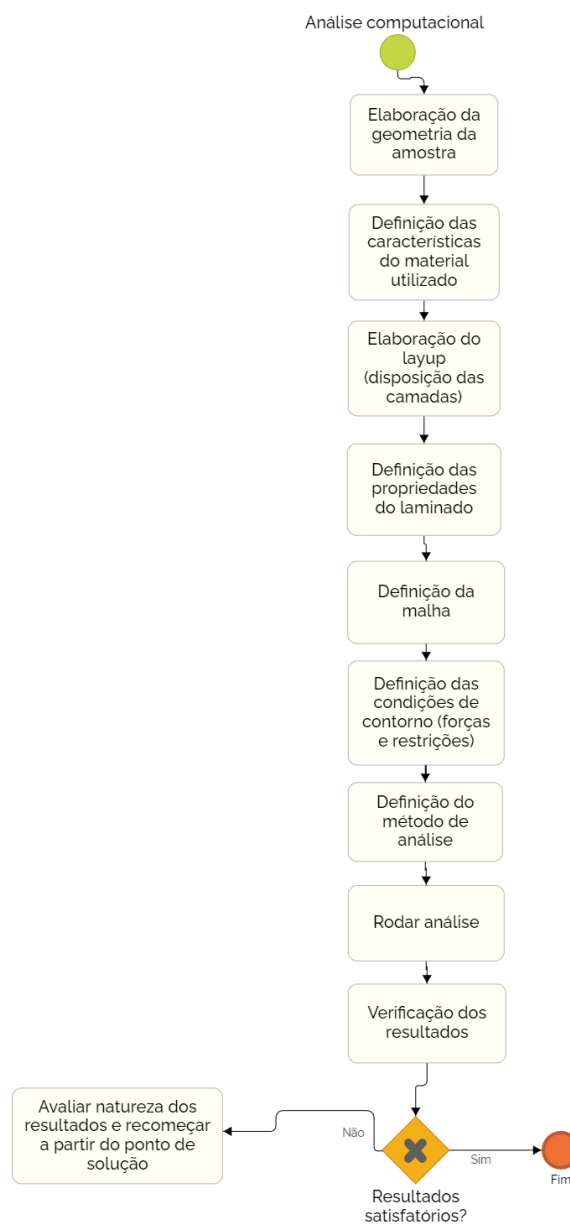


ângulo de fibra ficaram com quantidades diferentes, caso em que o teste U de *Mann-Whitney* se aplica perfeitamente.

### 3.3 Fluxograma da metodologia

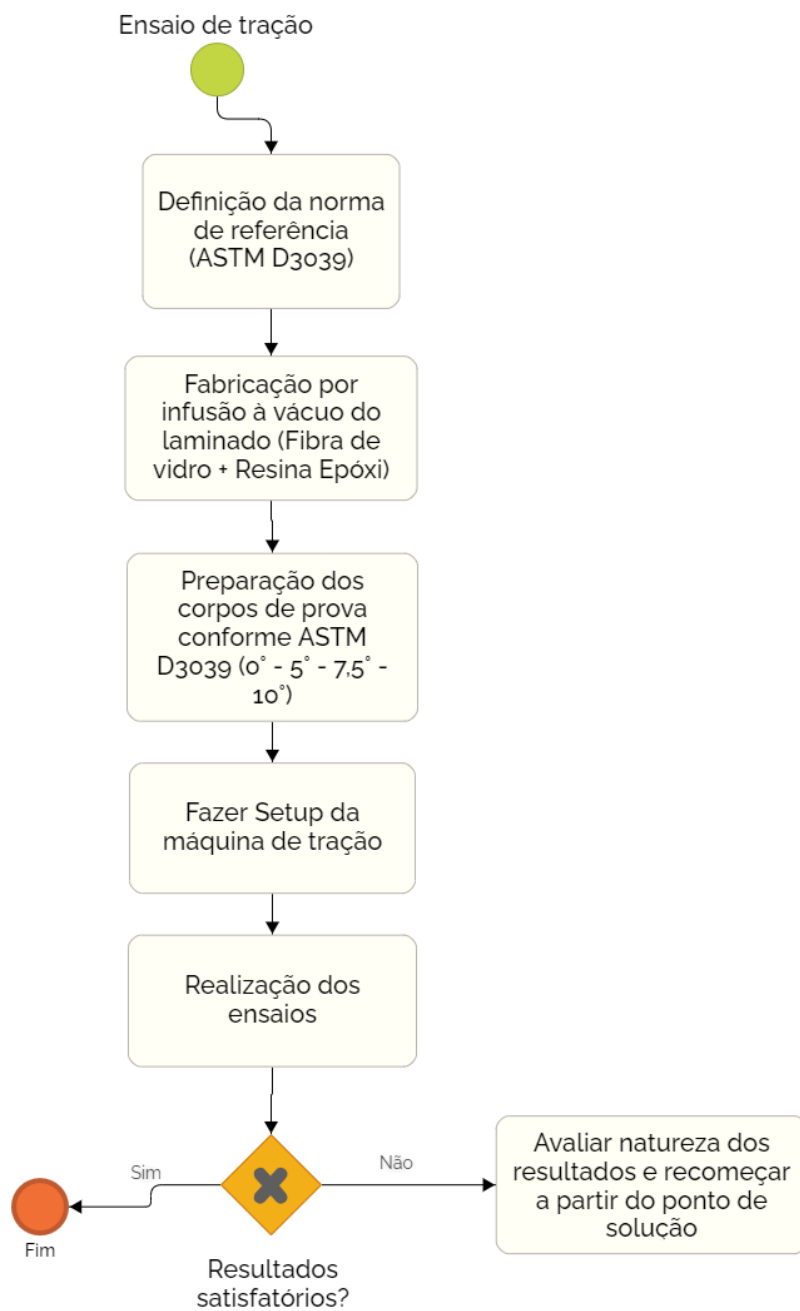
Os diagramas abaixo (Figuras 3.8, 3.9 e 3.10) mostram as atividades agrupadas na sequência que se pretende realizar seguindo a lógica discutida nesse trabalho (análise computacional e ensaios de tração):

