



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

LEONARDO DUARTE VIANA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO USO DE FILETES DE NÚCLEO NA RESISTÊNCIA
A TRAÇÃO DE UM COMPÓSITO ESTRUTURAL**

FORTALEZA

2022

LEONARDO DUARTE VIANA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO USO DE FILETES DE NÚCLEO NA RESISTÊNCIA A
TRAÇÃO DE UM COMPÓSITO ESTRUTURAL

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Enio 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)

V667a Viana, Leonardo Duarte.

Análise da influência do uso de filetes de núcleo na resistência a tração de um compósito estrutural / Leonardo Duarte Viana. – 2022.

44 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. Compósito estrutural sanduíche. 2. Resistência a tração. 3. Espuma PET. I. Título.

CDD 669

LEONARDO DUARTE VIANA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO USO DE FILETES DE NÚCLEO NA RESISTÊNCIA A
TRAÇÃO DE UM COMPÓSITO ESTRUTURAL

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: 18/02/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Enio Pontes de Deus (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Guilherme Capistrano Taboza
Aeris Energy

A Deus.

A minha família.

A minha esposa, Monique de Matos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre me protegeu e abençoou;

À minha família, por me incentivar em todas as minhas escolhas;

À minha esposa Monique de Matos Amorim Rodrigues, por compartilhar comigo os fracassos e as conquistas;

Aos meus professores pela colaboração na minha formação intelectual e pessoal;

Ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará;

À Aeris Energy e ao Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem, por fornecer os recursos necessários para o estudo e produção deste trabalho;

Aos meus amigos e colegas de curso;

A todos que participaram de forma direta ou indiretamente dessa conquista, muito obrigado.

“Ninguém é tão sábio que não tenha algo para aprender e nem tão tolo que não tenha algo para ensinar.” (Blaise Pascal)

RESUMO

Os materiais compósitos veem tomando cada vez mais lugar no mercado, devido a sua característica intrínseca de combinar materiais, e, conseqüentemente, propriedades melhoradas. Considerando o cenário crescente de utilização dos materiais compósitos, torna-se cada vez mais relevante o estudo do comportamento mecânico desses materiais considerando diversos cenários. Um deles é um caso típico que ocorre na indústria eólica, o uso de filetes de núcleo que são utilizados para realização de ajustes durante o processo de fabricação da pá eólica. Esse trabalho buscou avaliar o impacto do uso de filetes na resistência a tração de um compósito estrutural do tipo sanduíche de matriz polimérica e reforçado com fibra de vidro. Fabricamos três tipos diferentes de um laminado pelo processo de moldagem por infusão assistida à vácuo. No primeiro tipo utilizamos o núcleo de espuma PET intacto; no segundo, utilizamos filetes de núcleo, também de espuma PET, posicionadas no sentido longitudinal e no terceiro utilizamos filetes de núcleo posicionadas no sentido transversal. As 15 amostras foram preparadas e submetidas ao ensaio de tração conforme a norma ASTM D 3039/D 3039M. Foi observado que, a presença de filetes tem pouca influência na resistência a tração do laminado. A presença de filetes no sentido longitudinal implica em um aumento na resistência do material pois o espaço entre filetes é preenchido por resina, que possui resistência a tração maior do que a própria espuma PET. Já a presença de filetes no sentido transversal implica em uma leve redução na resistência a tração do laminado.

Palavras-chave: compósito estrutural sanduíche; resistência a tração; espuma PET.

ABSTRACT

Composite materials are taking more and more place in the market, due to their intrinsic characteristic of combining materials, and, consequently, improved properties. Considering the growing scenario of use of composite materials, it becomes increasingly relevant to study the mechanical behavior of these materials considering different scenarios. One of them is a typical case that occurs in the wind industry, the use of core fillets that are used to make adjustments during the rotor blade manufacturing process. This work sought to evaluate the impact of the use of fillets on the tensile strength of a sandwich-type structural composite with a polymer matrix and reinforced with glass fiber. We manufacture three different types of a laminate by the vacuum-assisted infusion molding process. In the first type, we use the intact PET foam core; in the second, we used core fillets, also made of PET foam, positioned in the longitudinal direction and in the third, we used core fillets positioned in the transverse direction. The 15 samples were prepared and submitted to the tensile test according to ASTM D 3039/D 3039M. It was observed that the presence of fillets has little influence on the tensile strength of the laminate. The presence of fillets in the longitudinal direction implies an increase in the strength of the material because the space between fillets is filled by resin, which has a higher tensile strength than the PET foam itself. The presence of fillets in the transverse direction implies a slight reduction in the tensile strength of the laminate.

Keywords: sandwich structural composite; tensile strength; PET foam.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mudança anual de geração mundial de energia renovável em TWh.....	13
Figura 2 Ranking de geração e consumo de energia eólica em 2020.....	14
Figura 3 Matriz Elétrica Brasileira em GW	14
Figura 4 Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal.....	15
Figura 5 Forças atuantes em uma pá eólica	16
Figura 6 Partes de uma pá eólica.....	17
Figura 7 Importância relativa dos materiais ao longo do tempo	18
Figura 8 Materiais utilizados no boing 787	18
Figura 9 Classificação de compósitos de acordo com o reforço	19
Figura 10 Fases presentes em um compósito.....	20
Figura 11 Três camadas empilhadas com orientações diferentes em um laminado .	23
Figura 12 Tipos de laminado sanduiche com núcleo de (a) espuma, (b) honeycomb e (c)ondulado	24
Figura 13 Processo de Moldagem por Infusão de Resina Assistida a Vácuo	26
Figura 14 Preenchimento de gaps com filetes de núcleo	27
Figura 15 Esquema de ensaios de tração e compressão	29
Figura 16 Diagrama Tensão x Deformação convencional e real para material dúctil	30
Figura 17 Aplicação de desmoldante	31
Figura 18 Núcleo a) sem preenchimento b) com preenchimento longitudinal e c) com preenchimento transversal	32
Figura 19 Plano de Infusão	33
Figura 20 Fluxo de resina após a) 30s b) 1min e c) 5min	34
Figura 21 Dimensões dos corpos de prova.....	34
Figura 22 Máquina Universal de Ensaios.....	35
Figura 23 Corpo de Prova Tipo A fraturado	39
Figura 24 Corpo de Prova tipo B fraturado.....	40
Figura 25 Corpo de Prova tipo C fraturado.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Vantagens e Desvantagens dos Compósitos.....	19
Tabela 2 Propriedades das fibras de vidro E-Glass e S-Glass.....	21
Tabela 3 Comportamento mecânico de compósitos de epóxi com vários tipos de fibras	23
Tabela 4 Dados mecânicos do núcleo de PET	36
Tabela 5 Dados mecânicos do sistema resina-endurecedor epóxi.....	36
Tabela 6 Limite de Resistência a Tração médio	37
Tabela 7 Módulo de Elasticidade médio	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	13
2.1 Setor eólico e os Aerogeradores.....	13
2.2 Materiais Compósitos.....	17
2.2.1 Fases de um Compósito	20
2.2.2 Compósitos Estruturais.....	23
2.2.3 Processos de Fabricação	25
2.3 Ensaio de Tração	28
3 METODOLOGIA.....	31
3.1 Preparação das amostras	31
3.2 Ensaio de Tração	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
5 CONCLUSÃO.....	41
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
ANEXO 1.....	45

1 INTRODUÇÃO

Apesar da queda de 4,6% no consumo brasileiro de compósitos em 2020, decorrente da pandemia mundial que afetou toda a cadeia produtiva, as expectativas de crescimento do setor 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)

Já o ano de 2021 foi 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)

A nível mundial, o Brasil ocupa a sétima posição em potência instalada e a previsão é que em 2026 (ABEE, 2022) a potência instalada aumente para 33,05 gigawatts. Esse cenário de crescimento e, principalmente de desenvolvimento, é animador para as espumas PET (polietileno tereftalato), que estão cada vez mais presentes em partes estruturais de geradores de energia eólica, substituindo as espumas PVC e a madeira balsa.

Uma das desvantagens associadas ao processo de fabricação de pás eólicas é a dificuldade de automação. A maior parte do processo é manual, o que o torna altamente passível de erro. Com o aumento no tamanho das pás, os critérios e exigências técnicas tornam-se cada vez mais rígidos. Correções e ajustes são realizados durante o processo para atender as especificações do projeto. Um exemplo disso ocorre quando as dimensões do material de núcleo (comprimento, largura, espessura) não estão conforme as especificações, faz-se necessário realizar complementos com filetes do mesmo material até que as dimensões obedeçam aos critérios de projeto.

