



UFC

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

BRUNO DOUGLAS RODRIGUES BARBOSA

**MATERIAIS COMPÓSITOS APLICADOS NA INDÚSTRIA EÓLICA: ANÁLISE
COMPARATIVA DE LAMINADOS DE MATRIZ DE RESINA EPÓXI REFORÇADOS
COM FIBRAS DE CARBONO E FIBRAS DE VIDRO**

FORTALEZA

2023

BRUNO DOUGLAS RODRIGUES BARBOSA

MATERIAIS COMPÓSITOS APLICADOS NA INDÚSTRIA EÓLICA: ANÁLISE
COMPARATIVA DE LAMINADOS DE MATRIZ DE RESINA EPÓXI REFORÇADOS COM
FIBRAS DE CARBONO E FIBRAS DE VIDRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao 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

2023

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

B195m Barbosa, Bruno Douglas Rodrigues.
Materiais compósitos aplicados na indústria eólica : análise comparativa de laminados de matriz de resina epóxi reforçados com fibras de carbono e fibras de vidro / Bruno Douglas Rodrigues Barbosa. – 2023.
65 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Enio Pontes de Deus.

1. Laminados. 2. Fibra de vidro. 3. Fibra de carbono. 4. Ensaio de tração. 5. Indústria eólica. I. Título.
CDD 669

BRUNO DOUGLAS RODRIGUES BARBOSA

MATERIAIS COMPÓSITOS APLICADOS NA INDÚSTRIA EÓLICA: ANÁLISE
COMPARATIVA DE LAMINADOS DE MATRIZ DE RESINA EPÓXI REFORÇADOS COM
FIBRAS DE CARBONO E FIBRAS DE VIDRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao 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: 11/12/2023.

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)

Dr. Marcos Fábio Veríssimo Montezuma
Vibra Energia

Eng. Douglas Rocha Arruda de Souza
Aeris Energy

A minha família, em especial minha avó, já falecida, Francisca Rodrigues Barbosa, e minha mãe, Teresa Cristina Rodrigues Barbosa, que são e sempre serão meus exemplos. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Enio Pontes de Deus, pela excelente orientação, apoio e prontidão sempre que precisei.

Aos demais participantes da banca examinadora Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva, Dr. Marcos Fábio Veríssimo e Douglas Rocha Arruda de Souza pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos meus familiares mais próximos, minha mãe, Teresa, que sempre batalhou para manter o sustento da casa enquanto eu estudei, meus irmãos, Letícia e René, que sempre estiveram do meu lado sempre que precisei, minha avó, Leda, e minha tia, Angélica, que, em momentos difíceis, me cederam um lar temporário e muito apoio, seja financeiro ou emocional. A minha avó Francisca, que está descansando, mas sempre me apoiou e me ergueu sempre que estava cabisbaixo. A minha tia/madrinha Cristiane e tio/padrinho Alberto, por terem acreditado em mim.

A minha namorada Raysa e sua família, Sandra, Rigoberto e Samuel, que são minha segunda família e segundos pais e irmão, que sempre me acompanharam, apoiaram e cobraram para que meu bacharel fosse concluído.

A todos os meus amigos da UFC, Dylan, Joel, Vitória Pereira, Victória Barroso, Alexandre e todos os outros da turma que sempre me ajudaram com algum entendimento sobre assuntos em que sentia dificuldade.

À UFC, pela disponibilidade de cursos gratuitos, facilitando a entrada de jovens, que assim como eu, não podem financiar os próprios custos de um ensino superior.

Ao Laboratório de Ensaios Mecânicos e todos os bolsistas que me ajudaram com os ensaios mecânicos dos materiais, em especial o Prof. Mauro Cerra, pela sua disponibilidade e prontidão para ajudar no projeto.

“A ciência é mais que um corpo de conhecimento, é uma forma de pensar, uma forma cética de interrogar o universo com pleno conhecimento da falibilidade humana.” (CARL SAGAN).