Figura 3.8. Diagrama análise computacional.



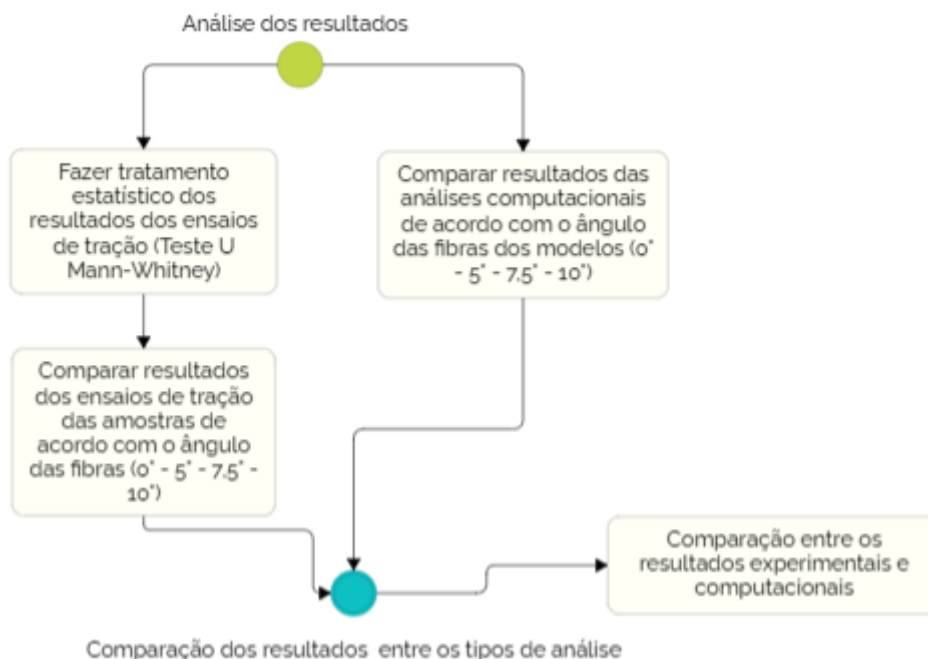
Fonte: Autor.

Figura 3.9. Diagrama ensaio de tração.



Fonte: Autor.

Figura 3.10. Diagrama análise dos resultados.



Fonte: Autor.

## 4 RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados das simulações utilizando a análise por elementos finitos, e dos ensaios de tração dos corpos de prova fabricados em plástico reforçado com fibra de vidro. Num primeiro momento são demonstradas as simulações computacionais feitas utilizando-se o software FEMAP<sup>®</sup> que permitiram avaliar o efeito teórico da resistência mecânica da fibra de reforço sob diversas orientações conforme definido nesse trabalho (0° - 5° - 7,5° - 10°).

As amostras utilizadas nos ensaios de tração são também orientadas de forma que a fibra de reforço possua desalinhamento de 5° - 7,5° - 10° em relação ao zero grau de orientação da fibra. Elas foram divididas em grupos de acordo com o respectivo ângulo de direcionamento da fibra (0° - 5° - 7,5° - 10°) sendo realizado um total de 40 ensaios.

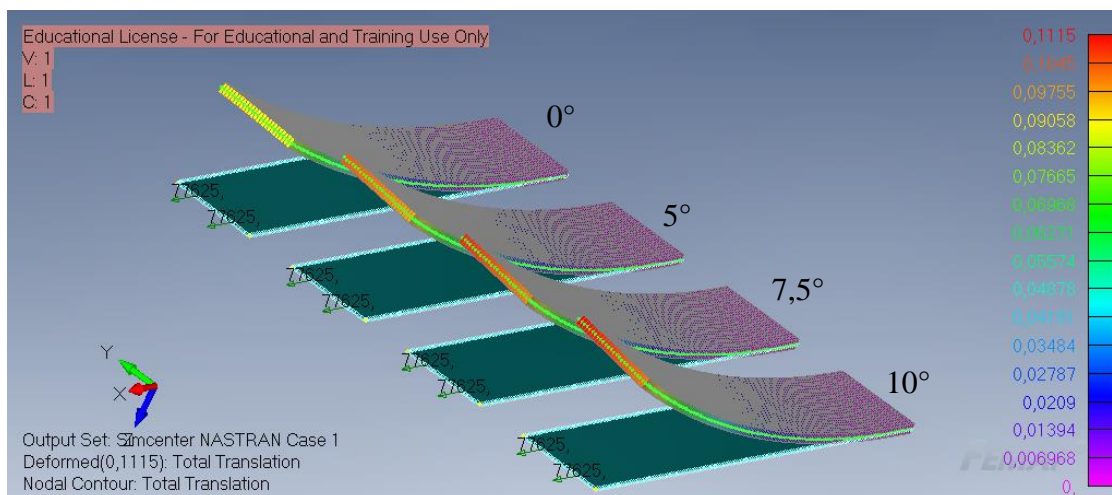
É apresentada, ao fim desse capítulo, a comparação entre as condições simuladas computacionalmente e as amostras ensaiadas em laboratório.