Entender a influência do uso de filetes como complemento do material utilizado como núcleo é de suma importância para a garantia das propriedades mecânicas finais do laminado. O objetivo principal desse trabalho é analisar o efeito do uso de filetes na resistência a tração do laminado de matriz polimérica reforçado com fibra de vidro e espuma PET.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

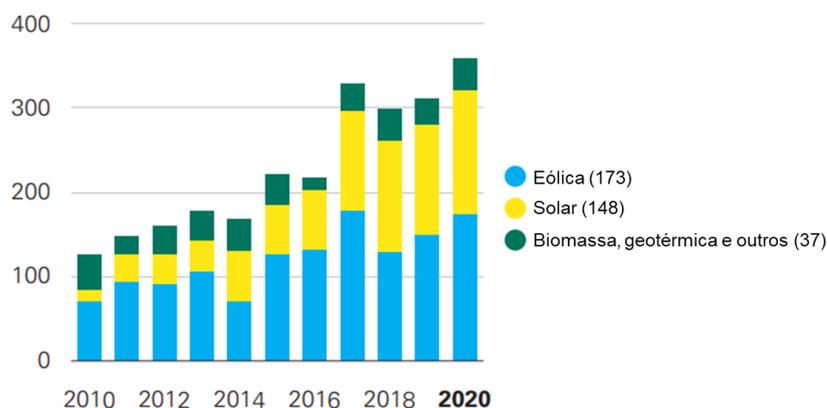
Com o intuito de situar o leitor, faremos uma breve revisão dos aspectos e conceitos mais relevantes ao entendimento e contextualização do presente trabalho. Inicialmente, iremos comentar aspectos do setor eólico bem como os principais conceitos relativos aos aerogeradores. Em seguida, trataremos dos conceitos relativos aos materiais compósitos e, por fim, das premissas relativas aos ensaios mecânicos de tração.

2.1 Setor eólico e os Aerogeradores

O ano de 2020 foi considerado o melhor ano da história para a indústria eólica global, apresentando um crescimento de 53% em potência instalada comparado ao ano de 2019. Em um ano desafiador, devido ao cenário de pandemia mundial, foram instalados 93 GW de energia eólica em todo o mundo. (GWEC, 2022)

Estima-se que a demanda global de energia tenha caído 4,5% em 2020, sendo essa a maior recessão desde o fim da Segunda Guerra Mundial. Apesar do contexto, as energias renováveis continuaram a crescer. A figura 1 apresenta, em termos de TWh, o crescimento anual de cada tipo de fonte de energia renovável a nível mundial. Percebe-se a grande influência do setor eólico na geração de energia. A relativa imunidade das energias renováveis para os eventos do ano passado é animadora. (BP STATISTICAL REVIEW OF ENERGY, 2021)

Figura 1 Mudança anual de geração mundial de energia renovável em TWh

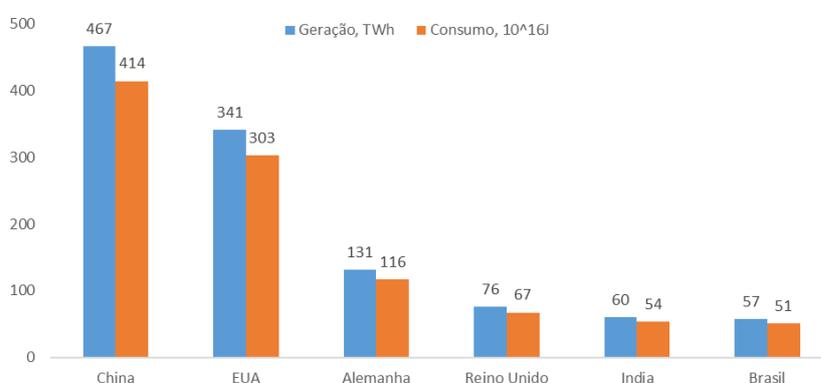


Fonte: Adaptado de BP Statistical Review Of Energy (2021)

Apesar da queda de 4,6% no consumo brasileiro de compósitos em 2020, decorrente da pandemia mundial que afetou toda a cadeia produtiva, as expectativas de crescimento do setor 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)

Conforme a imagem 02, em 2020 o Brasil foi o 6º maior produtor e consumidor de energia eólica do mundo, com uma produção de 57 TWh (1,6% maior do que em 2019) e consumo de 0,5 EJ (2% maior do que em 2019).

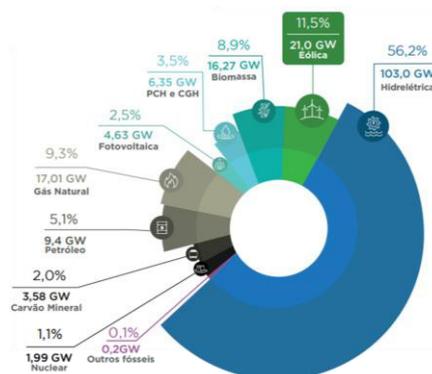
Figura 2 Ranking de geração e consumo de energia eólica em 2020



Fonte: Adaptado de BP Statistical Review Of Energy (2021)

Já o ano de 2021 foi marcado pela maior ampliação de geração de energia eólica no Brasil. As usinas eólicas constituíram cerca de 21 GW de potência instalada e responderam por quase 11,5% (figura 3) da matriz energética brasileira. (BERNARDINO, 2022)

Figura 3 Matriz Elétrica Brasileira em GW



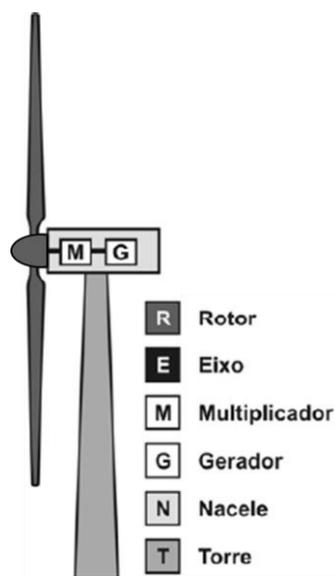
Fonte: ABEEólica (2022)

A nível mundial, o Brasil ocupa a sétima posição em potência instalada e a previsão é que em 2026 (ABEE, 2022) a potência instalada aumente para 33,05 gigawatts. Esse cenário de crescimento e, principalmente de desenvolvimento, é animador para as espumas PET (polietileno tereftalato), que estão cada vez mais presentes em partes estruturais de geradores de energia eólica, substituindo as espumas PVC e a madeira balsa.

As turbinas eólicas, ou aerogeradores, são sistemas que convertem a energia cinética em energia elétrica. As turbinas eólicas são divididas em duas categorias, se considerada a orientação dos seus eixos: as de eixo vertical e as de eixo horizontal. Os aerogeradores de eixo horizontal possuem três componentes básicos (figura 4), o rotor com as pás eólicas, a nacelle e a torre. A nacelle é composta pelos principais componentes, como o gerador elétrico, a caixa multiplicadora de velocidades, eixos, mancais, sistema de freios e controle e mecanismos de giro da turbina.

No rotor ficam acopladas as pás eólicas. O eixo que transmite o torque das pás apresenta uma velocidade de rotação baixa, por isso é utilizado um multiplicador de velocidades de engrenagens. Após o multiplicador é conectado ao gerador elétrico que transforma a energia mecânica em energia elétrica. (WENZELL, 2007)

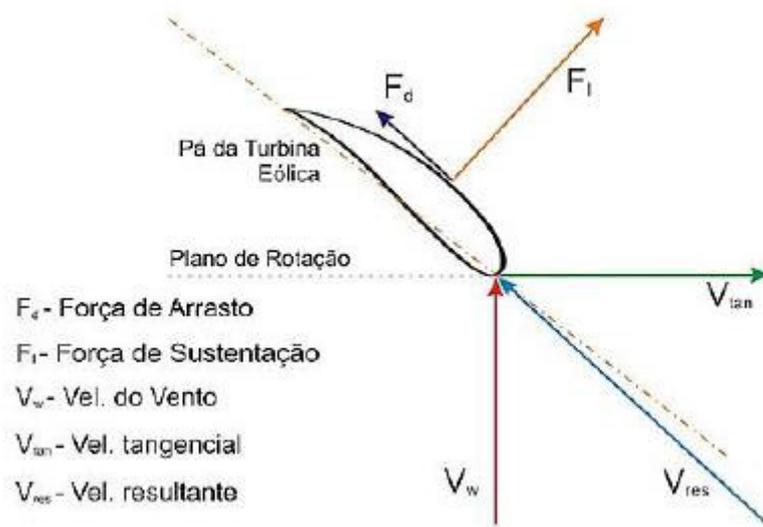
Figura 4 Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal



Fonte: Adaptado de Dutra (2008)

As pás eólicas são perfis aerodinâmicos responsáveis pela interação direta com a massa de ar em movimento, convertendo parte de sua energia cinética em trabalho mecânico. As pás são submetidas a diversos esforços mecânicos, conforme podemos ver na figura 5. Inicialmente fabricadas em alumínio, atualmente são fabricadas em materiais compósitos. (DUTRA 2008)

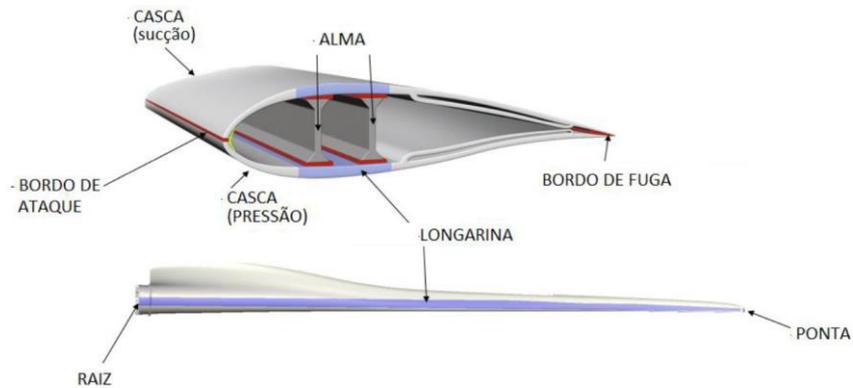
Figura 5 Forças atuantes em uma pá eólica



