



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**JOÃO PAULO DA COSTA SANTOS**

**ESTUDO DA INFILTRAÇÃO DE AR NO PROCESSO DE INFUSÃO DE  
COMPÓSITOS ESTRUTURAIS DE PÁS EÓLICAS**

**FORTALEZA**

**2018**

**JOÃO PAULO DA COSTA SANTOS**

**ESTUDO DA INFILTRAÇÃO DE AR NO PROCESSO DE INFUSÃO DE  
COMPÓSITOS ESTRUTURAIS DE PÁS EÓLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Graduando em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Materiais Compósitos, Infusão, Energia eólica. Orientador: Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues.

**FORTALEZA**

**2018**

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)

---

- S235e Santos, João Paulo da Costa.  
Estudo da infiltração de ar no processo de infusão de compósitos estruturais de pás eólicas / João Paulo da Costa Santos. – 2018.  
56 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues.
1. Eólica. 2. Compósitos. 3. Resistência mecânica. I. Título.

CDD 620.1

---

JOÃO PAULO DA COSTA SANTOS

ESTUDO DA INFILTRAÇÃO DE AR NO PROCESSO DE INFUSÃO DE COMPÓSITOS  
ESTRUTURAIS DE PÁS EÓLICAS

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Graduando em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Materiais Compósitos, Infusão, Energia eólica. Orientador: Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues.

Aprovado em: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Pierre Maurice Christophe Lamary  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Me. Carlos Henrique Silveira Macedo  
UNINASSAU

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, o ser superior que dirige o universo e todos os seres que nele habitam.

Aos meus pais Stélio e Neucimar, por conseguirem me proporcionar uma educação necessária para conseguir concluir mais uma etapa da minha vida. Por sempre me ensinarem o caminho da bondade, humildade, altruísmo e me apoiarem nas escolhas que fiz.

Aos meus avós paternos e maternos por toda a sabedoria, humildade, força de vontade, honestidade que me ensinaram.

À minha namorada Ágda Sarah por todo o suporte ao longo desses nove anos de relacionamento que me acompanhou durante toda a graduação, nos momentos tristes, nos momentos felizes, tanto na carreira acadêmica como na carreira profissional.

Aos irmãos Júlio e Allan que me ensinaram desde criança os valores ligados ao respeito, tolerância e o sentimento valioso de amizade.

Aos meus colegas Gordo, Ramsés, Diego, Davi, Bolado, Sérgio e Luiz por todo o suporte na passagem pelo Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos (LAERO).

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carla Freitas de Andrade por toda simpatia, amizade, suporte e conhecimentos passados ao longo de toda a minha graduação.

Aos meus colegas Damião, Abdias, Victor, Guilherme, Cairo, Júlio, Chico, Hideki e Lucas pela experiência universitária e profissional compartilhada.

Aos meus amigos Daniel, Pastor, Giras, Cabeça, Paulo Victor, Ossimar, Samuel e os Gemas por me proporcionarem ensinamentos que levo ao longo dessa vida.

À empresa Aeris Energy por ter concedido material, maquinário e espaço ideal por todo esse trabalho.

À Kariny por todos os ensinamentos fundamentais para este trabalho, bem como por toda a paciência que teve ao longo dos procedimentos.

Ao Bruno por fazer nascer a ideia desse trabalho, incentivar, orientar e repassar uma grande quantidade de conhecimento na área de compósitos e de estruturas. E também por me permitir realizar os experimentos.

Ao Douglas por incentivar o desenvolvimento desse projeto, além de permitir e garantir a realização dos experimentos.

Aos meus colegas de trabalho Alexandre, Jade, Alisson, Jayro, Marcos, Willyan, Victor, Evando e Ítalo que sempre deixaram o ambiente de trabalho ideal para conciliar as atividades acadêmicas com as profissionais.

## RESUMO

Com o intuito de explorar a tecnologia através da construção de pás eólicas que geram eletricidade pelo mundo, este projeto estudou o comportamento mecânico de materiais compósitos, fundamentais na fabricação delas, formados a partir da matriz resina epóxi e tecido de fibra de vidro unidirecional. Através da infusão, processo de fabricação que transfere a resina por um fluxo a vácuo, a criação de materiais poliméricos pode gerar diversos tipos de defeitos que comprometem as características mecânicas do material. O objetivo deste trabalho foi estudar esses defeitos, de maneira induzida, a partir de um processo de infusão feito com injeção de diferentes volumes de ar de maneira controlada. Foram criados corpos de prova para três situações diferentes: laminados sem a presença de ar e defeitos, laminados com 1,5 litros de ar e laminados com 3 litros de ar. Os corpos de prova foram todos confeccionados com o tecido de fibra de vidro L1800/07C07, a resina EPIKOTE™ Resin MGS™ RIMR035c e o endurecedor EPIKURE™ Curing Agent MGS™ RIMH0 038, pautados na norma ASTM D3039. Já a norma ISO 527-5 foi utilizada como referência para a realização dos ensaios de tração longitudinal. A partir de uma máquina de ensaios de tração, todas as amostras foram testadas num processo estático até o ponto de fratura total, a fim de buscar as possíveis diferenças do módulo de elasticidade, da deformação de fratura e coeficiente de Poisson de cada amostra. Os ensaios com os corpos de prova sem infiltração, aqueles que não receberam nenhuma quantidade de ar, apresentaram uma média de 413,67 MPa tensão de ruptura. Já as amostras com 1,5 L de ar tiveram a média de 397,51 MPa e as amostras de 3 L de ar ficaram com uma média de 396,56 MPa. O estudo conseguiu comprovar, através dos ensaios de tração longitudinal, que os defeitos gerados por maneira induzido impactaram de maneira negativa na resistência mecânica dos compósitos.

**Palavras-chave:** Eólica; Compósitos; Resistência mecânica.

## ABSTRACT

In order to explore the technology through the construction of Wind blades, which generates electricity around the world, this project studied the mechanical behavior of composite materials, fundamental on its manufacture, with a matrix of epoxy resin and unidirectional fiber glass layer. Through infusion, manufacturing process that transfers the resin for a vacuum flow, the manufacture of polymeric materials may generate many kind of defects that compromises the mechanical characteristics of the material. The purpose of this paper was to analyse these defects from an infusion process with injection of different controlled air volumes. It was manufactured proof bodies for three different situations: Airless and defect free laminate, laminate with 1,5 liters of air and laminate with 3 liters of air. The proof bodies were manufactured with fiber glass L1800/07C07, epoxy resin EPIKOTE™ resin MGS™ RIMR035C and the hardener APIKURE™ Curing Agent MGS™ RIMH0 038, based on the ASTM D3039 norm. The ISO 527-5 standard was used as reference for the longitudinal traction tests. From a traction test machine, all the samples were tested in a static process until the total fracture, in order to reach the different modulus of elasticity matrix, the fracture deformation and Poisson coefficient of each sample. The tests with non-infiltrating test specimens, which did not receive any amount of air, had an average of 413.67 MPa rupture stress. The samples with 1.5 L of air had a mean of 397.51 MPa and the samples of 3 L of air had a mean of 396.56 MPa. The study demonstrated that, through the longitudinal tensile tests, the defects generated by induced manner had a negative impact on the mechanical strength of the composites.

**Keywords:** Wind; Composites; Mechanical resistance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Matriz elétrica brasileira (GW). .....	14
Figura 2. Evolução da geração eólica. ....	14
Figura 3. Gerador eólico de eixo horizontal. ....	18
Figura 4. Componentes de uma pá eólica. ....	19
Figura 5. Spar cap. ....	20
Figura 6. Classificação de materiais compósitos. ....	21
Figura 7. Molécula de epóxi. ....	23
Figura 8. Cruzamento de resina com endurecedor. ....	23
Figura 9. Gráfico de cura de um material termorrígido. ....	25
Figura 10. Geometria e concentração de reforços. ....	26
Figura 11. Configurações de fibra como reforço de compósito. ....	27
Figura 12. Direções do material. ....	31
Figura 13. Gráfico tensão x deformação de um material. ....	32
Figura 14. Bomba de vácuo. ....	35
Figura 15. Dados técnicos da bomba de vácuo. ....	35
Figura 16. Mesa de aquecimento. ....	36
Figura 17. Máquina de tração. ....	37
Figura 18. Posicionamento da entrada de resina e do bico de vácuo para a infusão. ....	40
Figura 19. Distribuição dos materiais na mesa de aquecimento. ....	41
Figura 20. Bomba de vácuo acionada e entrada da resina sendo realizada. ....	42
Figura 21. Manta térmica. ....	42
Figura 22. Plano de infusão com defeito induzido. ....	43
Figura 23. Laminado preparada para ser cortado. ....	44
Figura 24. Corpo de prova de laminado sem ar. ....	45
Figura 25. Máquina de ensaios mecânicos. ....	47
Figura 26. Teste de precisão da máquina de tração. ....	49
Figura 27. Corpos de prova rompidos. ....	52



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Datasheet tecido.....	38
Tabela 2. Materiais para a construção do VIP.....	39
Tabela 3. Dimensões dos corpos de prova.....	45
Tabela 4. Resultado TG. ....	48
Tabela 5. Tensões de ruptura das amostras sem ar.....	50
Tabela 6. Tensões de ruptura das amostras com 1,5 L de ar. ....	50
Tabela 7. Tensões de ruptura das amostras com 3,0 L de ar. ....	51

## 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

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2 OBJETIVO GERAL</b> .....	16
2.1 Objetivos específicos.....	16
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	17
3.1 Conceitos de um aerogerador .....	17
3.1.1 Aerogerador de eixo horizontal .....	17
3.1.2 Pá eólica.....	18
3.1.3 Spar cap .....	19
3.2 Material Compósito .....	20
3.2.1 Resina Epóxi.....	22
3.2.2 Temperatura de transição vítrea.....	24
3.2.3 Reforço .....	25
3.2.4 Fibra de Vidro .....	26
3.2.5 Processos .....	28
3.2.6 Defeitos de infusão .....	29
3.3 Mecânica dos materiais.....	29
3.3.1 Ensaio mecânicos.....	30
3.3.2 Ensaio de tração.....	30
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	34
4.1.1 Máquinas .....	34
4.1.2 Materiais de reforço e matriz.....	37
4.1.3 Criação das placas de laminado.....	38
4.1.4 Criação dos corpos de prova.....	44
4.1.5 Teste de transição vítrea .....	46

4.1.6 Ensaio de tração.....	46
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>48</b>
5.1.1 Teste de transição vítrea.....	48
5.1.2 Ensaio de Tração.....	49
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos no mundo tem se ampliado cada vez mais na indústria e nos estudos acadêmicos, pois são materiais com uma grande quantidade de características que ainda estão sendo exploradas.

A partir dos estudos aplicados aos diversos tipos de compósitos, bem como suas características gerais, quantidades, geometrias e as propriedades das fases, existe a possibilidade de projetar materiais de acordo com a combinação de propriedades melhores que as encontradas em qualquer liga metálica, cerâmica ou material polimérico monolítico, de acordo com CALLISTER (2012).

De acordo com Costa (1999), 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.