#### 4.1 Simulação computacional

A figura 4.1 demonstra o comparativo entre as deformações dos laminados com sua tabela em cores apresentando os valores em metros. O laminado que está com as fibras na condição ideal, ou seja, mantidas a  $0^\circ$  demonstra menor deformação (90mm) quando submetido a mesma força de 45.000N. Os demais laminados que tiveram suas fibras desalinhadas em relação a de  $0^\circ$  apresentam maior deformação com valores entre 97 e 111mm.

Importante destacar que devido a não simetria na construção desses laminados, o aspecto das simulações possui a característica de um esforço de flexão, e não de tração. Esse fenômeno é proporcionado por uma reposta torcional produzida por uma deformação de cisalhamento (MIL, 1997).

Figura 4.1: Comparação entre as deformações totais dos quatro laminados.

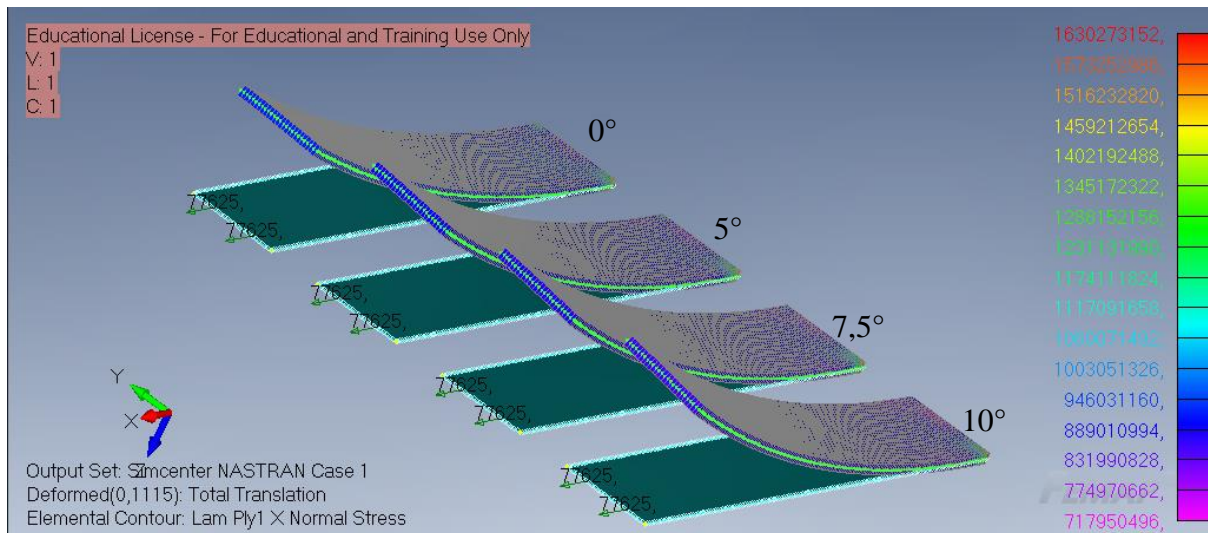


Fonte: Autor.

As figuras 4.2/4.3 demonstram o comparativo das tensões aplicadas nas camadas 1 e 2 com sua tabela em cores apresentando os valores em Pascal. Para a camada 1 (Figura 4.5) disposta originalmente a  $+45^\circ$  não há diferença nos resultados quando comparada aos demais laminados com desalinhamentos, no entanto, a camada 2 (Figura 4.6) disposta originalmente a