Fonte: Abendi (2020)

A figura 6 apresenta as principais partes que compõem uma pá eólica. A raiz da pá é responsável por conectar a estrutura com o cubo do rotor. A raiz é a parte da pá que é submetida aos maiores valores de esforços mecânicos, por isso ela é geralmente composta apenas de reforço e resina. A alma é uma peça fundamental que se estende longitudinalmente e é um componente estrutural que distribui os esforços. Ela é fixada nas cascas na região das sparcaps por meio de colas adesivas. As cascas formam a estrutura aerodinâmica da pá e são compostas principalmente de fibra e resina, e em algumas regiões, onde os esforços são menores, por madeira balsa e/ou espuma (PET/PVC). São necessárias duas cascas para formar uma pá: a casca pressão (lado de maior pressão aerodinâmica) e casca sucção (lado de menor pressão aerodinâmica). (ABENDI, 2020)

Figura 6 Partes de uma pá eólica



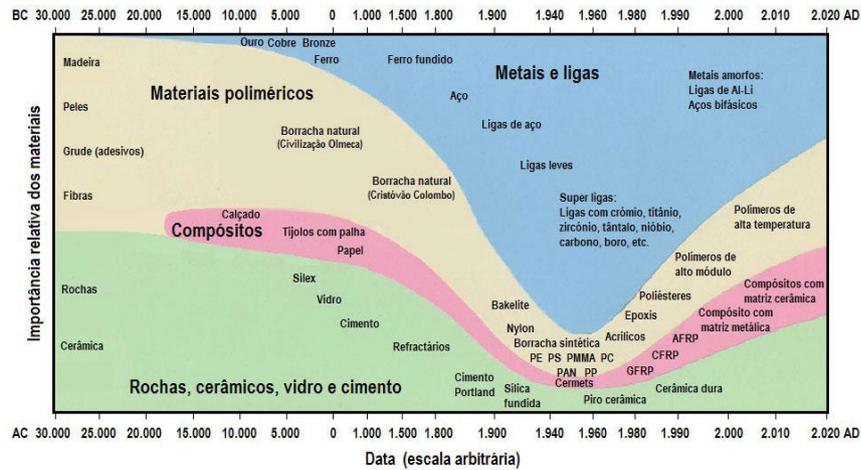
Fonte: Adaptado de Abendi (2020)

2.2 Materiais Compósitos

O estudo dos compósitos como uma classe de materiais (distinta dos metais, cerâmicas e polímeros) é recente e deu-se na metade do século XX. A ideia de unir diferentes materiais e, assim, mesclar as diferentes propriedades dos materiais envolvidos, abre um leque considerável de oportunidades para o projeto. (CALLISTER, 2016)

A figura 07 apresenta a importância relativa dos materiais ao longo da história. Percebe-se que, a partir de meados do século XIX, aumentou a importância dos materiais poliméricos, bem como dos materiais compósitos. Isso aconteceu principalmente pelo avanço no conhecimento desses materiais, pois o seu desenvolvimento está atrelado ao conhecimento da existência destes materiais, na facilidade de se obter a matéria prima, nas suas características quanto à facilidade de se processar, quão duráveis e mais recentemente os custos envolvidos e os impactos socioambientais associados. (JUNIOR, 2015)

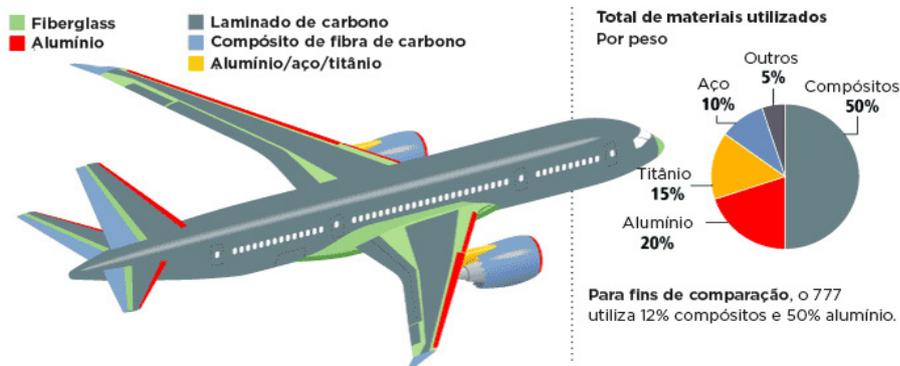
Figura 7 Importância relativa dos materiais ao longo do tempo



Fonte: Caetano (2010)

A busca por materiais com um conjunto de propriedades específicas (não usuais) acontece bastante na indústria eólica, aeroespacial, submarina, bioengenharia e de transporte. Um exemplo disso acontece na indústria aeronáutica, onde deseja-se um material leve, resistente, rígido e resistente a abrasão e ao impacto. Tais propriedades são atendidas apenas pelos compositos, pois entre os materiais monolíticos (possui microestrutura uniforme e contínua, formada a partir de um único material), o aumento da resistência geralmente implica na redução a tenacidade. A figura 08 apresenta os principais materiais utilizados no boing 787. Observa-se que 50% são materiais compositos, ilustrando a importância desses materiais para o setor. (CALLISTER, 2016)

Figura 8 Materiais utilizados no boing 787



Fonte: Medium (2018)

Um compósito pode ser definido como sendo a combinação de dois ou mais materiais, insolúveis, que são combinados para produzir um novo material com propriedades melhores do que a de seus constituintes (ASTM, 2003; BARBERO, 2010).

A figura 09 apresenta duas das quatro subdivisões principais dos materiais compósitos: compósitos fibrosos e compósitos particulados. A fase dispersa nos compósitos particulados é equiaxial (ou seja, as dimensões das partículas são aproximadamente as mesmas em todas as direções); nos compósitos fibrosos, a fase dispersa apresenta a geometria de uma fibra (ou seja, uma grande razão entre o comprimento e o diâmetro). (CALLISTER, 2016)

Figura 9 Classificação de compósitos de acordo com o reforço



Fonte: Junior (2015)

Segundo Barbero (2010), os principais fatores que orientam o uso dos compósitos são a redução de peso, resistência a corrosão, baixa expansão térmica, melhor vida em fadiga, alta condutividade térmica, etc. A tabela 01 apresenta outras vantagens associadas ao uso de materiais compósitos.

Tabela 1 Vantagens e Desvantagens dos Compósitos

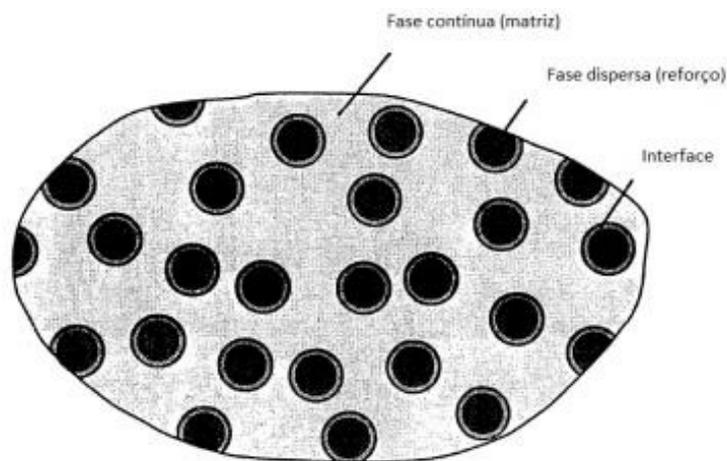
<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Redução de peso	Custo da matéria-prima
Propriedades adaptáveis	Propriedades transversais podem ser fracas
Melhor vida em fadiga	Matriz é fraca, baixa dureza
Resistência a corrosão	Reuso e substituição pode ser difícil
Amortecimento inerente	Difícil análise

Fonte: Adaptado de Peters, 1998

2.2.1 Fases de um Compósito

A maioria dos materiais compósitos são constituídos por duas fases: uma fase chamada matriz e outra fase chamada reforço (que está dispersa na matriz). Uma terceira fase pode ser mencionada, a interface, que é criada devido as interações químicas que ocorrem entre os constituintes. A figura 10 ilustra as três fases de um compósito. (CALLISTER, 2016)

Figura 10 Fases presentes em um compósito



Fonte: Daniel et al (2006)

Os reforços na forma de fibras são preferidos pois apresentam maior relação resistência-peso e rigidez-peso do que na forma em volume. Essas características são expressas em termos dos parâmetros resistência específica e módulo específico, que correspondem, respectivamente, às razões entre o limite de resistência à tração e a massa específica e entre o módulo de elasticidade e a massa específica. (BARBERO, 2010; CALLISTER, 2016)