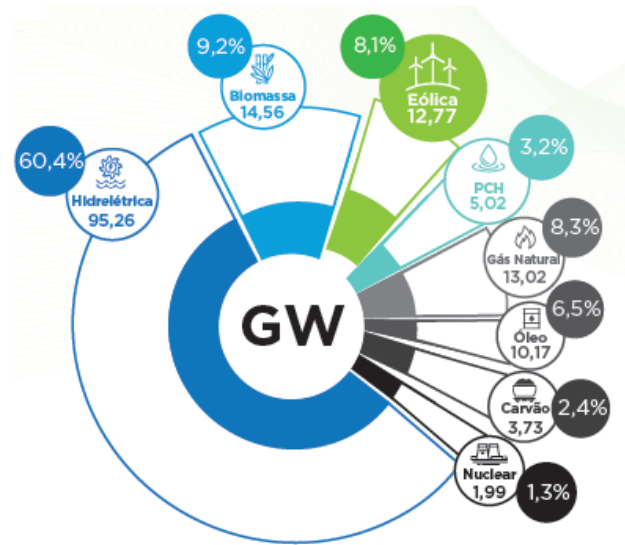
Diante dos materiais compósitos, a fibra de vidro como componente de reforço está entre os mais utilizados na indústria de setores variados como: naval, construção civil, automotiva, mecânica, eólica, metalúrgica, farmacêutica, aeronáutica, aeroespacial, entre outras.

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 (SCHWARTZ, 1984).

A partir das qualidades oferecidas pelos materiais compósitos e da necessidade energética do planeta foi possível o desenvolvimento da geração de energia elétrica a partir de energias renováveis como as usinas eólicas e solares, por exemplo. São as indústrias que mais crescem atualmente pela alta eficiência e um preço de geração favorável.

A matriz energética brasileira até o ano de 2017, de acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) constituída pelos dados da Figura 1.

Figura 1. Matriz elétrica brasileira (GW).

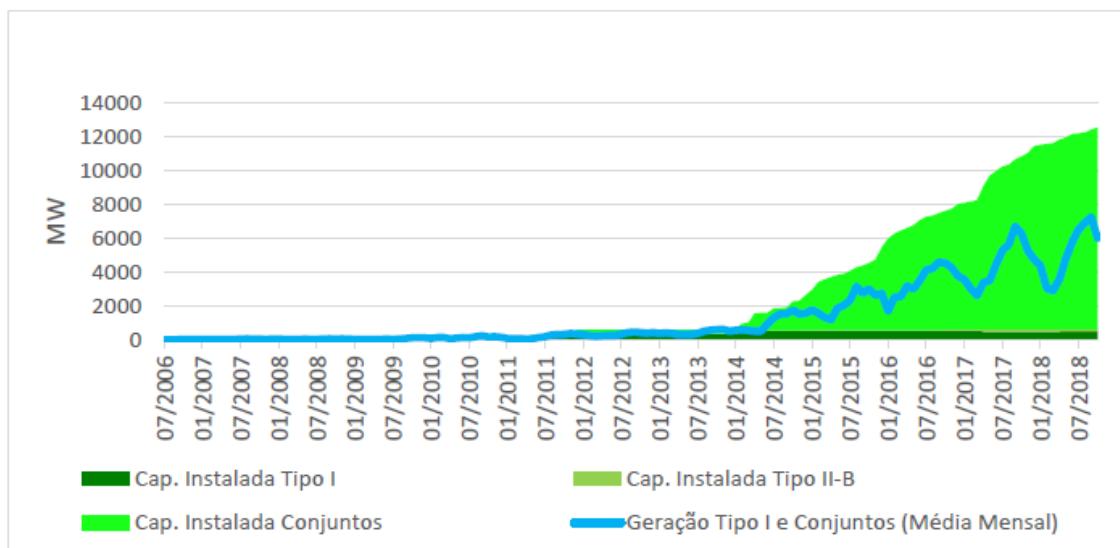


Fonte: ANEEL/ABEEÓLICA (2017).

A ilustra a matriz eólica ocupando o terceiro lugar entre as fontes produtoras de energia elétrica que abastecem o país. Representando uma fonte de energia importante também na criação de empregos e na produção de tecnologia.

O desenvolvimento do uso da energia eólica no Brasil é recente, já que é apresentado um aumento da capacidade instalada a partir do ano de 2012, como mostra a Figura 2, passando dos 12 000 MW de capacidade instalada em outubro de 2018, de acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Figura 2. Evolução da geração eólica.



Fonte: ONS (2018)

Uma torre eólica consiste de uma ou mais pás que recebem o vento e realizam a movimentação do rotor ligado a um gerador, através de um eixo horizontal, responsável por gerar eletricidade. As pás eólicas são formadas basicamente por madeira balsa, resina epóxi, fibra de vidro, espuma e algumas delas com fibra de carbono.

Atualmente existem pás com tamanhos variados. Iniciando nos 30 m (MASTBERGEN, 2004), alguns modelos já ultrapassam os 60 m de comprimento. Elas chegam a pesar até 12 toneladas e contam com uma vida útil de 20 anos (TOUBIA, 2011). E a capacidade de geração dessas turbinas eólicas, em terra, são de 1,5 MW a 5 MW (MANWELL, 2006).

A fabricação de pás eólicas exige um processo complexo e rigoroso, onde podem ocorrer diversos tipos diferentes de defeitos, como por exemplo: tecido semi-seco, ponto branco, rugas, não impregnação da resina e a geração de microbolhas. Esses podem comprometer totalmente a estrutura dos componentes de uma pá eólica. O estudo focou num componente específico da pá, a spar cap, estrutura relacionada a viga de sustentação. O ensaio de tração buscou identificar a importância dos defeitos de fabricação numas das regiões responsáveis pela alta resistência mecânica da pá.



## **2 OBJETIVO GERAL**

A partir de ensaios de tração em corpos de provas de laminados de tecido unidirecional, pesquisar a interferência de defeitos de infusão na resistência mecânica.

### **2.1 Objetivos específicos**

Este trabalho tomou como base para seu desenvolvimento os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um plano de infusão ideal para os testes;
- Fabricar um mecanismo que consiga armazenar e liberar ar de maneira controlada;
- Fabricar corpos de prova de acordo com a norma ASTM D3039;
- Realizar teste de temperatura de cura da resina para as três diferentes situações de corpo de prova;
- Medir o módulo de elasticidade dos corpos de prova no ensaio de tração longitudinal.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Conceitos de um aerogerador

A composição e o funcionamento dessas máquinas são fundamentais para o entendimento de engenharia das mesmas.

##### 3.1.1 Aerogerador de eixo horizontal

Conforme Dutra (2009), aerogeradores são máquinas de grande porte utilizadas na obtenção de energia elétrica. Existem duas categorias maiores dessas máquinas, a Turbina Eólica de Eixo Vertical (TEEV) e a Turbina Eólica de Eixo Horizontal (TEEH). A movimentação dessa máquina parte da força de sustentação e da força de arrasto, *lift* e *drag*, respectivamente. Desde que seja garantida a perpendicularidade das pás em relação ao motor, a continuidade da geração elétrica é funcional.

De acordo com Manwell et al. (2006), os geradores eólicos de eixo horizontal, Figura 3, são classificados de acordo com a orientação do rotor, design do cubo, controle do rotor, número de pás e como estas estão alinhadas com o vento. Alguns dos principais componentes desse tipo de aerogerador citados por Manwell (2006) são:

- Rotor, conjunto composto por hub e pás;
- Trem de acionamento, composto pelas partes rotativas do aerogerador (eixo, caixa de marchas, freio e gerador);
- Nacele, composta pela carcaça principal da turbina, pela placa de apoio e pelo sistema de guinada;
- A fundação de a torre;
- Os controles da máquina;
- Componentes elétricos em geral.

Figura 3. Gerador eólico de eixo horizontal.



Fonte: DUTRA (2009).

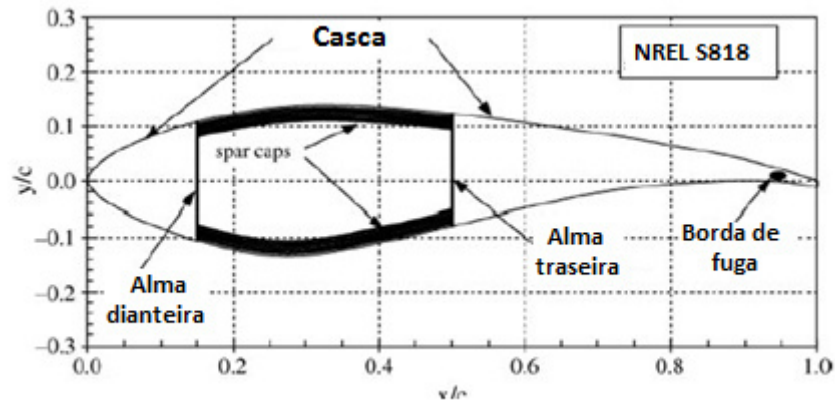
### 3.1.2 *Pá eólica*

Partindo dos princípios de Dutra (2009), as pás eólicas são estruturas perfiladas de maneira aerodinâmica que transformam parte da energia cinética da movimentação obtida pelos ventos em trabalho mecânico e consequentemente em energia elétrica.

De acordo com Manwell (2006), historicamente as pás eólicas tiveram suas primeiras fabricações a partir da madeira, já no século XX passaram a ser feitas de aço. Desde a década de 1970, o uso de compósitos abrange a maior parte da fabricação de pás eólicas de eixo horizontal. Dentre os principais compósitos estão: fibra de vidro em resina poliéster e laminados de éster e madeira – epóxi. Num momento mais atual, as fibras de carbono também foram inseridas na fabricação para complementar a fibra de vidro.

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). Esses componentes serão melhor explicados mais a frente. A Figura 4 ilustra os principais componentes de uma pá eólica.

Figura 4. Componentes de uma pá eólica.



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

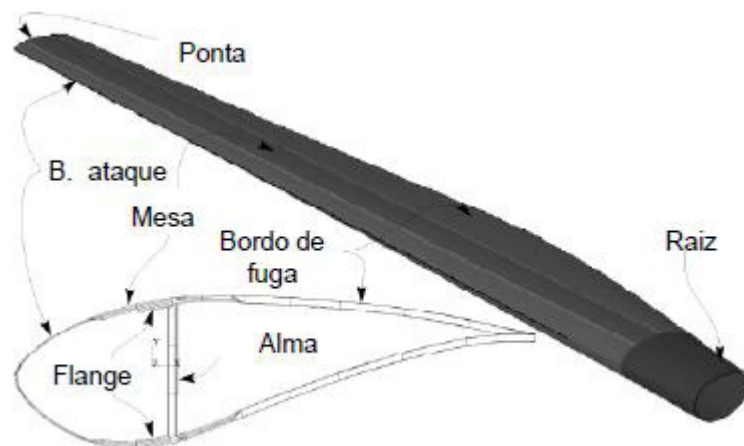
### 3.1.3 Spar cap

As spar caps são estruturas que compõem a longarina e têm como função principal a rigidez, já as cascas a responsabilidade de manter a geometria aerodinâmica, segundo Manwell (2006). Este ainda afirma que a primeira etapa da fabricação de pás eólicas é a concepção das spar caps, onde é importante a construção de um aparato leve e forte o suficiente para a resistência dos momentos aplicados.