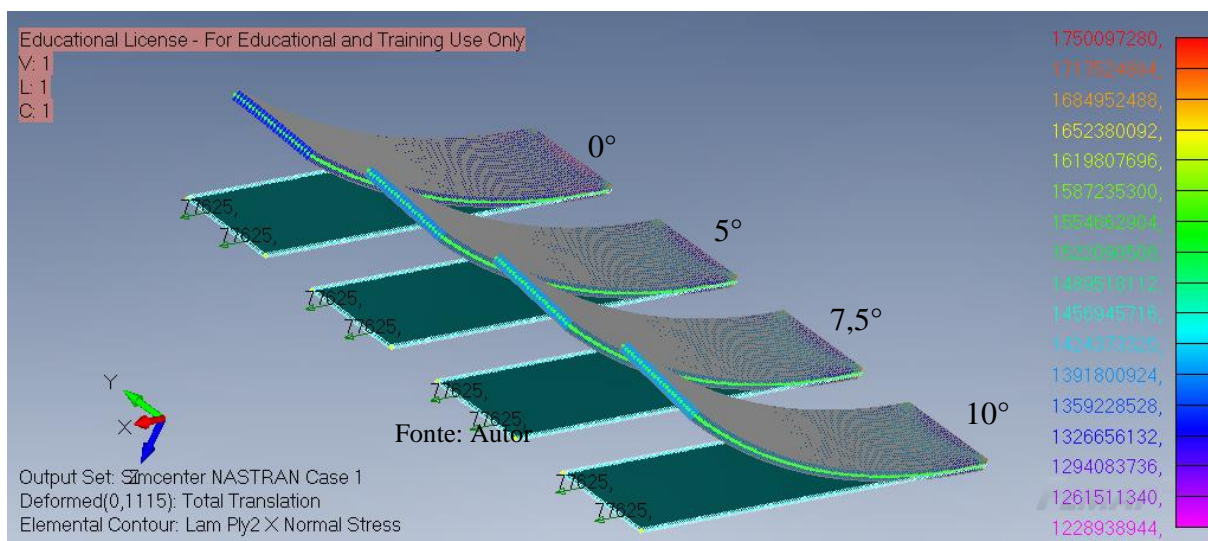
-45° apresenta ligeira diferença em relação às demais apresentando uma tensão inferior, em torno de 1359 MPa contra 1424 MPa das demais camadas.

Figura 4.2: Comparação entre as amostras considerando a tensão na camada 1 de +45°.



Fonte: Autor.

Figura 4.3: Comparação entre as amostras considerando a tensão na camada 2 de -45°.

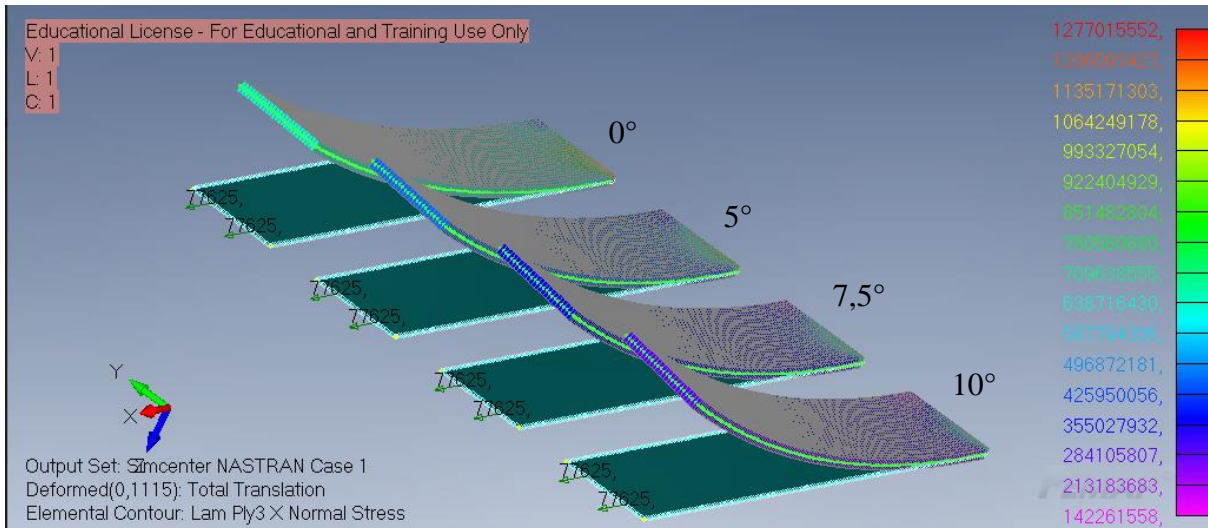


Fonte: Autor.

As figuras 4.4/4.5 demonstram o comparativo das tensões aplicadas nas camadas 3 e 4 com sua tabela em cores apresentando os valores em Pascal. Para a camada 3 (Figura 4.7) disposta originalmente a 0° há visível diferença nos resultados quando comparada aos demais laminados com desalinhamentos. A tensão suportada por esse modelo fica em torno de 780