Os principais componentes dos materiais compósitos são as fibras e a matriz. As fibras fornecem a maior parte da resistência e rigidez e são geralmente isotrópicas (possuem diferentes propriedades em diferentes direções), e a matriz liga e conecta as fibras fornecendo a transferência de carga entre elas. (BARBERO, 2010; PETERS, 1998; DANIEL et al, 2006)

A fibra é longa, com razão comprimento-diâmetro maior que 100. A matriz pode ser um material polimérico (resinas poliéster, epóxi, etc.), metálico, cerâmico. Quando a fibra e a matriz são unidas para formar um compósito, elas retêm suas

identidades individuais e ambas influenciam diretamente as propriedades do compósito final. (PETERS, 1998)

A fibra de vidro é considerada a mais comum entre todos os tipos de fibra, isso devido a sua alta resistência e baixo custo. Na tabela 2, apresentamos algumas propriedades dos dois principais tipos de fibra de vidro, E-Glass e S-Glass. Além da fibra de vidro, existem outros tipos de fibra que podem ser utilizadas como material de reforço para compósitos de matriz polimérica. São exemplos o carbono, o boro, a aramida. (AGARWAL, BROUTMAN, CHANDRASHEKHARA, 2006)

Tabela 2 Propriedades das fibras de vidro E-Glass e S-Glass

Propriedade [μn]	E-Glass	S-Glass
Densidade [g/cm ³]	2,54	2,49
Resistência à Tração [MPa]	3448	4585
Módulo de Tração [GPa]	72,4	85,5
Range de diâmetro [μ m]	3-20	8-13

Fonte: Agarwal, Broutman, Chandrashekhara (2006)

As propriedades dos compósitos são diretamente dependentes das propriedades dos constituintes, da geometria da fase dispersa e da distribuição das fases. Um dos principais parâmetros é a fração volumétrica (ou mássica) do reforço ou razão volumétrica da fibra. A geometria da fase dispersa está relacionada a forma, tamanho e orientação das partículas. (DANIEL et al, 2006; CALLISTER 2016)

A matriz influencia fortemente diversas propriedades mecânicas dos compósitos, tais como a resistência transversal, propriedades cisalhantes e de compressão. A matriz frequentemente limita a temperatura de serviço do compósito. (AGARWAL, BROUTMAN, CHANDRASHEKHARA, 2006)

Segundo Peters (1998), as funções e requisitos da matriz são:

- Manter as fibras no lugar dentro da estrutura;
- Ajudar a distribuir ou transferir cargas;
- Proteger os filamentos;
- Controlar as propriedades elétricas e químicas do compósito;
- Carregar o cisalhamento interlaminar;
- Minimizar absorção de umidade;

- Deve molhar e colar a fibra;
- Baixo coeficiente de expansão térmica;
- Deve fluir e penetrar os feixes de fibra completamente;
- Eliminar bolhas durante o processo de cura;
- Possuir resistência, módulo e alongamento razoáveis;
- Deve ser elástico para transferir carga para as fibras;
- Possuir resistência em altas temperaturas;
- Ser facilmente processado na forma do composto final;
- Possuir estabilidade dimensional.

Os materiais poliméricos são amplamente utilizados como matriz de compósitos. Além do baixo custo, são materiais de fácil processamento, boa resistência química e baixo peso específico. (AGARWAL, BROUTMAN, CHANDRASHEKHARA, 2006)

Um polímero é uma macromolécula composta por milhares de unidades de repetição denominada meros, ligadas por ligação covalente. Um polímero é formado a partir de um monômero, que é uma molécula com uma unidade de repetição. Os polímeros podem ser divididos, dependendo do tipo de monômero, em três grandes classes: Plásticos, Borrachas e Fibras. (CANEVAROLO, 2002)

Os polímeros podem ser classificados, de acordo com a sua estrutura, em termoplásticos ou termofixos. Os polímeros termofixos amolecem uma vez com o aquecimento, sofrem o processo de cura no qual se tem uma transformação química irreversível tornando-se rígido, e posteriores aquecimentos não mais alteram seu estado, ou seja, infusíveis e insolúveis. Exemplos de termofixos são a baquelite e a resina epóxi. Na tabela 3, apresentamos as propriedades de alguns compósitos com diferentes tipos de fibra com a matriz composta de resina epóxi. Percebe-se que o produto possui características intermediárias quando comparada as de seus componentes. (CANEVAROLO, 2002)

Tabela 3 Comportamento mecânico de compósitos de epóxi com vários tipos de fibras

Fibra Compósito *	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência a tração (GPa)	Densidade (g/cm ³)
Resina epóxi	3,5	0,09	1,20
Fibra de vidro tipo E	72,4	2,4	2,54
Compósito de epóxi	45	1,1	2,10
Fibra de vidro tipo S	85,5	4,5	2,49
Compósito de epóxi	55	2,0	2,00
Fibra de boro	400	3,5	2,45
Compósito de epóxi	207	1,6	2,10
Fibra de grafite de alta resistência	253	4,5	1,80
Compósito de epóxi	145	2,3	1,60
Fibra de grafite de alto módulo	520	2,4	1,85
Compósito de epóxi	290	1,0	1,63
Fibra de aramida (Kevlar)	124	3,6	1,44
Compósito de epóxi	80	2,0	1,38

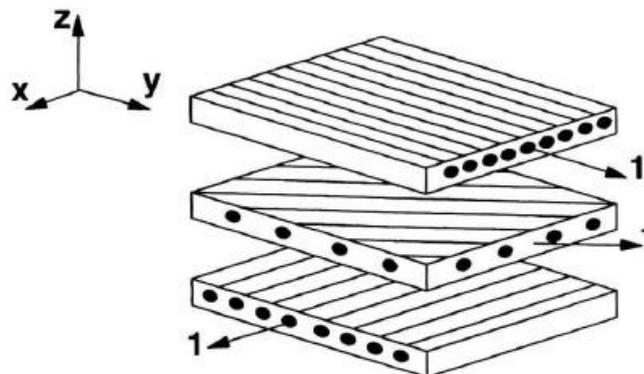
* Compósito com 33,3% de fibra unidirecional

Fonte: Canevarolo (2002)

2.2.2 Compósitos Estruturais

Como as fibras não contribuem para a resistência transversal a direção da fibra, e a resistência da matriz é muito baixa, torna-se necessário adicionar camadas com várias orientações para resistir a todos os carregamentos aplicados. Uma forma para alcançar isso é criando um laminado, empilhando camadas com várias orientações, conforme a figura 11. (BARBERO, 2010; PETERS 1998)

Figura 11 Três camadas empilhadas com orientações diferentes em um laminado

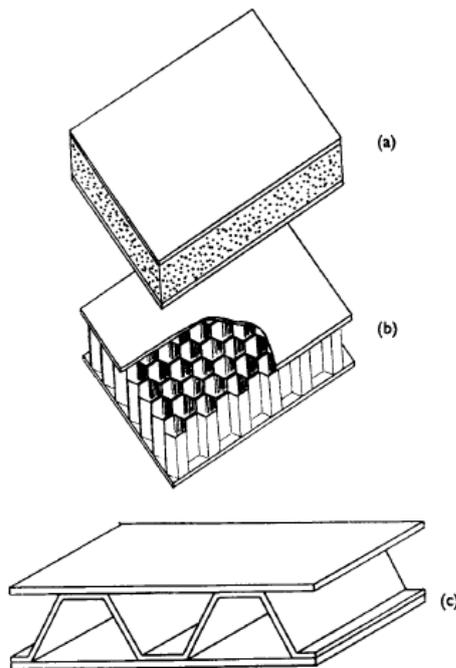


Fonte: Barbero (2010)

Um compósito laminado é composto por um conjunto de camadas sobrepostas, onde cada camada possui uma orientação específica. Dependendo de do conjunto de orientação dessas camadas, pode-se definir quatro tipos de compósitos laminados: unidirecionais (orientação da direção de alta resistência é mesma para todas as camadas), cruzados (orientações da camada de alta resistência alternadas em ângulos de 0° e 90°), com camadas em ângulo (orientações alternadas de alta resistência de $\pm\theta^\circ$, por exemplo $\pm 45^\circ$) e os multidirecionais (várias orientações de alta resistência). (CALLISTER, 2016)

Em algumas situações, torna-se atrativo combinar diferentes materiais de reforço para atender a requisitos específicos e/ou reduzir o custo do material. Compósitos híbridos são aqueles nos quais usa-se mais do que um tipo de material de reforço. O compósito híbrido mais comum é do tipo sanduiche, figura 12. Um núcleo, como a espuma (PVC ou PET) ou a balsa, é posicionado entre duas faces. Isso aumenta o momento de inércia entre as faces, aumenta a flexibilidade do compósito e reduz o peso e o custo do produto. (BARBERO, 2010)

Figura 12 Tipos de laminado sanduiche com núcleo de (a) espuma, (b) honeycomb e (c)ondulado



Fonte: Vinson apud Gama (2017)

2.2.3 Processos de Fabricação

A qualidade do produto final, em termos do alcance do desempenho mecânico esperado, está associada não apenas a seleção e qualidade dos materiais, mas também aos processos e técnicas que serão empregados na fabricação. Fatores importantes como fração volumétrica de fibra-matriz, orientação correta do reforço, tempo de trabalho e tempo de cura da matriz podem não ser repetitivos se o processo escolhido não for o mais adequado. (MARINUCCI, 2019)

Santos (2017) investigou a influência dos métodos de fabricação de compósitos nas suas propriedades mecânicas finais. Ele comparou os métodos de *Hand Lay Up* (HLU) e de moldagem por transferência de resina assistida por vácuo (VARTM), e verificou que ambos os processos apresentaram nível de resistência mecânica similares, e que o que mais impactava a resistência era o emprego do pós cura em ambos os processos.

