



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**  
**CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

**GILVANIA KÁTIA CRUZ PINHEIRO**

**INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DA FIBRA DE VIDRO NA RESISTÊNCIA  
MECÂNICA DE LAMINADOS EM COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXI**

**FORTALEZA**

**2022**

**GILVANIA KÁTIA CRUZ PINHEIRO**

**INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DA FIBRA DE VIDRO NA RESISTÊNCIA  
MECÂNICA DE LAMINADOS EM COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXI**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Metalúrgica e de materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Graduação em Engenharia Metalúrgica. Área de concentração: Materiais Compósitos, Fibra de vidro, Energia eólica. Orientador: Prof. Dr. Ênio Pontes de Deus

**FORTALEZA**

**2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

P719i Pinheiro, Gilvania Kátia Cruz.  
Influência da orientação da fibra de vidro na resistência mecânica de laminados em compósitos de matriz epóxi / Gilvania Kátia Cruz Pinheiro. – 2022.  
75 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Enio Pontes de Deus.

1. Fibra de vidro. 2. Compósitos. 3. Resistência mecânica. I. Título.

CDD 669

---

**INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DA FIBRA DE VIDRO NA RESISTÊNCIA  
MECÂNICA DE LAMINADOS EM COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXI**

**GILVANIA KÁTIA CRUZ PINHEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Metalúrgica e de materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Graduação em Engenharia Metalúrgica. Área de concentração: Materiais Compósitos, Fibra de vidro, Energia eólica.  
Orientador: Prof. Dr. Ênio Pontes de Deus

Aprovada em: \_\_/\_\_/\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Ênio Pontes de Deus (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Mestre Santino Ioruan Silvestre de Melo

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. Guilherme Capistrano Taboza

Aeris Energy

Ao homem que o agrada, Deus dá sabedoria,  
conhecimento e felicidade.

Eclesiastes 2:26

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, à Deus, que se fez presente em cada instante desta minha trajetória, me possibilitando mais uma conquista e fazendo com que meus objetivos sejam alcançados. A ti, Senhor, dedico essa vitória, confiando que continuarás a conduzir os meus passos.

À minha avó Margarida, que há pouco tempo se foi para os braços do Senhor. Dedico essa vitória e conquista por todo amor, carinho e cuidado a mim me dado. Por toda proteção e companhia nas noites e madrugadas em que eu estudava no nosso quartinho.

Ao meu pai, Jorlando, por todo apoio e força nos momentos difíceis e árduos dos estudos, desde o nível técnico até a graduação. Obrigada por ter sido minha fortaleza e por não ter me deixado deslizar nos caminhos complicados que foram chegando nessa trajetória.

À minha mãe, Solange, pela vida e por ter suportado todas as dificuldades desta trajetória e me oferecido o necessário para continuar na caminhada dos estudos, por ter aplaudido às minhas conquistas e pelo exemplo de força e coragem.

À minha irmã, Jordânia, por sempre vibrar e aplaudir as conquistas, e por sempre mandar vibrações positivas para finalizar as caminhadas difíceis.

Às minhas tias, Sandra e Kattyana, por sempre acreditar em mim e sempre apoiar o meu caminho de estudos. Por sempre vibrar e aplaudir as minhas conquistas.

À empresa Aeris energy, por ter me recebido de braços abertos e permitido a realização do estudo. Em especial, para Ana Kariny, por ter ajudado na confecção das peças, sempre com muita paciência e cuidado. Ao time de laboratório, pela realização dos ensaios realizados dentro da empresa. Ao time de produção, pelo auxílio na execução dos laminados.

Ao LPTS e LMCC, pela disponibilidade de máquina e operação para a realização dos ensaios mecânicos.

## RESUMO

Atualmente os materiais compósitos vem aumentando cada vez mais sua utilização, sendo eles fundamentais na construção de aeronaves, embarcações, carros de corrida e geradores eólicos. Diante dessa situação, se faz cada vez mais necessário estudos e análises voltados para a área de atuação dos compósitos de uma forma geral. Em um projeto de pá eólica, são utilizadas várias orientações de fibras de vidro, porém, em regiões diferentes da pá assim como em seus componentes. Desta forma, o estudo apresentado tem como objetivo analisar o comportamento mecânico de compósitos amplamente utilizados em pás eólicas compostos por fibra de vidro em direções unidirecional ( $0^\circ$ ), bidirecional ( $\pm 45^\circ$ ) e tridirecional ( $0^\circ, \pm 45^\circ$ ) com matriz de resina epóxi. Foram confeccionados corpos de prova para as 3 angulações diferentes citadas acima, todas com a fibra de vidro obtendo a mesma gramatura, são elas: UD  $1200\text{g/m}^2$ , BIAIX  $1200\text{g/m}^2$ , TRIAX  $1200\text{g/m}^2$ ) com a RESINA EPOXI MGS RIMR 035C – USA e o endurecedor ENDUR. PARA RESINA EPOXY MGS RIMH 037. As amostras foram feitas pelo processo de moldagem por infusão assistida à vácuo, onde os dimensionais das peças para ensaios foram preparados com base na norma ASTM D 3039/D 3039M e posteriormente submetidas à ensaios de Tg e tração. Foi observado que a amostra com orientação de  $0^\circ$  possui uma alta resistência à tração, porém possui uma ductilidade muito baixa, vindo a romper mais facilmente após chegar na zona plástica. A amostra com duas orientações ( $\pm 45^\circ$ ), possui a menor resistência a tração das três amostras, porém uma ductilidade maior que a amostra de UD ( $0^\circ$ ), deixando a peça no regime plástico por mais tempo antes do rompimento. Já a amostra com três orientações ( $0^\circ$  e  $\pm 45^\circ$ ), possui a maior resistência à tração, assim como uma ductilidade maior se comparado a amostra de UD, e pouco menor se comparado a amostra de biax.

**Palavras-chave:** Fibra de vidro; Compósitos; Resistência mecânica.

## ABSTRACT

Currently, composite materials have been increasingly used, being fundamental in the construction of aircraft, boats, racing cars and wind generators. In view of this situation, studies and analyzes focused on the area of activity of composites in general are increasingly necessary. In a wind blade design, various orientations of glass fibers are used, however, in different regions of the blade as well as in its components. Thus, the present study aims to analyze the mechanical behavior of composites widely used in wind blades composed of fiberglass in unidirectional ( $0^\circ$ ), bidirectional ( $\pm 45^\circ$ ) and tridirectional ( $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ) with epoxy resin matrix. Specimens were made for the 3 different angles mentioned above, all with fiberglass obtaining the same weight, they are: UD 1200g/m<sup>2</sup>, BIAx 1200g/m<sup>2</sup>, TRIAX 1200g/m<sup>2</sup>) with EPOXI RESIN MGS RIMR 035C – USA and ENDUR hardener. FOR EPOXY RESIN MGS RIMH 037. The samples were made by the vacuum-assisted infusion molding process, where the dimensions of the parts for testing were prepared based on the ASTM D 3039/D 3039M standard and subsequently subjected to Tg and tensile tests. It was observed that the sample with orientation of  $0^\circ$  has a high tensile strength, but has a very low ductility, breaking more easily after reaching the plastic zone. The sample with two orientations ( $\pm 45^\circ$ ), has the lowest tensile strength of the three samples, but a higher ductility than the UD sample ( $0^\circ$ ), leaving the part in the plastic regime for a longer time before breaking. The sample with three orientations ( $0^\circ$  and  $\pm 45^\circ$ ), has the highest tensile strength, as well as greater ductility compared to the UD sample, and slightly lower compared to the biax sample.

Keywords: Fiberglass; Composites; Mechanical resistance.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira (GW).....	14
Figura 2 - Matriz elétrica brasileira 2020 .....	15
Figura 3 - Esquema formação dos compósitos.....	15
Figura 4 - Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos.....	16
Figura 5 - Representação esquemática de compósitos reforçados com fibras .....	18
Figura 6 - (a) Curva tensão-deformação para fibra frágil e matriz dúctil. (b) curva tensão-deformação para um compósito reforçado com fibras alinhadas, exposto a uma tensão uniaxial na direção do alinhamento.....	19
Figura 7 - Propriedade mecânica das fibras.....	20
Figura 8 - Ilustração do processo de fabricação de fibras de vidro .....	22
Figura 9 - Composição (%) típica de fibras de vidro .....	24
Figura 10 - Etapa da industrialização da fibra de vidro.....	25
Figura 11 - Máquina de tear, utilizada para confeccionar tecidos .....	27
Figura 12 - Arranjo das fibras nas formas principais de tecido: a) tecido tipo tela (plain weave), b) tecido tipo .....	28
Figura 13 - Grupo funcional epóxi .....	31
Figura 14 - Exemplos de medição de Tg.....	32
Figura 15 - Etapas do processo de infusão. ....	35
Figura 16 - Moinhos de vento.....	36
Figura 17 - Crescimento no tamanho das turbinas eólicas desde 1980 e perspectivas .....	38
Figura 18 - Principais forças de uma turbina na pá. ....	39
Figura 19 - Componentes básicos de uma turbina.....	39
Figura 20. Componentes de uma pá eólica.....	40
Figura 21 – Outra versão dos componentes de uma pá. ....	41
Figura 22 - Curva tensão x deformação para compósitos. ....	44
Figura 23 - Bomba de vácuo WIKA RA 100.....	45
Figura 24 - Amostras em processo pós posicionamento do plástico de vácuo.....	49
Figura 25 - Teste de vácuo das amostras (2mbar em 10 min) .....	50
Figura 26 - Fluxo de infusão.....	50
Figura 27 - Infusão finalizada.....	51
Figura 28 - Curva de aquecimento de cura dos laminados.....	51
Figura 29 - Processo de marcação das regiões de corte .....	52
Figura 30 - Placa marcadas para corte.....	52
Figura 31 - Amostras cortadas .....	53
Figura 32 - Largura das amostras .....	53
Figura 33 - Amostras antes do ensaio de Tg.....	54
Figura 34 - Dimensional do cadinho utilizado para o teste de Tg.....	55
Figura 35. Máquina MTS .....	56
Figura 36 - Fixadores com a amostra de ensaio .....	56
Figura 37 - Máquina EMIC 23-300.....	57
Figura 38 - Monitor no momento do ensaio .....	58
Figura 39 - Ensaio de transição vítrea dos laminados de Bx, UD e Tx.....	59
Figura 40 - Comparativo dos testes de transição vítrea das amostras .....	60
Figura 41 - Figura 42. Teste de precisão da máquina de tração – Amostra de Biax. ....	61
Figura 42- Gráfico tensão x deformação - Biax 1200 g/m <sup>2</sup> .....	62
Figura 43 - Gráfico tensão x deformação - UD 1200 g/m <sup>2</sup> .....	63
Figura 44 - Média das Tensões .....	65
Figura 45 - Média das deformações .....	65
Figura 46 - Corpos de prova rompidos – Biax .....	66

Figura 47 - Corpos de prova rompidos - UD.....	67
Figura 48 - Corpos de prova rompidos - Triax .....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Datasheet das fibras .....	46
Tabela 2 - Datasheet da resina epóxi .....	46
Tabela 3 - Lista de materiais utilizados .....	47
Tabela 4 - Dimensional das amostras .....	54
Tabela 5. Resultado Tg. ....	58
Tabela 6. Tensões de ruptura das amostras de Biax 1200 g/m <sup>2</sup> . ....	62
Tabela 7. Tensões de ruptura das amostras de UD 1200 g/m <sup>2</sup> . ....	63
Tabela 8. Tensões de ruptura das amostras de Triax 1200 g/m <sup>2</sup> . ....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEÓLICA	Associação Brasileira de Energia Eólica
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
HLU	<i>Hand Lay Up</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RTM	<i>Resin Transfer Moulding</i>
TEEH	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
TEEV	Turbina Eólica de Eixo Vertical
UFC	Universidade Federal do Ceará
VIP	<i>Vacuum Infusion Process</i>
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial

## LISTA DE SÍMBOLOS

F	Força
A	Área de seção transversal
E	Módulo de elasticidade ou módulo de Young
N	Número de ciclos
$\tau$	Tensão de cisalhamento
DL	Elongação
$\varepsilon$	Deformação
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\theta$	Ângulo da fibra
$\sigma$	Tensão
$T_g$	Transição vítrea

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
2	OBJETIVO GERAL .....	14
2.1	Objetivos específicos .....	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	15
3.1	Compósitos .....	15
3.2	Reforços de fibras .....	17
3.2.1	Fibra de vidro .....	21
3.2.2	Tecido .....	25
3.3	Fase matriz .....	28
3.3.1	Resina Epóxi .....	29
3.3.2	Temperatura de transição vítrea .....	31
3.4	Processo de fabricação do compósito .....	33
3.4.1	Infusão .....	34
3.5	Energia eólica .....	36
3.5.1	Pá eólica .....	40
3.6	Propriedades mecânica dos polímeros .....	41
3.6.1	Ensaio de tração .....	42
4	METODOLOGIA .....	44
4.1.1	Máquinas .....	44
4.1.2	Criação das placas de laminado .....	47
4.1.3	Criação dos corpos de prova .....	52
4.1.4	Teste de transição vítrea .....	54
4.1.5	Ensaio de tração .....	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	58
5.1.1	Teste de transição vítrea .....	58
5.1.2	Ensaio de Tração .....	60
6	CONCLUSÃO .....	68
	REFERÊNCIAS .....	70

## 1 INTRODUÇÃO

Devido ao aumento da necessidade de propriedades mecânicas mais elevadas nos materiais com um menor custo, as empresas vêm sendo incentivadas a buscar materiais alternativos para produção de produtos novos. Áreas como aeronáutica, indústria eólica, automobilística e militar buscam intensamente materiais que apresentem propriedades relativas, produtos estruturais mais leves e resistentes mecânica e termicamente. Assim, a utilização dos compósitos tornou-se um diferencial competitivo.

De acordo com Callister, 2012, os compósitos multifásicos, como por exemplo os polímeros reforçados com fibras de vidro, fornecem oportunidades excitantes para o projeto de uma variedade extremamente grandes de materiais com combinações de propriedades que não podem ser atendidas por nenhuma liga metálica, cerâmica ou material polimérico monolítico convencional. Isso se dá devido a maioria dos compósitos terem sido criados para melhorar combinações de características mecânicas, tais como rigidez, tenacidade e resistências às condições do ambiente e de temperaturas elevadas.

Os materiais compósitos estão na categoria dos materiais ditos como tecnologia de ponta, já que as características comprovadamente obtidas até então estão ligadas as ótimas propriedades mecânicas e a pesos inferiores, segundo Costa, 1999.

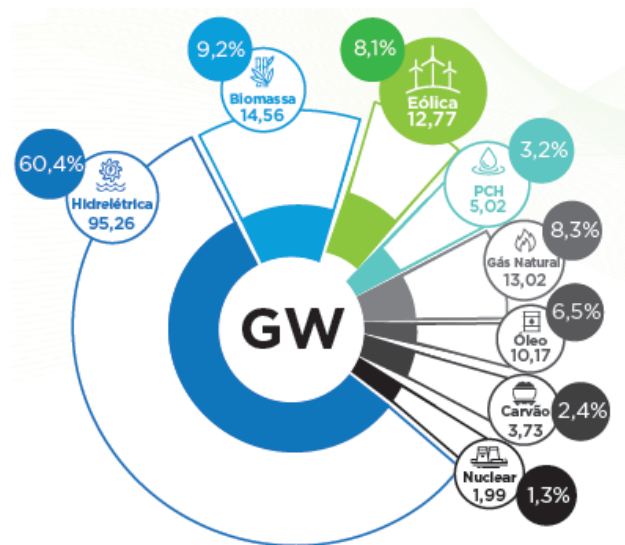
O material utilizado no reforço do compósito é o material responsável por atenuar as propriedades mecânicas e químicas no geral. Maior dureza, tenacidade, rigidez e resistência à tração são funções basicamente da geometria do material de reforço, ou seja, da forma, tamanho, distribuição e orientação das fibras. A fibra de vidro como componente de reforço está entre os mais utilizados não somente no setor eólico, mas também em indústria de setores variados como: naval, construção civil, automotiva, mecânica, metalúrgica, farmacêutica, aeronáutica, aeroespacial, entre outras. Com a elevada resistência à tração e o alto módulo de elasticidade provenientes da forma fibrosa do material, a engenharia vê essa combinação ideal com uma matriz que protege e distribui a tensão da fibra, assim evitando a propagação de falhas, conforme citado por SCHWARTZ, 1984.

Um dos mercados que mais vem crescendo no consumo de compósitos no mundo é o mercado de energia eólica, se tornando um diferencial pelas qualidades oferecidas dos materiais compósitos e da necessidade energética do planeta. O maior interesse no mercado cresceu devido a pesquisas preverem o esgotamento das fontes não renováveis (carvão mineral, petróleo, gás natural). A produção de eletricidade a partir da fonte eólica alcançou 33.489 GWh

em 2016, equivalente a um aumento de 54,9% em relação ao ano anterior, quando atingiu 21.626 GWh, segundo EPE (2017).

A matriz energética brasileira até o ano de 2017 mostra que a energia eólica está em terceiro lugar entre as fontes produtoras de energia elétrica que abastecem o país., de acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) constituída pelos dados da Figura 1.

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira (GW).

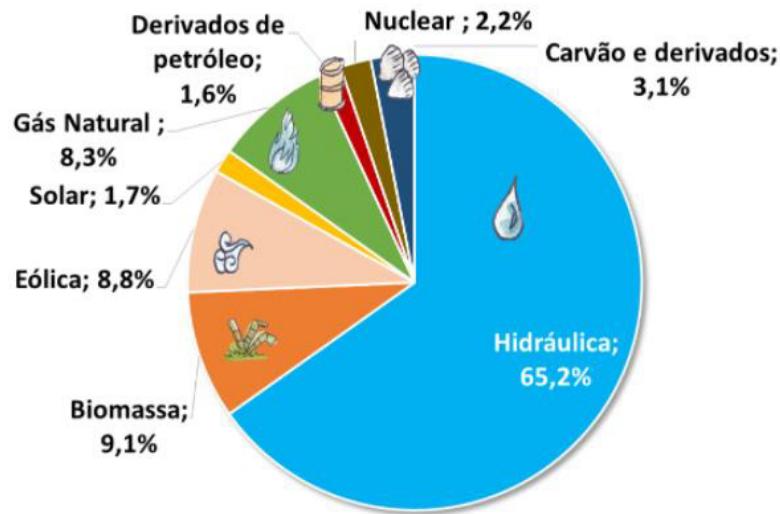


Fonte: ANEEL/ABEEÓLICA (2017).

Atualmente falando, no ano de 2020 obteve-se uma queda 4,6%, decorrente da pandemia mundial ter afetado toda a cadeia produtiva, porém, mesmo diante deste cenário, as expectativas de crescimento do setor eólico são boas. Analisando apenas o mercado de compósitos a base de resina epóxi, a geração de energia eólica representou 91% do consumo brasileiro nesse mesmo ano. (BEMPARANA, 2021). O cenário mudou no ano de 2021, onde foi um ano marcado pela maior ampliação de geração de energia eólica no Brasil. As usinas eólicas constituíram cerca de 21 gigawatts de potência instalada e responderam por 11,46% da matriz energética brasileira. (BERNARDINO, 2022).



Figura 2 - Matriz elétrica brasileira 2020



Fonte: EPE, 2021

Tão importante quanto as combinações citadas entre os materiais são os métodos de fabricação possíveis, uma vez que implicará diretamente na qualidade final das peças fabricadas. É sabido que a laminação é um método bastante expandido na fabricação de materiais compósitos. Porém, as propriedades que estes laminados irão apresentar podem se diferir conforme a orientação da fibra de vidro utilizada, assim como outros fatores de proporção de resina x fibra de vidro no componente. Para a situação da confecção de pá eólica, no seu processo produtivo são utilizados diferentes tipos de orientações ou angulações de fibras de vidro em determinadas regiões da pá, onde são destinadas as condições mais altas de propriedades relativas para regiões mais críticas. É possível se confirmar e obter resultados das propriedades destes materiais através de testes mecânicos, a fim de determinar os parâmetros e configurações ideais conforme a necessidade da região e aplicação.