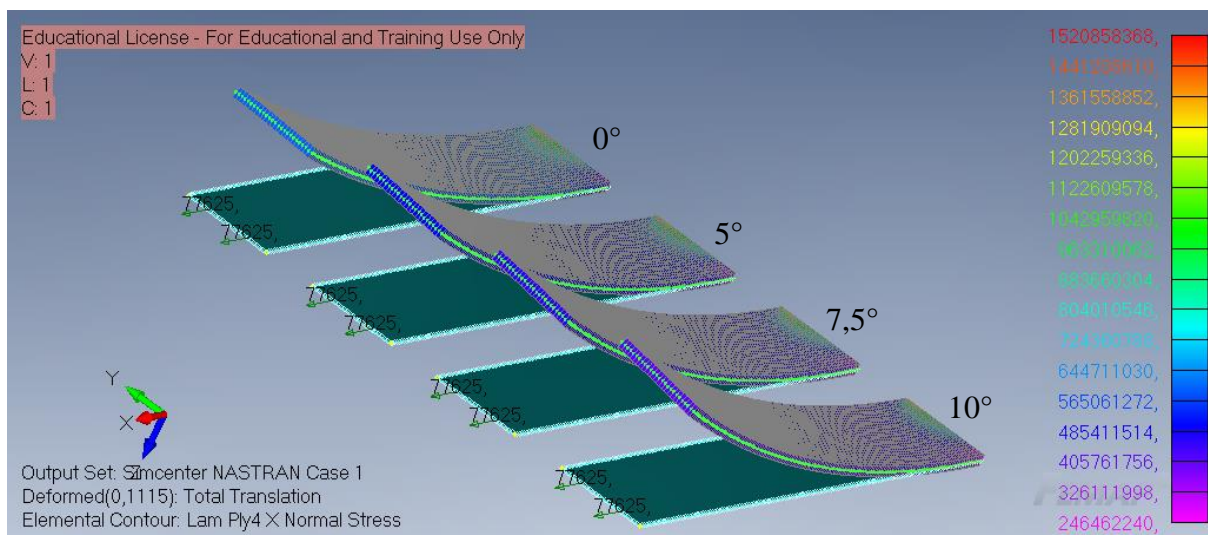
MPa. Contudo, para a camada 4 (Figura 4.8) não há diferença nos resultados quando comparada aos demais laminados com desalinhamentos.

Figura 4.4: Comparação entre as amostras considerando a tensão aplicada na camada 3 de 0°.



Fonte: Autor.

Figura 4.5: Comparação entre as amostras considerando a tensão aplicada na camada 4 de 0°.



Fonte: Autor.

A tabela 4.1 apresenta o resumo dos resultados obtidos pela simulação computacional por camada para as tensões aplicadas, e os valores globais de deformação para o laminado completo, conforme opções de resultados do FEMAP®.

Tabela 4.1. Resumo dos valores obtidos na simulação computacional.

Desalinhamento	Camada	Ângulo da fibra de reforço	Tensão máxima (MPa)	Deformação máxima (mm)
Nenhum	1	+45°	946	90
	2	-45°	1326	97
	3	0°	780	104
	4	0°	644	111
5°	1	+50°	946	
	2	-50°	1424	
	3	5°	496	
	4	5°	565	
7,5°	1	+52,5°	946	
	2	-52,5°	1424	
	3	7,5°	425	
	4	7,5°	565	
10°	1	+55°	946	
	2	-55°	1424	
	3	10°	425	
	4	10°	565	

Fonte: Autor.

## 4.2 Ensaio de tração dos corpos de prova

As amostras tiveram suas dimensões medidas individualmente para largura e espessura com o uso de um paquímetro para lançamento no sistema das máquinas de tração, e respectivo cálculo da tensão máxima suportado pelas amostras. A tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos para esse grupo de amostras:

Tabela 4.2. Resultados amostras em MPa para os ensaios de tração.

<b>i</b>	<b>Amostra (Direção da fibra)</b>	<b>Resist. Máx. (MPa)</b>
1	0°	655
2	0°	584
3	0°	579
4	0°	635
5	0°	850
6	0°	578
7	0°	397
8	0°	650
9	0°	661
10	0°	546
11	0°	602
1	5°	194
2	5°	357
3	5°	153
4	5°	234
5	5°	610
6	5°	237
1	7,5°	699
2	7,5°	648
3	7,5°	677
4	7,5°	894
5	7,5°	641
6	7,5°	642
7	7,5°	695
8	7,5°	585
9	7,5°	617
10	7,5°	560
11	7,5°	549
12	7,5°	497
13	7,5°	563
1	10°	598
2	10°	491
3	10°	667
4	10°	524
5	10°	617
6	10°	607
7	10°	708
8	10°	533
9	10°	620
10	10°	500

Fonte: Autor.



O valor médio encontrado foi de 566 MPa. O valor mínimo foi de 153 MPa e o máximo foi de 894 MPa, o que representa um range de 741 MPa. A partir desses dados foi aplicado o teste U de *Mann-Whitney*. As amostras foram comparadas aos pares sempre em relação a referência de 0°, ou seja, comparou-se as amostras com desalinhamento de 5°/7,5°/10° com as de 0°, no intuito de entender se há, de fato, correlação entre esses desvios de alinhamento das fibras e a resistência máxima de tração dos corpos de prova.

#### 4.2.1 Teste U *Mann-Whitney* comparação entre as amostras de 0° e 5°

As variáveis estatísticas U foram calculadas, sendo  $U_a$  e  $U_b$  os valores das amostras a 0° e 5°, respectivamente. A partir dessas variáveis foi calculado o valor teórico padronizado Z que foi comparado com o valor crítico padronizado  $Z_\alpha$  para um nível de confiança de 0,95.

Parâmetros calculados a partir dos dados apresentados na tabela 4.2.

$$U_a = 6$$

$$U_b = 60$$

$$U_{\text{experimental}} (\text{mín. } U_a; U_b) = 6$$

$$U_{\text{teórico}} = Z = -2,71$$

$$Z_\alpha (\text{crítico}) = 1,96 (\text{intervalo de confiança de 95\%})$$

Não há diferença nos resultados das amostras com fibra a 0° e 5°, pois,  $Z < Z_\alpha$ .