Em qualquer ramo da indústria, a qualidade do produto é extremamente impactada pela qualidade da matéria prima. Na fabricação de compósitos não é diferente. Fatores como temperatura e proporção do sistema resina-endurecedor, acomodação e posicionamento das camadas de reforço, dimensional do núcleo, entre outros, precisam ser controlados dentro do processo para a garantia da qualidade do produto final.

Junior (2021) verificou a influência da quantidade e do tipo de adesivo spray *dry layup adhesive (DLUA)*, utilizado para melhorar a acomodação das camadas de fibra no molde, nas propriedades mecânicas do compósito. Os resultados obtidos por ele mostraram que as tensões de ruptura tiveram pouca influência em função da variação da quantidade e do tipo de adesivo spray aplicado com as condições e métodos utilizados.

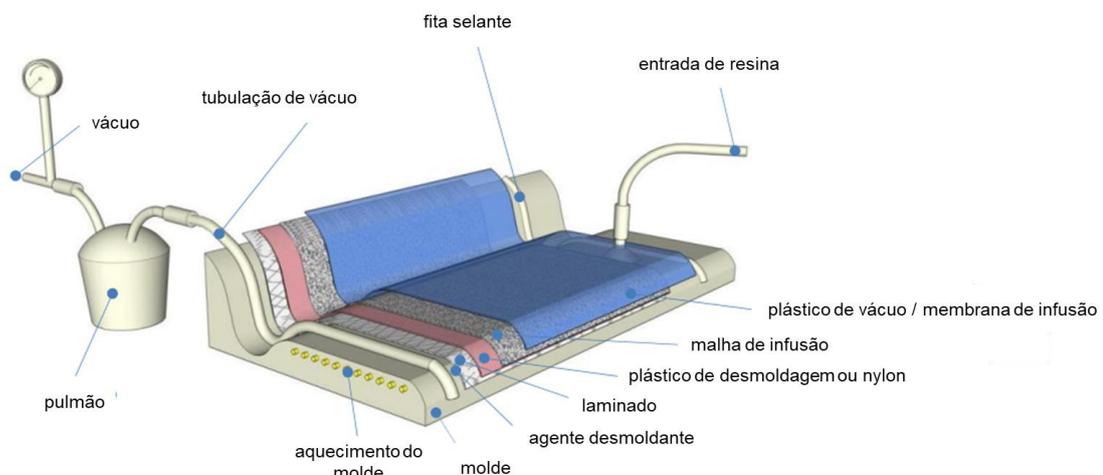
Existem duas formas de combinar a fibra e a matriz. Uma forma é pelo sistema pré-impregnado (prepeg) e a outra é pelo sistema de impregnação na fabricação. Nos processos onde a impregnação da matriz na fibra ocorre no momento da fabricação a cura da matriz ocorre em curto espaço de tempo. Por isso, é importante o conhecimento de técnicas para proporcionar correta molhabilidade das fibras. (MARINUCCI, 2019)

Segundo Nijssen (2015), os processos podem ser classificados em tecnologia de molde aberto ou fechado. Molde aberto significa que o produto não é coberto por um segundo molde durante o processo de impregnação.

Os principais processos de molde aberto são: laminação manual (*hand lay up*), laminação por projeção (*spray-up*), enrolamento filamental (filament winding) e pultrusão. Os principais processos de molde fechado são: moldagem por injeção a vácuo e infusão, moldagem por transferência de matriz e moldagem por prensagem. (MARINUCCI, 2019)

No Processo de Moldagem por Infusão de Resina Assistida a Vácuo (figura 13), o material de reforço seco é posicionado em um molde e selado com um saco plástico de vácuo. Em seguida, é aplicado vácuo e a resina é sugada para o laminado via tubos.

Figura 13 Processo de Moldagem por Infusão de Resina Assistida a Vácuo



Fonte: Adaptado de Nijssen (2015)

O processo consiste basicamente em cinco etapas: i) preparação do molde, ii) posicionamento do material de reforço, iii) vácuo e iv) infusão e v) cura. Tendo em vista que, nesse processo, o molde é fixo e reutilizável, é necessário, após cada ciclo do processo, a manutenção do mesmo. Essa manutenção inclui limpeza e aplicação de desmoldante. Após a preparação, inicia-se a fabricação do produto com o empilhamento das fibras e/ou núcleo conforme especificações do projeto.

O material de núcleo é fornecido geralmente em formato de placas com dimensões específicas para cada modelo de pá. É comum, dentro do processo de

2.3 Ensaio de Tração

O comportamento mecânico de um material refere-se a resposta do material a forças externas. Em um carregamento, o material pode deformar ou fraturar. A deformação é elástica quando, após a retirada da carga, o material retorna a sua forma original, isso ocorre geralmente em pequenas tensões. Quando o material não retorna a sua forma original, geralmente em grandes tensões, dizemos que ele sofreu deformação plástica. (HOSFORD, 2010)

A fratura é a quebra do material em duas ou mais partes. Se ela ocorre antes da deformação plástica, dizemos que o material é frágil. Porém, se ele apresenta altas deformações antes da fratura, dizemos que ele é dúctil. (HOSFORD, 2010)

A tensão é definida como a intensidade da força em um ponto. Se o estado de tensão é o mesmo em qualquer lugar no corpo, podemos relacionar da seguinte forma,

$$\sigma = F / A \quad (1)$$

Onde σ é a tensão aplicada na área A pela força F . Quando essa força é normal a área, a tensão é chamada tensão normal (tração ou compressão).

Uma deformação normal infinitesimal é definida como sendo a deformação do comprimento L :

$$d\varepsilon = dL / L \quad (2)$$

Integrando a partir de um comprimento inicial L_0 até um comprimento final L , temos que:

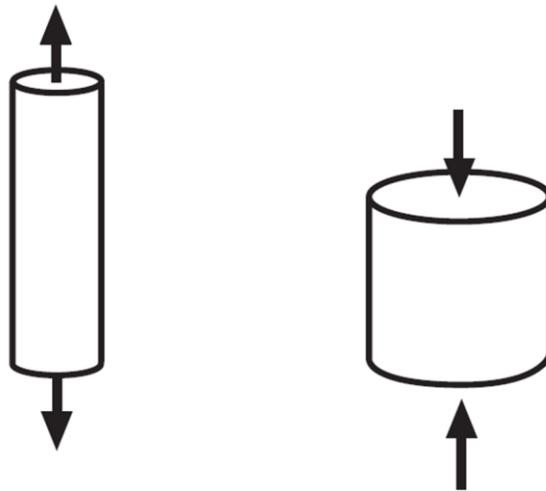
$$\varepsilon = \int dL / L = \ln (L / L_0) \quad (3)$$

Essa forma finita é chamada deformação verdadeira. Uma forma alternativa, deformação de engenharia, é definida como:

$$e = \Delta L / L_0 \quad (3)$$

Amostras de materiais de engenharia são submetidas a uma diversidade de ensaios mecânicos para medir sua resistência ou outras propriedades de interesse. Essas amostras são chamadas espécimes, e geralmente são fraturadas ou intensamente deformadas durante os testes. O teste mais básico consiste em fraturar o material aplicando uma força de tração ou compressão nele, como mostra figura 15. (DOWLING, 2013)

Figura 15 Esquema de ensaios de tração e compressão



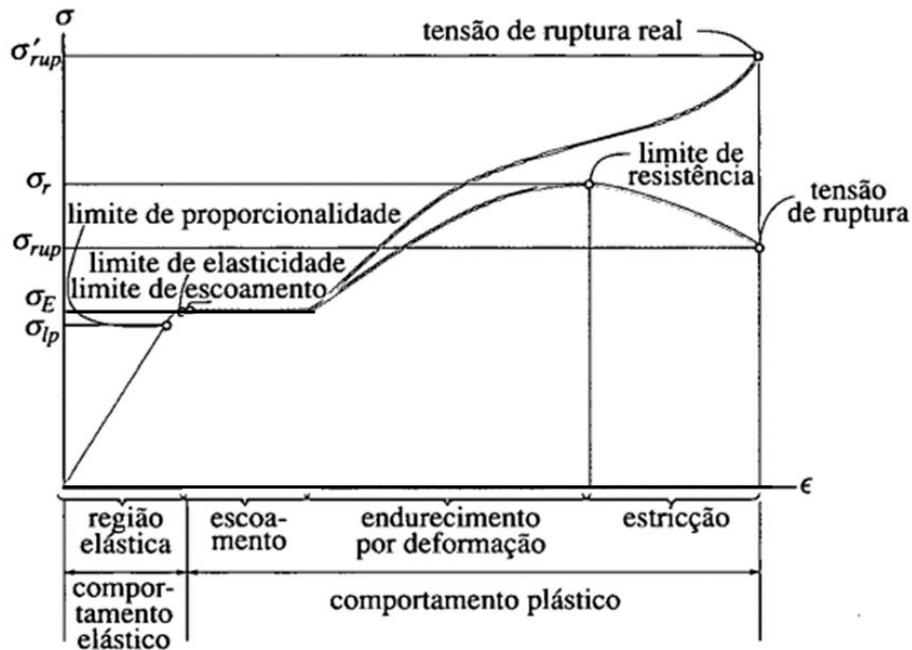
Fonte: Adaptado de Dowling (2013)