RESUMO

Os investimentos no setor de energia eólica cresceram notoriamente na última década. Uma vez que indústria eólica, mais especificamente a indústria de fabricação de aerogeradores e pás eólicas, é uma das maiores aplicações de materiais compósitos, o seu desenvolvimento implicou em avanços significativos na produção de compósitos. Na maioria dos casos, os materiais compósitos utilizados na indústria eólica possuem matrizes poliméricas termorrígidas, como resina epóxi, e são reforçados com tecidos de fibra de vidro ou de carbono. A utilização de fibras de vidro pode ser mais favorável do que a utilização de fibras de carbono, que possuem custo elevado. Portanto, o presente trabalho objetivou realizar um teste de matérias-primas, avaliando comparativamente as propriedades de compósitos laminados aplicados na indústria eólica fabricados com matriz de resina epóxi e com reforço de fibra de vidro e fibra de carbono. Por meio do processo *hand lay-up*, foram fabricadas duas placas de compósitos laminados de matriz de resina epóxi, sendo uma reforçada com tecidos bidirecionais de fibra de vidro e outra reforçada com tecidos bidirecionais de fibra de carbono. Realizaram-se ensaios de tração para analisar as propriedades mecânicas das placas e a temperatura de transição vítrea (T_g) foi determinada utilizando o ensaio de Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC). Os corpos de prova reforçados com fibra de vidro apresentaram um Limite de Resistência à Tração (LRT) médio de 141,30 MPa, enquanto o LRT médio dos corpos de prova reforçados com fibra de carbono foi de 167,33 MPa. A tensão de escoamento dos CPs reforçados fibra de carbono foi consideravelmente maior do que para os CPs reforçados com fibra de vidro, sendo a diferença verificada em 39,18 MPa (128,54%). Enquanto isso, o módulo de elasticidade foi 2,51 GPa (48,55%) menor para os CPs reforçados com fibra de carbono. O compósito laminado reforçado com tecido de fibra de vidro e o reforçado com tecido de fibra de carbono apresentaram temperatura de transição vítrea bastante semelhante e ambos foram aprovados no ensaio DSC, possuindo T_g maior do que a temperatura de operação estabelecida. Por fim, concluiu-se que é viável substituir reforços de tecidos de fibra de carbono por reforços com fibras de vidro em determinadas aplicações da indústria de fabricação de componentes de aerogeradores, dependendo estritamente das propriedades mecânicas requeridas.

Palavras-chave: compósito laminado; resina epóxi; fibra de vidro; fibra de carbono; ensaio de tração.

ABSTRACT

Investments in the wind energy sector have grown markedly in the last decade. Since the wind industry, more specifically the wind turbine and wind blade manufacturing industry, is one of the largest applications of composite materials, its development has entailed significant advances in the production of composites. In most cases, composite materials used in the wind industry have thermoset polymer matrices, such as epoxy resin, and are reinforced with fiberglass or carbon fibers. The use of glass fibers may be more favorable than the use of carbon fibers, which have a high cost. Therefore, the present work aimed to perform a test of raw materials, comparatively evaluating the properties of laminated composites applied in the wind industry manufactured with epoxy resin matrix and with glass and carbon fiber reinforcement. Through the hand lay-up process, two laminated composite plates of epoxy resin matrix were manufactured, one reinforced with bidirectional fiberglass and the other reinforced with bidirectional carbon fiber. Tensile tests were performed to analyze the mechanical properties of the plates and the glass transition temperature (T_g) was determined using the Differential Scanning Calorimetry (DSC) test. The glass-fiber-reinforced specimens had an average tensile strength limit of 141.30 MPa, while the average tensile strength limit of the carbon-fiber-reinforced specimens was 167.33 MPa. The yield stress and modulus of elasticity of the carbon-fiber-reinforced specimens were considerably higher than for the glass-fiber-reinforced specimens, with the difference being more than 39 MPa for the yield stress and more than 2540 MPa for the modulus of elasticity. The laminated composite reinforced with fiberglass and the one reinforced with carbon fiber showed very similar glass transition temperature and both were approved in the DSC test, having T_g higher than the established operating temperature. Finally, it was concluded that it is feasible to replace carbon fiber reinforcements with glass fiber reinforcements in certain applications of the wind industry's components manufacturing, depending strictly on the required mechanic properties.