## **2 OBJETIVO GERAL**

A partir de ensaios de tração e transição vítrea em corpos de provas de laminados unidirecional, bidirecional e tridirecional analisar as propriedades mecânicas das orientações da fibra de vidro.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Abranger o conhecimento em materiais compósitos e as diferentes orientações das fibras de vidro;
- Conhecer os impactos das orientações das fibras nos laminados e entender as aplicações em diferentes regiões da pá eólica;
- Medir o módulo de elasticidade dos corpos de prova no ensaio de tração longitudinal;

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

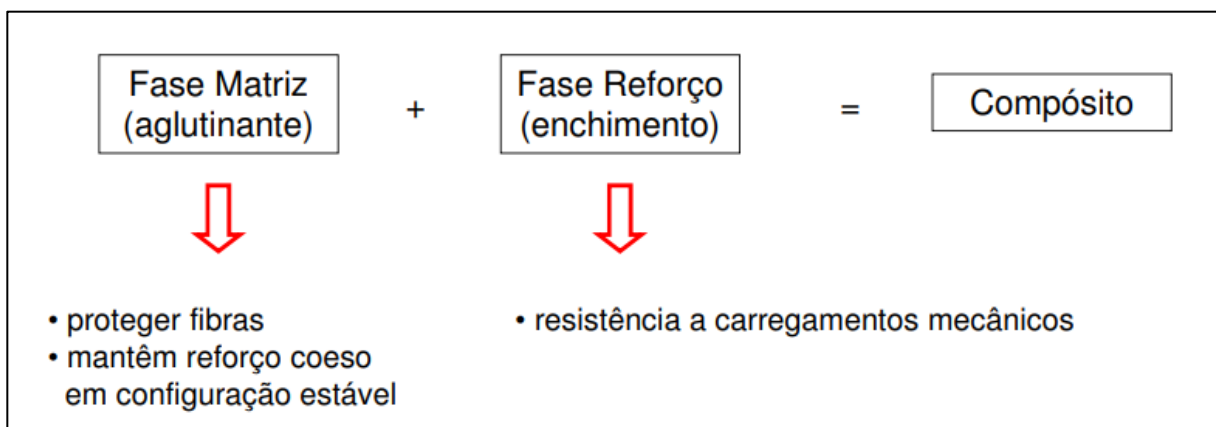
Tendo como objetivo deixar o leitor situado dos assuntos a serem abrangidos nesta tese, será feita uma explanação dos principais conceitos de compósitos, mais especificamente voltado para o setor eólico no qual é o foco da discussão.

#### 3.1 Compósitos

O advento dos compósitos como uma classe de materiais distinta deu-se na metade do século XX, com a fabricação de compósitos multifásicos deliberadamente projetados e engenheirados, tais como os polímeros reforçados com fibras de vidro. Embora materiais multifásicos, tais como madeira, tijolos de argila reforçada com palha, conchas marinhas e mesmo ligas como o aço fossem conhecidos há milênios, o reconhecimento desse novo conceito de combinar materiais diferentes durante a fabricação levou à identificação dos compósitos como uma nova classe distinta dos metais, cerâmicas e polímeros familiares. Agora temos consciência que tal conceito de compósitos multifásicos fornece oportunidades excitantes para o projeto de uma variedade extremamente grande de materiais com combinações de propriedades que não podem ser atendidas por nenhuma liga metálica, cerâmica ou material polimérico monolítico convencional, segundo apresentado por Callister, 2012.

Os compósitos são, afinal, estruturas ou componentes fabricados a partir de combinações (mistura macroscópica) de dois ou mais constituintes (fases) que apresentam morfologias distintas (esquema abaixo). Eles são constituídos por uma matriz contínua, no qual envolve fibras e ou partículas que formam a mistura.

Figura 3 - Esquema formação dos compósitos



Fonte: Universidade de Caxias do Sul

Conforme dito, o compósito é formado por apenas duas fases, uma denominada matriz, a qual é contínua e envolve a outra fase chamada de fase dispersa (ou reforço). Um esquema simples dos materiais compósitos é apresentado abaixo, onde evidencia três divisões principais: os compósitos reforçados com partículas, os compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais. (Callister, 2012)

Figura 4 - Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos.



Fonte: Callister 2012

A fase dispersa nos compósitos reforçados com partículas é equiaxial, nos compósitos reforçados com fibras, a fase dispersa apresenta a geometria de uma fibra, já os compósitos estruturais são combinações de compósitos de materiais homogêneos. Segundo Callister 2012, os compósitos mais importantes são aqueles reforçados com fibras. Comumente, as fibras mais utilizadas são as de vidro, carbono, aramida, que apresentam firmezas específicas e altas resistências.

Os compósitos reforçados com fibras possuem uma matriz chamada polimérica. As matrizes poliméricas podem ser tanto termoplásticas, cujo formato pode ser modificado, como termofixa, onde possui uma estrutura tridimensional rígida e o formato não pode ser modificado. Como exemplo para as matrizes poliméricas termoplásticas, seriam: PE, Nylon, PS, PP, PC e PVC. Já para as matrizes termofixas, seriam: epóxi, poliéster e fenólicas.

### 3.2 Reforços de fibras

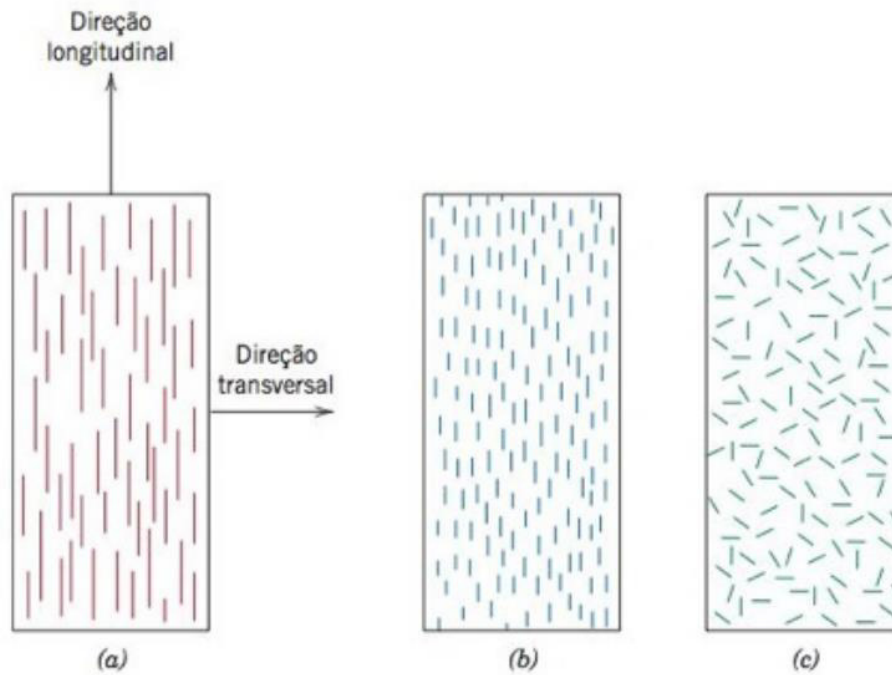
O objetivo dos projetos de compósitos reforçados com fibras inclui principalmente a alta resistência / rigidez em relação ao peso do material, afirma Callister 2012. Compósitos reforçados com fibras com resistências e módulos específicos altos tem sido produzido empregando materiais de baixo peso específico, tanto para a fibra como para a matriz. As fibras de reforço representam o principal componente estrutural nos compósitos avançados (PUCKETT; PETERVARY, 1998).

A escolha ou seleção do reforço leva sempre em conta aspectos que variam desde o custo desses materiais até o desempenho pretendido e a técnica de fabricação empregada. Considerando uma estrutura sob ação de determinados carregamentos, tais como carregamentos estáticos, dinâmicos ou mesmo com esforços combinados, os componentes que a compõe têm que estar capacitados a desempenhar ações de acordo com as condições previstas ou estabelecidas em projeto. Essas condições nos compósitos são alcançadas pela capacidade do elemento de reforço, que confere à estrutura elevadas propriedades específicas de resistência e módulo de elasticidade na direção da fibra. Fibras de vidro, fibras aramida e fibras de carbono são os elementos de reforço mais utilizados para fabricação de materiais compósitos (Marinucci, 2019).

Dentro da estrutura do material composto, as fibras são responsáveis pela transferência das tensões através da matriz de resina. Dentre todas as características das fibras de reforço, o tipo de filamento, a interação da sua superfície com a matriz da resina, a quantidade de resina e finalmente a orientação do reforço são as que irão determinar a performance final do laminado (Nasseh, 2007).

O arranjo ou a orientação das fibras umas em relação às outras, a concentração das fibras e sua distribuição apresentam uma influência significativa sobre a resistência e outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras. Em relação à orientação, são possíveis dois extremos: (1) um alinhamento paralelo do eixo longitudinal das fibras em uma única direção e (2) um alinhamento totalmente aleatório. Normalmente, as fibras contínuas são alinhadas na Figura 5(a), enquanto as fibras descontínuas podem estar alinhadas Figura 5(b), orientadas aleatoriamente Figura 5(c), ou parcialmente orientadas (Callister, 2012).

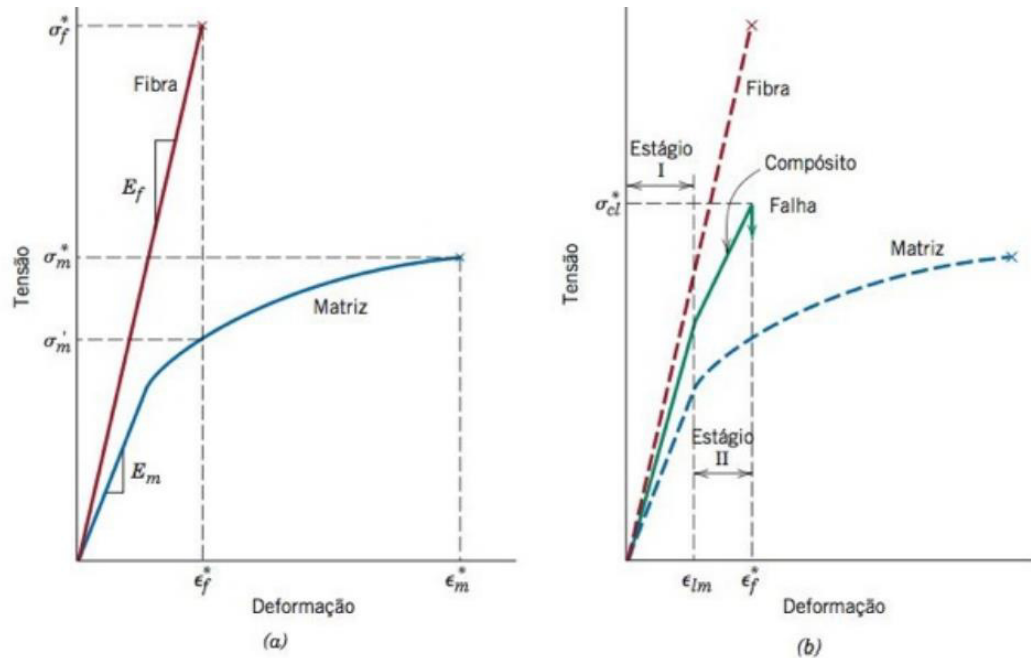
Figura 5 - Representação esquemática de compósitos reforçados com fibras



Fonte: Callister, 2012

Ainda conforme dito por Callister (2012), as respostas mecânicas desses tipos de compósito dependem de vários fatores, incluindo os comportamentos tensão-deformação das fases fibra e matriz, as frações volumétricas das fases e a direção na qual a tensão ou carga é aplicada. Além disso, as propriedades de um compósito cujas fibras estão alinhadas são altamente anisotrópicas, ou seja, dependem da direção na qual são medidas. A figura 6.a irá mostrar o comportamento tensão-deformação para a situação na qual a tensão é aplicada no sentido longitudinal. A figura 6.b mostrará um compósito formado com os materiais utilizados na figura 6.a e explanará qual a resposta o compósito possui de tensão-deformação uniaxial.

Figura 6 - (a) Curva tensão-deformação para fibra frágil e matriz dúctil. (b) curva tensão-deformação para um compósito reforçado com fibras alinhadas, exposto a uma tensão uniaxial na direção do alinhamento



Fonte: Callister, 2012

Na figura 6.a é possível observar que a fibra é totalmente frágil e que a fase matriz é dúctil. Na figura 6.b está incluído os comportamentos dos materiais separados para dar perspectiva. Observa-se que no estágio I tanto a fibra quanto a matriz deformam-se elasticamente, o que geralmente essa região possui um comportamento linear. Já para o compósito desse tipo, nessa região a matriz escoou e deforma-se plasticamente, no entanto as fibras continuam a se alongar elasticamente devido à tração das fibras serem significativamente maior que o limite de escoamento da matriz. Tendo isso, é possível construir o estágio II, onde está muito próximo de ser linear, porém com uma leve curvatura se comparado ao estágio I. Passando-se do estágio I para o estágio II, a proporção de carga suportada pela fibra aumenta.

Desta forma, o início da falha do compósito ocorre quando as fibras começam a fraturar, porém a falha de um compósito não se torna catastrófica, pois nem todas as fibras se rompem ao mesmo tempo, por sempre haver uma variação na resistência a fratura dos materiais fibrosos e, além disso, mesmo após a falha da fibra ainda existe a fase matriz que se manterá intacta. Assim, as fibras fraturadas são capazes de suportar uma carga reduzida enquanto a matriz continua a deformar-se plasticamente.

Fazendo um comparativo com os metais. As fibras oferecem propriedades atrativas, contudo, deve ser considerado que as propriedades mecânicas são apenas as das fibras e não as do compósito (figura 6).

Figura 7 - Propriedade mecânica das fibras

Material	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Resistência a tração (MPa)	Resistência específica 10 <sup>3</sup> (Nmkg <sup>-1</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo específico 10 <sup>6</sup> (Nmkg <sup>-1</sup> )
Aço-carbono 1020 recozido	7,86	400	50,9	210	26,7
Aço <i>maraging</i> 300	7,86	2000	254,5	210	26,7
Alumínio	2,63	600	228,1	73	27,8
Titânio	4,61	1900	412,1	115	24,9
Fibra de vidro-E	2,54	3448	1357,5	72	28,3
Fibra de vidro-S	2,48	4585	1848,8	85	34,3
Fibra de carbono- HT	1,77	3400	1920,9	238	134,5
Fibra de carbono-HM	1,80	2350	1305,6	358	198,9
Fibra aramida	1,44	2760	1916,7	62	43,1
Fibra aramida-HM	1,44	2760	1916,7	117	81,3
Boro	2,60	3500	1346,2	420	161,5
Fibra de alumina (AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,00	2000	500,0	470	117,5
Fibra de carbeto de silício (SiC)	3,40	2300	676,5	480	141,2

Fonte: Marinucci, 2019

Conforme Nasseh, 2007, o grau de interação superficial da fibra com a resina controla as características de adesão entre elas, e no final proporciona a coesão do laminado, o que é altamente influenciado pelo tipo de tecelagem, trama e tratamento superficial. Tipos de reforço com maior poder de compactação irão fornecer maior fração em volume de fibras e maiores propriedades mecânicas. Neste processo o alinhamento das fibras é fundamental para reduzir os espaços vazios a serem preenchidos pela resina. Laminados produzidos com baixa tecnologia de tecelagem irão produzir espaços vazios entre os cabos e reduzir o grau de compactação.

Nasseh também afirma que o diâmetro das fibras também é importante, e como regra geral, quanto menor o diâmetro, melhor será a adesão entre as fibras e a matriz de resina, melhor a compactação e menor o índice de porosidade, e finalmente maior a resistência. Geralmente quanto maior a quantidade de fibras maior a resistência do laminado, entretanto a partir de 70% de fração em volume a matriz de resina não consegue manter a coesão das fibras e a tendência é haver redução das propriedades mecânicas. Pela própria natureza as fibras produzidas com filamentos contínuos são mais propícias a resistir aos esforços em sua própria



direção. O uso de fibras alinhadas com a direção dos esforços reduz a quantidade de material sem função estrutural dentro do composto.

Com base no diâmetro e na natureza, as fibras são agrupadas em três classificações diferentes: whiskers, fibras e arames. Onde os whiskers são monocristais muito finos com razões comprimento-diâmetro extremamente grandes. Como consequência de suas pequenas dimensões, eles apresentam alto grau de perfeição cristalina e são virtualmente livres de defeitos, o que lhes confere resistências excepcionalmente elevadas; eles estão entre os materiais mais resistentes conhecidos. Apesar dessas altas resistências, os whiskers não são utilizados extensivamente como meio de reforço, pois são extremamente caros. Além disso, é difícil e impraticável incorporar whiskers em uma matriz, pois eles são fabricados com grafite, carvão de silício e óxido de alumínio.

As fibras podem ser tanto policristalinos quanto amorfos, e possuem diâmetros pequenos (geralmente polímeros ou cerâmicas). Já os arames finos têm diâmetros relativamente grandes. Os arames são utilizados como um reforço radial de aço nos pneus de automóveis nas carcaças de foguetes fabricados por enrolamento filamentar e em mangueiras de alta pressão (Callister, 2012).

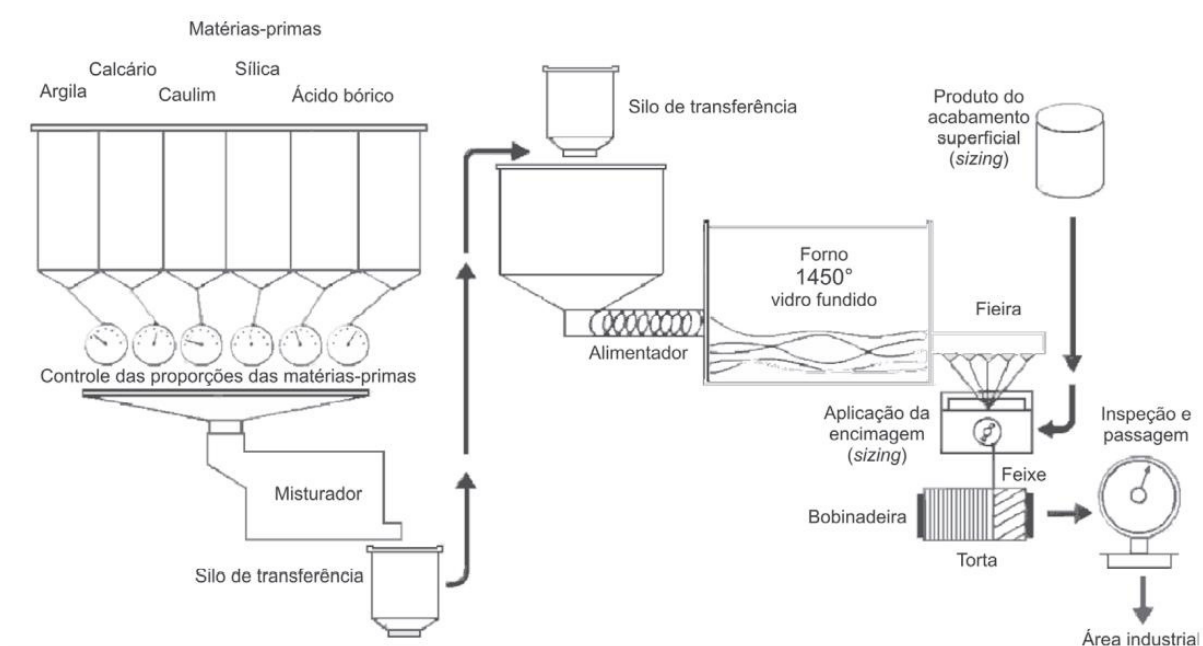
### *3.2.1 Fibra de vidro*

Apesar de o vidro ser conhecido há milhares de anos, foi somente próximo à metade do século XX que o material pôde ser produzido na forma de contínuos e minúsculos filamentos, permitindo sua utilização na indústria têxtil e a fabricação de produtos de isolamento elétrico. (Marinucci, 2019)

A fibra de vidro começou a ser fabricada e comercializada pela primeira vez na Europa em meados dos anos 30, com a patente de uma empresa europeia sob o processo de obtenção de vidro maleável. Contudo, foi a partir de sua combinação com materiais poliméricos que um novo conceito de material surgiu, permitindo, em menos de duas décadas depois, o nascimento de uma nova indústria, a indústria dos materiais compósitos poliméricos. Assim, a partir da década de 40 que este material se expandiu pelo mundo sendo amplamente utilizado nos mais diversos segmentos industriais, provavelmente em função da Segunda Guerra Mundial, visto que este compósito é amplamente utilizado na fabricação de aviões. Em virtude de sua baixa densidade, alta resistência mecânica e facilidade no manuseio, tanto na fabricação de peças acabadas quanto no transporte destas, em virtude de ser um material leve.