As propriedades mais importantes em um ensaio de tração são: o limite de escoamento e a resistência a tração. Como a tensão de escoamento é o nível de tensão que inicia a deformação plástica, é de grande valia conhecer o limite na qual o material irá deixar de se comportar de forma elástica e passará a deformar-se plasticamente. Já a tensão máxima que o material é capaz de suportar é chamada de resistência a tração. (HOSFORD, 2010)

A figura 16 apresenta um diagrama tensão-deformação convencional e real típico para um material dúctil. Percebe-se no início da curva um comportamento elástico, onde a tensão é proporcional a deformação. Essa fase termina no ponto considerado limite de proporcionalidade ou limite de escoamento. Se a carga for removida antes sem ultrapassar esse ponto, o material retorna a sua forma original. Caso a tensão ultrapasse esse ponto, o material começa a deformar plasticamente e proporcionalmente em todo o seu volume, em uma fase conhecida como

escoamento. Após um certo nível de deformação plástica, o material endurece devido a deformação sofrida. O material ainda suporta um aumento na tensão até o limite de resistência, onde ocorre a estricção e, posteriormente, a ruptura. (HIBBELER, 2004)

Figura 16 Diagrama Tensão x Deformação convencional e real para material dúctil



Fonte: Adaptado de Hibbeler (2004)

Nem todos os materiais apresentam esse comportamento em um ensaio de tração. No caso apresentado, o material é capaz de suportar grandes deformações antes da fratura, esse comportamento é encontrado em materiais dúcteis. Já os materiais frágeis, apresentam pouco ou nenhum escoamento antes da fratura. (HIBBELER, 2004)

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada nesse estudo teve como base a norma ASTM D 3039/D 3039M que norteia o ensaio de tração em materiais compósitos.

3.1 Materiais e equipamentos

Todos os materiais utilizados para a fabricação dos corpos de prova foram disponibilizados pela empresa Aeris Energy, onde o estudo foi realizado. No anexo 01, listamos os materiais e as respectivas funções de cada um.

3.1 Preparação das amostras

Utilizamos uma mesa de metal como molde para a preparação dos corpos de prova. Primeiramente realizamos a limpeza da superfície do molde. Em seguida, aplicamos fita crepe nas extremidades, para proteger a região onde posteriormente foi posicionado a fita selante, aplicamos uma demão de desmoldante em toda superfície do molde e aguardamos a secagem (figura 17).

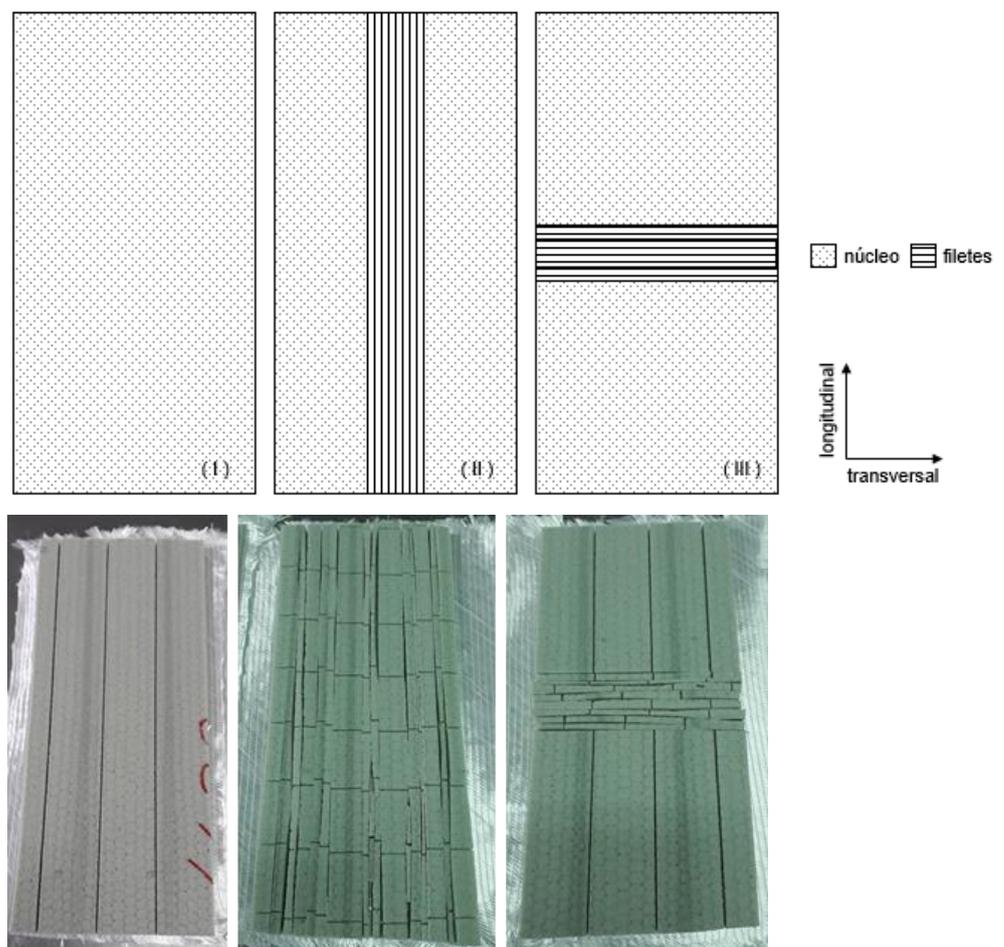
Figura 17 Aplicação de desmoldante



Fonte: Autor

Posicionamos três camadas de fibra de vidro com orientação biaxial ($\pm 45^\circ$) de gramatura de 800 g/m^2 e dimensões de $350\text{mm} \times 160\text{mm}$, uma ao lado da outra. Em seguida, posicionamos acima de cada uma das camadas, os núcleos (figura 18) que seriam testados: i) sem preenchimento, ii) com filetes no sentido longitudinal e iii) com filetes no sentido transversal. Os filetes foram previamente fabricados do mesmo material do núcleo com largura de 5mm .

Figura 18 Núcleo a) sem preenchimento b) com preenchimento longitudinal e c) com preenchimento transversal



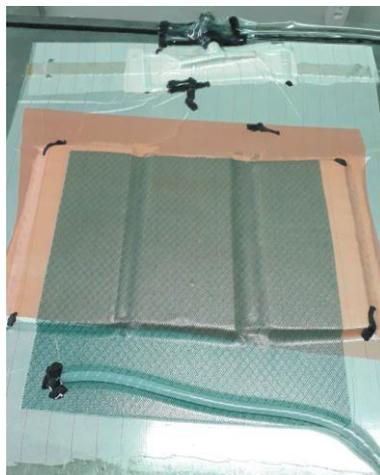
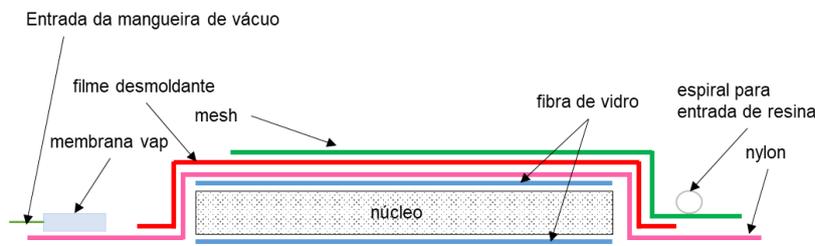
Fonte: Autor

Posicionamos uma camada de fibra de vidro com orientação biaxial ($\pm 45^\circ$) de gramatura de 800 g/m^2 e dimensões de $350\text{mm} \times 160\text{mm}$ acima de cada núcleo e posicionamos uma camada de nylon acima de todo o composto. O nylon tem por função auxiliar na desmoldagem e auxilia na distribuição do vácuo através da peça, pois funciona como uma “ponte” por onde o ar escoar. Uma membrana também foi

confeccionada para impedir que a resina entrasse na tubulação de vácuo e prejudicasse a bomba de vácuo. A membrana permite apenas a passagem de ar, garantindo que a resina não entre na tubulação de vácuo.

Foi posicionado também plástico perfurado e malha de infusão (figura 19) para auxiliar o fluxo de resina durante a infusão. Foi utilizado tubo espiral como canal para a entrada de resina. Após posicionar todos os materiais secundários, aplicamos fita selante nas extremidades do molde e posicionamos o saco plástico de vácuo sobre a fita selante. Em seguida ligamos a bomba de vácuo.