Keywords: laminated composite; epoxy resin; glass fibers; carbon fibers; tensile test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Representação esquemática de um material compósito	16
Figura 2	- Tipos de reforço	17
Figura 3	- Exemplo de um grupo epóxido	19
Figura 4	- Estrutura de uma molécula de DGEBA	20
Figura 5	- Estrutura de uma molécula de resina epóxi cicloalifática	20
Figura 6	- Desenho estrutural de uma lâmina de turbina eólica	24
Figura 7	- Representação esquemática de compósitos laminados	28
Figura 8	- Produção de um compósito reforçado com fibra de vidro por meio do processo hand lay-up	29
Figura 9	- Representação esquemática do processo hand lay-up	30
Figura 10	- Relação entre Limite de Resistência à Tração (LRT) e ângulo entre orientação de fibra e tensão aplicada	31
Figura 11	- Desenho esquemático de corpo de prova para ensaio de tração em material compósito	32
Figura 12	- Códigos de falha de ensaios de tração de materiais compósitos: modos típicos de falha	33
Figura 13	- Fluxo de calor do ensaio de DSC por temperatura em uma resina epóxi, de uma baixa temperatura até a completa reação de ligações cruzadas	35
Figura 14	- Obtenção dos tecidos de fibra de vidro nas dimensões desejadas: (a) medição e (b) corte	37
Figura 15	- Posicionamento dos tecidos na mesa de laminação	37
Figura 16	- Aplicação da resina nos (a) tecidos de fibra de carbono e nos (b) tecidos de fibra de vidro	38
Figura 17	- Processo de espatulagem	39
Figura 18	- Colocação da camada superior de nylon	39
Figura 19	- Marcação dos corpos de prova para ensaios de tração na placa reforçada com fibra de vidro	40

Figura 20	- Marcação dos corpos de prova para ensaios de tração na placa reforçada com fibra de carbono	41
Figura 21	- Remoção de rebarbas e corte de corpos de prova	41
Figura 22	- Corpos de prova para ensaios de tração do compósito laminado reforçado com tecidos de fibra de carbono	43
Figura 23	- Corpos de prova para ensaios de tração do compósito laminado reforçado com tecidos de fibra de vidro	43
Figura 24	- Equipamento para ensaio de tração utilizado	44
Figura 25	- Procedimento de remoção de amostras ensaios DSC: (a) extração da amostra e (b) remoção da primeira camada do laminado	45
Figura 26	- Corpos de prova do compósito laminado reforçado com tecidos de fibra de vidro após ensaios de tração	46
Figura 27	- Corpos de prova do compósito laminado reforçado com tecidos de fibra de carbono após ensaios de tração	48
Figura 28	- Gráfico Tensão versus Deformação obtido por meio dos ensaios de tração dos corpos de prova da placa laminada reforçada com fibras de vidro	53
Figura 29	- Gráfico Carga versus Deslocamento obtido por meio dos ensaios de tração dos corpos de prova da placa laminada reforçada com fibras de vidro	53
Figura 30	- Gráfico Tensão versus Deformação obtido por meio dos ensaios de tração dos corpos de prova da placa laminada reforçada com fibras de carbono	54
Figura 31	- Gráfico Carga versus Deslocamento obtido por meio dos ensaios de tração dos corpos de prova da placa laminada reforçada com fibras de carbono	54
Figura 32	- Gráfico Fluxo de Calor versus Temperatura obtido no ensaio DSC do compósito laminado reforçado com fibra de vidro	56
Figura 33	- Gráfico Fluxo de Calor versus Temperatura obtido no ensaio DSC do compósito laminado reforçado com fibra de carbono	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Diferentes tipos de reforços e matriz utilizados em materiais compósitos com suas aplicações e técnicas de fabricação	22
Tabela 2	- Propriedades físicas de diversas classes de fibras de vidro	23
Tabela 3	- Propriedades físicas de diversas classes de fibras de vidro	25
Tabela 4	- Análise de vantagens e desvantagens de lâminas eólicas fabricadas com compósitos à base de fibra de carbono	27
Tabela 5	- Descrição dos códigos referentes aos modos típicos de falha em materiais compósitos submetidos a ensaio de tração	34
Tabela 6	- Algumas propriedades da resina epóxi e do endurecedor utilizados, segundo fabricante	36
Tabela 7	- Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de tração	42
Tabela 8	- Modos de falha do compósito laminado reforçado com tecidos de fibra de vidro, segundo descrições da norma ASTM D3039	47
Tabela 9	- Modos de falha do compósito laminado reforçado com tecidos de fibra de carbono, segundo descrições da norma ASTM D3039	49
Tabela 10	- Propriedades mecânicas dos corpos de prova reforçados com fibra de vidro	50
Tabela 11	- Propriedades mecânicas dos corpos de prova reforçados com fibra de carbono	51
Tabela 12	- Propriedades mecânicas médias de ambos os tipos de corpos de prova avaliados	52
Tabela 13	- Resultado dos ensaios DSC dos compósitos laminados produzidos	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
BIAX	Bidirecional
CP	Corpo de Prova
DSC	Differential Scanning Calorimetry (Calorimetria de Varredura Diferencial)
LRT	Limite de Resistência à Tração
Tg	Temperatura de Transição Vítea