A fibra de vidro é um composto filamentosos de finíssimos fios de vidro, agregados através de resinas, silicones, fenóis e outros compostos solúveis em solventes orgânicos. As fibras de vidro proporcionam a melhor relação custo/benefício entre os reforços oferecidos para fabricação de materiais compósitos poliméricos, e isso se dá devido a origem e abundância das matérias-primas utilizadas, principalmente as já citadas: o silício contido nas areias, que com calcário, ácido bórico, carvão e argila. Essas matérias-primas são fundidas num forno refratário com temperatura em torno de  $1450^{\circ}\text{C} - 1600^{\circ}\text{C}$ , onde o material irá se transformar em líquido. Esse líquido é submetido ao resfriamento sob alta velocidade, no qual o controle cinético e térmico favorece a obtenção de fios em tamanhos e diâmetro desejados através da passagem do líquido por finíssimos e reguláveis orifícios de platina, que chegam a produzir cerca de 3000 m de fibra por minuto. Ou seja, o material convenientemente processado após a formação do vidro, dão origem às fibras de vidro na forma contínua e picada, conforme mencionado por Marinucci, 2019. A figura 6 ilustra este processo de fabricação.

Figura 8 - Ilustração do processo de fabricação de fibras de vidro



Fonte: Marinucci, 2019

As fibras de vidro são produzidas em uma variedade de composições químicas, cada uma delas exibindo diferentes propriedades mecânicas e químicas, e designadas por uma letra do alfabeto. De toda essa variedade, as fibras de vidro do tipo E, C e S são as mais utilizadas. Ele ainda afirma que o vidro tipo E tem baixo teor alcalino, boa resistência à tração e boa rigidez em relação à flexão. Os filamentos usados no laminado são produzidos num diâmetro de 6 a 15

mícrons (Nasseh, 2007).

Segundo Marinucci, 2019, a transformação da massa fundida em fios é feita pelo processo de fiação por fusão, a qual permite a obtenção de filamentos contínuos pela passagem da massa fundida de vidro por uma placa de platina, denominada de feira ou peneira (bushing), que possui centenas e até milhares de microfuros. O diâmetro dos monofilamentos de vidro pode variar em função dos microfuros da feira, mas estão numa faixa de 12 a 16  $\mu\text{m}$ .

Após passar pela feira, os filamentos altamente viscosos são solidificados por resfriamento e recebem um acabamento superficial denominado de ensimagem. Esse tratamento é feito por uma emulsão aquosa que contém, entre outras substâncias, agentes de ligação, formadores de filme, agentes antiestáticos e lubrificantes. A ensimagem (binder ou sizing) tem uma função importante no processo de fabricação das fibras de vidro, pois confere flexibilidade, além de compatibilidade com a matriz polimérica que será empregada para fabricação do compósito, proteção superficial para manuseio e contato com elementos dos equipamentos de fabricação, atuando também como agente de aglutinação dos filamentos (Marinucci, 2019).

Em sua forma original, esses filamentos têm excelentes propriedades mecânicas. Contudo nos volumes em que é maciçamente produzida, a fibra acaba perdendo metade da sua resistência original, se tornando assim a menos resistente de todas as fibras disponíveis para o construtor, afirma Nasseh, 2007. Ainda é enfatizado que a demanda da indústria aeronáutica e aeroespacial por fibras mais resistentes e com propriedades mecânicas melhores que apresentadas pelo tipo E, introduzindo assim os tipos de fibras conhecidas por tipo S e R. Embora o vidro tipo S tenha sido desenvolvido inicialmente para aplicação espacial, uma versão com custo mais reduzido, chamada tipo S-2 ou CS (Commercial S-Glass), está disponível para aplicações que não requerem certificado para utilização aeroespacial ou militar. Em sua formulação química, os vidros tipo R e S contêm uma maior proporção de alumínio e sílica, o que pode representar um aumento de 20% a 40% nas propriedades mecânicas quando comparados com o vidro tipo E (conforme mostrado na figura 9), além de possuírem diâmetro aproximadamente metade do diâmetro do vidro E.

A micronagem de uma fibra de vidro, que está relacionada ao diâmetro, pode ser afetada pela variação da temperatura na feira ou pela velocidade das enroladeiras (bobinadeiras), alterando a densidade linear, também chamada de título, uma vez que a vazão do vidro fundido que passa pelas feiras pode ser considerada constante. A unidade característica que representa a densidade linear de uma fibra é o tex, que expressa a quantidade em gramas que a fibra possui por um quilômetro do material, sendo dada, portanto, em g/km. Há ainda o múltiplo dtex, que

representa a quantidade em gramas por dez quilômetros de fibra. Em uma fibra de vidro de qualidade, espera-se propriedades como boa dispersão, facilidade de corte, bom assentamento no molde, baixa formação de eletricidade estática, boa conformação em cantos vivos, boa translucidez e fácil desenrolamento (Marinucci, 2019).

Figura 9 - Composição (%) típica de fibras de vidro

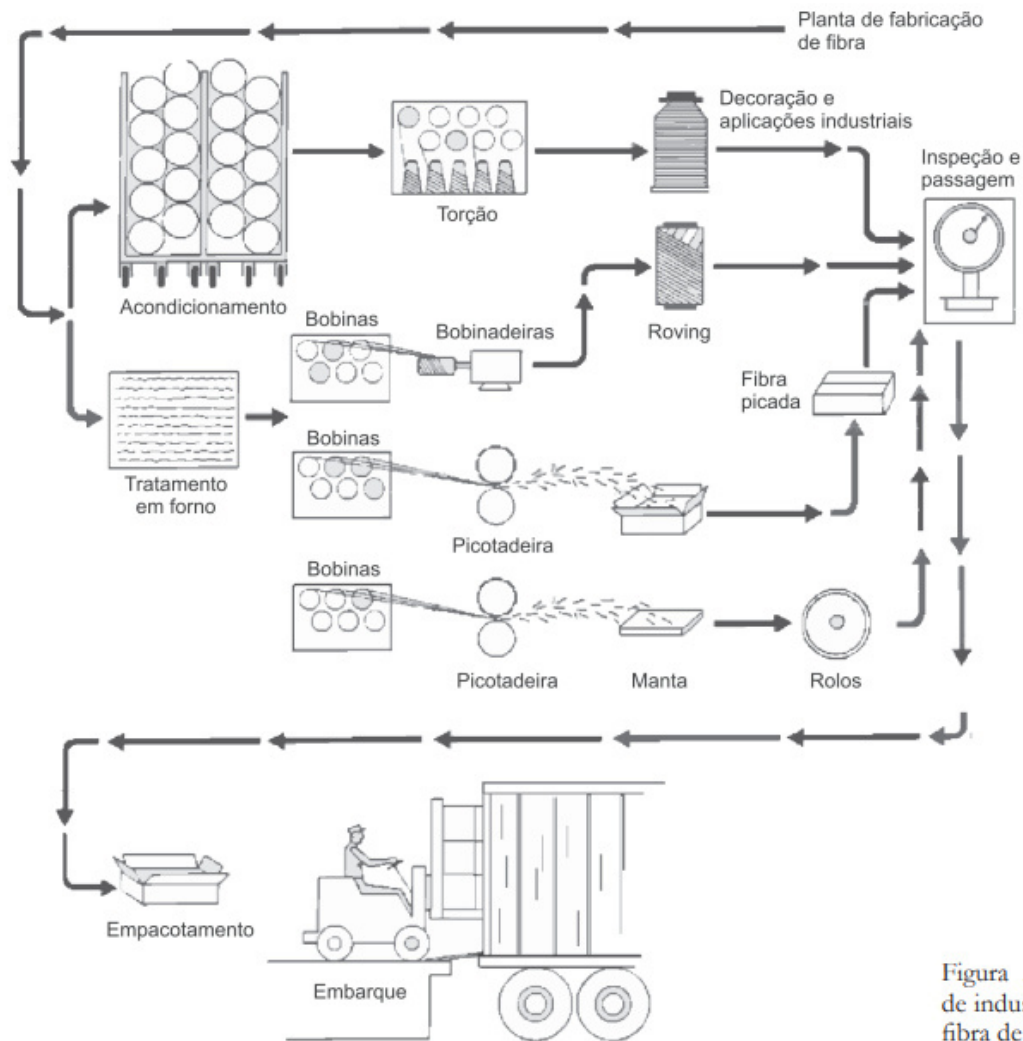
COMPOSIÇÃO	A	E	S	R
SiO <sub>2</sub>	72.0	52.4	64.4	60.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.5	14.4	25.0	25.0
CaO	10.0	17.2	-	9.0
MgO	2.5	4.6	10.3	6.0
Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	14.2	0.8	0.3	-
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	10.6	-	-

Fonte: NASSEH, 2007

Na figura 10, observa-se que as fibras de vidro são produzidas pelo mesmo processo de fabricação até a etapa final, quando se originam as duas formas principais do material: filamentos contínuos e filamentos descontínuos, muitas vezes referenciados, respectivamente, como single-end e multi-end. Cada uma dessas formas dará origem às inúmeras possibilidades de formação do material para ser utilizado como reforço, tais como mantas, véus de superfície, tecidos e fibras contínuas (Marinucci, 2019).

Marinucci, 2019 também afirma que a fibra contínua é o primeiro produto na escala de produção das fibras de vidro para a indústria de materiais compósitos, que faz o mercado oferecer o produto a um preço atrativo, o que consequentemente favorece sua maior utilização. As fibras picadas e as mantas, com diversas gramaturas, possuem maior valor agregado devido às vantagens que oferecem na fabricação do compósito e por isso têm um preço maior.

Figura 10 - Etapa da industrialização da fibra de vidro

Figura 3.2 – Etapas de industrialização da fibra de vidro<sup>27</sup>

Fonte: Marinucci, 2019

Finalmente, a fibra contínua é utilizada na fabricação de tecidos, um produto muito mais elaborado e que oferece vantagens significativas em relação à fibra contínua e às mantas.

### 3.2.2 Tecido

Existem duas formas mais usuais de apresentação da fibra de vidro para fabricação de compósitos poliméricos, que são: na forma de manta (fibras curtas ou fragmentadas) e na forma de tecido (filamentos contínuos).

Conforme Marinucci, 2019, a fibra para fabricação de compósitos poliméricos é a reunião de milhares de monofilamentos contínuos, orientados numa só direção e unidos por um

material aglomerante. Assim, a fibra é o primeiro produto na escala dos materiais de reforços. São materiais contínuos que podem ser torcidos (twisted) durante a fabricação, denominados de yarns, ou não torcidos (non-twisted), denominados de rovings.

O foco desse trabalho é 100% em fibras com filamentos contínuos (ou tecidos), diante disso será abrangido apenas esse tipo de apresentação da fibra.

Para o tecido, a montagem das fibras na direção do comprimento do fio, chamada de urdume, e na direção transversal, denominada de trama, permite a fabricação de tecidos que conferem ao compósito resistência em duas direções. Os tecidos possuem maior custo quando comparados às mantas, entretanto, oferecem propriedades superiores em termos de resistência e rigidez e maior estabilidade dimensional ao compósito. De acordo com o arranjo entre urdume e trama, há, por exemplo, a formação de tecidos tipo tela (plain weave), tipo sarja (twill weave) e tipo cetim (satin weave), cada um com diferentes características e aplicações, afirma Marinucci, 2019.

Devido à variedade de fabricação dos tecidos, tem-se a necessidade de referenciar os tipos de tecidos conforme sua característica. Por exemplo, para indústria têxtil uma denominação comum é para comprimento de 9.000 metros de tecido, que recebe a identificação de denier. O título da fibra irá relacionar a massa e o comprimento, o que determina sua massa linear. Já para indústria eólica, por exemplo, a expressão utilizada se refere à massa de um tecido por unidade de área, que define a gramatura, expressa em g.m<sup>-2</sup>. Porém, conforme informa Marinucci (2019), nem todos os tecidos apresentam igual distribuição de massa na direção da trama e do urdume. Quando isso ocorre, os tecidos são denominados de desbalanceados, em oposição aos tecidos que possuem mesma distribuição de massa nas duas direções, chamados de balanceados. Esse conhecimento é importante para o cálculo de algumas propriedades físicas e mecânicas do compósito.

O reforço de fibra contínua pode ser obtido no mercado na forma de rolos de cabos com diferentes números de filamentos contínuos, por exemplo, 3.000, 9.000 ou 12.000 filamentos, fitas unidirecionais ou como tecidos, com o arranjo dos filamentos em duas, três e até quatro direções e diferentes gramaturas, conforme figura 11. (Barros, 2010).

Figura 11 - Máquina de tear, utilizada para confeccionar tecidos

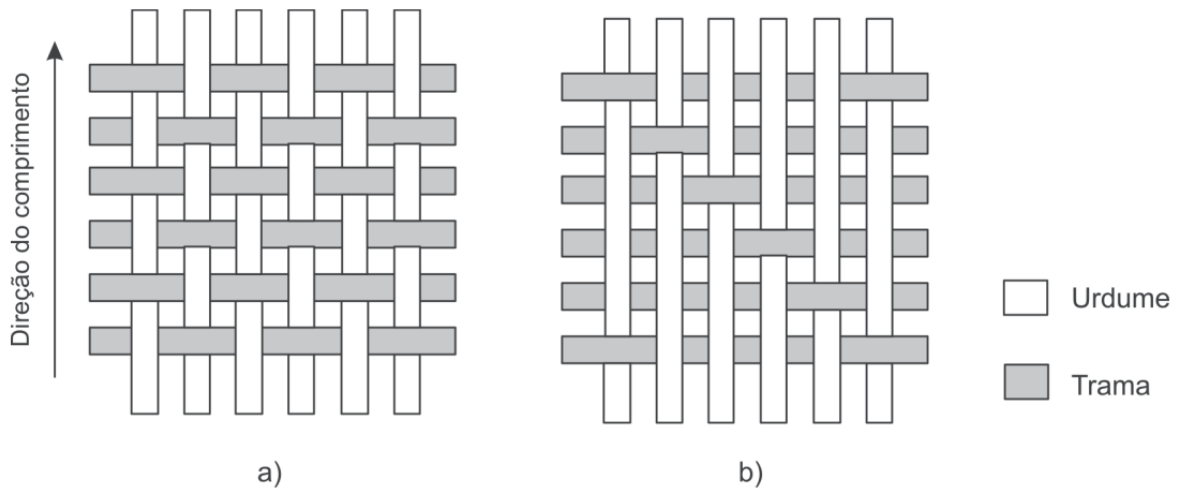


Fonte: Liba (2009)

Frequentemente são utilizados tecidos de fibra de vidro padrão tela intercalados entre camadas de mantas na fabricação de compósitos. O tecido padrão tela é fabricado alternando-se o fio de urdume sobre e sob o fio de trama, com essa sequência sendo invertida na fileira seguinte, de forma a se ter um arranjo conforme mostrado na figura 12.a. Essa montagem permite uma maior compactação do laminado e também tem a vantagem de se obter as propriedades que ambos os materiais oferecem. Tecidos de fibra de vidro padrão tela são fabricados com gramaturas variando de 150 g.m<sup>-2</sup> até 1000 g.m<sup>-2</sup> (Marinucci, 2019). Reforços com arranjo unidirecional e tecido bidirecional  $\pm 45^\circ$ , preferencialmente de fibras de vidro, são os tipos de reforços normalmente utilizados na área de fabricação de pás para geradores eólicos. A seleção dos tecidos de reforço utilizados na fabricação de pás de turbinas eólicas é historicamente focada em materiais utilizados na indústria naval (Samborsky, 1999).

Na construção típica de um tecido sarja, por exemplo, no padrão 2x1, um fio da trama é entrelaçado sob e sobre dois fios do urdume em movimentos sucessivos, figura 12.b (Marinucci, 2019).

Figura 12 - Arranjo das fibras nas formas principais de tecido: a) tecido tipo tela (plain weave), b) tecido tipo sarja



Fonte: Marinucci, 2019

Nos tecidos, as fibras podem também ser mantidas em sua posição por meio de costura com fios sintéticos (poliéster, poliamida), com o arranjo dos filamentos em uma, duas, três e até quatro direções, na direção da trama ou do urdume, ou até mesmo a 45°. Para aplicações estruturais de pás para geradores eólicos, normalmente são utilizados os reforços unidirecionais na direção 0° (trama) (Saertex, 2009).

### 3.3 Fase matriz

Nos compósitos reforçados com fibras, a fase matriz tem várias funções. Em primeiro lugar, ela liga as fibras umas às outras e atua como meio pelo qual uma tensão aplicada externamente é transmitida e distribuída para as fibras, onde apenas uma proporção muito pequena da carga aplicada é suportada pela fase matriz. Além disso, o material da matriz deve ser dúctil. O módulo de elasticidade da fibra deve ser muito maior que o da matriz. A segunda função da matriz é proteger as fibras individuais contra danos superficiais decorrentes de abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente. Tais interações podem introduzir defeitos superficiais capazes de formar trincas, que podem levar a falhas sob baixos níveis de



tensão de tração. Finalmente, a matriz separa as fibras umas das outras e, em virtude de sua baixa dureza e plasticidade relativas, previne a propagação de trincas frágeis de uma fibra para outra, o que poderia resultar em uma falha catastrófica (Callister, 2012). Em outras palavras, a fase matriz serve com uma barreira à propagação de trincas do compósito. Embora algumas fibras individuais falhem, a fratura total do compósito não ocorrera até que um grande número de fibras adjacentes forme um aglomerado com dimensões críticas.

Callister (2012) afirma que é essencial que as forças de ligação adesivas entre a fibra e a matriz sejam grandes, para minimizar o arrancamento das fibras. Segundo Marinucci (2019), a resistência da ligação interfacial deve ser suficiente para a carga ser transferida da matriz para as fibras para que o compósito seja mais forte e resistente do que a matriz sem reforço.

Ele também afirma que, uma vez que a matriz recebe o material de reforço, ocorre um contato íntimo entre elas, podendo haver adesão. Diferentes tipos de adesão podem ser formados, ou seja, para uma certa combinação de materiais, um mecanismo de adesão pode ocorrer, como adesões mecânica, eletrostática, química e por interdifusão. Os tipos de adesão dependem de alguns fatores como a presença de impurezas ou adição de agentes de acoplamento (MATTHEWS e RAWLINGS, 1994).

O desenvolvimento de uma ligação química ou interação física, na região interfacial, promove a adesão necessária entre fibra/matriz, produzindo compósitos com melhores propriedades (Marinucci, 2019).

As matrizes podem ser resinosas (poliéster, epóxi, etc), minerais (carbono) e metálicas (ligas de alumínio). No presente trabalho foi utilizado matriz polimérica epóxi, dessa forma o assunto que será abordado a seguir irá mostrar suas características e vantagens para aplicação com reforços de fibra de vidro.

### ***3.3.1 Resina Epóxi***

A primeira síntese da resina epóxi ocorreu em 1936 e é atribuída ao Dr. Pierre Castan, pesquisador suíço que produziu uma resina dotada de baixo ponto de amolecimento com a finalidade de utilização em dentaduras, próteses dentárias e outros produtos odontológicos. Em 1954, o California State Highway Department utilizou a resina epóxi na construção civil para colar sinais de trânsito. Desde então o emprego das resinas epóxi com esta finalidade (colar) tem aumentado devido ao seu alto grau de aderência. (Silveira, 2009)

Atualmente as resinas epóxi abrangem uma vasta gama de propriedades, desde

líquidos de baixa viscosidade sem solvente até sólidas de alto ponto de fusão, sendo utilizados na construção civil como revestimentos de pisos industriais, em revestimento interno de recipientes de cervejas e refrigerantes e na indústria eletrônica em placas de circuito impresso, “mainboard” de computadores, encapsulamentos de componentes, “flash drives”, entre outros. (Silveira, 2009)

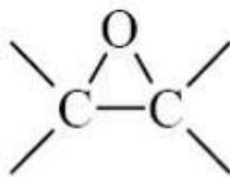
Existem vários tipos de resina, sendo elas divididas em dois grupos: resinas naturais e resinas sintéticas. As resinas naturais estão incluídas as ceifas de plantas como por exemplo: látex, breu, colofônia. Então, as resinas naturais são produtos extraídos de árvores que, através de algum processo, irá se transformar em um produto. Já as resinas sintéticas são feitas na maioria das vezes por meio do petróleo. A maioria dos plásticos são considerados resinas sintéticas, como por exemplo: epóxi e poliéster.

A resina epóxi é um tipo de plástico termorrígido usado na fabricação de tintas para diversos segmentos. Produção de embalagens de alimentos, artigos esportivos e catalisadores estão na lista. Seu uso é versátil, por isso também está presente em muitas indústrias. Ela é um material resistente, tem grande capacidade de aderência e dependendo de sua classificação ainda obtêm proteção UV.