As spar caps são construídas a partir da matriz resina epóxi e fibra de vidro ou fibra de carbono em cima de um molde.

De acordo com Barros (2010), a longarina está presente na região mais central da pá, onde possui uma viga no formato de I, formada por duas estruturas que compõem a região inferior e superior da viga da longarina, denominadas em inglês de spar cap, já a região central da viga é denominada de alma, no inglês chamada de shear web, colaborando para suportar o cisalhamento e a flexão sofrida. Ele também afirma que as spar caps, o bordo de ataque e o bordo de fuga são fabricados prioritariamente a partir de tecidos unidirecionais, haja visto que são regiões que sofrem cargas cíclicas na direção da ponta da pá. A estrutura representada na Figura 5 identifica cada região de uma pá eólica, nela é mostrada a spar cap como uma tira que vai da raiz até a ponta da pá

Figura 5. Spar cap.



Fonte: BARROS (2010).

### 3.2 Material Compósito

Material compósito tem seu significado voltado para qualquer material multifásico que mostre de maneira significativa a proporção das propriedades de ambas as fases que o compõem, conseqüentemente obtendo a melhor combinação de propriedades. A partir desse princípio que pode ser chamado de ação combinada podem gerar combinações superiores de propriedades, onde são criadas por uma combinação de dois ou mais materiais distintos (CALLISTER, 2012).

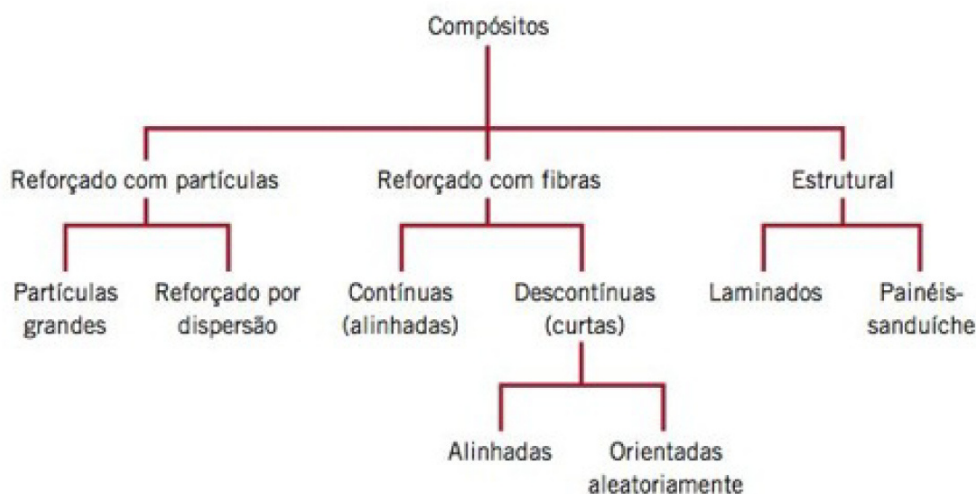
Os materiais compósitos se tornaram uma classe distinta dos metais, cerâmicas e polímeros familiares, pois representam um conceito diferenciado de combinação de materiais diversos durante a fabricação. Hoje é conhecido que o conceito de compósitos multifásicos fornece possibilidades variadas para o projeto de uma gama de materiais com combinações de propriedades que não conseguem ser atendidas por liga metálica, cerâmica e outros materiais, de acordo com Callister (2012).

A categorização dos materiais compósitos pode ser dividida por apenas duas fases: a matriz e a fase dispersa. A primeira sendo contínua e que envolve a outra fase, no caso, a fase dispersa (CALLISTER, 2012).

A classificação dos materiais compósitos pode ser diferenciada de maneira

simples em três divisões principais: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais (CALLISTER, 2012). Essas três se dividem em seis subdivisões como é ilustrado na Figura 6.

Figura 6. Classificação de materiais compósitos.



Fonte: CALLISTER (2012).

A fibra de vidro é um dos exemplos mais conhecidos de compósito por conta da sua resistência mesmo com pequenos diâmetros adicionada a ductilidade da matriz polimérica. A união desses dois componentes confere características superiores a qualquer um deles separadamente, como diz Shackelford (2008).

A parcela de materiais compósitos possui uma quantidade diversificada de materiais, alguns mais comuns e outros mais rebuscados. Entre os materiais de construção que são mais usuais, estão fibra de vidro, madeira e concreto, de acordo com Shackelford (2008).

O crescimento do uso de novos materiais, muitas vezes, está ligado a necessidades específicas do ser humano. Um dos primórdios do uso de materiais compósitos foi durante a guerra do Vietnã, país que possui florestas de muita umidade, foram desenvolvidos novos plásticos para a indústria de eletroeletrônicos e utensílios militares que eram mais resistentes a erosão e a corrosão (REZENDE, 2000).

Muitas indústrias utilizam materiais compósitos em larga escala, hoje, entre elas a indústria aeronáutica que é bastante exigente com relação a qualidade dos materiais utilizados na construção de aeronaves diversas. De acordo com Rezende (2000), o setor identificou uma oportunidade de substituir o alumínio por materiais compósitos, já que a redução do custo gira em torno de 25% e a redução de peso entre 20 a 30%.

A classe dos materiais compósitos poliméricos é o foco central desse estudo. Esses materiais possuem fibras de maior módulo. Nessa classificação se encontram os materiais da matriz polimérica: termofixo, epóxis, poliésteres, fenólicos, silicones, termoplástico, náilon 66, policarbonato e poliestireno (SHACKELFORD, 2008).

### ***3.2.1 Resina Epóxi***

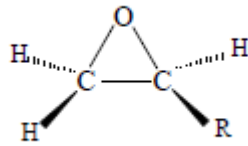
As resinas epóxi são materiais considerados como polímeros termoendurecíveis (ODEGARD e BANDYOPADHYAY, 2011).

As resinas epóxi, poliéster, poliamida e éster-vinílica são as matrizes poliméricas com maior grau de utilização no que se refere a materiais compósitos (BARROS, 2000). Este trabalho buscou utilizar a resina epóxi como a matriz polimérica fundamental para compor as fibras de vidro unidirecionais na composição dos laminados.

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).

A caracterização molecular das resinas epóxi é identificada por um anel com três membros, chamado de epóxi, oxirano ou grupo etoxileno. Uma rede tridimensional é formada a partir da capacidade do anel epóxi se ligar de maneira cruzada com uma vasta variedade de substratos, assim estabelecendo um material insolúvel e infusível, chamado de termorrígido. O estado termorrígido é atingido pelo processo de cura da resina epóxi (ALCÂNTARA, 2003). A Figura 7 ilustra a molécula de resina epóxi:

Figura 7. Molécula de epóxi.

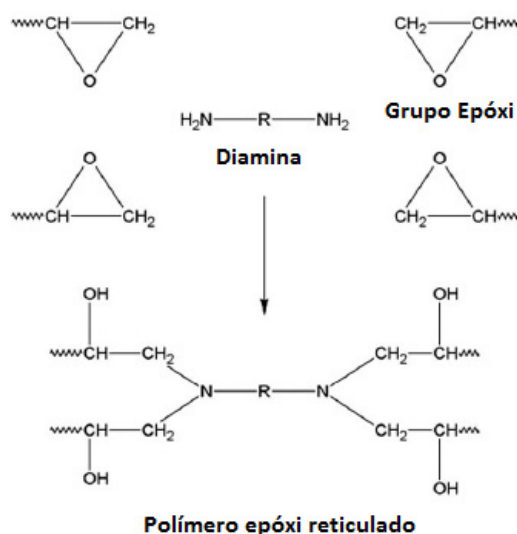


Fonte: ALCÂNTARA (2003).

O processo de cura é fundamental para concretização das resistências mecânicas da resina epóxi. O princípio da cura consiste em alterar as propriedades de uma resina termoendurecida de forma irreversível por reação química, no caso, condensação por adição ou pelo fechamento do anel. A cura pode ser realizada de diversas formas como: adição de material de agentes de cura, com a presença ou não de calor, com a presença ou não de catalisador (MIL-HDBK-17-3F, 2002).

As resinas epóxi são construídas a partir da reação de poliepóxidos (monômero) a poliaminas (endurecedor). A estrutura geral de uma resina epóxi que já está curada é de característica amorfa. A mistura ocorre através do estado líquido do monômetro e endurecedor, eventualmente com temperaturas elevadas. A rigidez e a complexidade da rede reticulada são razões fundamentais para a existência da transição vítrea, estado que não tem a capacidade de se consolidar como uma estrutura totalmente cristalina (ODEGARD e BANDYOPADHYAY, 2011). A Figura 8 mostra a ligação cruzada de resina e do endurecedor.

Figura 8. Cruzamento de resina com endurecedor.



Fonte: Adaptado de ODEGARD e BANDYOPADHYAY (2011).



As resinas epóxi são utilizadas de maneira geral em adesivos, tintas, revestimentos, implantes médicos e até em dispositivos elétricos. Elas também são parte fundamental na composição da matriz de compósitos fibrosos para amplos setores da indústria como: aeroespacial e de turbinas eólicas. A resina epóxi tem como maior ponto positivo a alta rigidez específica, alta força específica, compatibilidade química com fibras em geral (carbono, vidro, kevlar e outras), isolamento elétrico, resistência contra corrosão e um nível técnico de fabricação não tão complexo (ODEGARD e BANDYOPADHYAY, 2011).

Com relação a utilização das matrizes poliméricas direcionadas na impregnação dos reforços, 40% são do tipo epóxi, 20% bismaleimidas e termoplásticas que são utilizadas para altas temperaturas e 40% formado por outras resinas (REZENDE, 2000).

Esse trabalho utilizou, exclusivamente, a resina epóxi Epikote™ Resin MGS RIMR 035C e o agente de cura (endurecedor) MGS RIMR 038.

### ***3.2.2 Temperatura de transição vítrea***

O vidro é um produto inorgânico proveniente da fusão que não cristalizou após o resfriamento a uma condição rígida. A transição vítrea ( $T_g$ ) consta como a mudança reversível em um polímero amorfo, bem como em regiões amorfas de um polímero parcialmente cristalino com uma característica emborrachada ou viscosa para um material rígido e relativamente frágil. A temperatura de transição vítrea é o ponto médio aproximado da faixa de temperatura que esse fenômeno acontece (MIL-HDBK-17-3F, 2002).