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%$	Porcentagem
\pm	Mais ou menos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	Materiais compósitos	16
3.1.1	Matriz	17
3.1.1.1	Matriz polimérica	18
3.1.1.1.1	Resina epóxi	19
3.1.2	Reforços	21
3.1.2.1	Fibra de vidro	23
3.1.2.1	Fibra de carbono	25
3.1.3	Compósitos laminados	27
3.1.4	Fabricação de compósitos pelo processo hand lay-up	29
3.1.5	Propriedades dos materiais compósitos	30
3.1.5.1	Ensaio de tração	32
3.1.5.2	Ensaio de DSC	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	Materiais	36
4.2	Métodos	36
4.2.1	Processo de fabricação dos compósitos laminados	36
4.2.2	Ensaio de tração	42
4.2.3	Ensaio de DSC	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1	Ensaio de tração	46
5.2	Ensaio de DSC	55
6	CONCLUSÃO	58
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59

REFERÊNCIAS	60
--------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

A alta demanda de energia e a iniciativa de reduzir as emissões de gás carbônico na atmosfera impulsionaram a ascensão da utilização de fontes de energias renováveis para compor a matriz energética brasileira e mundial. Dessa forma, os investimentos no setor de energia eólica cresceram notoriamente na última década (GOMES, 2021). Uma vez que indústria eólica, mais especificamente a indústria de fabricação de aerogeradores e pás eólicas, é uma das maiores aplicações de materiais compósitos, o seu desenvolvimento implicou em avanços significativos na produção de compósitos, os quais são materiais leves e que podem ser moldados para construir componentes e equipamentos complexos (SANTOMAURO, 2021).

Na maioria dos casos, os materiais compósitos utilizados na indústria eólica possuem matrizes poliméricas termorrígidas, que são estáveis e capazes de manter a integridade das propriedades mesmo sob aquecimento (CANEVAROLO, 2006; SHABUDEEN, 2009). As resinas epóxi são exemplos de polímeros termorrígidos largamente usados para compor a fase matriz, junto aos seus respectivos endurecedores (JIN *et al.*, 2015). Em relação ao reforço, definido como a fase que é dispersa na matriz a fim de conferir propriedades mecânicas adequadas ou outras propriedades específicas, a manufatura de pás eólicas geralmente emprega tecidos de fibra de vidro e de fibra de carbono (PRASHANTH *et al.*, 2017; TENG *et al.*, 2023).

Em termos da relação custo-benefício, a utilização de fibras de vidro pode ser mais favorável do que a utilização de fibras de carbono — que possuem custo elevado, além de implicarem outros fatores desvantajosos (TIAN *et al.*, 2022). Portanto, o presente trabalho objetivou realizar um teste de matérias-primas, avaliando comparativamente as propriedades de compósitos laminados aplicados na indústria eólica fabricados com matriz de resina epóxi e com reforço de fibra de vidro e carbono. A partir disso, visou-se estudar a possibilidade de substituição das fibras de carbono por fibra de vidro no processo de manufatura de determinados componentes de aerogeradores.