Segundo Callister (2012), a resina epóxi é um componente de reforço acrescentado para aumentar a ductilidade. A fase matriz tem várias funções quando aplicada nos compósitos reforçados com fibras. Uma de suas funções é realizar a ligação das fibras, além de atuar como meio de distribuição de tensão nas mesmas. A resina epóxi deve ser dúctil, ou seja, o módulo de elasticidade da fibra deve ser muito superior que o da matriz. Outra função da resina epóxi é a proteção das fibras contra avarias relacionadas a reações químicas com o ambiente e abrasão mecânica. Estas influências podem gerar defeitos superficiais capazes de comprometer o compósito através de trincas, que podem gerar falhas em baixos níveis de tensão de tração (CALLISTER, 2012).

Conforme dito por Almeida (2005), as resinas epóxi são polímeros caracterizados pela presença de pelo menos dois anéis de três membros (Figura 13), conhecidos como epóxi, epóxido, oxirano ou etano epóxi. Ela, que pode possuir um ou mais grupamentos epóxi, é convertida em uma forma termorrígida pela formação de uma estrutura tridimensional em rede (May, 1988; Costa, 1998).

Figura 13 - Grupo funcional epóxi



Fonte: Almeida, 2005

Almeida (2005) também afirma que as resinas epóxi são convertidas em polímeros termorrígidos por um processo chamado reação de cura, pela ação de agentes de cura, que também são conhecidos por endurecedores. O termo cura é usado para descrever o processo onde um ou mais tipos de reagentes, isto é, um grupo epóxi e um agente de cura, são transformados de um material de baixa massa molar em uma rede rica em ligações cruzadas e de maior massa molar. Esse mecanismo de crescimento das cadeias moleculares é devido à presença de monômeros poli funcionais. Após esta etapa de tratamento térmico, a resina termorrígida não mais se funde.

A utilização de agentes de cura (endurecedores) no processamento de resinas epóxi torna esta estrutura com um arranjo tridimensional das cadeias, que confere ao material propriedades como estabilidade, insolubilidade e infusibilidade. A escolha do tipo e da proporção de endurecedor está ligada aos parâmetros de processamento do produto, que, por sua vez, está relacionada ao tempo de trabalho da matriz. Os parâmetros de mistura são normalmente definidos pelo fabricante, visando as melhores propriedades do material final (Almeida, 2005).

### 3.3.2 *Temperatura de transição vítrea*

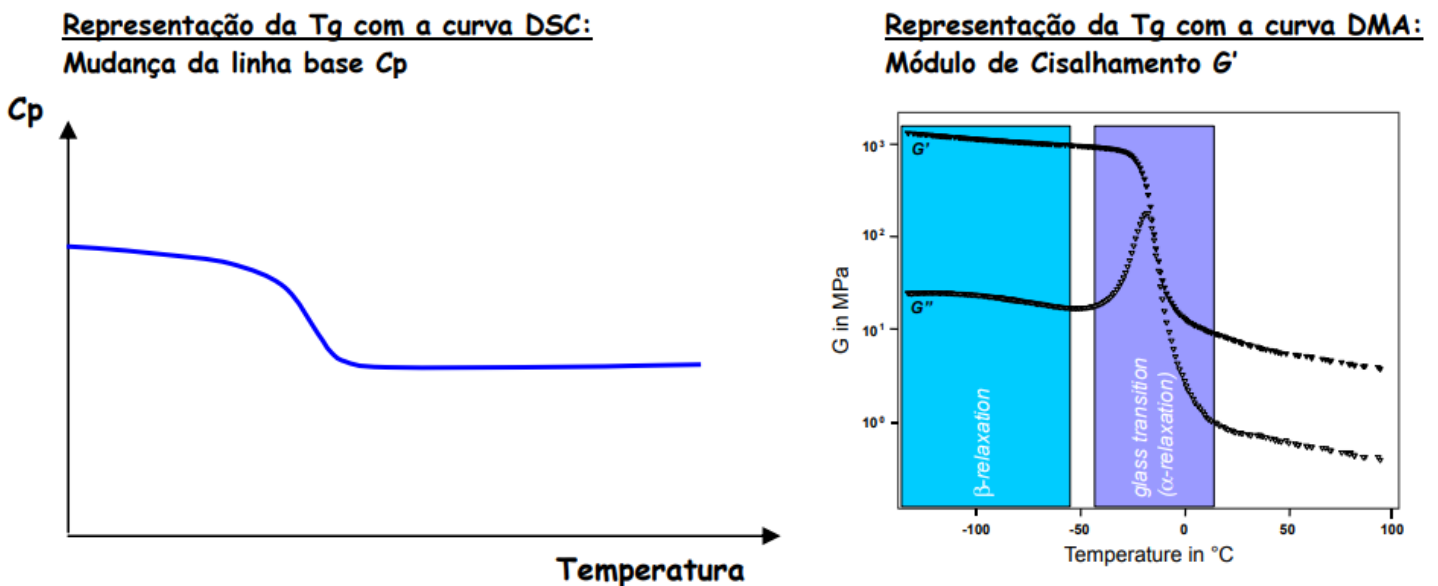
A transição vítrea ( $T_g$ ) é um importante efeito térmico que pode ser utilizado para a caracterização de plásticos e outros materiais amorfos ou semicristalinos (ex.: vidros inorgânicos ou alimentos, onde os componentes nos materiais alimentícios apresentam efeitos similares aos dos polímeros). A  $T_g$  é a propriedade do material onde podemos obter a temperatura da passagem do estado vítreo para um estado “maleável”, sem ocorrência de uma mudança estrutural. A parte amorfa do material (parte onde as cadeias moleculares estão desordenadas) é a responsável pela caracterização da Temperatura de Transição Vítrea. Abaixo da  $T_g$ , o material não tem energia interna suficiente para permitir deslocamento de uma cadeia com relação a outra por mudanças conformacionais. Portanto, quanto mais cristalino for o

material, menor será a representatividade da Transição Vítea.

Basicamente, Tg trata-se de uma transição termodinâmica de segunda ordem, isto é, afeta variáveis termodinâmicas secundárias. Algumas propriedades mudam com a Tg e, portanto, podem ser utilizadas para a sua determinação.

A garantia da temperatura de Tg é de suma importância neste trabalho, uma vez que está relacionado a resistência mecânica dos materiais compósitos. Ela pode ser medida tanto pela técnica de DSC (Calorimetria Exploratória Diferencial) onde a Tg é caracterizada pela mudança de Cp (Calor específico: mudança da linha base, dado em J/g°C), como pela técnica de DMA (Análise Dinâmico-Mecânica) ou TMA (Análise Termomecânica), onde a Tg pode ser caracterizada por outras propriedades físicas, tais como: Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Expansão Térmica (CTE). Exemplos nas figuras abaixo:

Figura 14 - Exemplos de medição de Tg



Fonte: PAIVA, 2006

A transição vítrea é importante para que um compósito polimérico possa atender aos requisitos de serviço exigidos, bem como elevadas propriedades mecânicas (tração, compressão, cisalhamento, etc.). A temperaturas da Tg identifica o limite máximo de serviço que o material pode sofrer com segurança, além disso essa característica pode ser afetada pela temperatura e umidade elevadas (PAIVA, 2006).

### 3.4 Processo de fabricação do compósito

A qualidade de um produto empregando-se material compósito é fortemente influenciada pelo processo de fabricação. Dependendo da exigência, características importantes, como frações volumétricas de fibra e matriz, orientação correta do reforço, tempo de trabalho da matriz e tempo de cura da matriz, podem nem sempre ser repetitivas se o processo de fabricação não for corretamente escolhido. A escolha inadequada pode também elevar o custo de produção contribuindo para a perda de competitividade do produto (Marinucci, 2019).

A taxa de crescimento de compósitos com matriz termoplástica é consideravelmente maior que para compósitos de matriz termorrígida. Isto ocorre devido ao grande uso de peças na indústria automobilística e a possibilidade de uma taxa de produção mais rápida com termoplásticos do que com a maioria das resinas termorrígidas. Os termoplásticos podem ser reprocessados e reciclados, não precisam ser estocados à baixa temperatura e são mais resistentes a ataques químicos que os termorrígidos, reduzindo assim os custos. Os polímeros termoplásticos têm sido uma alternativa de aplicação em estruturas devido à maior tenacidade à fratura, resistência ao impacto e tolerância a danos em relação aos polímeros termorrígidos (BUNSELL e RENARD, 2005). (BUNSELL e RENARD, 2005).

Conforme afirma Marinucci (2019), existem duas formas em que fibra e matriz podem ser combinadas para formar o compósito. Há o sistema pré-impregnado (dry system) e o sistema de impregnação na fabricação (wet system). No sistema dry system, a fibra é previamente impregnada, daí o nome de prepreg ou pré-impregnado, diante disso, é necessário que a cura da matriz seja retardada. Uma das condições para o trabalho com esse material é o armazenamento em freezers com temperatura controlada. As vantagens desse tipo de material são o controle do conteúdo de materiais voláteis, frações volumétricas bem estabelecidas, tempo de gelatinização controlado e uniformidade de espessura do laminado. No wet system, as fibras e matriz são combinadas no momento da fabricação da peça. Apresenta como vantagem o custo, porém exige do transformador técnicas para proporcionar uma correta molhabilidade das fibras e garantir quantidades de fibra e matriz no compósito de acordo com a especificação estabelecida. As variáveis que afetam a matriz estão associadas ao processo, destacando-se a viscosidade, o tempo de gelatinização (gel time) e a temperatura do ambiente.

Ele também cita que os processos de fabricação de peças, componentes e estruturas de material compósito podem ser divididos em processos de molde aberto e processos de molde fechado. A distinção está na qualidade do acabamento que se consegue nas superfícies do elemento fabricado e na quantidade de moldes necessários para a conformação da peça. São

exemplos de processos que utilizam molde aberto a laminação por contato (hand lay-up), a laminação por projeção (spray-up), o enrolamento filamental (filament winding) e a infusão.

O processo utilizado neste trabalho, que tem vasta aplicação nos processos de fabricação de pás eólicas, foi o processo de infusão.

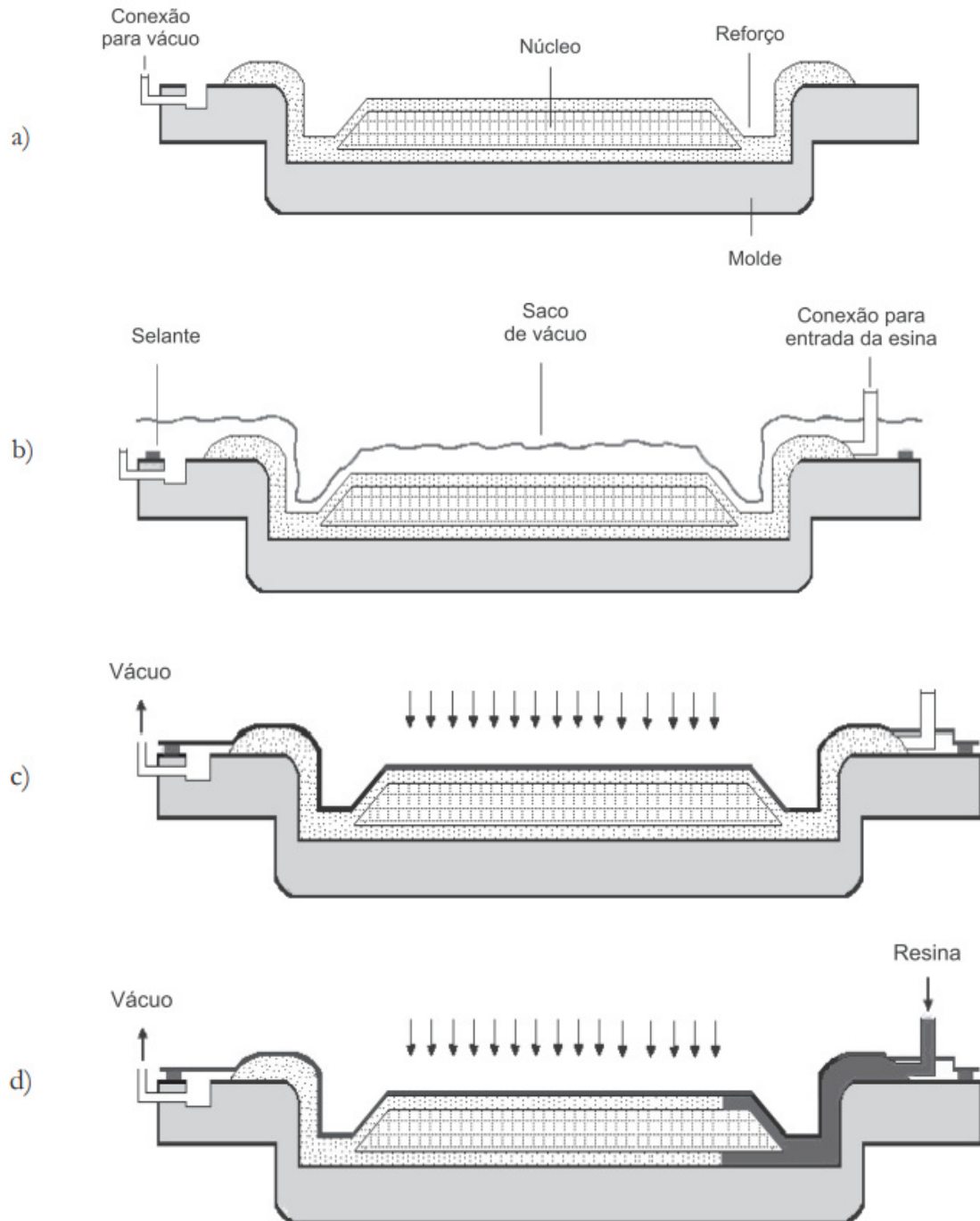
### **3.4.1 Infusão**

O processo de infusão a vácuo, conhecido como VIP – vacuum infusion process, é uma técnica que pode ser considerada como sendo de moldagem fechada, embora não tenha um par de moldes como nos processos vistos anteriormente. Isto porque utiliza apenas o molde que dará a forma geométrica à peça e um saco de vácuo. (Marinucci, 2019).

É um processo indicado para fabricação de peças de grande porte, como peças de ônibus, partes de veículos ferroviários e rodoviários de transporte de carga, iates, veleiros e pás eólicas. Devido à preparação do molde, o processo é indicado para baixa escala de produção. Oferece peças com regularidade de espessura e melhor controle dimensional e substitui com vantagens o processo de laminação com molde aberto devido à dificuldade que esse oferece na laminação de grandes áreas.

O processo por infusão acontece da seguinte forma: Após a preparação do molde (limpeza, aplicação do gel coat e do desmoldante), núcleos, mantas e/ou tecidos são posicionados na quantidade necessária para obter a espessura final desejada para a estrutura, executando um trabalho que se costuma chamar de alfaiataria. Sobre o reforço é colocado um filme plástico que deve ser devidamente selado por um adesivo que envolve toda a parte periférica do molde, formando o que se denomina de saco de vácuo. Utilizando uma bomba de vácuo, o ar que eventualmente esteja aprisionado no reforço é retirado e ocorre simultaneamente uma compactação do reforço contra o molde. Finalmente, a impregnação da manta é feita pela matriz que é succionada pelo vácuo criado sob o filme. O processo é realizado conforme esquema abaixo:

Figura 15 - Etapas do processo de infusão.



Fonte: Marinucci, 2019.

Os processos são: a) posicionamento da fibra e núcleos inerciais, b) fechamento do saco de vácuo, c) vácuo, d) injeção da matriz polimérica (resina).

Os maiores mercados para o processo de infusão são os setores náutico e o de energia eólica, esse último com a fabricação de pás que têm, entre outras dimensões, comprimentos que podem alcançar mais de 70 metros. O processo alia alta qualidade, rapidez e repetibilidade,

fatores que contribuem para substituir os processos de laminação por contato e laminação por projeção.

### 3.5 Energia eólica

A energia eólica é conhecida pelo homem há mais de 3.000 anos. De antemão a história da energia eólica começa quando civilizações utilizavam a força dos ventos, por meio de cata-ventos, para moer grãos, bombear água e transportar mercadorias em barcos a vela. Com o avanço da agricultura, o homem necessitava cada vez mais de ferramentas que o auxiliassem nas diversas etapas do trabalho. Muitas tarefas como a moagem dos grãos e o bombeamento de água exigiam cada vez mais esforço braçal e animal. Isso levou ao desenvolvimento de uma forma primitiva de moinho, que possuía um eixo vertical acionado por uma longa haste presa a ela. (Energês, 2020)

Energês (2020) também afirma que na Europa surgiram, por volta de 1430, os MOINHOS DE VENTO. Com a função de moer grãos e também capazes de controlar e drenar o excesso de água em regiões abaixo do nível do mar. Os moinhos de bombeamento Holandeses possuíam desenhos bastante detalhados. A base era construída em pedra, torre em madeira e pás que formavam um diâmetro de até 30 m, figura 15.

Figura 16 - Moinhos de vento.



Fonte: Energês (2020)

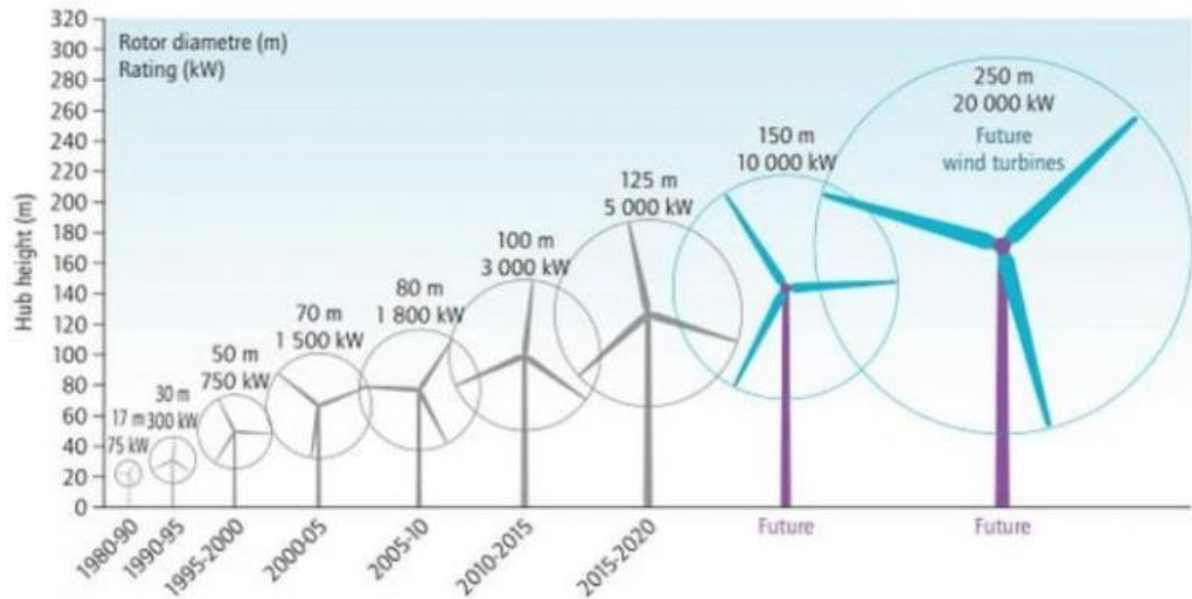


O início da adaptação dos cata-ventos para geração de energia elétrica teve início no final do século XIX. Em 1888, Charles F. Brush, um industrial voltado para eletrificação em campo, ergueu na cidade de Cleveland, nos EUA, o primeiro cata-vento destinado à geração de energia elétrica. Era um aerogerador que fornecia 12kW em corrente contínua para carregamento de baterias, as quais eram destinadas, sobretudo, para o fornecimento de energia para 350 lâmpadas incandescentes. Na Europa, por volta do ano de 1890, houve o interesse na ENERGIA EÓLICA COMO FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA. Surgiu então o primeiro programa governamental incentivando o desenvolvimento eólico. Entre 1897-1904 foram construídas mais de 70 turbinas com potências em torno de 25 kW. Porém ainda não havia conexão com a rede elétrica. Um dos primeiros passos para o desenvolvimento de aerogeradores de grande porte para aplicações elétricas foi dado na Rússia em 1931.

O aerogerador Balaclava, era um modelo avançado de 100 kW conectado, por uma linha de transmissão de 6,3 kV de 30 km, a uma usina termelétrica de 20 MW. Essa foi a primeira tentativa bem-sucedida de se conectar um aerogerador de corrente alternada com uma usina termelétrica.