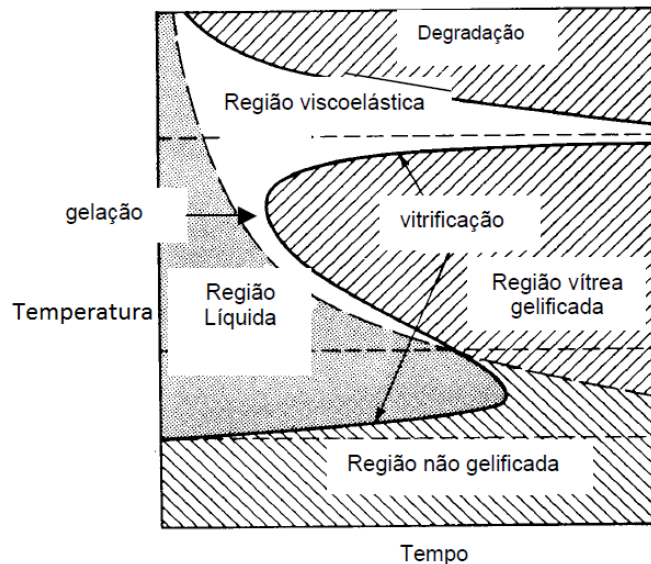
A temperatura de  $T_g$  é uma etapa importante desse estudo, pois está relacionada ao entendimento da resistência mecânica dos materiais compósitos, nesse caso, composição fibra de vidro e resina epóxi.

A gelificação é o estágio em que um líquido passa a apresentar características pseudo-elásticas (MIL-HDBK-17-3F, 2002). Em um aspecto mais específico é a formação de uma rede tridimensional num certo ponto, onde tem seu estágio bem definido no decorrer da reação química e depende da estequiometria dos reagentes, da funcionalidade e da reatividade (ALCÂNTARA, 2003).

No começo do processo é a difusão quem define o controle do mecanismo de reação da vitrificação, onde há um decréscimo gradual da taxa de reação (ALCÂNTARA,

2003). A Figura 9 mostra um diagrama de tempo, temperatura e transformação identificando a transição da vitrificação e da gelificação.

Figura 9. Gráfico de cura de um material termorrígido.



Fonte: Adaptado de ALCÂNTARA (2003).

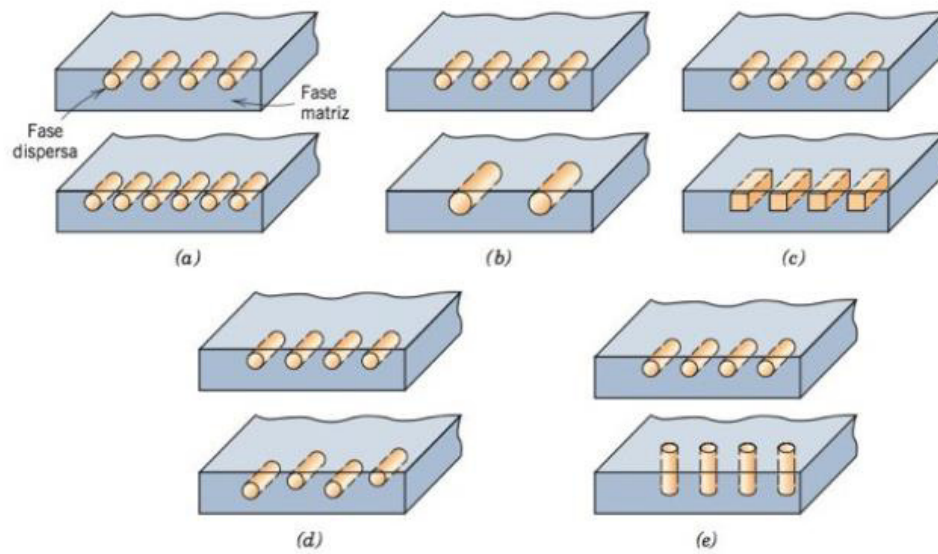
A transição vítrea é importante para que um compósito polimérico possa atender aos requisitos de serviço exigidos, bem como elevadas propriedades mecânicas (tração, compressão, cisalhamento, etc.). A temperatura da  $T_g$  identifica o limite máximo de serviço que o material pode sofrer com segurança,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

### 3.2.3 Reforço

O reforço é o componente do material compósito dedicado ao esforço, isto é, maior rigidez e resistência à tração do material. Em compósitos estruturais, o reforço é formado por fibras contínuas, sendo de diferentes tipos como: carbono, fibra de vidro e aramida (BARROS 2010).

A geometria do componente de reforço é fundamental na definição do módulo elástico do compósito (SHACKELFORD, 2008). A Figura 10 ilustra as várias características espaciais e geométricas do reforço que podem influenciar nas propriedades dos compósitos:

Figura 10. Geometria e concentração de reforços.



Fonte: CALLISTER (2012).

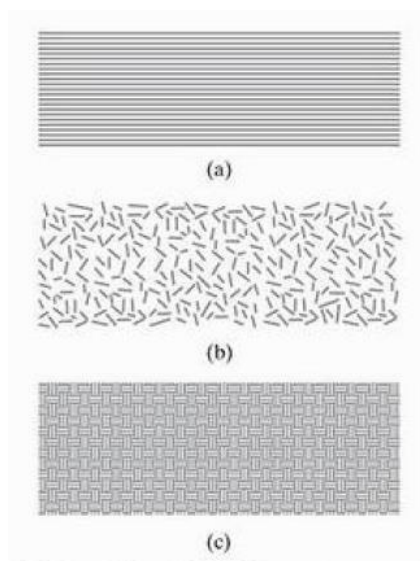
Onde (a) representa a concentração, (b) o tamanho, (c) a forma, (d) a distribuição e (e) a orientação. Esse trabalho vai realizar experimentos apenas com reforços a partir da fibra de vidro.

### 3.2.4 Fibra de Vidro

Fibra de vidro é um tipo de material compósito sintético que representa o reforço na combinação de elementos para a formação de um novo material. Ela possui alto valor de módulo de elasticidade (SHACKELFORD, 2008).

Os tipos de fibra de vidro são classificados em três diferentes, como mostra a figura abaixo:

Figura 11. Configurações de fibra como reforço de compósito.



Fonte: SHACKELFORD (2008).

A Figura 11 mostra na região (a) as fibras de maneira contínua, em (b) as fibras de maneira discretas (curtas) e em (c) o tecido tramado, isto é, em camadas com a matriz polimérica para formar um laminado (SHACKELFORD, 2008).

O tipo de fibra de vidro denominado de E-glass é o mais amplamente utilizado, inclusive na produção de componentes eólicos. O componente principal deste tipo de fibra é a sílica ( $\text{SiO}_2$ , dióxido de silício) (MASTBERGEN, 1994).

Tecidos de fibra de vidro apresentam diferentes direções das fibras. Tecidos unidirecionais apresentam apenas uma direção, já tecidos com mais de uma direção são: biaxial, triaxial e quadriaxial e todos são utilizados na fabricação de pás eólicas. Os tecidos unidirecionais são projetados para aplicações de alta concentração de reforços em apenas uma direção. Estas fibras são contínuas nas direções de  $0^\circ$  e  $90^\circ$  e eficientes com relação a cargas extremas de tração e compressão. Fibras com mais de uma direção, ou seja,  $-45^\circ/-90^\circ/+45^\circ/+90^\circ/0^\circ$  dão um maior controle na impregnação de resina, além de possuírem excelentes propriedades mecânicas (OWENS CORNING, 2017).

A fibra de vidro utilizada para compor o reforço com a resina epóxi desse trabalho é o modelo L1800/07C07 da empresa Owens Corning. É uma fibra contínua na orientação  $\theta = 0^\circ$  com uma gramatura de  $1800 \text{ g/m}^2$  (OWENS CORNING, 2017).

A fibra de vidro na forma de tecido é produzida a partir de máquinas de tear, de modo que as características: orientação de camadas, gramatura e tipo de costura é decidida na aplicação final (BARROS 2010).

Os compósitos reforçados com fibras possuem como característica maior a frequência, a alta resistência e a rigidez em relação ao peso. Essas características condizem com o limite de resistência à tração em relação ao peso específico, além do módulo de elasticidade e o peso específico (CALLISTER, 2012).

Rolos de fibra de vidro podem ser facilmente encontrados no mercado, onde é vendido de acordo com o arranjo dos filamentos em relação a diferentes direções, bem como diferentes gramaturas.

Fibras de vidro são utilizadas nas mais diversas indústrias, entre elas: energia eólica, automotiva, aeroespacial, balística, defesa, construção civil, náutica, infraestrutura e outras.

### 3.2.5 Processos

Existem muitas combinações de materiais diferentes para formação de materiais compósitos que contam com propriedades diferenciadas como: rigidez, força, dureza, resistência térmica, custo, produção e outras. Entretanto, as propriedades finais obtidas de um material compósito são dependentes do processamento, isto é, das técnicas de fabricação (SP systems, 2000).

De acordo com Barros (2010), o conjunto de diferentes processos de fabricação de pás eólicas a partir de materiais compósitos é formado pela laminação manual, também conhecida como *hand lay up*, além da infusão a vácuo, também conhecida como *Vacuum Infusion Process* (VIP), pela *Resin Transfer Moulding* (RTM) e a laminação a partir de pré-impregnados. A qualidade e o preço são os maiores fatores que distinguem os processos.

Existem diversos tipos de processos de fabricação de compósitos poliméricos. De acordo com Nijssen (2015) alguns deles são: *spray-up*, *hand lay-up*, *pultrusion*, *vacum processes*, *infusion* e outros.

Na busca da fabricação de um produto da maneira mais correta, os métodos de fabricação de compósitos são baseados no uso de moldes. Eles reduzem os custos de produção e garantem um maior controle dimensional de grandes produtos. A estrutura de molde é rígida, resiste a altas temperaturas e ao desgaste de produções em série (NIJSSSEN, 2015).

A técnica de infusão a vácuo é bastante utilizada na indústria pelo fato de conseguir de se adaptar bem com o posicionamento dos reforços num molde (BARROS, 2010).

Este trabalho utilizou a técnica de infusão à vácuo por conta de uma maior facilidade de fabricação, já que contou apenas com uma sobreposição de materiais, sem a necessidade de molde.

### ***3.2.6 Defeitos de infusão***

O processo de infusão é complexo e depende de muitas variáveis e de vários cuidados para sua realização. Muitos fatores como: temperatura, umidade, infiltrações, objetos estranhos, materiais de má qualidade, maquinários desregulados podem atrapalhar o seu total desempenho na formação de laminados de compósitos.

Alguns defeitos são observados após a cura total da placa, são eles: criação de poros, ponto branco, tecido semi-seco, ondulações, microbolhas e outros.

No processo de fabricação de componentes estruturais com fibras unidirecionais, um dos tipos de defeitos que promovem o comprometimento das propriedades mecânicas é o desalinhamento de fibras no plano e fora do plano (BARROS, 2010).

Este trabalho investigou os defeitos que acontecem com a injeção ar de maneira induzida.

## **3.3 Mecânica dos materiais**

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).

### **3.3.1 *Ensaio mecânicos***

A resistência é uma propriedade inerente a um material ou de um elemento mecânico. Ela depende do tratamento, da escolha e até do processo do material. A partir da resistência, existe a tensão que pode ser considerada como uma propriedade de estado em um ponto específico de um corpo, ou seja, uma função da geometria, da carga e da temperatura (BUDYNAS, 2016).

As forças que atuam no rotor e conseqüentemente na pá estão ligadas aos efeitos da aerodinâmica, forças inerciais e gravitacionais. Elas podem ser classificadas de acordo com o efeito e com o tempo no rotor rotativo. Durante cada revolução, as pás do rotor são submetidas a velocidades mais altas do vento no setor rotacional superior e, por conseqüência, estão sujeitas a cargas mais altas do que no setor mais próximo do solo (HAU, 2006).