Por meio do processo *hand lay-up*, foram fabricadas duas placas de compósitos laminados de matriz de resina epóxi, sendo uma reforçada com tecidos bidirecionais de fibra de vidro e outra reforçada com tecidos bidirecionais de fibra de carbono. Realizaram-se ensaios de tração para analisar as propriedades mecânicas das placas. Além disso, para estipular o

comportamento destas placas mediante as condições de temperatura média de operação de aerogeradores no Brasil, a temperatura de transição vítrea (T_g) foi determinada utilizando o ensaio de Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho objetiva analisar compósitos laminados de matriz de resina epóxi reforçados com fibras de vidro e fibras de carbono, comumente aplicados na indústria de produção de pás eólicas, a fim de compará-los em termos de suas propriedades.

2.2 Objetivos específicos

- Fabricar duas placas de compósitos laminados de matriz de resina epóxi pelo processo *hand lay-up*, sendo uma reforçada com tecidos bidirecionais de fibra de vidro e outra reforçada com tecidos bidirecionais de fibra de carbono;
- Por meio de ensaios de tração, determinar o Limite de Resistência à Tração (LRT), o Módulo de Elasticidade, a Tensão de Escoamento e outras propriedades mecânicas correspondentes aos dois tipos de compósitos laminados para compará-los em relação à resistência mecânica;
- Determinar a temperatura de transição vítrea (T_g) dos compósitos produzidos por meio do ensaio de Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

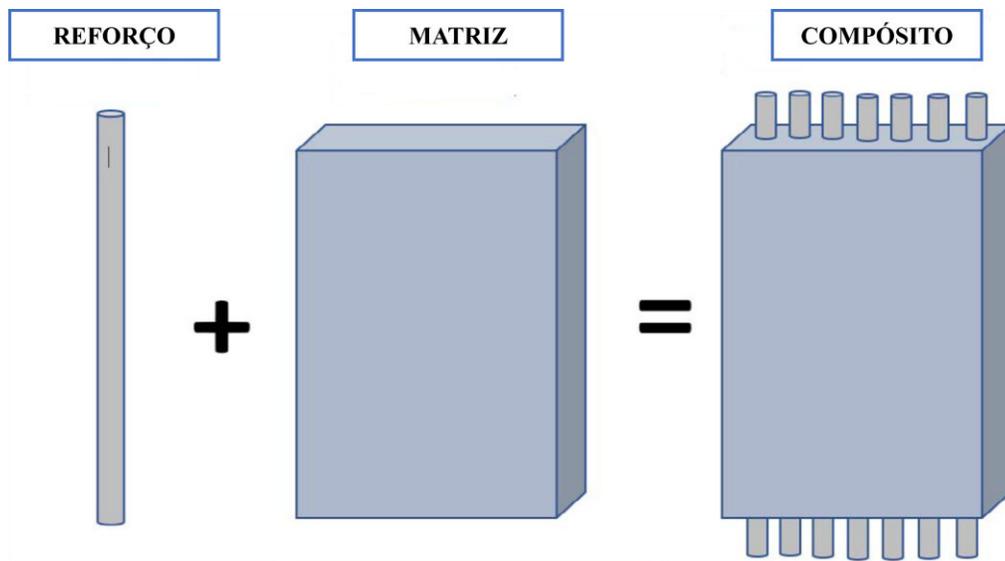
Nesta seção, serão fornecidos os conceitos necessários para compreensão das discussões contidas no presente trabalho.

3.1 Materiais compósitos

Um material compósito é a combinação de dois ou mais materiais distintos, com o objetivo de alcançar propriedades físicas e mecânicas superiores ou diferentes àquelas dos materiais base (MATHUR *et al.*, 2017). Esta classe de materiais torna possível superar desafios relacionados a projetos de engenharia onde materiais não-reforçados são incapazes de suportar determinadas condições de aplicação. Também é possível adaptá-los à fabricação de componentes de grande dimensão e geometria complexa, acarretando em uma mais fácil união de partes de um determinado equipamento e redução de custos (ZWEBEN, 2015).