A Segunda Guerra Mundial contribuiu para o desenvolvimento dos aerogeradores de médio e grande porte, uma vez que os países se empenhavam para economizar combustíveis fósseis. O aerogerador Smith-Putnam, apresentava 53,3 m de diâmetro, uma torre de 33,5 m de altura e duas pás de aço com 16 toneladas. Em 1952 (Dinamarca) ocorreu um marco primordial, que foi a elaboração do MAPA EÓLICO. Em 1957 (Dinamarca) surgiu o aerogerador Gedser, com potência de 200 kW com 24 m de diâmetro de rotor. Anos depois surgiu o AEROGERADOR MOD-I, com potência de 2 MW. E em 1987 (Hawaii), o AEROGERADOR MOD-5B já possuía uma potência 3,2 MW e pás de 100 m de diâmetro. (Energês, 2020).

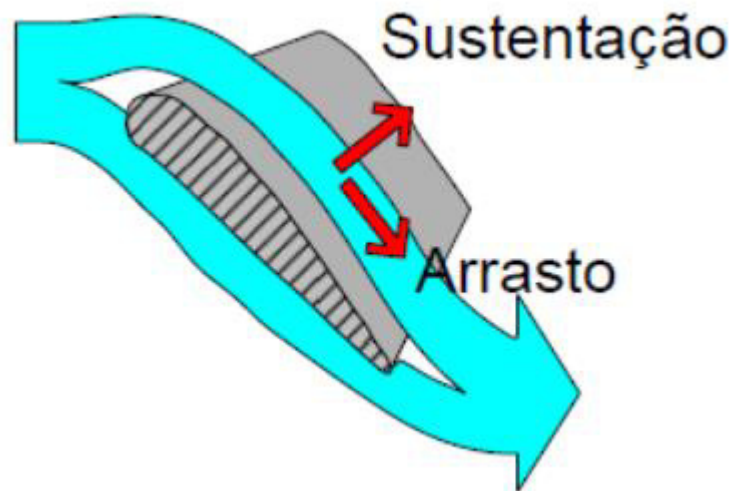
Figura 17 - Crescimento no tamanho das turbinas eólicas desde 1980 e perspectivas



Fonte: Adaptado de EWEA

Energês também fala do funcionamento do aerogeradores onde, em suma, Em suma, os aerogeradores funcionam a partir da transformação de energia do vento. Ou seja, a energia cinética do vento impulsiona as pás e se converte em energia mecânica. Assim, a partir da energia mecânica, ocorre a transformação para energia elétrica pelos geradores. O princípio de funcionamento de uma turbina eólica é basicamente em função das forças de sustentação e arrasto. É o mesmo princípio utilizado em aviões! A força de sustentação é perpendicular às superfícies das pás, surgindo a partir do diferencial de pressão entre as superfícies. Logo, isto cria uma área de baixa pressão sobre o lado mais longo da superfície. Como a pá está presa ao cubo do rotor, essa força irá causar a sua rotação. Por outro lado, a força de arrasto age em direção paralela às superfícies das pás, sendo responsável pela resistência ao movimento e ocasionando a diminuição da velocidade das mesmas.

Figura 18 - Principais forças de uma turbina na pá.



Fonte: SPALENZA CASER, 2016

A turbina eólica tem 4 componentes básicos, o rotor junto com as pás, onde o torque aerodinâmico é gerado, a nacelle que converte o torque em energia elétrica, a torre que sustenta a nacelle e as pás do rotor e que possui acesso a nacelle, e a fundação da construção que garante que turbina se mantenha em pé. (HANSEN, 2016).

Figura 19 - Componentes básicos de uma turbina.



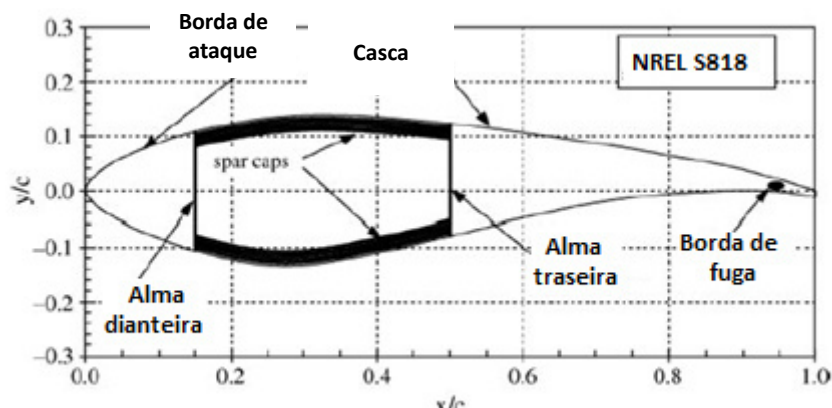
Fonte: HANSEN, 2016

### 3.5.1 Pá eólica

Segundo Arizona, 2019, as pás eólicas tratam-se de uma espécie de lâmina em forma de aerofólio que aproveitam a energia eólica e acionam o rotor de uma turbina. O desenho em forma de aerofólio (que proporciona elevação em uma aeronave de asa fixa) é usado para permitir que as pás exerçam elevação perpendicular à direção do vento. Este vetor de força atua sobre o rotor e é a força motriz da turbina eólica. Elas são consideradas como a peça mais crítica de uma turbina eólica por estarem sujeitas a enormes tensões e são fabricadas com tolerâncias apertadas. Elas devem ser equilibradas e mantidas dessa maneira a fim de minimizar qualquer quantidade de vibração que de outra forma destruiria a turbina eólica

Na fabricação de uma pá eólica, o intuito maior é construir uma estrutura forte e leve, desde que possa manter sua aerodinâmica. As lâminas, geralmente, apresentam geometria cônica e torcida. Então, o ideal é construir a pá em duas partes, uma casca e uma spar cap por vez. Os principais componentes de uma pá eólica são: as *spar caps* na região interior, superior e inferior da pá, além da *balsa-core skins* (casca) e por fim as *shear webs* (almas) (MANWELL, 2006).

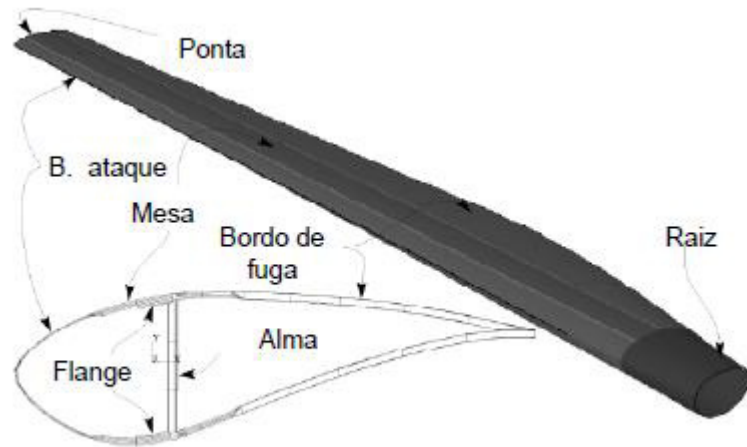
Figura 20. Componentes de uma pá eólica.



Fonte: Adaptado de MANWELL *et al.* (2006).

O mercado global de energia eólica continua crescendo em mais de 10% ao ano. A informação é do Conselho Global de Energia Eólica. Isso significa que até 10 mil novas pás eólicas terão que ser instaladas em todo o mundo nos próximos 20 anos. Atualmente, o tamanho de uma pá eólica pode ter 100 metros ou mais e pesar toneladas.

Figura 21 – Outra versão dos componentes de uma pá.



Fonte: BARROS (2010).

### 3.6 Propriedades mecânica dos polímeros

As propriedades mecânicas dos polímeros são especificadas por muitos dos mesmos parâmetros que são usados para os metais (modulo de elasticidade, limite de escoamento e limite de resistência à tração). Para muitos materiais poliméricos, um simples ensaio tensão-deformação é empregado para caracterizar alguns desses parâmetros mecânicos (Callister, 2012).

A configuração de um material compósito é fator determinante de suas propriedades mecânicas e é definida pelo número de lâminas (camadas) sobrepostas, bem como pelo ângulo de orientação entre as fibras. Com o crescente uso de materiais compósitos pela indústria se fez necessária a adoção de um padrão para identificação da configuração do material. Materiais compósitos com fibras unidirecionais, objeto deste trabalho, são identificados da seguinte maneira:  $[0^\circ]$ . Quando o número de camadas ( $n$ ) utilizado no processo é conhecido, a configuração do material pode ser identificada como:  $[0^\circ]_n$  (ADAMS, 2003).

### 3.6.1 *Ensaio de tração*

O ensaio de tração pode ser utilizado para avaliar diversas propriedades mecânicas dos materiais de grande importância em projetos de máquinas e equipamentos mecânicos; é também bastante utilizado como teste para controle de especificações da matéria prima fornecida. Sua ampla utilização na indústria de componentes mecânicos deve-se à vantagem de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais, como limite de resistência à tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, módulo de tenacidade, ductilidade, coeficiente de encruamento e coeficiente de resistência (LOPES, 2011, p.130). Os Ensaio de Tração fornecem dados quantitativos que permitem cálculos matemáticos para a determinação de parâmetros e coeficientes importantes, citados por Lopes (2011), para a análise de materiais.

Materiais compósitos, por poderem ser constituídos de uma imensa gama de materiais distintos e com diferentes arranjos, não possuem uma norma rígida em termos de ensaio de tração. No entanto, a ASTM D 3039/D 3039M busca padronizar ao máximo este procedimento, de maneira a garantir também certa flexibilidade e adequação às necessidades de cada material.

Existem cargas e tensões muito específicas que influenciam a estrutura de turbinas eólicas. De acordo com o comportamento do vento, as cargas são variáveis. Estas são mais difíceis de lidar do que as cargas estáticas, já que o material está sujeito à fadiga. Grandes estruturas são elásticas e as cargas variáveis criam interações elásticas que resultam em vibrações e ressonâncias, além de poder gerar componentes de carga dinâmicas elevadas. Então, a turbina e seus componentes devem ser capazes de suportar altas velocidades do vento para assim garantir uma vida útil de 20 a 30 anos (HAU, 2006).

Existem cargas e tensões muito específicas que influenciam a estrutura de turbinas eólicas. De acordo com o comportamento do vento, as cargas são variáveis. Estas são mais difíceis de lidar do que as cargas estáticas, já que o material está sujeito à fadiga. Grandes estruturas são elásticas e as cargas variáveis criam interações elásticas que resultam em vibrações e ressonâncias, além de poder gerar componentes de carga dinâmicas elevadas. Então, a turbina e seus componentes devem ser capazes de suportar altas velocidades do vento para assim garantir uma vida útil de 20 a 30 anos (HAU, 2006).

Na condição de tração na direção longitudinal, a resistência é tomada normalmente como a tensão máxima na curva tensão – deformação. De modo geral, corresponde à fratura da fibra e se mostra como o início da falha do compósito. A falha desse material é complexa, já

que diversos modos de falha diferentes são possíveis. Tudo dependerá das propriedades das fibras, da matriz, da natureza e da resistência da ligação interfacial do reforço com a matriz (CALLISTER 2012). Para o cálculo da tensão é necessário o uso da Equação 1:

Equação 1: Fórmula tensão.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Onde  $\sigma$  é representa a resistência a tração (Mpa),  $F$  é a força medida (N) e a  $A$  área da seção transversal ( $\text{mm}^2$ ) do corpo de prova.

No cálculo dos valores de deformação  $\varepsilon$  é necessário o uso da seguinte equação (ALCÂNTARA, 2003):

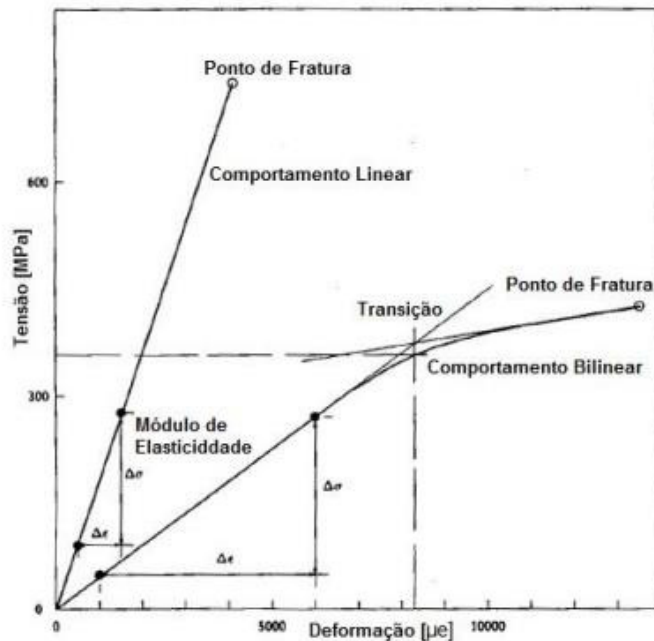
Equação 2: Deformação.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Onde  $\varepsilon$  representa a deformação na direção do esforço no sentido axial (%),  $\Delta L$  é a variação de comprimento (mm) e  $L_0$  é o comprimento original da amostra.

O ensaio de tração consiste em submeter o corpo de prova a um deslocamento constante ao longo da direção de orientação das fibras, medindo como resposta do material sua força de resistência a esse deslocamento. As propriedades do material medidas através deste ensaio, para a direção correspondente ao mesmo, são: tensão de fratura, deformação de fratura, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e deformação de transição. Esta última é observada para alguns compósitos que apresentam uma mudança significativa na inclinação da curva tensão – deformação, apresentando um comportamento bilinear. Este, no entanto, não é o caso mais comumente observado (ADAMS, 2003).

Figura 22 - Curva tensão x deformação para compósitos.



Fonte: ADAMS, 2003

## 4 METODOLOGIA

Com o objetivo de conhecer e diferenciar e conhecer as características dos compósitos utilizados para a confecção dos corpos de prova, foi realizado ensaios de tração e dureza. Dessa forma é possível conhecer as propriedades mecânicas a resistência à tração do material e a deformação máximas das amostras.

Agora, serão apresentados as máquinas e materiais utilizados no estudo em questão, assim como todos os métodos utilizados para infusão dos laminados e os testes realizados nas amostras, onde todos os materiais e máquinas foram cedidos pela empresa Aeris Energy e para os testes realizados subsequentemente foram utilizadas máquinas localizadas no Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará.

### 4.1.1 Máquinas

#### 4.1.1.1 Molde com aquecimento

Para a confecção dos laminados para testes e análises das propriedades mecânicas, foi utilizado o molde da linha produtiva que estava liberado para uso, onde o mesmo possui aquecimento próprio através de resistências instaladas na parte externa do molde, deixando os



laminados o mais real possível de sua aplicação final. De acordo com Costa (1999), aumentando a temperatura da reação consequentemente aumenta exponencialmente a velocidade de reação da resina.

#### **4.1.1.2 Bomba de vácuo**

Para a confecção dos laminados por infusão, é extremamente necessário o uso de uma bomba de vácuo no processo. Para os laminados em questão, a bomba de vácuo utilizada foi a de marca WIKA sendo do modelo RA 100. Ela tem como principal objetivo realizar a sucção do ar presente no material a ser utilizado, onde uma vez totalmente vedado esta máquina ira conseguir realizar a retirada em 100% do ar da peça. A bomba também irá atuar na orientação do fluxo de resina uma vez que o processo é por infusão.

A bomba de vácuo, mostrada na Figura 23, rotativa utilizada foi da marca Busch, modelo RA 100. Essa máquina foi utilizada nos experimentos mais especificamente na criação de todas as placas de laminado. Sua funcionalidade é direcionada na sucção do ar presente entre os materiais que compõem o ambiente preparatório do laminado. Desde que o lay-up seja eficientemente vedado, a máquina proporciona a retirada desse ar por completa. Ela também atua na entrada da resina que vai impregnar em todo o tecido de fibra de vidro.

Figura 23 - Bomba de vácuo WIKA RA 100



Fonte: Autor

### 4.1.1.3 Materiais para confecção dos laminados

Para o estudo em questão, foram utilizados materiais tais quais são utilizados para confecção de pás eólicas, materiais utilizados desde os pré-fabricados da pá, até a confecção da casca principal. Os materiais utilizados nesse processo necessitam de especificações técnicas para garantia da qualidade na impregnação da resina no tecido evitando assim problemas relacionados a infusão.

O reforço de fibra para confecção dos laminados possui gramatura de 1200 g/m<sup>2</sup> em todas as amostras, a diferença entre elas está na direção da fibra, onde possuem orientação no sentido unidirecional a 0°, bidirecional a +/- 45° e tridirecional a 0°, +/-45°. Os dados técnicos das fibras encontram-se na tabela abaixo:

Tabela 1 - Datasheet das fibras

<b>DATASHEET DOS MATERIAIS</b>			
Tipo do tecido	<b>UD</b>	<b>Biax</b>	<b>Triax</b>
Direção da fibra	0°	+/-45°	+/-45° / 0°
Calculada g/m <sup>2</sup>	1134 (+/-59,1)	1210 (+36/-61)	1175 (+36/-59)
Material	WindStrand® 2000 Roving	Advantex® Glass Fibers	Advantex® Glass Fibers
Fabricante	SAERTEX	OC_BR	OC_BR
Diâmetro do filamento	17μ	17μ	17μ
Compatibilidade do Sizing	EP	EP	EP
Tipo de Sizing	SE1500	SE1500	SE1500

A matriz para a confecção dos laminados em questão foi com resina epóxi, com descrição EPOXI RESIN MGS RIMR 035C – USA e o endurecedor com descrição EPOXY RESIN MGS RIMH 037.

Tabela 2 - Datasheet da resina epóxi

<b>Propriedade</b>	<b>UM</b>	<b>Valor</b>	<b>Norma</b>
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	Aprox. 1,15	DIN EN ISO 1183-1
Resistência a Flexão	MPa	Aprox. 115	DIN EN ISO 178
Módulo de Elasticidade	Gpa	Aprox. 3,1	DIN EN ISO 178
Resistência a Tração	MPa	Aprox. 70	DIN EN ISO 527-2
Alongamento na Fratura	%	7 - 10	DIN EN ISO 527-2

O processo para a confecção das placas de laminado seguiram o processo de VIP – Vacuum infusion process (infusão a vácuo), que consiste numa técnica complexa e que envolve

vários materiais e cuidados significativos que possam garantir uma estrutura o mais próximo possível da peça fabricada em série.

#### 4.1.2 Criação das placas de laminado

O processo de criação de placas de laminado foi realizado através do método de Vacuum Infusion Process (VIP), método conhecido como infusão a vácuo, que consiste numa técnica complexa e que envolve vários materiais e cuidados significativos que possam garantir uma estrutura o mais próximo possível da peça fabricada em série. Um dos maiores problemas na realização de experimentos com processo de infusão a vácuo é a quantidade de ar que pode entrar no plano por meio de pequenos furos, rugas ou outras áreas sem isolamento devido. Na fase de construção do plano de infusão ideal para os ensaios, houve alguns dessas infiltrações de ar, não impregnação de resina e defeitos pós-cura. Ao longo da criação de vários planos de infusão, foram criadas novas formas de distribuição e posicionamento dos materiais envolvidos para conseguir chegar num padrão ideal que não gerasse defeitos.