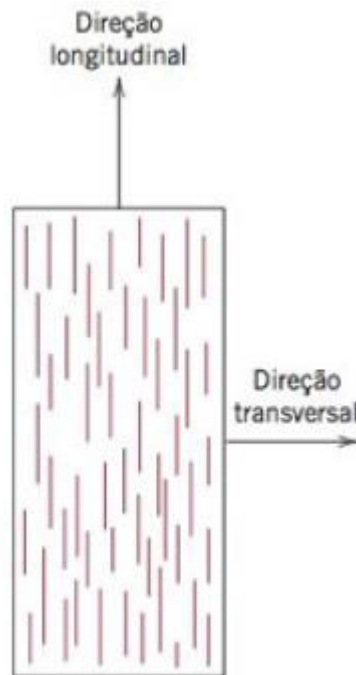
Ensaio mecânicos são necessários em pás eólicas, pois de acordo Manwell (2006), as pás de turbinas eólicas devem ser projetadas para converter energia cinética do vento em torque, ao mesmo tempo em que possuem propriedades estruturais que garantem a fadiga e a resistência estática necessárias para uma grande vida de serviço, onde tudo isso deve estar alinhado a custos baixos de material e de fabricação para que possa ser aceito no mercado eólico.

Esse trabalho adotou um ensaio estático para as amostras, isto é, um experimento destrutivo.

### **3.3.2 *Ensaio de tração***

O comportamento tensão-deformação para o caso da tensão aplicada ao longo da direção do alinhamento, isto é, a direção longitudinal (CALLISTER, 2012) é mostrada na Figura 12.

Figura 12. Direções do material.



Fonte: Adaptado de CALLISTER (2012).

O ensaio de tração longitudinal que este trabalho adotou foi pautado na norma ASTM D3039, na qual mostra todas as informações completas sobre o experimento. A norma é bastante clara quanto a geometria, fabricação, dimensões e cuidados gerais sobre os corpos de prova, em compósitos reforçados com fibra de vidro unidirecionais.

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 (ALCÂNTARA, 2003).

Equação 1. 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 (mm<sup>2</sup>) do corpo de prova.



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

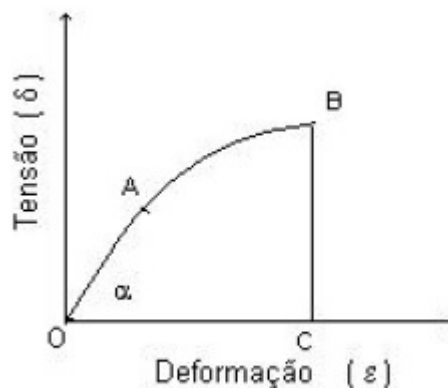
Equação 2. Deformação.

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

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.

A deformação ou alongação é relativa ao comprimento, então seu valor pode ser expresso em porcentagem. Um gráfico de tensão em função da deformação pode ser construído por meio da aplicação da força no material (ALCÂNTARA, 2003), como mostra a Figura 13.

Figura 13. Gráfico tensão x deformação de um material.



Fonte: ALCÂNTARA (2003).

No gráfico, o segmento AO da curva representa a região elástica, ou seja, o material sofre deformação, mas pode retornar a sua dimensão original.

O módulo de elasticidade do material pode ser obtido no gráfico através da linearidade da curva do gráfico de tensão em função da deformação. O ângulo  $\alpha$  proporciona o módulo de Young (E), que mede a rigidez do material, quanto maior o seu valor, menor será a deformação elástica. Ele é dado pela seguinte equação (ALCÂNTARA, 2003):

Equação 3. Ângulo.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

A região AB do gráfico representa uma deformação não reversível do material, ou seja, a partir do ponto A em diante ele não consegue voltar para suas dimensões iniciais. O ponto B é a região de tensão e a deformação máxima do material, ou seja, o ponto de ruptura.

Através do cálculo da área OBC do gráfico de tensão versus deformação é possível descobrir a tenacidade do material, isto é, a capacidade de absorver energia durante a tensão que o levou à ruptura (ALCÂNTARA, 2003).

A partir de órgãos certificadores de geradores eólicos, a resistência à tração longitudinal (paralela à direção da fibra) de materiais compósitos unidirecionais deve ser baseada na norma ISO 527-5 (BARROS, 2010).

## **4 METODOLOGIA**

Nessa etapa são apresentados os materiais e máquinas utilizados ao longo de todo o estudo, bem como os métodos de infusão dos laminados e os testes de tração. Todos os materiais, máquinas para infusão e ambientes de testes foram cedidos pela empresa Aeris Energy. Já os testes de tração foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) no Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

### ***4.1.1 Máquinas***

#### ***4.1.1.1 Bomba de Vácuo***

A bomba de vácuo, mostrada na Figura 14, rotativa utilizada foi da marca Busch, modelo R5 RA 0025. 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 14. Bomba de vácuo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados técnicos fornecidos pelo fabricante da bomba de vácuo utilizada são mostrados na Figura 15.

Figura 15. Dados técnicos da bomba de vácuo.

Dados técnicos		R 5 RA 0025 F	
Capacidade nominal	m <sup>3</sup> /h	50 Hz	25
Pressão final	hPa (mbar)	50 Hz	0,1
Potência nominal do motor	kW	50 Hz	1,0
Consumo energético à 100 mbar	kWh	50 Hz	0,8
Consumo energético à pressão final	kWh	50 Hz	0,5
Velocidade nominal do motor	min <sup>-1</sup>	50 Hz	1500
Nível de ruído (ISO 2151)	dB(A)	50 Hz	60
Capacidade de óleo	l	50 Hz	1
Peso aprox.	kg		36*
Dimensões (L x W x H)	mm		585 x 284 x 263*
Entrada / saída de gases			G 1 ¼" / G 1 ¼"

Fonte: BUSCH (2018).

#### **4.1.1.2 Mesa de aquecimento**

A mesa de aquecimento, identificada pela Figura 16, utilizada no estudo é apresentada de acordo com a Figura 4. Esse tipo de mesa tem sua importância voltada para criação de um ambiente mais próximo possível do molde das spar caps, além disso, de acordo com Costa (1999), aumentando a temperatura da reação consequentemente aumenta exponencialmente a velocidade de reação da resina.

Figura 16. Mesa de aquecimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### **4.1.1.3 Máquina de Tração**

A máquina utilizada para realizar os ensaios de tração foi o modelo EMIC 23-300, como mostrada na Figura 17, da marca INSTRON/EMIC, localizada no LMCC. Esse dispositivo suporta uma carga de até 300 KN em ensaios de tração.

Figura 17. Máquina de tração.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A máquina tem como principais características:

- Capacidade: 300kN (30000kgf);
- Tipo: Dupla Coluna Autoportante;
- Acionamento: através de fusos de esferas recirculantes pré-carregados com sistema de colunas guias cilíndricas;

A máquina possui duas estruturas, uma na base e outra no teto, que ajudam a segurar o corpo de prova. Essas estruturas funcionam como pinças, uma superior e outra inferior, que agarram o corpo de prova de maneira que ele não seja solto durante os testes. Um fuso então é acionado, para que aconteça o deslocamento da pinça inferior, consequentemente tracionando o corpo de prova.

#### ***4.1.2 Materiais de reforço e matriz***

A criação dos laminados para esse estudo foi concebida assim como acontece no ambiente industrial, onde diversos materiais são utilizados com especificações técnicas para que possa ser garantida uma qualidade eficiente na impregnação da resina no tecido, assim

evitando rugas, bolhas, pontos brancos e outros tipos de defeito.

O reforço fibroso para a construção do laminado foi o mesmo utilizado na confecção das spar caps, o tecido L1800/07C07 de sentido unidirecional  $\theta = 0^\circ$ , com gramatura igual a 1800 g/m<sup>2</sup>. A Tabela 1 apresenta os dados técnicos sobre esse material.

Tabela 1. Datasheet tecido.

<b>DATASHEET L1800/07C07 UD 0° - 1800 g/m<sup>2</sup></b>			
Nome da camada	1	2	3
direção da fibra	0°	90°	Fio de costura
calculada g/m <sup>2</sup>	1730 +-87	79,3+-3	9,1+-0,45
Fios / cm	7,16	3,94	2,76
Peso do Fio	2400	200	11
Material	WindStrand® 2000 Roving	WindStrand® 2000 Roving	PES
Fabricante	OC_RC	OC_RC	Branyl
Diâmetro do filamento	17μ	15μ	
Compatibilidade do Sizing	EP	EP	
Tipo de Sizing	WS2000	WS2000	

Fonte: OWENS CORNING (2017).

A matriz para a formação do material compósito foi a resina EPIKOTE™ Resin MGS™ RIMR035c e o endurecedor EPIKURE™ Curing Agent MGS™ RIMH0 038.

#### **4.1.3 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 Tabela 2.

Tabela 2. Materiais para a construção do VIP.

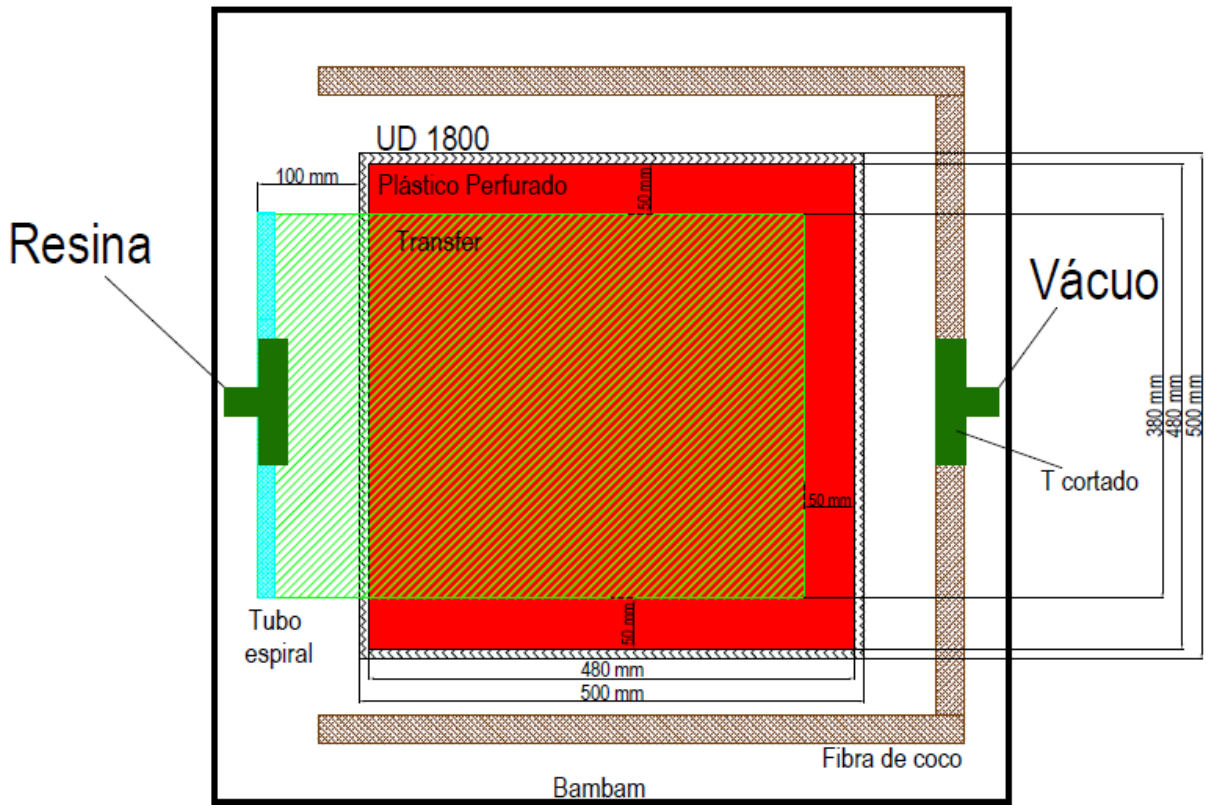
<b>Lista de Materiais - Primeira Infusão</b>	
<b>Material</b>	<b>Função</b>
Desmoldante	Limpeza da mesa de aquecimento
Fibra de vidro	Material base para a construção do laminado
Bambam	Fita selante que fixa e veda plástico de vácuo e mangueira
Fibra de coco	Evitar infiltração de ar
Plástico Perfurado	Auxiliar no fluxo da resina e retirada do laminado da mesa
Transfer	Ajudar no fluxo de resina durante infusão
Spray Adesivo	Colar os plásticos na fibra de vidro
Conector "T" cortado	Sucção do ar e entrada de resina
Tubo espiral	Distribuir o fluxo de resina
feltro	Evitar infiltração de ar
Mangueira aço mola	Garantir a sucção do ar sem compressão
Abraçadeira galvanizada	Fixar a mangueira nos conectores
Plástico de vácuo	Garantir a ausência de ar no processo
Mangueira cristal	Passagem da resina