Kumar e Lohchab (2016) definem os materiais compósitos como reforços integrados em uma matriz. A matriz possui o papel de dar forma ao reforço e mantê-lo em sua posição, enquanto o reforço melhora significativamente as propriedades mecânicas da matriz. A Figura 1 ilustra um material compósito.

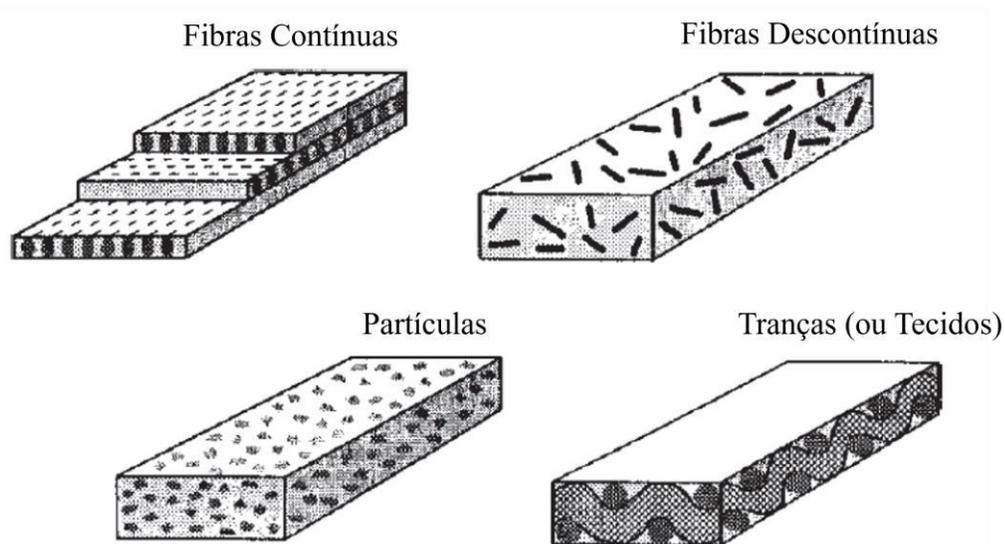
Figura 1 — Representação esquemática de um material compósito



Fonte: Pervaiz *et al.* (2021).

Os materiais compósitos podem ser classificados quanto à distribuição de reforços na matriz. A matriz pode ter seu interior ocupado por fibras contínuas ou descontínuas, partículas ou tranças (ZWEBEN, 2015). Além disso, o comprimento dos reforços pode ser subdividido em fibras curtas, de 0,2 a 0,4 mm, ou longas, de 10 a 25 mm (PERVAIZ *et al.*, 2021). A Figura 2 mostra detalhadamente as possíveis maneiras de distribuição de reforço. O comprimento das fibras, assim como geometria e volume ocupado, caracterizam suas propriedades mecânicas. A escolha destes parâmetros é determinante para projetos de engenharia, uma vez que grande parte dos esforços é suportada pelo reforço (ALMACO, 2020).

Figura 2 — Tipos de reforço



Fonte: ZWEBEN (2015).

3.1.1 Matriz

Também é possível classificar um material compósito quanto ao material utilizado em sua matriz, a qual pode ser: polimérica, metálica, cerâmica e à base de carbono (ZWEBEN, 2015). As principais funções da fase matriz em um material compósito são possuir boa adesão ao reforço sem que haja qualquer interação química, transmitir esforços ao reforço e fornecer resistência à abrasão e à corrosão (ZWEBEN, 2015; MATHUR *et al.*, 2017). Devido à possível interação entre materiais metálicos e o elemento carbono, não é possível utilizar estes materiais como reforço e matriz, respectivamente (ZWEBEN, 2015).

A capacidade dos materiais poliméricos serem processados em baixas temperaturas e pressões faz com que estes sejam os mais amplamente aplicados nos diversos setores industriais com uma melhor relação custo-benefício — uma vez que o processo de produção ocorre com maior rapidez e sem a necessidade de equipamentos mais robustos para operação em condições críticas (ZWEBEN, 2015).

No contexto da indústria eólica, área de enfoque do presente trabalho, as matrizes poliméricas são as mais utilizadas. Sendo assim, uma melhor descrição a respeito destas será apresentada na próxima subseção.