Os materiais de construção do plano de infusão e a funcionalidade de cada um estão descritos na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 3 - Lista de materiais utilizados

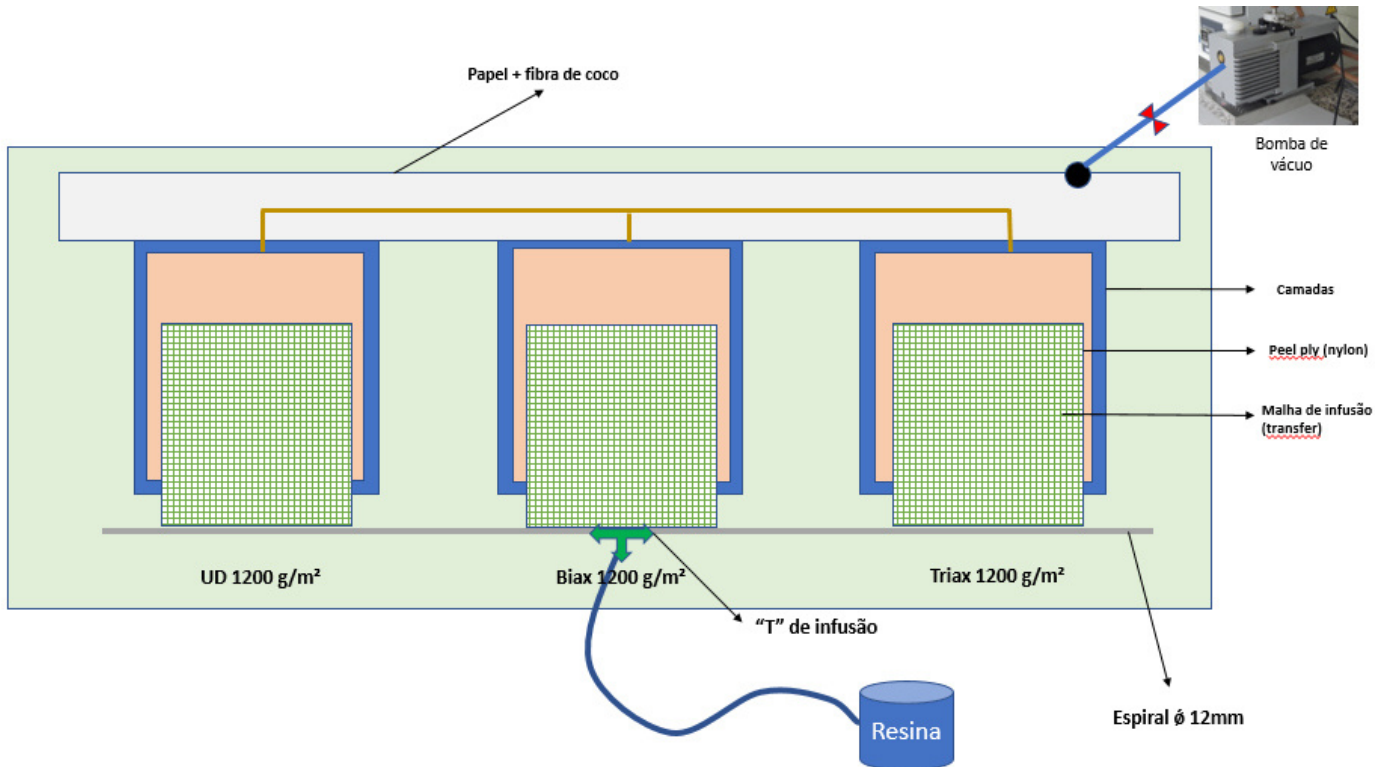
#### LISTA DE MATERIAIS - CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS

Material	Funcionalidade
Desmoldante	Auxílio na desmoldagem da placa
Plástico de vácuo no molde	Evitar contato das amostras de teste com o molde de produção
Fibra de vidro	Base para construção do laminado - Fase Fibra
Fibra de coco	Evitar infiltração de ar
Malha de infusão - Transfer	Auxílio no fluxo de resina durante a infusão
"T" de infusão	Sucção de vácuo e entrada de resina
Mangueira aço mola	Garantir vácuo da peça sem deformações na mangueira
Fita de borracha - Bambam	Vedação entre o plástico de vácuo e o molde
Plástico de vácuo nas amostras	Vedação da região de infusão / Garantia da ausência de ar
Resina + Endurecedor	Criação da fase matriz do compósito

Fonte: Elaborada pelo autor.

O projeto de plano de infusão ideal para criação dos três diferentes tipos de fibras, assim como a estrutura para criação dos laminados, foi todo desenhado em Power Point,

conforme esquema abaixo:



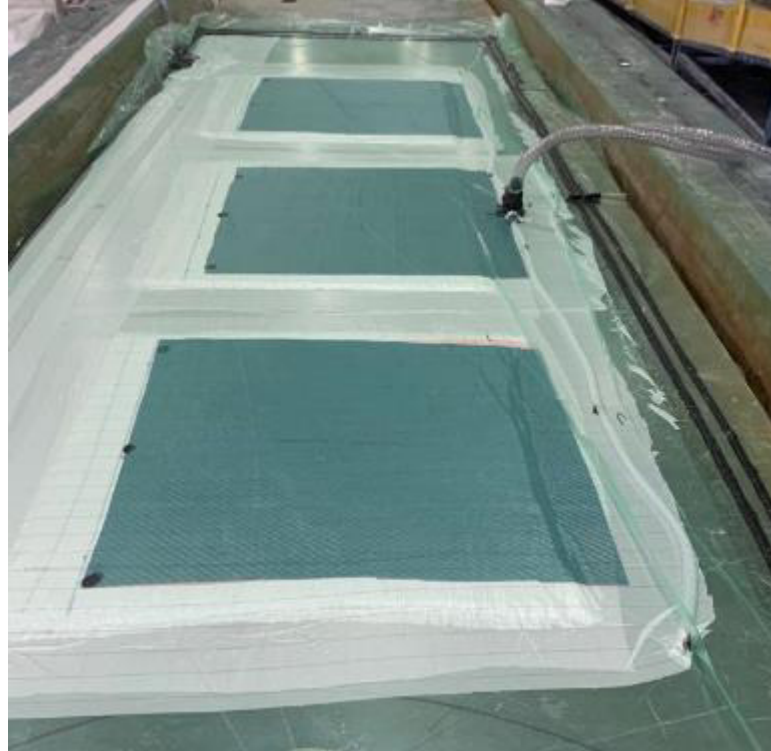
Fonte: Elaborada pelo autor.

Todos os 3 laminados passaram pelo mesmo processo de infusão, possuíam o mesmo plano de infusão e estavam todos submetidos à mesma temperatura ambiente e temperatura de aquecimento do molde, logo todos estavam exatamente nas mesmas configurações a critério de comparação entre eles.

Na primeira etapa do processo, foi feita a limpeza e preparação química do molde, onde foi utilizado o desmoldante para facilitar no método de desmoldagem dos laminados. Em seguida, foi posicionado o plástico de vácuo para fazer a proteção da região de laminação das amostras. Posteriormente foi dado início ao processo de layup, onde todas as camadas foram cortadas com um dimensional de 800x800mm. Como foi possível ser observado no esquema acima, o processo de layup foi dividido em 3 amostras em um mesmo molde e momento de processo, onde cada amostra representava uma orientação da fibra, sendo elas: UD, Biax e Triax, todos 1200 g/m², possuindo 8 camadas de cada. Finalizando o posicionamento das camadas, foi então iniciado o posicionamento do plano de infusão, que basicamente se caracterizava pelos posicionamentos do peel ply, manta de infusão (transfer), papel para conexão do vácuo nas amostras, manta fibra de coco, espiral como condutor de resina e o T de infusão. A confecção das amostras foi então finalizada com o posicionamento do plástico de

vácuo, onde o mesmo tem como objetivo criar uma bolsa de proteção do laminado com o ambiente/ar.

Figura 24 - Amostras em processo pós posicionamento do plástico de vácuo



Fonte: Autor

Após toda montagem do layup de camadas, plano de infusão e posicionado do plástico de vácuo, foi realizado o teste de vácuo da rede de vácuo do molde, com o intuito de ter a garantia que a rede de vácuo não possuía nenhuma passagem de ar (critério utilizado: durante 20 minutos, variação precisaria ser de no máximo 5mbar) e, em seguida, foi realizado o teste de vácuo dos laminados, garantindo então que não possuía nenhuma variação crítica entre o plástico de vácuo e as amostras/ambiente (critério utilizado: durante 10 minutos, variação precisaria ser <20mbar).

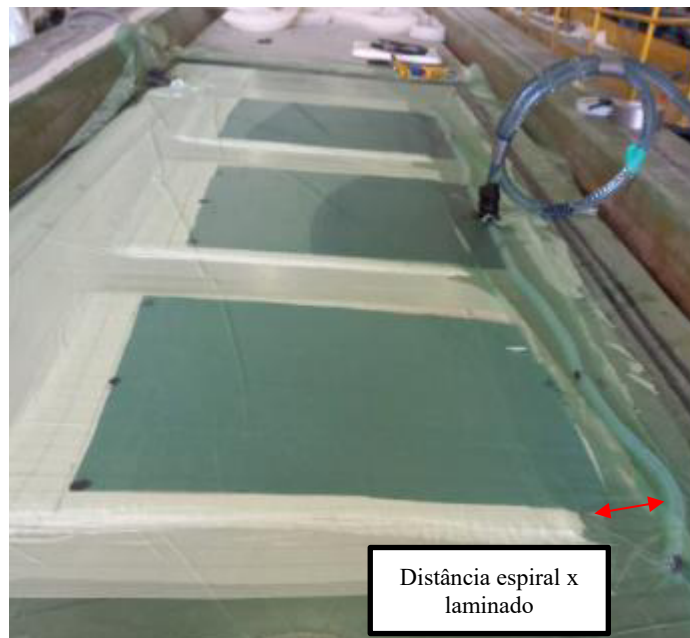
Figura 25 - Teste de vácuo das amostras (2mbar em 10 min)



Fonte: Autor

Com os parâmetros de vácuo garantidos, foi possível então se iniciar a infusão. O fluxo de infusão seguiu conforme imagem abaixo, onde o fluxo mais lento se deu na fibra que possuía apenas uma orientação (UD). Isso se deu devido a uma movimentação do espiral que ocorreu durante o vácuo do plástico, ficando assim o condutor de resina mais distante do laminado, gerando esse atraso no fluxo.

Figura 26 - Fluxo de infusão

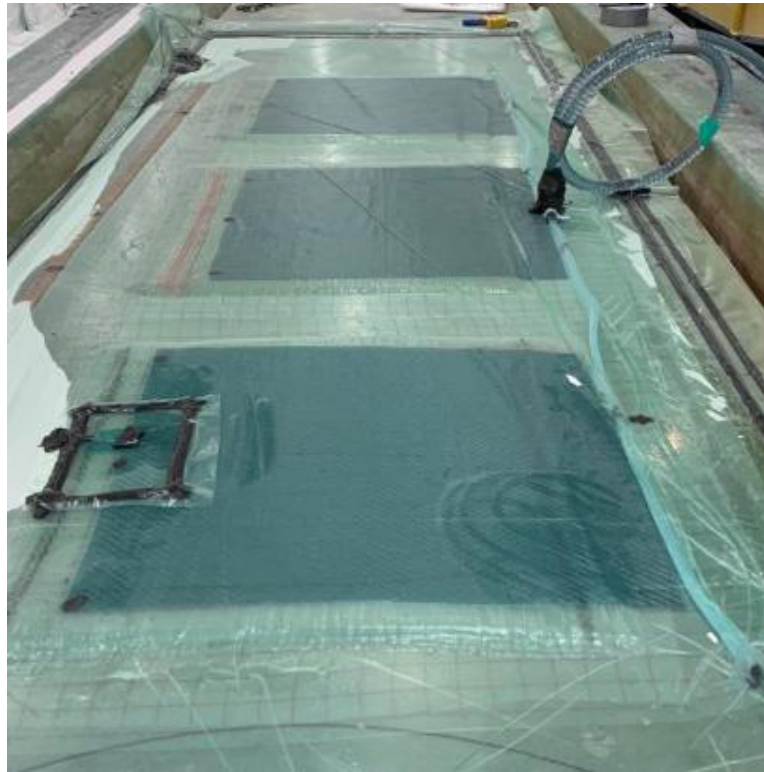


Fonte: Autor

Como forma de conter o problema, foi adicionado mais uma entrada de vácuo extra no centro do laminado de UD para que fosse possível aumentar o fluxo de resina na região.

Desta forma, foi possível finalizar a infusão sem nenhuma anomalia.

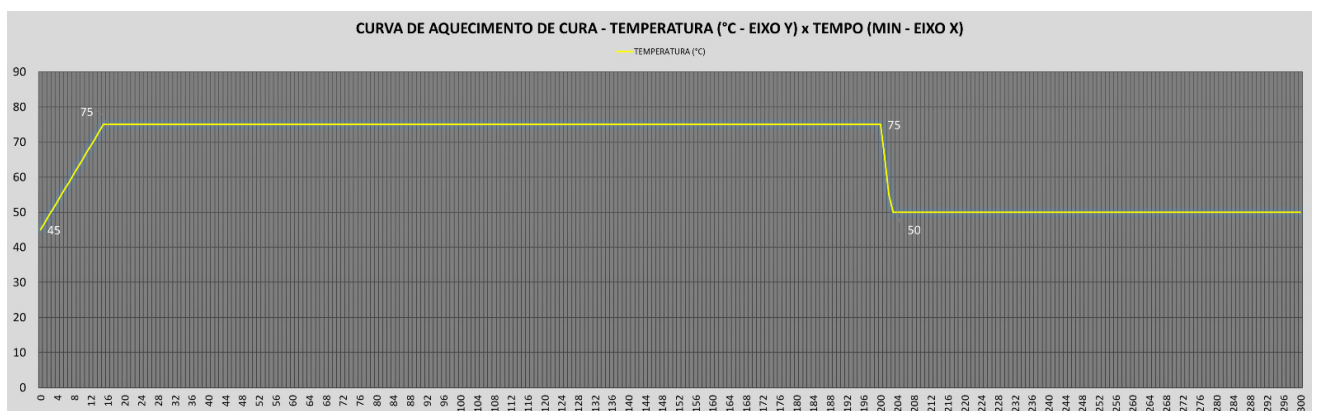
Figura 27 - Infusão finalizada



Fonte: Autor

Após a finalização da infusão, foi ativado então o programa de cura das peças, onde o mesmo seguiu a seguinte curva de aquecimento:

Figura 28 - Curva de aquecimento de cura dos laminados



Fonte: Autor

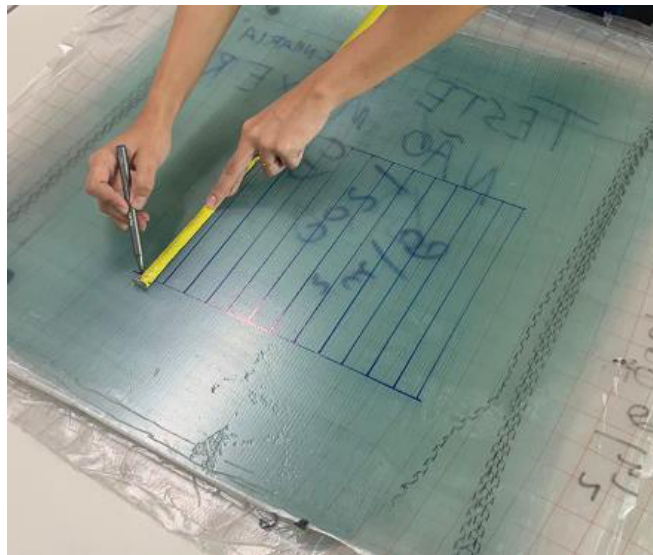
Desta forma, a cura dos laminados possuiu um tempo total de 300 minutos, incluindo pico exotérmico e resfriamento. A temperatura de pico exotérmico foi de 75°C, se mantendo nesta temperatura por 185 minutos, e a temperatura de resfriamento foi de 50°C

durante 100 minutos, garantindo assim a temperatura adequada para desmoldagem, que é 45°C (5°C abaixo do TG (TG: 50°C para peças pré-fabricadas)).

#### 4.1.3 Criação dos corpos de prova

O corte para a criação dos corpos de prova foi realizado com base na norma ASTM 3039. Após todas as peças estarem curadas, foi realizado a marcação dos corpos de prova em cima do laminado para posterior corte. Os cortes foram todos realizados em regiões que possuíam a maior qualidade com relação a infusão e impregnação da resina no tecido.

Figura 29 - Processo de marcação das regiões de corte



Fonte: Autor

Figura 30 - Placa marcada para corte

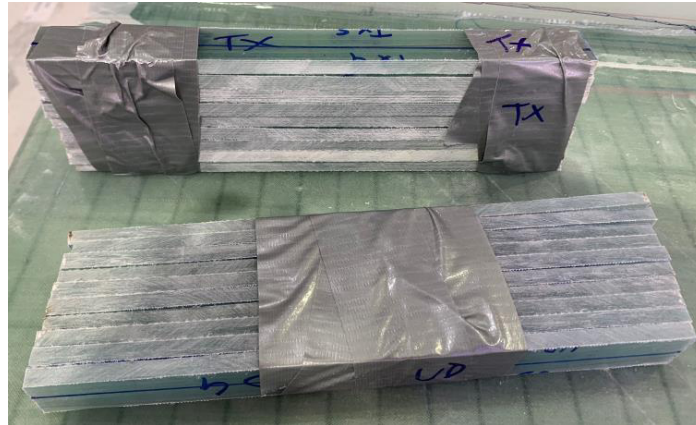


Fonte: Autor



Após a marcação, foi então realizado o processo de corte das amostras que serão utilizadas para o teste de tração. ISSO 527-5 tipo A, relata que se faz necessário pelo menos 6 amostras no mínimo para que seja determinado a resistência a tração de um laminado, tensão máxima de ruptura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. As amostras foram todas cortadas com uma máquina policorte.

Figura 31 - Amostras cortadas



Fonte: Autor

Figura 32 - Largura das amostras



Fonte: Autor

Com as amostras já cortadas, foram realizadas as medições de todas as seções de amostras para verificação do dimensional conforme solicita ASTM D3039. Na tabela abaixo mostra todas as informações de dimensional:

Tabela 4 - Dimensional das amostras

	UD 1200 g/m <sup>2</sup>		BIAx 1200 g/m <sup>2</sup>		TRIAx 1200 g/m <sup>2</sup>	
	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)
CP1	25,5	6,88	26,93	6,77	26,05	7,5
CP2	26	6,82	25,73	6,85	25,15	7,45
CP3	25,9	6,75	26,9	6,8	26,3	7,28
CP4	25,7	6,67	25,35	7	26,8	7,45
CP5	26,4	6,83	26,2	6,87	26,3	7,45
CP6	26,8	6,66	25,4	6,9	26,5	7,37

Fonte: elaborada pelo autor

#### 4.1.4 Teste de transição vítrea

Para identificar a temperatura de transição vítrea (T<sub>g</sub>) foi utilizado o método de calorimetria exploratória diferencial (DSC). Esta técnica também consiste em observar perfis de cura de sistemas reagentes e a determinação das melhores condições de preparação de compósitos. Esse método funciona através de uma reação exotérmica que mostra a taxa de geração de calor num pico máximo e mínimo, assim proporcionando o fluxo de calor em função da temperatura e fluxo de calor em função do tempo (COSTA, 1999).

Foram coletados fragmentos das três placas confeccionadas, de modo a não ter nenhum tipo de contaminação para comprometer os resultados. Estes ensaios foram realizados no laboratório de materiais da empresa Aeris Energy seguindo a norma ASTM 2584.

Figura 33 - Amostras antes do ensaio de T<sub>g</sub>



Fonte: Autor

Figura 34 - Dimensional do cadinho utilizado para o teste de Tg



Fonte: Autor

#### **4.1.5 Ensaio de tração**

O ensaio de tração para o estudo em questão foi realizado no Laboratório de Pesquisa e Tecnologia da Soldagem (LPTS) para as amostras de Biax e no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) para as amostras de UD e Triax. Inicialmente os ensaios seriam todos realizados no LPTS, porém as amostras de UD e de Triax, durante o ensaio, excederam o limite de carga da máquina, sendo então necessário utilizar uma máquina com limite de carga maior. O LPTS possui uma máquina MTS 810 (Material Testing System) com garras hidráulicas, capaz de realizar ensaios mecânicos diversos, e possuindo uma capacidade de 100Kn. Na figura 36 mostra a máquina e na figura 37 apresenta-se seus fixadores:

Figura 35. Máquina MTS



Fonte: Autor

Figura 36 - Fixadores com a amostra de ensaio



Fonte: Autor

O LMCC possui uma máquina EMIC 23-300 com garras hidráulicas, também capaz de realizar ensaios mecânicos diversos, e possuindo uma capacidade de 300kN. Na figura 38 mostra a máquina e seus fixadores.