#### 4.2.2 Teste U *Mann-Whitney* comparação entre as amostras de 0° e 7,5°

As variáveis estatísticas U foram calculadas, sendo  $U_a$  e  $U_b$  os valores das amostras a 0° e 7,5°, respectivamente. A partir dessas variáveis foi calculado o valor teórico padronizado Z que foi comparado com o valor crítico padronizado  $Z_\alpha$  para um nível de confiança de 0,95.

Parâmetros calculados a partir dos dados apresentados na tabela 4.2:

$$U_a = 80$$

$$U_b = 63$$

$$U_{\text{experimental}} (\text{mín. } U_a; U_b) = 63$$

$$U_{\text{teórico}} = Z = -0,49$$

$$Z_{\alpha} (\text{crítico}) = 1,96 (\text{intervalo de confiança de } 95\%)$$

Não há diferença nos resultados das amostras com fibra a  $0^\circ$  e  $7,5^\circ$  pois,  $Z < Z_{\alpha}$ .

#### 4.2.3 Teste U *Mann-Whitney* comparação entre as amostras de $0^\circ$ e $10^\circ$

As variáveis estatísticas U foram calculadas, sendo  $U_a$  e  $U_b$  os valores das amostras a  $0^\circ$  e  $10^\circ$ , respectivamente. A partir dessas variáveis foi calculado o valor teórico padronizado Z que foi comparado com o valor crítico padronizado  $Z_{\alpha}$  para um nível de confiança de 0,95.

Parâmetros calculados a partir dos dados apresentados na tabela 4.2:

$$U_a = 6$$

$$U_b = 60$$

$$U_{\text{experimental}} (\text{mín. } U_a; U_b) = 6$$

$$U_{\text{teórico}} = Z = -1,41$$

$$Z_{\alpha} (\text{crítico}) = 1,96 (\text{intervalo de confiança de } 95\%)$$

Não há diferença nos resultados das amostras com fibra a  $0^\circ$  e  $10^\circ$ , pois,  $Z < Z_{\alpha}$ .

### 4.3 Comparação entre a simulação computacional e as amostras ensaiadas em laboratório

Os valores obtidos em simulação computacional para a condição de não-desalinhamento ( $0^\circ$ ) foram comparados com os resultados dos ensaios de tração das amostras que também não sofreram nenhuma alteração na direção de suas fibras de reforço. Foi utilizado teste de hipótese de *Mann-Whitney* no intuito de entender se os valores computacionais possuíam alguma relação de dependência com os valores empíricos.

Parâmetros calculados a partir dos dados apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2:

$$U_a = 34$$

$$U_b = 10$$

$$U_{\text{experimental}} (\text{mín. } U_a; U_b) = 10$$

$$U_{\text{teórico}} = Z = -3,56$$

$$Z_\alpha (\text{crítico}) = 1,96 (\text{intervalo de confiança de } 95\%)$$

Não há diferença nos resultados das amostras computacionais com fibra a  $0^\circ$  quando comparados com os ensaios de tração das amostras com fibras nessa mesma direção, pois,  $Z < Z_\alpha$ .

## 5 DISCUSSÕES

A simulação computacional demonstrou que o desalinhamento das fibras quando analisado camada por camada, não demonstra uma influência direta na resistência mecânica.

Os ensaios de tração também não apresentaram diferença característica entre as amostras com e sem desvio da fibra de reforço. O teste U de *Mann-Whitney* confirmou que não há diferença significativa nos resultados.

Os resultados computacionais quando comparados aos ensaios de laboratório também não mostram relação de dependência conforme demonstrou o teste U de *Mann-Whitney*.

No entanto, a baixa quantidade de amostras experimentadas foi considerada um ponto negativo desse trabalho. A dificuldade na obtenção dos materiais, bem como, a preparação da placa compósita para posterior fabricação das amostras justificam esse ponto. O *setup* das máquinas de tração colaborou também para a perda de amostras, uma vez que se tratavam de testes destrutivos.

Os resultados obtidos nesse trabalho foram avaliados utilizando-se o teste U de *Mann-Whitney*. No entanto, é importante destacar que calculando-se a média dos valores médios dos grupos de dados mais regulares ( $0^{\circ}$ - $7,5^{\circ}$ - $10^{\circ}$ ) foi encontrado o resultado de 596,4MPa relativo à resistência à ruptura com um desvio padrão de apenas 13,9MPa.

Dessa forma, fica fortalecida a apuração demonstrada pelo teste estatístico em função da baixa dispersão dos resultados, ainda que houve uma variação no ângulo da fibra de reforço, as propriedades mecânicas não variam de forma relevante.

No item 2.7 dessa dissertação é apresentado o resultado da pesquisa bibliográfica voltada para encontrar referências para o estudo ora conduzido. No entanto, não foi encontrado nenhuma referência executada exatamente nas mesmas condições como conduzidas nesse trabalho, isso de certa forma, prejudicou as comparações dos resultados para efeito de validação ou de novas discussões.