Figura 19 Plano de Infusão

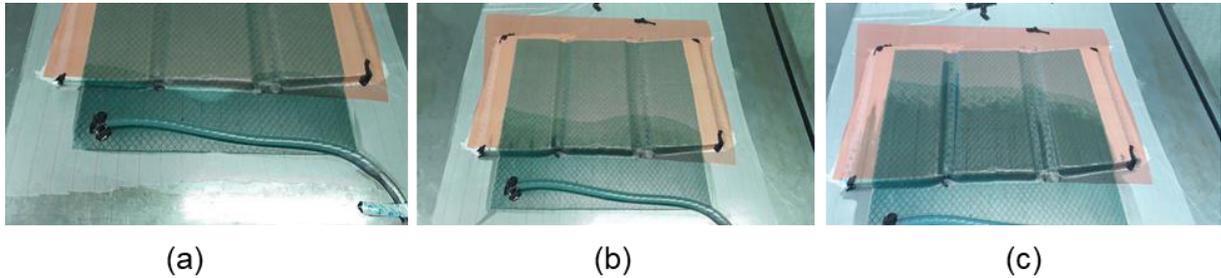


Fonte: Autor

Após ligarmos a bomba de vácuo, posicionamos uma manta elétrica de aquecimento a 40°C para aumentar a temperatura do composto afim de reduzir a viscosidade da resina e mantivemos por cerca de 30 minutos. Após esse tempo, retiramos a manta e demos início a infusão. Utilizamos cerca de 2kg do sistema resina/endurecedor para impregnar o laminado e o tempo de infusão foi de 10

minutos. Após a infusão, reposicionamos a manta elétrica a 80°C e mantivemos por um tempo de 4 horas.

Figura 20 Fluxo de resina após a) 30s b) 1min e c) 5min



Fonte: Autor

Após a cura do material, realizamos a usinagem das peças para confecção de amostras. As dimensões dos corpos de prova são apresentadas na figura abaixo

Figura 21 Dimensões dos corpos de prova



Fonte: Autor

3.2 Ensaio de Tração

A dimensão dos corpos de prova e os parâmetros para a realização dos ensaios de tração foram baseados na norma ASTM D 3039/D 3039M que estabelece um método de teste padrão para determinação de propriedades de tração de materiais compósitos de matriz polimérica. Ela exige um mínimo de 5 amostras por tipo configuração a ser testada. A velocidade de aplicação da carga foi de 2 mm/min, conforme especifica a norma.

Utilizamos a máquina universal de tração modelo MTS Landmark® Servohydraulic Test System (figura 22), disponibilizada pelo Laboratório de Pesquisa e Tecnologia de Soldagem (LPTS).

Figura 22 Máquina Universal de Ensaios



Fonte: Autor

Os dados gerados relativos aos ensaios foram tratados e analisados pela ferramenta Excel.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 04, apresentamos os dados mecânicos referente ao material de núcleo. O material de núcleo utilizado foi uma espuma de PET 100% reciclada e que possui boa adesão excelente resistência química.

Tabela 4 Dados mecânicos do núcleo de PET

Propriedade	Valor	Norma
Densidade [Kg/m ³]	100	ISO 845
Resistência a Tração [MPa]	1,82	ASTM D-1623
Módulo de Tração [MPa]	116	ASTM D-1623

Fonte: Datasheet do Material

Na tabela 05, apresentamos os dados mecânicos referentes ao sistema resina-endurecedor utilizado. Foi utilizado um sistema de resina para infusão (resina epóxi e endurecedor) de baixa viscosidade e excelentes propriedades mecânicas. A fração em massa da resina/endurecedor é 100:28 ±2. A temperatura ótima de processo do sistema é na faixa de 15 – 50°C e o tempo médio de cura é 8h a 70°C, podendo ser reduzido, aumentando-se a temperatura de cura.

Tabela 5 Dados mecânicos do sistema resina-endurecedor epóxi

Propriedade	Valor	Norma
Densidade [g/cm ³]	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

Fonte: Datasheet do Material

Na tabela 06 estão sintetizados os valores de limite de resistência a tração médio das amostras testadas. Podemos perceber que há pouca diferença no comportamento mecânico entre os três tipos amostras. As amostras do tipo C foram as que apresentaram os menores valores de resistência a tração, apresentando um valor de resistência a tração médio de 8,55 MPa (cerca de 14% menor do que a do tipo A). Já as amostras do tipo B apresentaram os maiores valores de resistência a

tração, apresentando um valor de resistência a tração médio de 11,95 (cerca de 21% maior do que a do tipo A).

Tabela 6 Limite de Resistência a Tração médio

Tipo	Limite de Resistência a Tração médio [MPa]	Desvio Padrão
A	9,87	0,85
B	11,95	0,65
C	8,55	0,82

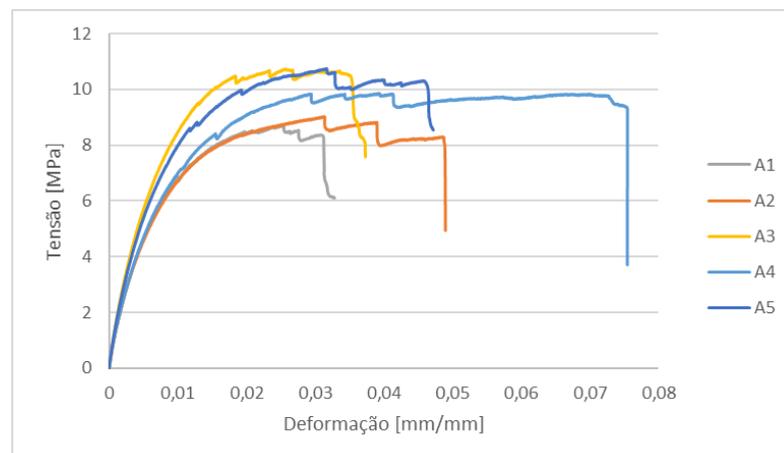
Fonte: Autor

As amostras do tipo 2 apresentaram maior resistência a tração. Isso ocorreu, pois, devido ao aumento da área superficial e de vazios no interior do núcleo, a quantidade de resina no laminado aumentou, tanto devido a maior área superficial, quanto devido aos vazios disponíveis dentro laminado. Essa maior quantidade de resina influenciou na resistência mecânica do laminado, já que a resina possui resistência mecânica consideravelmente maior do que a espuma PET

Pelos gráficos, percebemos um certo comportamento dúctil das amostras. Apesar dos baixos valores de resistência, apresentaram uma deformação plástica considerável. Isso ocorre devido as propriedades elásticas da matriz.

No gráfico 01, são apresentadas as curvas tensão-deformação das amostras do tipo A (núcleo sem filetes).

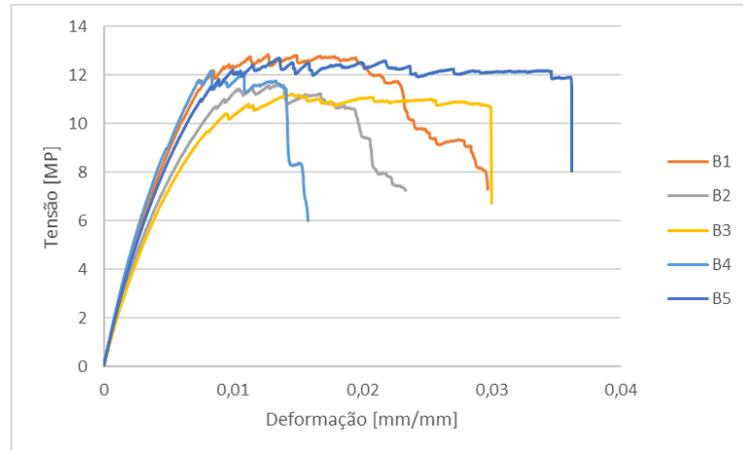
Gráfico 01 Curva Tensão-Deformação das amostras do tipo A



Fonte: Autor

No gráfico 02, são apresentadas as curvas tensão-deformação das amostras do tipo B (filetes no sentido longitudinal).

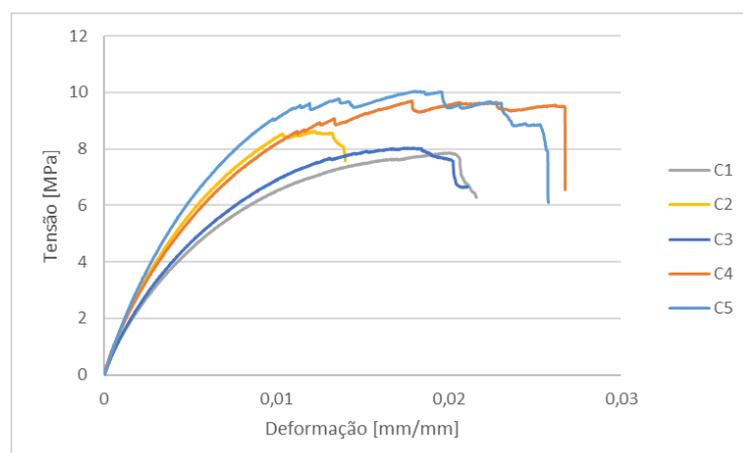
Gráfico 02 Curva Tensão-Deformação das amostras do tipo B



Fonte: Autor

No gráfico 03, são apresentadas as curvas tensão-deformação das amostras do tipo C (filetes no sentido transversal). Como mencionado, elas apresentaram menor resistência a tração, como esperado. Isso ocorreu possivelmente devido a descontinuidade no sentido da aplicação da carga.