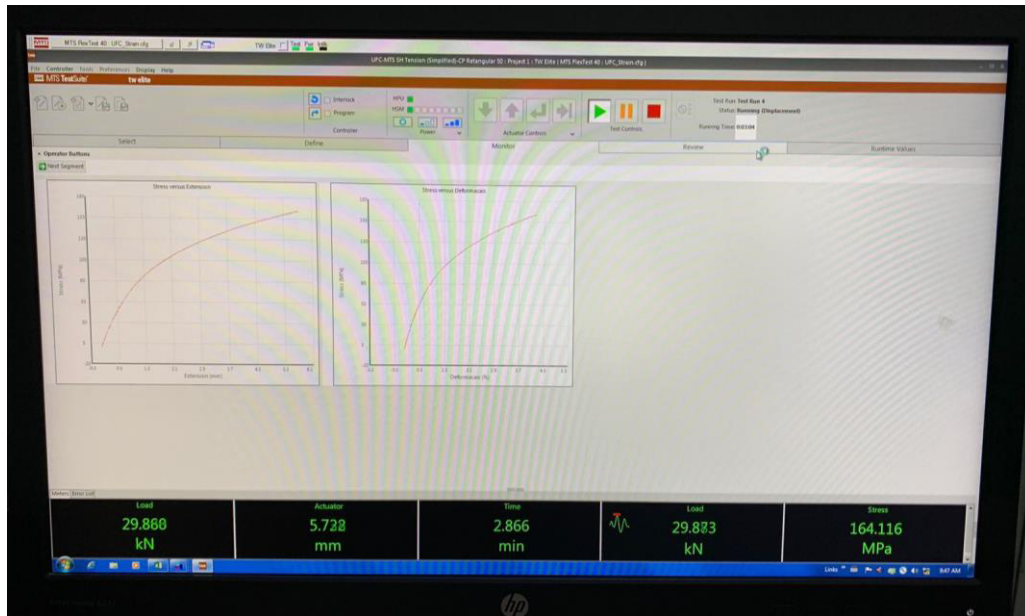
Figura 37 - Máquina EMIC 23-300



Fonte: Autor

Para se iniciar a operação da máquina, o operador fez as verificações necessárias para a realização do ensaio, tais como verificação de componentes elétricos e mecânicos. Após isto, foi feito então a etapa de fixação da amostra, onde a mesma foi presa no fixador superior (fixador fixo) e em seguida presa ao fixador inferior, dando assim início ao ensaio. O ensaio se dá, basicamente, na movimentação do fixador inferior até que chegue no ponto da fratura do corpo de prova. Em paralelo a movimentação do fixador, no monitor diretamente vinculado a máquina, se forma então o gráfico de tensão x deformação para acompanhamento do operador, assim como a carga que está sendo suportada pelo corpo de prova em análise.

Figura 38 - Monitor no momento do ensaio



Fonte: Autor

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados nas amostras do estudo deste trabalho, tais como: ensaio de temperatura de transição vítrea realizado no DSC, ensaio de tração realizado na máquina MTS e máquina EMIC 23-300.

### 5.1.1 Teste de transição vítrea

A partir dos fragmentos das três diferentes placas de materiais compósitos que foram confeccionadas, foram inseridas as temperaturas encontrados na Tabela 3.

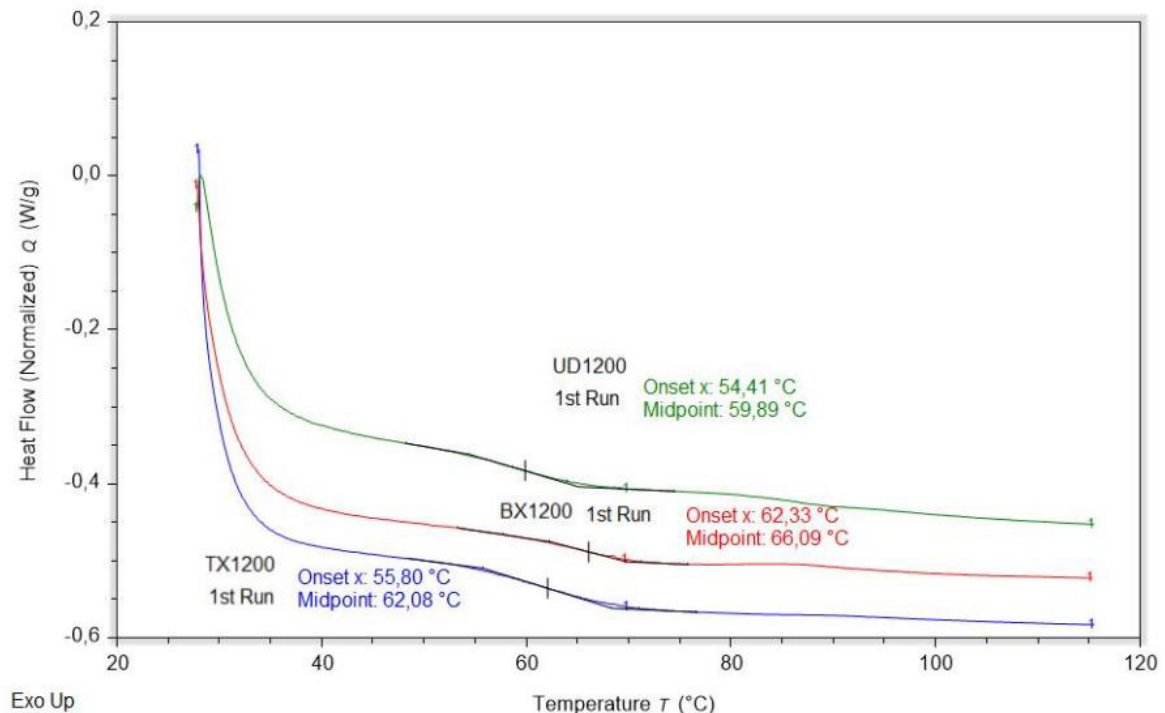
Tabela 5. Resultado T<sub>g</sub>.

Amostra	Onset (°C)	Midpoint (°C)
UD 1200 g/m <sup>2</sup>	54,11	59,89
Bx 1200 g/m <sup>2</sup>	62,33	66,09
Tx 1200 g/m <sup>2</sup>	55,8	62,08

Fonte: Autor.

A média das temperaturas de transição vítrea entre as amostras para teste foi de 62,69 °C e os resultados do ensaio são mostrados no gráfico abaixo:

Figura 39 - Ensaio de transição vítrea dos laminados de Bx, UD e Tx.



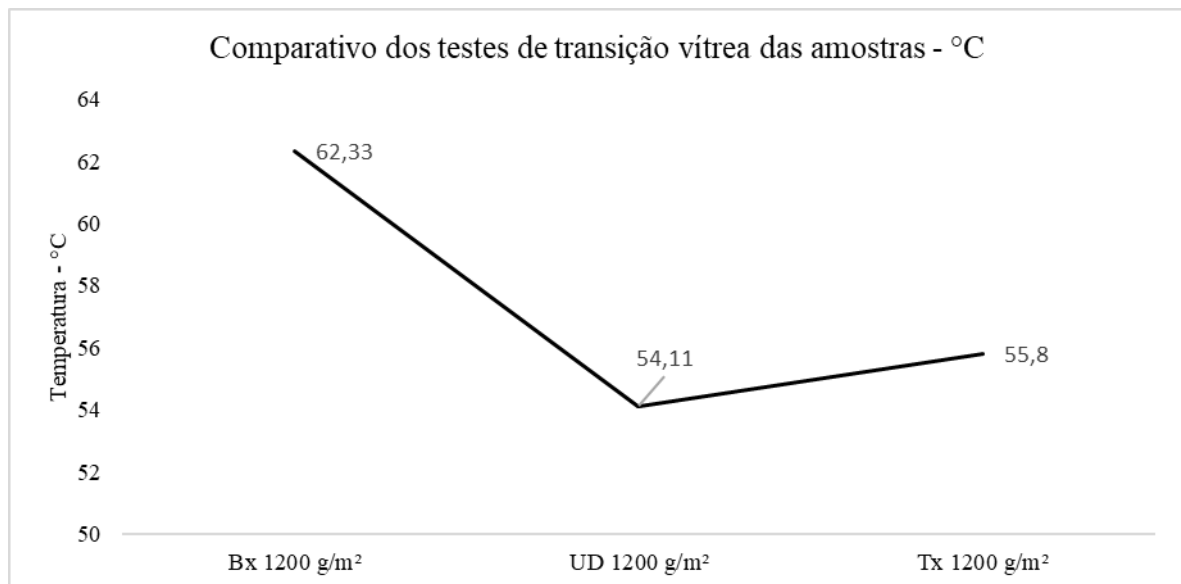
Fonte: Laboratório de materiais – Aeris Energy

No teste, foi possível observar que a amostra de Triax, onde seu resultado de Tg foi de 55,8°C, possui uma temperatura de Tg maior que a amostra de UD em cerca de 3%, porém se demonstrou com resultado menor que a amostra de Biax em cerca de 11,7%. A amostra de UD, com temperatura de Tg 54,11°C, se demonstrou ser a menor de todas as temperaturas encontradas, sendo menor em 15,19% se comparada a amostra de Biax e 3,12% se comparada a amostra de Triax. A amostra que possuiu um melhor resultado de temperatura de Tg foi a amostra com laminado de Biax, onde a mesma apresentou 62,33°C, sendo então maior que a amostra de UD em 13,18% e maior que a amostra de Triax em 10,47%.

É importante salientar que todas as amostras tiveram resultados positivos, ou seja, acima do que se é esperado para o tipo de resina utilizada (resina epóxi) e quantidade de camadas do laminado. Para componentes pré-fabricados e acessórios, se faz necessário que a temperatura mínima de transição vítrea, para a aplicação do material, seja de 50°C.

A transição vítrea é um importante parâmetro nas áreas de processamento, pesquisa e desenvolvimento de materiais, devido à grande importância com relação às mudanças das propriedades relacionadas a esses materiais, onde se pode estudar o comportamento de processabilidade em função da temperatura. Esta é então uma das características importantes sobre a capacidade de o material ter sua resistência mecânica garantida para os tipos de serviços que se propõe. Desta forma, a partir dos dados obtidos nas análises, a amostra que tem a maior capacidade de garantir suas propriedades mecânicas resistindo a maiores temperaturas, se comparada as demais amostras do estudo, é a amostra de laminado Biax 1200 g/m<sup>2</sup>.

Figura 40 - Comparativo dos testes de transição vítrea das amostras



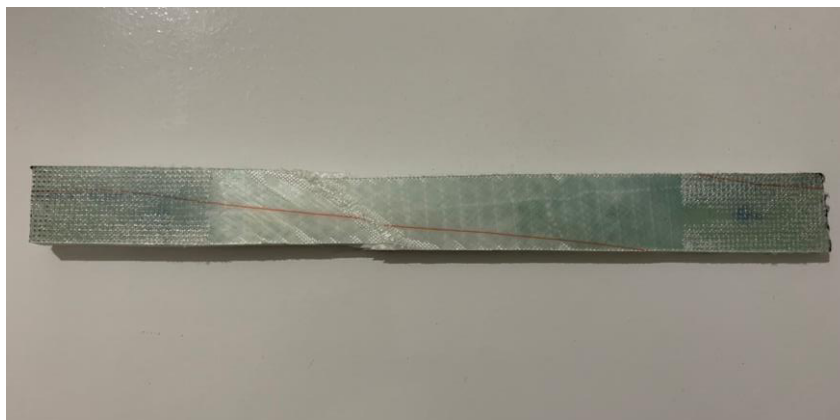
Fonte: Autor

### 5.1.2 Ensaio de Tração

Para dar início aos ensaios, primeiramente foi utilizado um corpo de prova para realizar a verificação da máquina afim de conferir a precisão desta. A amostra utilizada seguiu todos os dimensionais solicitados via norma para a garantia do resultado do teste.



Figura 41 - Figura 42. Teste de precisão da máquina de tração – Amostra de Biax.



Fonte: Autor

O resultado do ensaio da amostra teste suportou uma carga de 34,38kN até sua ruptura, logo o resultado ficou dentro da faixa de medição que a máquina suporta, sendo ela o máximo de 100kN. Já para as amostras de Biax e UD, as mesmas excederam o limite da máquina, necessitando então que seja realizado os ensaios em uma máquina que suportasse uma maior carga, como a de 300kN utilizada para os ensaios.

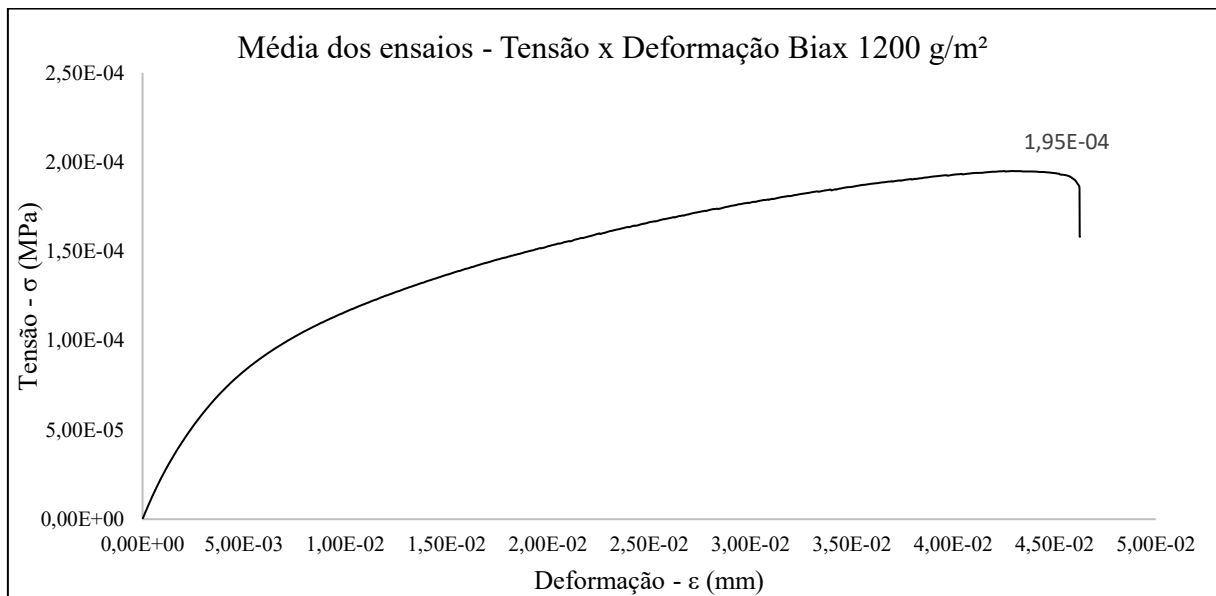
A norma ISO 527-5 indica que são necessárias 6 amostras para cada tipo de situação a ser realizado ensaio, onde as mesmas foram identificadas para controle. Diante da situação do teste realizado acima, as primeiras amostras a serem realizadas o teste foram as amostras de Biax no LPTS. Em seguida foram realizados os ensaios nas amostras de UD e Triax, respectivamente, no LMCC. Seguindo o procedimento padrão, as amostras foram então fixadas e alongadas até que chegassem em sua ruptura. No *software* do computador da máquina foram criados três arquivos correspondentes aos três cenários estudados, nos quais cada um recebeu os dados de ruptura de cada amostra.

Para o ensaio de tração do laminado de Biax, a máquina revelou a carga suportada pela amostra e deformação gerada no material. Com base nos dados de carga e tendo conhecimento da área, foi possível então gerar os dados e gráficos de Tensão através do Excel Microsoft. O dado de deformação foi dado através do software utilizado durante o ensaio.

Tabela 6. Tensões de ruptura das amostras de Biax 1200 g/m<sup>2</sup>.

	Corpo de prova	Carga (kN)	Carga (N)	Área (mm <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)
BIAx 1200 g/m <sup>2</sup>	CP1	34,385	0,034385	182,92	1,88 x 10 <sup>-04</sup>
	CP2	33,31	0,03331	176,2505	1,89 x 10 <sup>-04</sup>
	CP3	35,19	0,03519	182,3161	1,93 x 10 <sup>-04</sup>
	CP4	36,71	0,03671	179,994	2,04 x 10 <sup>-04</sup>
	CP5	36,68	0,03668	177,45	2,07 x 10 <sup>-04</sup>
	CP6	34,9	0,0349	175,26	1,99 x 10 <sup>-04</sup>

Fonte: Autor

Figura 42- Gráfico tensão x deformação - Biax 1200 g/m<sup>2</sup>

Fonte: Autor

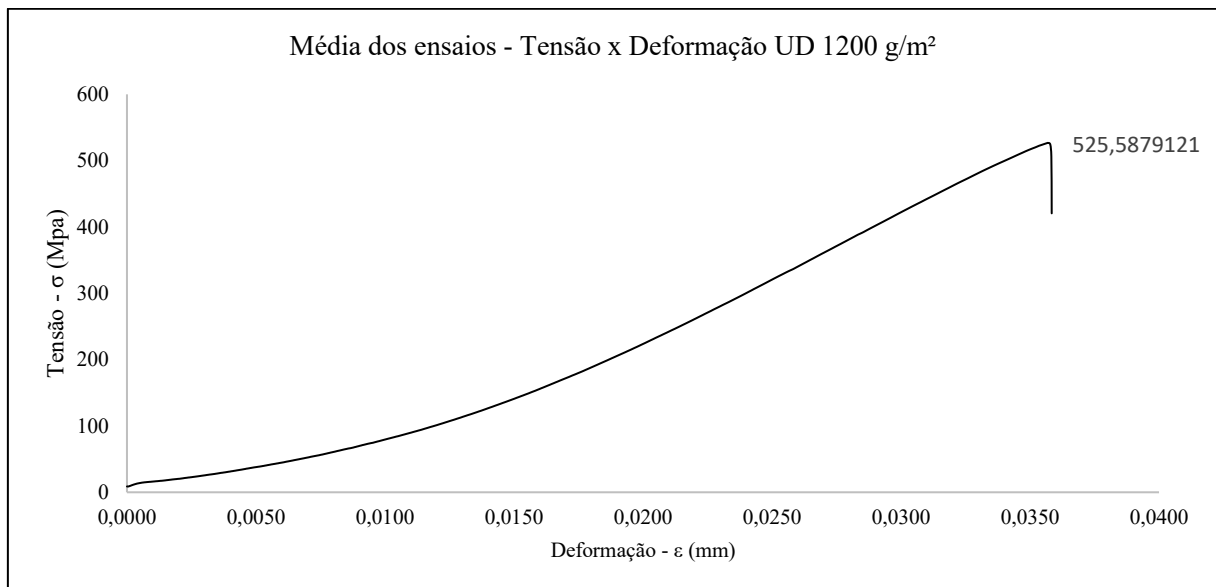
Os valores encontrados nos ensaios mostram que a maior carga suportada entre as amostras foi de 36,71kN, que corresponde ao corpo de prova CP4, e tensão máxima de  $2,04 \times 10^{-04}$ . O corpo de prova que suportou menor carga foi o CP2, onde o mesmo suportou 33,31Kn e sua tensão foi de  $1,89 \times 10^{-04}$ . Desta forma, as amostras entre si, do maior valor obtido se comparado ao menor valor obtivo, possuem uma diferença de 7%.

Para o ensaio com as amostras de UD, os dados foram coletados diretamente da máquina e inseridos na tabela abaixo.

Tabela 7. Tensões de ruptura das amostras de UD 1200 g/m<sup>2</sup>.

	Corpo de prova	Carga (kgf)	Carga (N)	Área (mm <sup>2</sup> )	Tensão (Mpa)
UD 1200 g/m <sup>2</sup>	CP1	9935,88	97371,624	171,42	568,03
	CP2	9320,13	91337,274	177,32	515,10
	CP3	8690,58	85167,684	175,44	485,45
	CP4	10963,55	107442,79	178,48	601,99
	CP5	9846,71	96497,758	180,31	535,18
	CP6	9181,06	89974,388	174,82	514,67

Fonte: Autor.

Figura 43 - Gráfico tensão x deformação - UD 1200 g/m<sup>2</sup>

Fonte: Autor

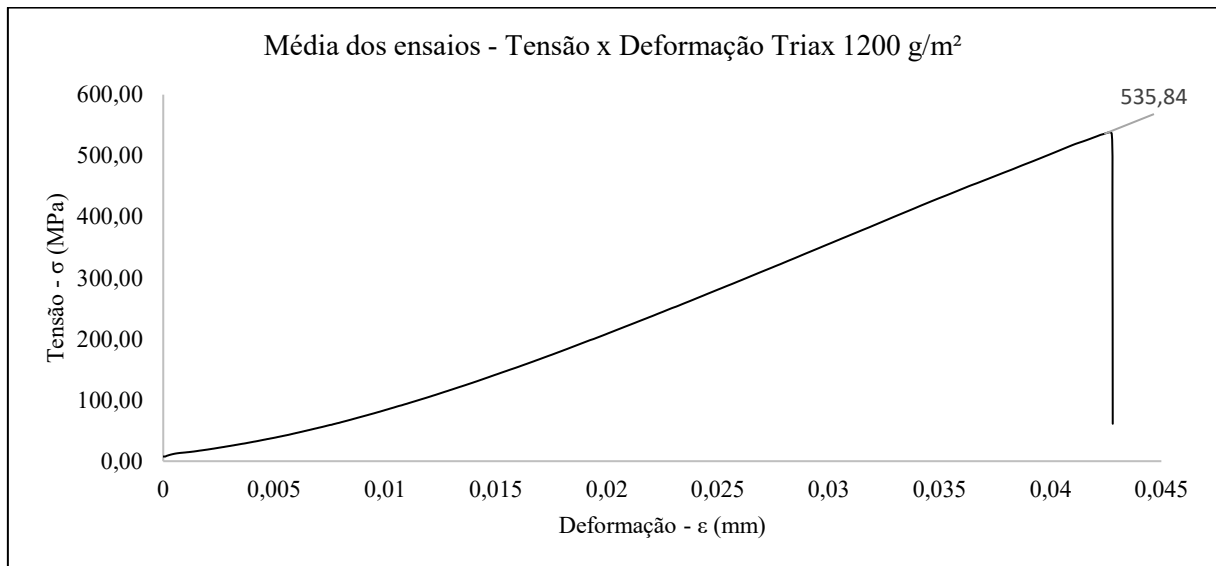
Para a situação dos laminados de UD, a menor e a maior carga e tensão suportada na amostra foram 9181,06 kgf e 10963,55kgf, gerando uma tensão de 514,67Mpa e 601,99MPa que correspondem as amostras CP6 e CP4, respectivamente. Desta forma, entre elas foi gerado uma diferença de 14,51% entre a maior e a menor tensão de ruptura da amostra.