Fonte: Elaborada pelo autor.

O projeto de plano de infusão ideal para criação das três diferentes situações de infusão estabelecidas foi todo desenhado em *software* CAD, onde foram estabelecidos os tamanhos e os posicionamentos dos materiais numa escala 1:1. A Figura 18 ilustra como o processo foi montado.



Figura 18. Posicionamento da entrada de resina e do bico de vácuo para a infusão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.1.3.1 Placa de laminado sem ar

O experimento de infusão a vácuo que formou o laminado sem bolhas se deu da seguinte maneira:

No primeiro momento, todo o material necessário para a realização da primeira infusão foi separado e disposto perto da mesa de aquecimento para respeitar as etapas do procedimento. Em seguida foi realizada a aplicação da fita selante (bambam) nas bordas da região na qual foi feita a infusão.

Após a fita selante ser colocada, um pedaço de feltro foi embebido com desmoldante e passado lentamente em cima da região de infusão, mas apenas na região central onde foi colocado a fibra de vidro, pois ele compromete a característica adesiva da fita selante.

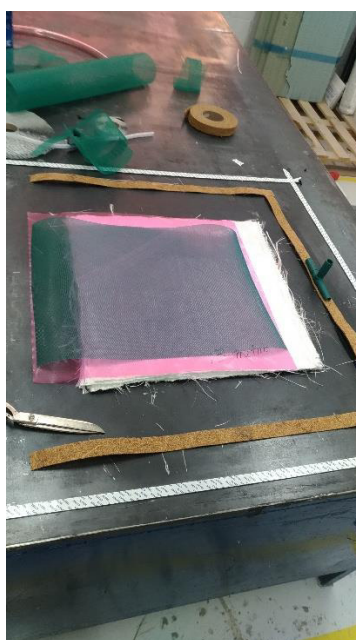
O processo seguinte foi realizar o corte de 6 camadas de UD 1800 com 500 mm de comprimento e 500 mm de largura, então colocado na região central da zona de infusão.

Para que a resina possa se distribuir e impregnar de maneira ideal na fibra, foi

necessária a inclusão de dois plásticos (Plástico perfurado, e Transfer), chamados de consumíveis pois são removidos no processo pós cura. Estes são posicionados a partir da entrada de resina até a região próxima ao limite do tecido formando assim um freio (região de baixa velocidade de fluxo da resina).

O passo seguinte se deu no corte e posicionamento da fibra de coco ao redor da fibra, bem como o papel na região interior da fita selante como mostrado na Figura 19.

Figura 19. Distribuição dos materiais na mesa de aquecimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

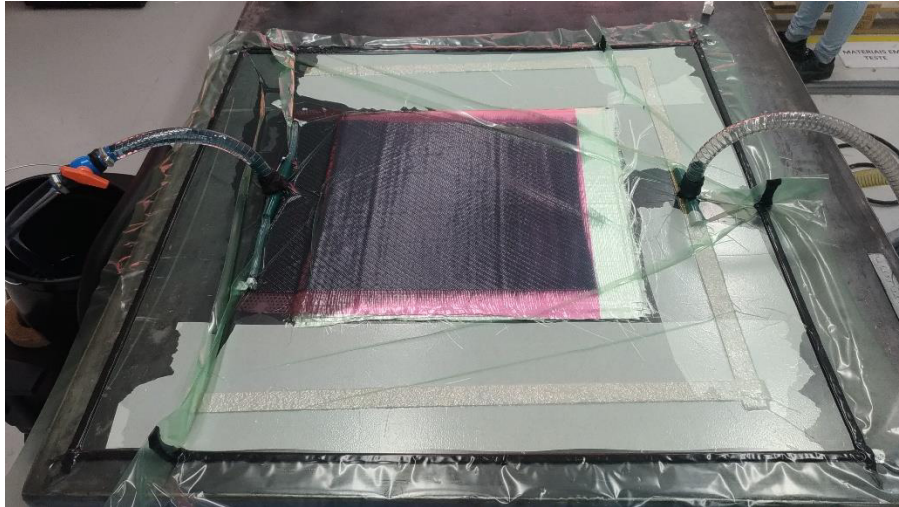
Em seguida foram colocados os materiais que fazem parte da entrada de resina, no caso o tubo espiral com o conector T ligado a mangueira aço mola responsável pela entrada de resina, essa conectada a uma válvula com uma mangueira cristal que recebe a resina, em cima dos plásticos consumíveis.

Na região da saída de ar foi colocado um conector T cortado em cima da fibra de coco para que pudesse ter a presença de vácuo de uma forma garantida.

O último material a ser colocado é o plástico de vácuo. Ele é posto cobrindo todos os materiais e adesivado através da fita selante. A bomba de vácuo então foi acionada e o plano de infusão começou a ter seu ar totalmente sugado. Antes da liberação de resina para o laminado, foi analisado todo o esquema de infusão na busca de alguma infiltração de ar que pudesse comprometer a operação.

Após todos esses procedimentos a resina é inserida e a distribuição dela pelo tecido é iniciada. A Figura 20 mostra a impregnação da resina.

Figura 20. Bomba de vácuo acionada e entrada da resina sendo realizada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a distribuição de toda a resina, uma manta térmica foi colocada para cobrir o plano de infusão, como mostra a figura XXX, para auxiliar na manutenção da temperatura estabelecida pela mesa.

Figura 21. Manta térmica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Depois de cinco horas a resina estava totalmente curada e pronta para ser removida da mesa.

#### 4.1.3.2 Placa de laminado com ar

O desenvolvimento dos laminados com a presença induzida de defeitos seguiu o mesmo padrão de infusão do laminado sem ar, no entanto são adicionados alguns materiais para a diferenciação dos corpos de prova. A **Error! Reference source not found.** lista os materiais adicionados ao processo.

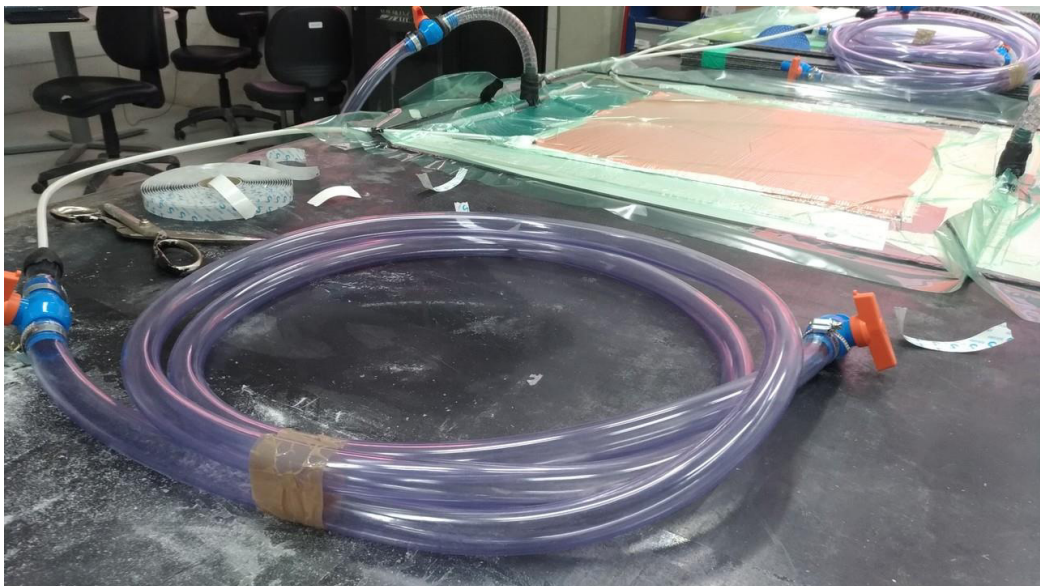
Quadro 1. Materiais para defeito induzido.

Lista de Materiais – Laminados com microbolhas	
Material	Função
Mangueira poliamida	Passar o ar da mangueira cristal para o tecido
Mangueira cristal de diferentes comprimentos	Servir como recipiente de ar para que possa ter um controle do volume de ar que entra

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 22 mostra o plano de infusão preparado para a criação de defeitos através da injeção de ar de maneira controlada.

Figura 22. Plano de infusão com defeito induzido.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A mangueira cristal serviu como recipiente de ar para a criação dos corpos de

prova defeituosos. Foram estabelecidos os volumes de 1,5 L e 3,0 L de ar na injeção das placas. O plano de infusão com geração de defeito recebeu 3 mangueiras que tiveram seus volumes calculados para armazenar os volumes de ar estabelecidos. A **Error! Reference source not found.** mostra os dados utilizados na criação dos laminados defeituosos.

Quadro 2. Dados dos recipientes de ar.

Comprimento mangueira cristal para geração de defeitos		
Volume de ar desejado(L)	1,5	3,0
Comprimento total do recipiente (m)	5,265	10,531

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a distribuição completa da resina pelo tecido através de uma inspeção visual, as válvulas conectadas as mangueiras foram acionadas para a injeção do ar. O processo seguinte de pós cura foi semelhante a criação do laminado sem defeito.