Gráfico 03 Curva Tensão-Deformação das amostras do tipo C



Fonte: Autor

Todos os corpos de prova apresentaram o mesmo padrão de fratura. Como a espuma PET apresenta baixa resistência mecânica em comparação com a

resina e a fibra de vidro, ela era o primeiro material a romper. A resina conferia ao laminado certa característica dúctil. Já a fibra era responsável pela resistência mecânica do laminado e era a última a fraturar. O núcleo sempre rompia antes da fibra. O que mudava entre os tipos de corpos de prova era a região de núcleo afetada pela trinca.

Na tabela 7, podemos ver que os corpos de prova do tipo A apresentaram menor módulo de elasticidade, seguido pelos corpos de prova do tipo C. Os corpos de prova do tipo B apresentaram módulo de elasticidade bastante elevado em comparação com o do tipo A, cerca de 57% maior. Como já dito, pela maior influência da resina no laminado.

Tabela 7 Módulo de Elasticidade médio

Tipo	Módulo de Elasticidade [MPa]	Desvio Padrão
A	1455	1,06
B	2292	42
C	1584	122

Fonte: Autor

A figura 23 apresenta um corpo de prova do tipo A fraturado. Percebe-se que a trinca se propagou por uma grande extensão. Como nesse tipo o núcleo não possui discontinuidades, ela pôde se propagar por todo o corpo de prova sem qualquer tipo de resistência.

Figura 23 Corpo de Prova Tipo A fraturado



Fonte: Autor

A figura 24 apresenta um corpo de prova tipo B fraturado. Percebe-se que a região de núcleo afetada pela fratura é bem menor do que a do tipo A. Isso se

deve a presença das descontinuidades no corpo de prova, que impediram a propagação da trinca.

Figura 24 Corpo de Prova tipo B fraturado



Fonte: Autor

A figura 25 apresenta um corpo de prova tipo C fraturado. Percebe-se que a região de núcleo afetada pela fratura é um pouco menor do que a do tipo A, também devido as descontinuidades. A trinca iniciava na região de preenchimento, porém não tinha tempo para se propagar, a fraturava.

Figura 25 Corpo de Prova tipo C fraturado



Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo principal verificar a influência na resistência mecânica a tração do uso de filetes para preenchimento de gaps no material de núcleo.

Foram produzidas amostras com três tipos de configuração. A primeira configuração utilizando uma placa de núcleo sem ajuste. Na segunda configuração, utilizamos filetes de núcleo no sentido longitudinal. E na terceira configuração, utilizamos filetes de núcleo no sentido transversal.

Através dos resultados obtidos, concluímos que, para os parâmetros e condições apresentadas nesse estudo, apesar da pequena diferença entre os valores, podemos perceber que a presença de filetes no laminado tipo sanduíche influencia, mesmo que indiretamente, o comportamento mecânico do laminado. Principalmente quando falamos de preenchimento no sentido longitudinal, pois haverá um aumento no consumo de resina e conseqüentemente na resistência do material, porém, aumentará também o peso. Quando se trata de preenchimento no sentido transversal, percebe-se uma leve redução na resistência mecânica do laminado.

Por fim, ressaltamos que, é preciso levar em consideração os aspectos apresentados, na definição das condições de fabricações e uso de filetes no processo de fabricação de pás eólicas.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Sugerimos que, para trabalhos futuros, realize-se também ensaios de flexão para visualizar a influência do uso de filetes nessa propriedade do laminado. Pode-se também realizar o ensaio com quantidade maior de camadas de reforço ou com outro tipo de reforço, a fim de simular com maior precisão as condições de atuação do laminado. Por fim, pode-se alterar o material de núcleo e o padrão dos filetes, aumentando a área ou distribuição dos mesmos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, Bhagwan D., BROUTMAN, Lawrence. J., & CHANDRASHEKHARA, K. **Analysis and performance of fiber composites**. 3. Ed. John Wiley & Sons, 2006

ABEEólica. **Infovento nº24**. 2022. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wpcontent/uploads/2022/01/2022_01_InfoVento24.pdf>. Acesso em: 12 de janeiro de 2022.

ABENDI. Terminologia básica aplicável aos componentes do aerogerador. 2020.

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

_____. **ASTM D3039/D3039M-14. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials**. 2008

BARBERO, Ever J. **Introduction to composite materials design**. CRC press, 2010.

BERNARDINO, Erika. **Brasil termina 2021 com maior acréscimo em potência instalada desde 2016**. Almaco, 2022. Disponível em: <<https://almaco.org.br/2022/01/page/2/>>. Acesso em: 21 de janeiro de 2022.

BP. Statistical Review of World Energy. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>>. 2021. Acesso em: 28 de jan. de 2022.

BUNSELL, A. R., JOANNÉS, S. e THIONNET, A. **Fundamentals of fibre reinforced composite materials**. CRC Press, 2021

CAETANO, M. J. L. **Ciência e Tecnologia da Borracha**. Disponível em: <http://www.ctb.com.pt/?page_id=422> Acessado em: 12 de janeiro de 2022.

CALLISTER, W. R. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 9. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CANEVAROLO Jr, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**. 2. Ed. Artiber editora, São Paulo, 2002.

Compósitos nosso de cada dia. Medium, 2018. Disponível em: <<https://medium.com/@gatrininovacao/comp%C3%B3sitos-no-nosso-dia-a-dia-94548b474acc>>. Acesso em: 05 de fev. de 2022.

DANIEL, Isaac M. et al. **Engineering mechanics of composite materials**. New York: Oxford university press, 2006.

DOWLING, Norman E. **Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue**. 4. Ed. Pearson Education Limited, 2013.

DUTRA, Ricardo Marques. **Energia Eólica–Princípios e Tecnologia**. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito: Rio de Janeiro, 2008.

Consumo de materiais compósitos caiu 4,6% em 2020. Bemparana, 2021. Disponível em: < <https://www.bemparana.com.br/noticia/consumo-de-materiais-compositos-caiu-46-em-2020-251036#.Yertev7MLIU>>. Acesso em: 21 de jan. de 2022.

GAMA, Daniel Pereira Nunes. **Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche**. 2017. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense, 2017.

GWEC. **Global Wind Report**. Disponível em: <<https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf>>. 2021. Acesso em: 28 de jan. de 2022.

HIBBELER, R. C. Resistência dos Materiais. 5. Ed. Pearson Education Brasil, 2004.

HOSFORD, Willian F. **Mechanical behavior of materials**. 2. Ed. Cambridge University Press, 2010.

JUNIOR, Luiz Carlos Gonçalves Pennafort. **Aplicação da mecânica da danificação na análise o comportamento de materiais compósitos poliméricos reciclados reforçados por fibras de coco**. 2015. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

JUNIOR, Pedro Pereira de Sousa. **Avaliação da influência do adesivo dry layup nas propriedades mecânicas de compósitos usados na fabricação de pás eólicas**. 2021. 51 f. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2021

MARINUCCI, Gerson. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e tecnologia**. São Paulo – SP: Artliber Editora Ltda, 2019.

NIJSSEN, R.P.L. **Composite Materials: An introduction**. Inholland University of Applied Sciences: [s. n.], 2015.

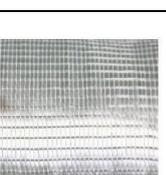
PETERS, Stanley T. **Handbook of composites**. 2. Ed. Springer Science & Business Media, 1998.

SANTOS, Breno Bessa. **Estudo da influência do tipo de processo de fabricação de laminados de compósito nas propriedades mecânicas**. 2017. 61 f. TCC (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2017.

WENZEL, Guilherme München. **Projeto aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal**. 2007. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

ANEXO 1

Lista de materiais e suas respectivas funções na fabricação do laminado sanduiche

IMAGEM	ITEM breve descrição	IMAGEM	ITEM breve descrição
	FOLHA DESMOLDANTE auxilia na desmoldagem do laminado		RESINA/ENDURECEDOR polímero utilizado como matriz do compósito
	MEMBRANA VAP auxilia na rede de vácuo permitindo apenas a passagem de ar através dela e bloqueando a resina		ESTRANGULADOR abre e fecha o sistema de infusão
	SACO DE VÁCUO utilizado para fechar isolar o sistema do meio externo e garantir o vácuo		BOMBA DE VÁCUO equipamento que retira o ar da peça e mantém alto vácuo
	MESH auxilia no processo de infusão, permitindo um fluxo mais rápido da resina		MOLDE METÁLICO superfície utilizada como molde para a fabricação dos corpos de prova
	DESMOLDANTE auxilia na desmoldagem do laminado do molde		ESPUMA PET material de núcleo
	FIBRA DE VIDRO BX45° reforço estrutural do laminado		MANTA TÉRMICA utilizada para regular a temperatura de infusão e cura
	FIBRA DE COCO auxilia na distribuição do vácuo no sistema		NYLON auxilia na distribuição do vácuo no laminado
	FITA SELANTE utilizada para selar o saco de vácuo no molde e impedir vazamentos de ar para o laminado		ESPIRAL utilizada como canal do sistema de vácuo e de infusão