Já para a situação dos laminados de Triax, os dados foram novamente coletados e inseridos na tabela abaixo.

Tabela 8. Tensões de ruptura das amostras de Triax 1200 g/m<sup>2</sup>.

	Corpo de prova	Carga (kgf)	Carga (N)	Área (mm <sup>2</sup> )	Tensão (Mpa)
TRIAX 1200 g/m <sup>2</sup>	CP1	10939,13	107203,474	195,93	547,15
	CP2	11293,72	110678,456	199,66	554,33
	CP3	10433,79	102251,142	195,3	523,56
	CP4	10621,7	104092,66	187,36	555,58
	CP5	9631,3	94386,74	192,28	490,88
	CP6	104960	1028608	191,46	5372,44

Fonte: Autor

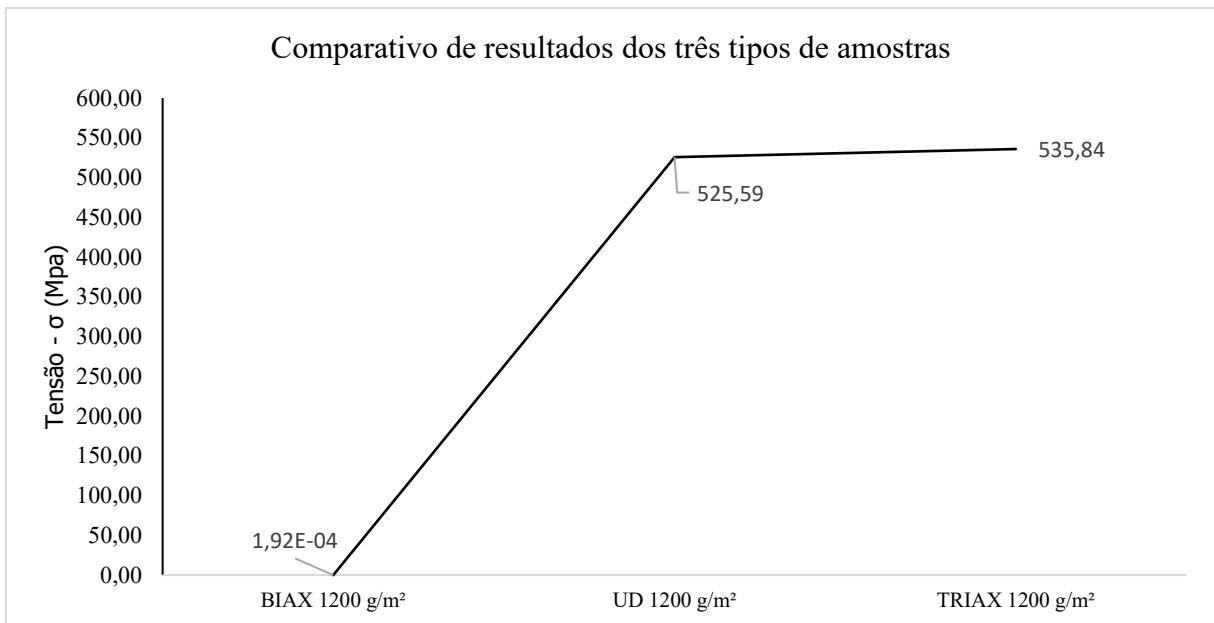
Figura 44 - Gráfico tensão x deformação - Triax 1200 g/m<sup>2</sup>

Fonte: Autor

Na situação dos corpos de prova de Triax, a força de ruptura e tensão mínima encontrada foi de 96313kgf e 490,88Mpa, resultado da amostra CP5, e a força de ruptura e tensão máxima encontrada foi de 11293,72kgf e 554,33MPa, resultado da amostra CP2. A amostra CP2 apresentou então uma tensão 11,45% maior que a tensão da amostra CP2.

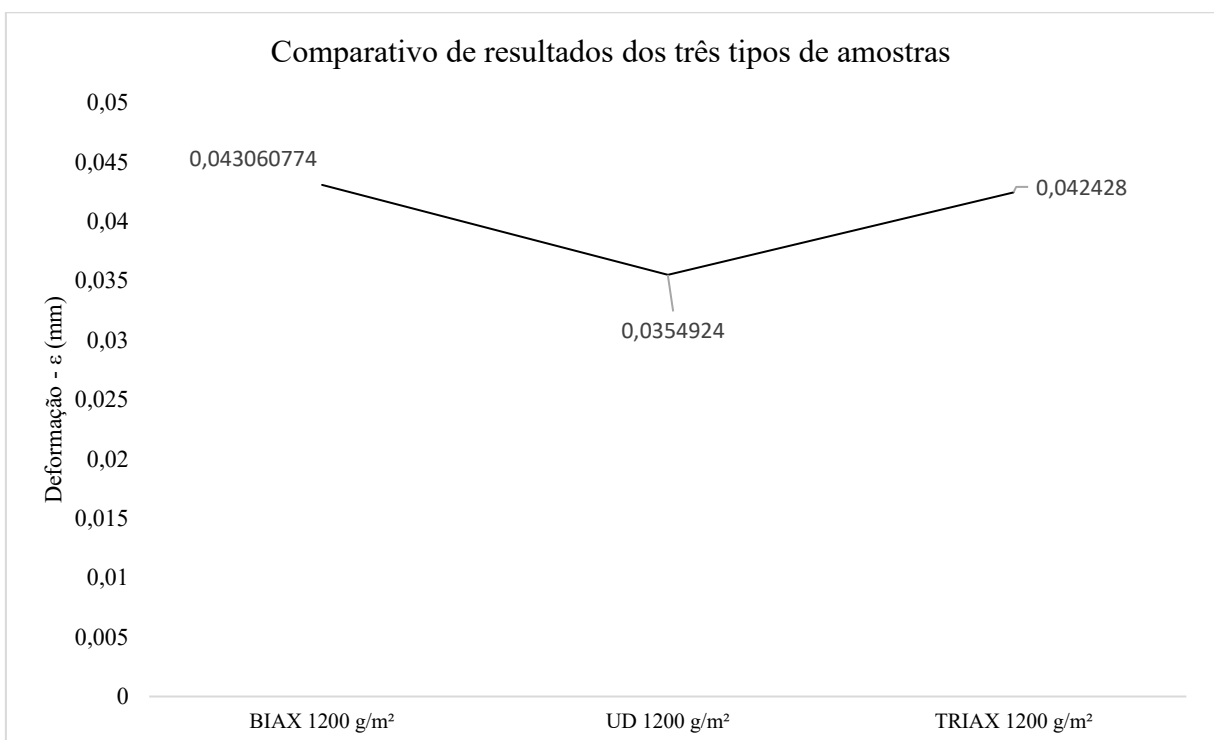
Foi então construído um gráfico comparativo das tensões médias de cada tipo de laminado através dos resultados obtidos.

Figura 45 - Média das Tensões



Fonte: Autor

Figura 46 - Média das deformações



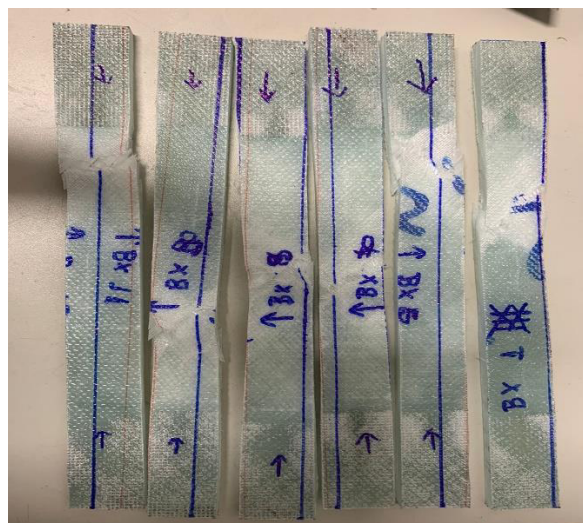
Fonte: Autor

O gráfico indica que a maior resistência a tração foi da amostra do tipo Triax. Mesmo possuindo uma quantidade menor de fibras na orientação 0° (sentido da carga aplicada), se comparado ao laminado de UD, possui em sua construção de tecido fibras em suas

ramificações de angulações  $\pm 45^\circ$ , com isso o resultado ocorre devido ao equilíbrio de orientações de fibras, fortalecendo e dispersando a carga em três orientações distintas. Para a situação do Biax, a orientação das fibras se encontram em angulações diferentes da orientação da carga aplicada, gerando assim uma menor resistência nesse sentido fazendo com que o material se rompa em uma carga menor aplicada. Em contrapartida, devido a essas angulações negativas e positivas de  $45^\circ$ , o material conseguiu então possuir uma área de deformação 18% maior que os outros materiais, mesmo se rompendo a uma carga menor aplicada. Desta forma, o Biax se torna então um material cujo comportamento no gráfico tensão x deformação é do tipo não linear, se caracterizando como um material dúctil. Já os materiais de UD e Triax praticamente não tiveram deformação, se rompendo rapidamente ao chegar na sua carga máxima, ou seja, material com uma área de deformação muito pequena, sendo caracterizado então como material com comportamento de curva tensão x deformação frágil, possuindo uma pequena diferença entre o Triax e o UD, onde o Triax possuiu uma deformação um pouco maior causada exatamente pelas angulações negativas e positivas existentes dentro das configurações da fibra.

Após os ensaios serem finalizados, foi possível notar que as rupturas nos corpos de prova se concentram, a grande maioria, nas regiões próximas as pinças que os prendiam na máquina. Isso aconteceu devido à ausência de abas nas pontas dos corpos de prova, fazendo com que a tensão fosse distribuída de maneira uniforme. Desta forma a ruptura ocorreu então no ponto de maior concentração, ou seja, próximo as pinças.

Figura 47 - Corpos de prova rompidos – Biax



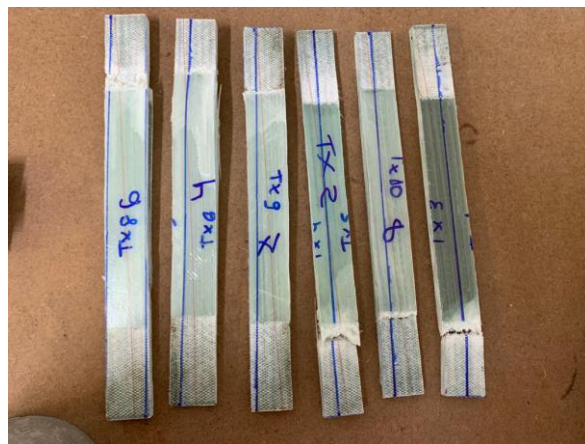
Fonte: Autor

Figura 48 - Corpos de prova rompidos - UD



Fonte: Autor

Figura 49 - Corpos de prova rompidos - Triax



Fonte: Autor

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal identificar a influência da orientação da fibra de vidro no comportamento mecânico dos laminados, ambos reforçados com fibra de vidro de 1200 g/m<sup>2</sup> com a matriz de resina epóxi. Esses materiais são amplamente utilizados na construção de pás eólicas, sendo destinados desde peças dos componentes que compõem a pá, até a composição principal da pá eólica, chamada na indústria de “cascas” ou “moldes principais”.

Neste trabalho foram produzidas amostras com três tipos de configurações de fibras de vidro, sendo elas possuindo apenas uma direção a 0° (unidirecional – UD), duas direções, sendo +/-45° (bidirecionais – Biax). Todas foram submetidas ao mesmo processo de layup, plano de infusão, vácuo, infusão e cura.

O teste de transição vítrea realizado nas três placas, através do equipamento DSC, teve como objetivo identificar as temperaturas de Tg destas. A temperatura de Tg que apresentou um maior valor foi a do corpo de prova de Biax (duas orientações de fibras). Isso indica que, dentre as 3 amostras testadas, a Biax foi a amostra que possuiu uma maior qualidade de infusão, gerando uma impregnação melhor que as demais. Mais uma vez, essa qualidade de infusão se dá devido a orientação da fibra, pois a orientação da fibra impacta diretamente no fluxo de infusão. Para este caso, como a fibra possui direções de +/-45° e o plano de infusão foi exatamente igual para os 3 tipos de fibras, o fluxo se torna mais uniforme em mais de uma direção realizando uma melhor impregnação na área do tecido a ser infundido. Como consequência, o fluxo de infusão da amostra tipo UD, diante dos dados apresentados, foi o que possuiu uma menor qualidade de infusão, devido a orientação da fibra ser somente a 0° (orientação do fluxo estava a 0°), com o mesmo plano de infusão da Biax, o fluxo se tornou além de mais retardado, de menor qualidade de impregnação. O mesmo vale para o laminado de Triax, este possui 3 orientações de fibras, porém utilizando o mesmo plano de infusão do demais, o fluxo pode ter acontecido de forma mais rápida gerando então uma impregnação com qualidade intermediária. Desta forma, concluímos que a amostra de Biax, para este estudo, possui uma maior capacidade de absorção de temperatura sem que haja deformação/mudança de fase do material.

Para os ensaios de tração, os resultados obtidos foram bastante claros entre a média das amostras. Dentre os resultados obtidos, a amostra que possuiu um melhor resultado de resistência a tração foi a amostra do tipo Triax, possuindo uma média de 535,84Mpa, isso se dá devido ao tecido utilizado possuir três orientações de fibras, assim fortalecendo e dispersando



a carga em três orientações distintas. O material possui uma quantidade menor de fibras na orientação  $0^\circ$  (sentido da carga aplicada), se comparado ao laminado de UD, mas também possui sua construção de tecido fibras em suas ramificações de angulações  $\pm 45^\circ$ , com isso o resultado ocorre devido ao equilíbrio de orientações das fibras.

O tecido UD teve seu resultado bastante satisfatório, porém não superando o resultado do tecido de Triax. O mesmo teve seu resultado médio de 525,59Mpa, cerca de 2% menor se comparado ao resultado do tecido Triax.

Para a o tecido de Biax, tivemos o resultado mais inferior do estudo, onde o mesmo possuiu uma resistência a tração baixa se comparado aos demais materiais, com média de  $1,92 \times 10^{-04}$  Mpa. Isso se dá devido a angulação das fibras serem de forma diagonal ao sentido de aplicação da carga, fazendo com que as forças sejam dispersadas nos sentidos  $\pm 45^\circ$ , gerando assim uma deformação maior, porém se rompendo mais facilmente no sentido  $0^\circ$  da força aplicada.

Desta forma, o trabalho conseguiu mostrar e concluir que a orientação da fibra impacta diretamente na resistência a tração do laminado e, conforme apresentado e comprovado neste estudo, com uma maior orientação de fibra na configuração do tecido, maior a resistência a tração do material.

Esse projeto ressalta então a importância da escolha do tipo e orientação da fibra na confecção de componentes de pás eólicas e fabricação das cascas principais utilizados, assim como onde esses tipos de tecidos serão utilizados para um melhor resultado e um menor impacto estrutural durante o funcionamento da pá eólica, desde sua movimentação até sua utilização em campo nas torres para geração de energia.

Como próximos passos do trabalho foram listados os seguintes pontos:

- Realizar ensaios de cisalhamento nos tecidos de Biax para comprovar o real objetivo do uso deste tipo de tecido em componentes de pás eólicas;
- Utilização de tabs nos corpos de prova;

## REFERÊNCIAS

ASTM. **ASTM D3878-95. Terminologia padrão para materiais compostos.** 2003

**Materiais Compósitos Aspectos Gerais e Aplicações - UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL - Prof. Márcio R. F. Soares**

ALCÂNTARA, Robério Marcos. **Estudo das Propriedades Micro e Macroscópicas de pseudo Redes Poliméricas Interpenetradas (pseudo-RPIs) à Base de Resina Epóxi para Aplicações na Área Odontológica**, UFSC, 2002. (1o semestre de 2002). 2003 (Dissertação de Doutorado).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3039:** Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. United States, 2006.

**MACHADO, Marcélia:**

[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5867/5867\\_1.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5867/5867_1.PDF)

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 2584:** Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins. United States, 2006.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução.** LTC, v. 8ª Edição, 201

COSTA, Michelle L.; REZENDE, Mirabel C.; PARDINI, Luiz C. **Métodos de Estudo da Cinética de Cura de Resinas Epóxi. Polímeros: Ciência e Tecnologia.** p 39, 1999.

ABEEólica. Infovento nº24. 2022. Disponível em:

<[http://abeeolica.org.br/wpcontent/uploads/2022/01/2022\\_01\\_InfoVento24.pdf](http://abeeolica.org.br/wpcontent/uploads/2022/01/2022_01_InfoVento24.pdf)>.

Acesso em: 12 de janeiro de 2022.

Silva, Henrique Pereira. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS DE FIBRA DE VIDRO/EPOXY NANO-REFORÇADOS – Tese de doutorado**

BARROS, André Santiago. **Estudo do desalinhamento das fibras nas propriedades mecânicas de compósitos estruturais de pás eólicas**. 180 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2010.

Rik Heslehurst PhD, MEng, BEng(Aero) FIEAust, FRAeS, CPEng. **Composite Engineer's**

BUSCH. Bomba de vácuo. **Technical Data Sheet**. Disponível em:

<<https://www.buschvacuum.com/br/pt/products/r-5/r-5-ra/r-5-ra-0025-0040-f>>. Acesso em: 29 outubro 2018.

### **Polímeros reforçados por fibras vegetais uma revisão sobre esses compósitos**

Gay, Daniel. Hoa, Soung V. **Composite Materials design and application**. 2003 by CRC Press LLC

DUTRA, R. **Energia Eólica: Princípios e Tecnologia**. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito/CRESESB. Brasília, 2009.

SILVA, RANAILDO GOMES. **ESTUDO DO EFEITO DE INTEMPÉRIES REGIONAIS NA DETERIORAÇÃO DE PÁS EÓLICAS**. Natal, 2018.

Marinucci, Gerson. **Materiais compósitos poliméricos. Fundamentos e tecnologia**. Copyright© 2019 by Artliber Editora Ltda.

EPE – Empresa de pesquisa energética. Acesso: 19/04/2022 12:26

**ISO 527-5: 1997 (E)**: Plastics - Determination of tensile properties – part 5: test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites. Berlim, 1997.

PERUZZI, Antônio de Paulo. **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento portland modificada com latex e adição de sílica.** São Carlos, 2002.

**TRANSIÇÃO VÍTREA: UMA IMPORTANTE PROPRIEDADE PARA CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS.** USERCOM - Publicação Semestral da Mettler Toledo em Análise Térmica

SHACKELFORD, J.F. **Ciência dos materiais.** 6ª edição, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2008. 560 p.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application.** 1. ed. United States: John Wiley & Sons Ltd, 2009. p. 567.

SCHWARTZ, M. M. **Composite Materials Handbook.**, New York, McGrawhill, 1984.

MASTBERGEN, 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.

REZENDE, Mirabel C. **O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol 10, nº 2. Centro Técnico Aeroespacial. 2000.

NIJSSEN, R.P.L. **Composite Materials an introduction.** VKCN. In Holland University of Applied Sciences, Holanda, 2015.

ODEGARD, G. M.; BANDYOPADHYAY, A. **Physical Aging of Epoxy Polymers and Their Composites.** Journal of polymer science part b: polymer physics. Department of mechanical engineering—engineering mechanics. Michigan Technological University. Michigan, 2011.

OWENS CORNING. Tecido Unidirecional. **Technical Data Sheet.** outubro, 2017. Disponível em: < <http://www.owenscorning.com.br>>. Acesso em: 27 outubro 2018.