3.1.1.1 Matriz polimérica

Os materiais poliméricos podem ser definidos quanto às suas propriedades térmicas, podendo ser termoplásticos ou termofixos. A escolha entre estas duas categorias dependerá dos requisitos da aplicação almejada. Polímeros termoplásticos são caracterizados por cadeias poliméricas formadas por ligações de van der Waals, ligações dipolo-dipolo ou hidrogênio. Suas estruturas são lineares e, durante aquecimento ou aumento de pressão, facilmente adquirem novas formas e podem ser moldados ou recuperar determinada forma inicial. Ao serem moldados, necessitam de resfriamento para retirada do molde. Os polímeros termoplásticos são materiais amorfos ou semicristalinos, a exemplo do polietileno e polipropileno (SHABUDEEN, 2009).

Os polímeros termofixos, por sua vez, possuem fortes ligações covalentes, as quais são quebradas e dão rigidez durante aquecimento, adquirindo formas estáveis e irreversíveis, tornando impossível voltar ao estado físico anterior, seja por novo aquecimento ou resfriamento. (SHABUDEEN, 2009). Este processo é conhecido como “cura” do polímero (CANEVAROLO, 2006). Uma vez processados por aquecimento, não é necessário resfriamento posterior para retirada do molde. Esta classe de matrizes poliméricas se torna importante em termos de operação em ambientes que envolvem ciclos de aquecimento e resfriamento, portanto, tendo comportamento inerte quanto à sua forma e propriedades físico-químicas (SHABUDEEN, 2009). Exemplos clássicos de polímeros termofixos são a baquelite e resinas epóxi, sendo este último um dos materiais estudados no presente trabalho.

Para além disto, outra classificação de matrizes poliméricas é definida em relação às suas propriedades mecânicas, visando sua utilização como produto final. Os polímeros elastômeros

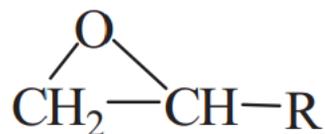
possuem boa resistência mecânica e alongação ao serem submetidos a processos de vulcanização (inserção de enxofre em sua estrutura molecular) (SHABUDEEN, 2009; CALLISTER, RETHWISCH, 2012). Estes tipos de matrizes são caracterizadas por uma estrutura inicialmente desorganizada (alta entropia) em equilíbrio — isto é, na ausência de tensões externas. Ao ser alongado, as cadeias poliméricas são reorganizadas linearmente para formar uma estrutura mais organizada, de baixa entropia. Esta baixa entropia é a força motriz de um polímero elastômero para voltar à sua forma original, uma vez relaxado da aplicação de tensão. Este fenômeno é conhecido como memória de forma. Os elastômeros, em sua maioria, estão inseridos dentro da categoria de polímeros termofixos (SHABUDEEN, 2009).

Na indústria eólica, uma vez que requer-se que os componentes de aerogeradores, tais como os pré-fabricados ou demais partes das pás eólicas, mantenham sua integridade física durante o tempo de operação previsto (mesmo mediante a oscilações de temperatura, por exemplo), os polímeros termorrígidos são utilizados para compor a fase matriz.

3.1.1.1.1 Resina epóxi

As resinas epóxi são uma classe especial de polímeros termofixos de baixo peso molecular que contêm grupos epóxido em suas estruturas moleculares, que passam pelo processo de endurecimento ou “cura” ao reagirem com compostos do tipo amins aromáticas e alifáticas, ou compostos ácidos, conhecidos como endurecedores. A Figura 3 ilustra a forma de um grupo epóxido. O processo de cura garante a formação de termofixos com excelente resistência mecânica, estabilidade térmica e química. Estas propriedades podem ser modificadas pela simples escolha do composto a ser utilizado como endurecedor. Resinas epóxi têm sua endurecibilidade pós-cura devido ao fenômeno de ligações cruzadas entre cadeias poliméricas (VERMA *et al.*, 2020).