Algumas sugestões para trabalhos futuros são: Ampliação da gama de ângulos para maior precisão da sensibilidade desse tipo de desvio em laminado compósitos de fibra de vidro com base epoxídica; realização de ensaios de fadiga nas mesmas condições aqui apresentadas nesse trabalho, aplicação dessa abordagem em amostras em fibra de carbono como fibra de reforço, ainda que nesse caso os custos devam ser fortemente considerados, caso não haja um patrocinador para suportar a confecção das amostras com esse material.

## **REFERÊNCIAS**

ABAQUS, *Abaqus User's Manual*, Version 6.8, 2008.

ADAMS, D.O.; HYERT, M.W. **Effects of layer waviness on the compression fatigue performance of thermoplastic composite laminates.** *Fatigue*, v 16, p 385-391, 1994.

ANCELOTTI JR., A. C. **Efeitos da porosidade na resistência ao cisalhamento e nas propriedades dinâmicas de compósitos de fibra de carbono / resina epóxi.** 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - ITA, São José dos Campos, 2006.

ASTM D3039/D3039M – 14. **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.**

AVELINO A.F. **Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE**, São Paulo: Érica, 2013.

AVERY, D. P.; SAMBORSKY, D.D.; MANDELL, J.F.; CAIRNS, D.S. **Compression strength of carbon fiber laminates containing flats with fiber waviness.** In: *Wind Energy Symposium*. 2004, Reno.

AZEVEDO, Álvaro Ferreira Marques. **Método dos Elementos Finitos.** 1 ed. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Portugal, 2003. 258 p.

BARROS, A, S. **Estudo do desalinhamento das fibras nas propriedades mecânicas de compósitos estruturais de pás eólicas.** INPE-16645-TDI/1608, 2009.

BATHE, K.J. **Finite Element Procedures.** Watertown, MA: 2<sup>nd</sup> edition, 2014.

CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada.** 4a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CHAN, W.S.; Wang, J.S. Influence of fiber waviness on the structural response of composite laminates. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v 7, p 243- 260, July 1994.

CHEN Xiao, **What researchers have learned from fractured wind turbine blades. Windpower engineering and development.** Cleveland, Junho de 2018. Disponível em: <<https://www.windpowerengineering.com/what-researchers-have-learned-from-fractured-wind-turbine-blades/>>. Acesso em: 14 de julho de 2021.

COOK, Robert D.. **Finite element modeling for stress analysis.** Nova Iorç: John Wiley & Sons, 1995. 320 p.

Costa G.A, Diniz D.D.S, Peña D.P.A, Medeiros D.S, Fernandes L.O. **Simulação do comportamento mecânico de matérias compósitos reforçados com fibra de algodão.** Universidade Federal Rural do Semi-árido, Caraúbas, RN, 2016.

ELLIS, B. **Chemistry and technology of epoxy resins.** 1a edição. Londres. Black Academie & Professional. 1993. 332 p.

FORGHANI M. RITTO T.G. **Stochastic analysis on the stability of the solutions of wind turbine blade vibrations applying the floquet theory.** Conference: 11th International Conference on Engineering Vibration (ICoEV), Ljubljana, Slovenia, September 2015.

GARNICH, M.R.; KARAMI, G. Localized fiber waviness and implications for failure in unidirectional composites. **Journal of Composite Materials**, v 39, p 1225-1245, 2005.

GOVIGNON, Q. e BICKERTON, S. **Full field monitoring of the resin flow and laminate properties during the resin infusion process**. Composites: Part A: 39 1412-1426, 2008.

Guimarães F.A. **Avaliação das propriedades mecânicas de um compósito híbrido de matriz termoplástica PPS reforçado com fibras de carbono contínuas e descontínuas**. Universidade Estadual Paulista, 2018.

HIGHSMITH, A.L.; Davis, J.J.; Helms, K.L.E. The influence of fiber waviness on the compressive behavior of unidirectional continuous fiber composites. **Composite Materials: Testing and Design**, American Society for Testing and Materials, Philadelphia. p 20-36, 1992.

IRENA. **FUTURE OF WIND Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects**. 2019.

Jones, R.M. **Mechanics of Composite Materials**. CRC Press, 2<sup>nd</sup> edition, 1999.

JOYCE, P.J.; KLUGER, D.; MOON, T.J. A technique for characterizing process-induced fiber waviness in unidirectional composite laminates - using optical microscopy. **Journal of Composite Materials**, v 31, n 17, p 1694-1727, 1997.

KLUGER, D.; MOON, T.J. Identification of the most significant processing parameters on the development of fiber waviness in thin laminates. **Journal of Composite Materials**, v 36, n 12, p 1451-1479, 2002.

LEE, H.; NEVILE, K. **Handbook of epoxy resins**. New York: McGraw Hill, 1968.

Leitão E.S, Marinucci G., Carvalho O., Arnaldo H.P. **Caracterização mecânica de compósitos poliméricos bobinados em diversas orientações do reforço**. Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, 2006.

MADENCI, Erdogan; GUVEN, Ibrahim. **The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS**. 2. ed. Tucson: Springer, 2015. 663 p.

Mandell J.F, Samborsky D.D, Wang L. **Effects of fiber waviness on composites for wind turbine blades**. Department of Chemical Engineering Montana State University Bozeman, Montana, 2002.