#### 4.1.4 Criação dos corpos de prova

Os corpos de prova utilizados no estudo foram confeccionados a partir da norma ASTM 3039 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS). Após a infusão das três placas de laminados, foi desenhado em cima das mesmas, como mostrado na

Figura 23, as trajetórias necessárias para realizar o corte das regiões com maior qualidade de impregnação da resina no tecido. A norma ISO 527-5 tipo A, padroniza um mínimo de 6 amostras para determinar a resistência à tração, tensão máxima de ruptura, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

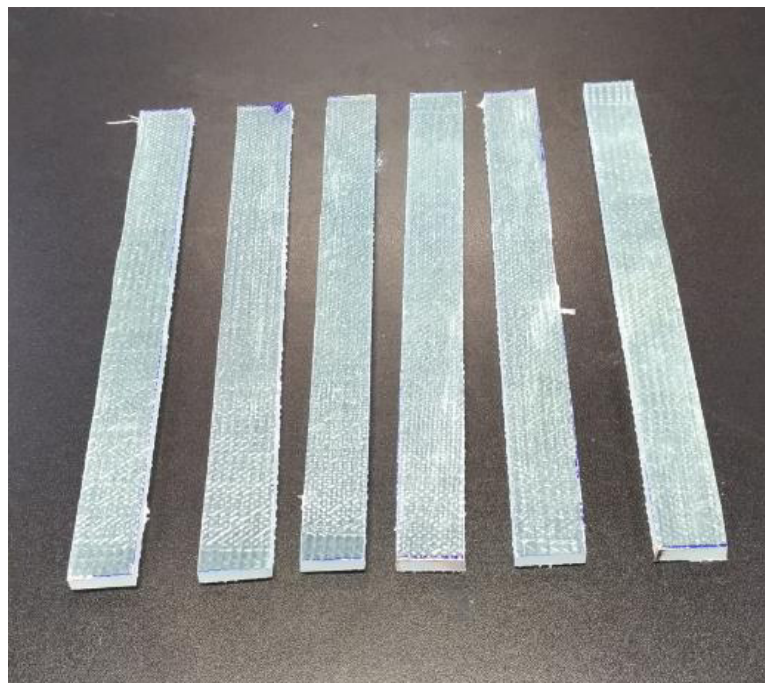
Figura 23. Laminado preparada para ser cortado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os corpos de prova, apresentados na Figura 24, foram cortados em seis unidades com uma máquina policorte para fazerem parte do conjunto das amostras.

Figura 24. Corpo de prova de laminado sem ar.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A norma ASTM D3039 afirma que é recomendável a utilização de *tabs*, abas de apoio ao corpo de prova para que eles rompam na região mais central, nos corpos de prova de fibra de vidro unidirecionais. No entanto, a máquina utilizada para os ensaios de tração não suportava uma espessura maior que 1,5 mm, o que impossibilitava o uso de *tabs*.

Os corpos de prova das três diferentes situações do experimento foram coletados e colocados na Tabela 3.

Tabela 3. Dimensões dos corpos de prova.

Dimensões das amostras						
Número	Amostra Sem Ar		Amostra 1,5 L de ar		Amostra 3,0 L de ar	
	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
1	26,0	7,3	25,3	7,2	26,4	7,1
2	25,8	7,4	25,8	7,4	25,8	7,2
3	26,9	7,0	27,4	7,0	25,8	6,6
4	25,8	7,1	26,8	7,1	27,5	6,8
5	27,2	7,5	26,8	7,9	26,8	6,8
6	25,6	7,4	25,5	7,0	26,1	6,9
Média	26,2	7,3	26,3	7,3	26,4	6,9

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### ***4.1.5 Teste de transição vítrea***

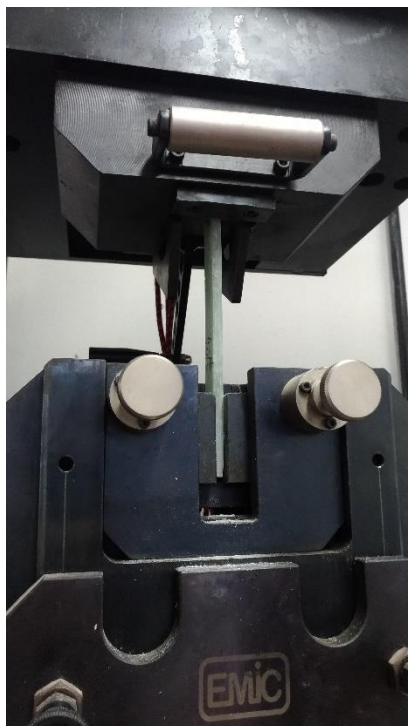
Para identificar a temperatura de transição vítrea (Tg) foi utilizado o método de calorimetria exploratória diferencial (DSC). Esta técnica também consiste em observar perfis de cura de sistemas reagentes e a determinação das melhores condições de preparação de compósitos. Esse método funciona através 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.

#### ***4.1.6 Ensaio de tração***

Os ensaios de tração para o estudo dos laminados foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC). Este possui uma máquina, de modelo EMIC 23-300, capaz de realizar ensaios mecânicos diversos, onde seus fixadores são apresentados na Figura 25.

Figura 25. Fixador do corpo de prova.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Primeiramente, o operador da máquina fez a verificação do funcionamento dos componentes mecânicos e elétricos. Em seguida ele realizou o posicionamento do fixador inferior, cujo se movimenta, e do fixador superior, que sempre permanece estacionado. O corpo de prova então foi preso no fixador superior e num segundo instante no fixador inferior. Após esses procedimentos houve a movimentação do fixador inferior até o ponto de ruptura do corpo de prova.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes de temperatura de transição vítrea e tração longitudinal foram todos computados e comparados para a identificação das possíveis diferenças nessa etapa. O teste de transição vítrea foi feito duas vezes seguidas para que se pudesse ter uma maior credibilidade dos resultados. Estes foram inseridos comparados para cada situação da amostra. No ensaio de tração foi testado um corpo de prova avulso para identificar a capacidade da máquina de obter os dados buscados. Então, os dados encontrados dos dezoito corpos de prova foram todos inseridos e identificadas as médias e os desvios padrões das três diferentes situações.

### 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 4.

Tabela 4. Resultado TG.

Amostra	1st Teste		2st Teste	Média do 2st Teste
	Início (°C)	Ponto médio (°C)	Início (°C)	
Laminado sem ar	56	56	64	70,3
Laminado com 1,5 L de ar	70	76	73	
Laminado com 3,0 L de ar	73	80	74	

Fonte: Elaborada pelo autor.

A média das temperaturas de transição vítrea foi de 70,3 °C. O teste de DSC mostrou que o laminado com injeção de 3,0 L de ar apresentou uma temperatura de Tg de 74 °C. Essa temperatura foi a maior registrada entre as testadas, na qual apresentou uma temperatura cerca de 1,35% superior a amostra de 1,5 L de ar e 13,51% superior a amostra confeccionada sem a presença de ar. Esta apresentou uma diferença de 12,33% inferior a amostra de 1,5 L de ar.

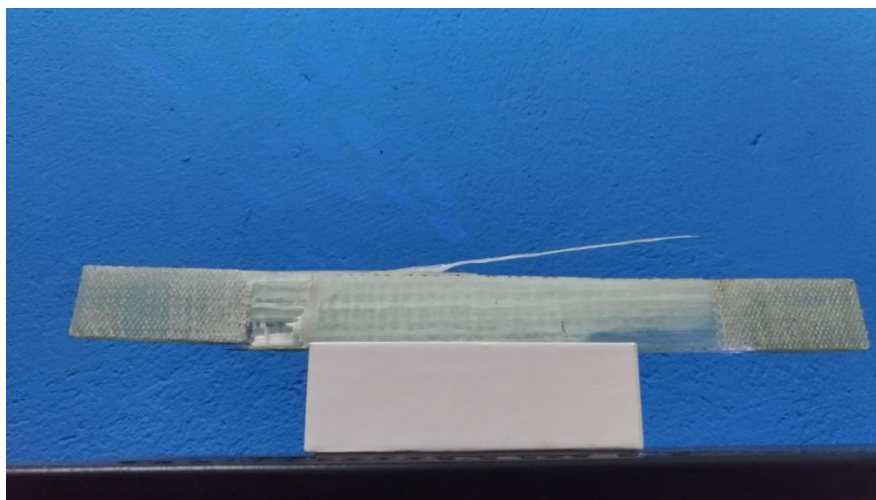
A temperatura de transição vítrea é uma das características importantes sobre a capacidade de o material ter sua resistência mecânica garantida para os tipos de serviços que se propõe. A partir dos dados obtidos, a amostra de 3,0 L, mesmo com um maior volume de ar e com vários tipos de defeitos, é aquela que tem a capacidade de garantir suas propriedades

mecânicas a maiores temperaturas se comparada as outras amostras.

### 5.1.2 Ensaio de Tração

Uma amostra do primeiro corpo de prova feito a partir da placa de laminado sem injeção de ar foi testada de forma primária para medir a precisão da máquina utilizada no estudo. A amostra foi submetida a um ensaio de tração obedecendo todas as medidas que foram empregadas nos outros testes.

Figura 26. Teste de precisão da máquina de tração.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O ensaio a partir dessa amostra avulsa, Figura 26, obteve uma força de 9177,45 kfg até a ruptura. Assim obedecendo um faixa de medição importante da máquina, pois a mesma suporta até  $300 \times 10^3$  kfg e tem uma precisão de 20% do total, no caso  $60 \times 10^3$  kfg.

A partir da norma ISO 527-5 tipo A que indica a utilização de 6 amostras para cada situação a ser testada, todas as amostras foram marcadas com pincel para identificação e controle. Primeiro foram inseridas as amostras que não tinham a presença de ar, em seguida as amostras de 1,5 L de ar e por fim as amostras de 3,0 L de ar. As amostras foram fixadas na máquina e então alongadas até a 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.

A máquina enviou os dados de tensão de ruptura das amostras sem a presença de ar conforme a Tabela 5.

Tabela 5. Tensões de ruptura das amostras sem ar.

<b>Amostra Sem Ar</b>				
Número	Área (mm <sup>2</sup> )	Força (kgf)	Tensão (kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensão (Mpa)
1	189,8	9984,1	52,60	515,83
2	190,92	7248,02	37,96	372,42
3	188,3	7696,4	40,87	400,96
4	183,18	6481,29	35,38	347,10
5	202,64	7672,47	37,86	371,43
6	189,44	9158,07	48,34	474,24
Média		<b>8040,06</b>		<b>413,67</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados encontrados no cenário das amostras sem a presença de ar apontam que o maior valor de força para a ruptura foi de 9984,1 kgf para o corpo de prova número 1. Já o corpo de prova de número 4 apresentou o menor valor, no caso 6481,29 kgf dentre as seis testadas. A média das forças obtidas foi de 8040,06 kgf. Com relação a tensão de ruptura, o corpo de prova número 4 obteve o menor valor, 347 Mpa. Já a maior tensão de ruptura obtida foi de 515,83 Mpa, correspondente a amostra de número 1. Estes valores representam uma diferença de 32,7% entre a menor e a maior tensão de ruptura obtida.

Os dados das amostras de 1,5 L de ar foram coletados e inseridos na Tabela 6.

Tabela 6. Tensões de ruptura das amostras com 1,5 L de ar.

<b>Amostra 1,5 L de ar</b>				
Número	Área (mm <sup>2</sup> )	Força (kgf)	Tensão (kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensão (Mpa)
1	182,16	7602,77	41,74	409,44
2	190,92	8711,77	45,63	447,63
3	191,8	6132,78	31,97	313,67
4	190,28	7520,58	39,52	387,73
5	211,72	8648,31	40,85	400,72
6	178,5	7749,46	43,41	425,89
Média		7727,61		<b>397,51</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

No cenário de amostras de 1,5 L de ar, o maior e o menor valor de força para a ruptura do material foram de 8711,77 kgf e 6132,78, correspondente a amostras de número 2 e 3, respectivamente. A partir dos dados de força de todas as amostras foi encontrada uma média de 7727,61 kgf. Com relação a tensão de ruptura, a amostra de número 3 apresentou o

menor valor, obtendo uma tensão de ruptura de 313,67 Mpa. Já a amostra de número 2 obteve 447,63 Mpa, o maior valor de tensão de ruptura entre as amostras desse cenário. Esses dados representam uma diferença de 29,9% entre o maior e o menor valor obtido na tensão de ruptura.

O conjunto de resultados obtidos na situação de corpos de prova com 3,0 L de ar foram inseridos na Tabela 7.

Tabela 7. Tensões de ruptura das amostras com 3,0 L de ar.

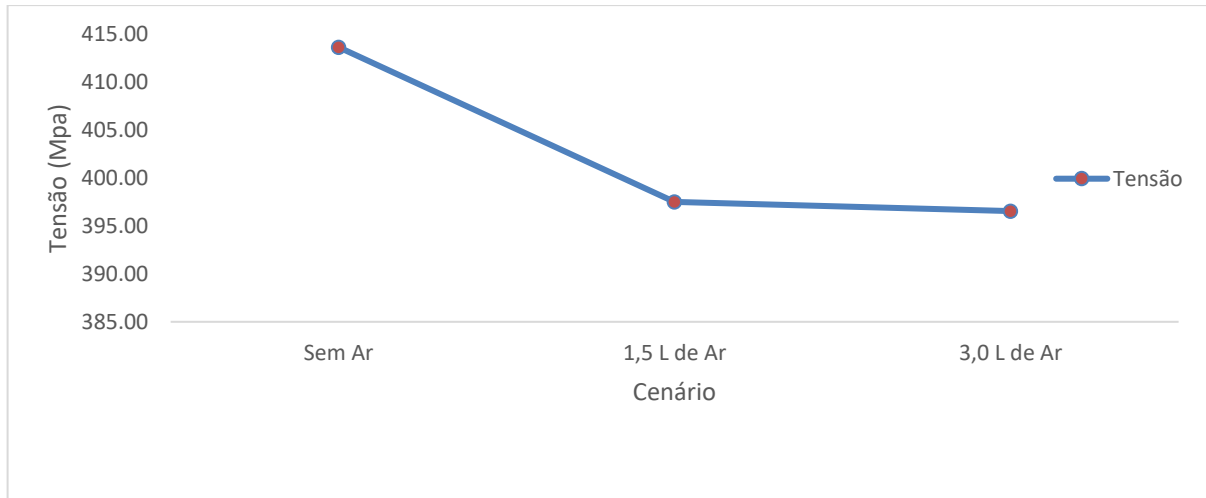
<b>Amostra 3,0 L de ar</b>				
Número	Área (mm <sup>2</sup> )	Força (kgf)	Tensão (kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensão (Mpa)
1	187,44	8566,12	45,70	448,32
2	185,76	5998,57	32,29	316,78
3	170,28	7973,13	46,82	459,34
4	187	7331,24	39,20	384,60
5	182,24	7493,54	41,12	403,38
6	180,09	6736,17	37,40	366,94
Média		7349,80		<b>396,56</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na situação dos corpos de prova de 3,0 L de ar, a força de ruptura do maior e menor valor encontrados foram de 8566,12 kgf e 5998,57 kgf, das amostras de número 1 e 2, respectivamente. A média das 6 amostras foi de 7349,80 kgf. A tensão de ruptura mínima foi de 316,78 Mpa da amostra 2 e a máxima foi 459,34 da amostra 3. A amostra 3 mostrou uma tensão superior de 2,4% com relação a amostra 1 por conta do valor de área do seu corpo de prova. A diferença de tensão máxima e tensão mínima nesse cenário foi de 31%.

A partir da média das tensões das amostras caso foi construído o Gráfico 1 que exhibe o comportamento da tensão nas três situações abordadas neste trabalho.

Gráfico 1. Média das Tensões.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A utilização das médias foi fundamental para pegar um equilíbrio dos dados obtidos no ensaio. O gráfico mostra uma maior resistência a tração longitudinal dos corpos de prova sem a presença de ar. Isso ocorre por conta da ausência de espaços vazios no interior dos mesmos, consequentemente diminui as concentrações de tensões internamente fazendo com que o material possa resistir melhor as condições impostas. O cenário de 1,5 L e de 3,0 L mostraram médias bem próximas, o que evidencia uma diferença de volume pequena entre os dois para uma comparação mais precisa.

Após os ensaios, todos os corpos de prova tiveram suas rupturas próximas a pinça que os segurava na máquina de tração, como mostrado na Figura 27. Com a ausência de abas nas pontas dos corpos de prova, a tensão foi distribuída de maneira uniforme, então a ruptura ocorreu no ponto de maior concentração imposto, no caso, nas proximidades das pinças da máquina.

Figura 27. Corpos de prova rompidos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 6 CONCLUSÃO

Este projeto buscou identificar o comportamento mecânico de materiais compósitos formados pelo reforço de fibra de vidro unidirecional L1800/07C07 0° de gramatura 1800 g/m<sup>2</sup> com a matriz de resina epóxi. Esses materiais fazem parte da spar cap, componente da viga de sustentação de pás eólicas e foram submetidos a defeitos induzidos através da injeção de ar.

Uma variável importante nesse trabalho foi a disposição dos materiais no plano de infusão, já que não só a infiltração de ar pode gerar defeitos. Uma série de placas foram fabricadas até que se conseguisse um padrão ideal para obter os corpos de provas de acordo com a norma ASTM D3039. As três placas finais foram cuidadosamente confeccionadas com os mesmos materiais, com as mesmas dimensões, com as mesmas máquinas e com os mesmos processos de infusão e pós cura para que não houvessem mudanças significativas.

O teste de DSC buscou identificar as temperaturas de transição vítrea T<sub>g</sub> das três placas que serviram de base para os corpos de prova. A temperatura de T<sub>g</sub> de maior valor foi da placa que sofreu injeção de 3,0 L de ar. Esta apresentou uma temperatura cerca de 1,35% superior a amostra de 1,5 L de ar e 13,51% superior a amostra confeccionada sem a presença de ar. Esses dados ilustram, para a amostra de 3,0 L, uma infusão de melhor qualidade, pois conseguiu manter uma temperatura mais alta que as demais, assim possibilitando a capacidade de manter suas características mecânicas até essa temperatura.

Nos ensaios de tração realizados na máquina EMIC, os resultados demonstraram uma diferenciação clara entre a média das amostras. Com relação as tensões de ruptura obtidas, a amostra sem infiltração de ar durante a infusão obteve uma média de 413,67 Mpa, um valor 3,91% superior a amostra que recebeu 1,5 L de ar durante a infusão. A amostra sem ar também teve sua média de tensão de ruptura superior a amostra de 3,0 L, nesse caso, um valor de 4,14%.

No entanto, a amostra de 1,5 L que tem a metade do volume de ar da amostra 3,0 L, obteve uma diferença de apenas 0,24% da média de tensão de ruptura.

Esses dados então ligados a menor concentração de material no interior dos corpos de prova, ou seja, quanto mais ar sendo infiltrado, menor será o valor da tensão de ruptura.

Após os ensaios de tração, todos os corpos de provas tiveram suas rupturas evidenciadas nas proximidades das pinças da máquina que realizou o ensaio. Esse fenômeno

se deve a alta concentração de tensão nessa região, por conta da não utilização de tabs.

Durante o ensaio de tração, o extensômetro não conseguiu identificar a elasticidade dos corpos de prova, pois o rompimento das fibras unidirecionais, diferente do aço, não se rompe depois de uma variação de comprimento bem definida. A fibra se rompe internamente em alguns fios, mas não por completa.

O trabalho conseguiu mostrar a importância do ensaio mecânico de materiais compósitos utilizados na indústria eólica. A partir de uma fabricação sem infiltrações de ar, consequentemente sem defeitos, nos compósitos, no caso de spar cap, foi mostrada uma resistência mecânica de tração superior em tecidos unidirecionais.

Esse projeto ressalta a importância da identificação de falhas de fabricação de compósitos, ou seja, difere um produto confiável de um produto com defeito através de dados concretos.

Como trabalhos futuro, pode-se apontar:

- Utilização de *tabs* (abas) nos corpos de prova;
- Utilização de um extensômetro capaz de resistir a tração longitudinal de compósitos;
- Fabricação de corpos de prova com uma maior quantidade de ar, consequentemente de defeitos induzidos.

## REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. **Boletim Anual de Geração Eólica**. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/>>. Acesso em: 09 dezembro 2018.

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.

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

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.

BUDYNAS, Richard G; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley**: projeto de engenharia mecânica. 10. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2016.

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.

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



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

EMIC. Máquina de ensaios mecânicos. **Technical Data Sheet**. Agosto, 2016. Disponível em: <<http://www.emic.com.br/>>. Acesso em: 27 outubro 2018.

HAU, E. *Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. 2. ed. Springer, 2006.

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

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.

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.

NIJSSEN, R.P.L. **Composite Materials an introduction**. VKCN. Inholland 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.

ONS. **Boletim Mensal de Geração Eólica Outubro/2018**. Disponível em: <<http://ons.org.br/>> Acesso em: 09 dezembro 2018.

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

PAIVA, Jane M. F. de; MAYER, Sérgio; CÂNDIDO, Geraldo M.; REZENDE, Mirabel C. **Avaliação da Temperatura de Transição Vítreia de Compósitos Poliméricos Reparados de**

**Uso Aeronáutico Polímeros:** Ciência e Tecnologia, vol. 16, núm. 1, pp. 79-87. Associação Brasileira de Polímeros São Paulo, Brasil, 2006.

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

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

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

SP SYSTEMS. **Guide to Composites.** Junho, 2000. Disponível em:  
<[http://www.composites.ugent.be/home\\_made\\_composites/documentation/SP\\_Composites\\_Guide.pdf](http://www.composites.ugent.be/home_made_composites/documentation/SP_Composites_Guide.pdf)>. Acesso em: 08 dezembro 2018.

TOUBIA, Carim Miguel; GUERRERO, Patrícia Carla; MANCINI, Sandro Donnini.  
**REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA FABRICAÇÃO DE PÁS EÓLICAS.**  
UNESP. 11º Congresso Brasileiro de Polímeros. Campos do Jordão, 2011.

UNITED STATES. Department of Defense. **MIL-HDBK-17-3F:** 2002: Composite Materials Handbook, Polymer Matrix Composites: Materials Usage, Design, and Analysis. Washington, DC, 2002.