MARTHA, Luiz Fernando. **Métodos Básicos da Análise de Estruturas**. Rio de Janeiro: PucRio, 2017. 318 p.

Mastemberg, D.B. **Simulation and testing of resin infusion manufacturing processes for large composite structures**. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Montana State University. Bozeman,, 2004.

Matthew F L, Davies G A O, Hitchings D, Soutis C. **Finite element modeling of composite materials and structures** (CRC Press: Woodhead Publishing Limited), 2000.

May, C. A. **Epoxy resins**. 2a edição. New York: ed. Marcel Dekker, inc., 1988. 1242 p.

Michael C Y N. **Airframe structural design: Practical design information and data on aircraft structure** (Los Angeles: Conmilit Press Ltd.), 1988.

Mil-HDBK-17-3E. **Composite materials handbook**, 1997.

Mili F, Necib B. **The effect of stacking sequence on the impact-induced damage in crossply E-glass/epoxy composites plates** *Archive of Applied Mechanics* 79: 1019-1031, 2009.

Mishnaevsky L.J, Branner K., Petersen H.N, Beauson J, McGugan M, Sørensen B.F. **Materials for Wind Turbine Blades: An Overview**. Department of Wind Energy, Technical University of Denmark, 2017.

Nogueira, C. L.; Marlet, J. M. F.; Rezende, M.C. **Processo de obtenção de pré-impregnados poliméricos termoplásticos via moldagem por compressão a quente**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v 9, n 3, p 18-27, 1999.

Ortiz, E. C. **Avaliação do comportamento dinâmico-mecânico de compósito carbono/epóxi/termoplástico em espectro amplo de frequências**. Dissertação (Mestrado em Física e Química de Materiais Aeroespaciais) - ITA, São José dos Campos, 2008.

Pardini, L.C, Neto, F.L. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo. Blücher, 2016.

Pavan R.C. **Aplicação da teoria de dano na análise do comportamento de materiais compósitos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

Peter J. S. and Richard J. C. **Wind Turbine Blade Design**. Faculty of Engineering, Division of Materials, Mechanics and Structures, University of Nottingham, University Park, Nottingham NG7 2RD, UK, 2012.

Potter K, Khan B, Wisnom M, Bell T, Stevens J. **Variability, fibre waviness and misalignment in the determination of the properties of composite materials and structures**. Department of Aerospace Engineering, University of Bristol, Queen's Building, University Walk, Bristol BS8 1TR, UK, 2008.

Rocha, D.F.B. **Obtenção de curvas mestre de compósitos poliméricos estruturais utilizando utilizando DMTA em fluência**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

SAERTEX. Unidirectional Carbon Fabric. **Technical Data Sheet**. março, 2007. Disponível em: <<http://www.saertex.com>>. Acesso em: 05 de janeiro de 2021.

SAMBORSKY, D. D.; MANDELL, J. F.; CAIRNS, D. S. **Selection of reinforcing fabrics for wind turbine blades.** AIAA. 1999.

Sanjay K M **Composites Manufacturing: Materials, Product and Engineering** (Boca Raton: CRC Press), 2002.

Sebaey T.A, Catalanotti G, Lopes C.S., O'Dowd N. **Computational micromechanics of the effect of fibre misalignment on the longitudinal compression and shear properties of UD fibre-reinforced plastics.** Irish Composites Centre (IComp), Bernal Institute, University of Limerick, Limerick, Ireland, 2020.

Shackelford, J.F. **Introduction to materials science for engineers.** 7a edição, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2008. 878 p.

SIEMENS (Org.). **FEMAP.** Disponível em: <<https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt/products/simcenter/femap.html>>. Acesso em: 07 fev. 2022.

Souza S. A. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos. Fundamentos teóricos e práticos.** São Paulo, Edgard Blücher, 1982.

Stangler, L. **The Effects of Carbon Fiber Misalignment on Composite Material Strength.** South Dakota University, 2016.

Teste Mann U – Whitney: **o que é e quando aplicado, execução, exemplo.** Disponível em: <https://maestrovirtuale.com/teste-mann-u-whitney-o-que-e-e-quando-aplicado-execucao-exemplo/>. Acesso em: 05 de julho de 2022.

Valery V V, Evgeny, V M. **Mechanics and analysis of composite materials** (Elsevier Science Ltd.), 2001.

Volkan Ş. E. **An integrated review and analysis of multi-energy transition from fossil fuels to renewables.** Kadir Has University, Center for Energy and Sustainable Development (CESD), Cibali, Istanbul 34083, Turkey, 2019.

Yang Y, Li W, Tang W, Li B, Zhang D. **Sample Sizes Based on Weibull Distribution and Normal Distribution for FRP Tensile Coupon Test.** Central Research Institute of Building and Construction Co. Ltd, MCC, Beijing 100088, China, 2019.

WANG, L. **Effects of in -plane fiber waviness on the static and fatigue strength of fiberglass.** 2001, 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Montana State University. Bozeman, 2001.

Wisnow M.R. **The effect of fibre misalignment on the compressive strength of unidirectional carbon fibre/epoxy.** Composites. Volume 21. Number 5. September 1990.