Figura 3 — Exemplo de um grupo epóxido

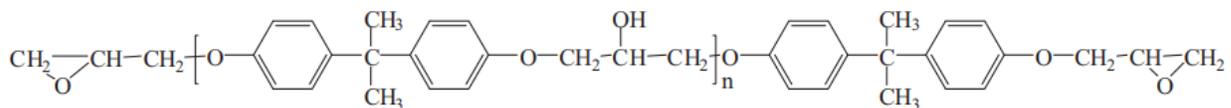


Fonte: Jin *et al.* (2015).

Outras características que podem ser mencionadas a respeito de resinas epóxi são: a possibilidade de aplicação em mais de um estado físico, a depender da aplicação (desde líquidos de baixa viscosidade até sólidos de alto ponto de fusão); a variedade de pontos de cura, de 0 a 180 °C, fato que torna as resinas epóxi de fácil operação, e a excelente adesão com diversas superfícies, especialmente metálicas, pela presença de grupos hidroxila e ligações do tipo éter (VERMA *et al.*, 2020).

Jin *et al.* (2015) afirmam a existência de diversas classes de resinas epóxi, diferidas pelo pré-polímero e o agente endurecedor utilizados. O éter diglicidil de bisfenol A (DGEBA) é produzido a partir da reação de epícloridrina com bisfenol A na presença de um catalisador básico. As propriedades da resina dependem do número de unidades estruturais repetidas, como representa a Figura 4. Moléculas leves tendem a ser líquidas, enquanto a forma sólida ou líquida de maior viscosidade são de maior presença em moléculas mais pesadas.

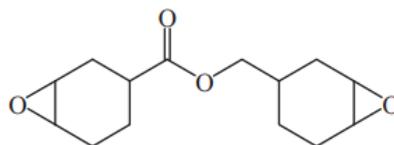
Figura 4 — Estrutura de uma molécula de DGEBA



Fonte: Jin *et al.* (2015).

A resina epóxi cicloalifática é obtida a partir da reação entre ciclohexil metanol e ácido peracético. Esta resina possui um esqueleto formado por cadeias alifáticas e estrutura saturada, responsáveis por proporcionar estabilidade diante de raios ultravioleta, boa resistência climática, estabilidade térmica e propriedades elétricas (JIN *et al.*, 2015). A Figura 5 mostra a estrutura de uma resina do tipo cicloalifática.

Figura 5 — Estrutura de uma molécula de resina epóxi cicloalifática



Fonte: Jin *et al.* (2015).

É válido ressaltar que, com alta resistência mecânica alcançada, a resina epóxi apresenta fragilidade — isto é, baixa resistência à nucleação e propagação de trincas, o que pode limitar sua aplicação em diversos setores industriais, como aeroespacial, eletrônica e, como apresentado neste trabalho, indústria eólica. Desta forma, esforços vêm sendo continuamente aplicados para melhorar propriedades de acordo com a escolha de agente de cura, assim como a sua utilização como compósito, combinado com diferentes categorias de reforço (JIN *et al.*, 2015).

3.1.2 Reforços

Os materiais compósitos também podem ser classificados quanto ao tipo de material utilizado como reforço. Rajak *et al.* (2019) nomeiam três diferentes categorias: fibras, partículas e laminados. A partir da escolha da maneira que o reforço será aplicado, diferentes propriedades resultantes podem ser observadas.

Em materiais compósitos reforçados por fibras, boa resistência mecânica, rigidez e resistência química, térmica e ao desgaste são observadas. Exemplos de reforços utilizados no formato de fibras são o vidro, carbono, basalto e a poliaramida. As fibras destes materiais, tratados quimicamente, estão disponíveis em abundância na natureza e são obtidas a baixo custo. Além disso, possuem boa tenacidade ao impacto e adequada resistência à fadiga, são biodegradáveis e possuem menor densidade em relação às fibras sintéticas (RAJAK *et al.*, 2019).

Compósitos fabricados com partículas são menos efetivos em termos de aumento de resistência quando comparados aos materiais compósitos reforçados com fibras contínuas e descontínuas. O reforço do tipo partícula geralmente é aplicado em situações onde uma grande resistência ao desgaste é requerida. Um clássico exemplo é a fabricação de cimento, onde a adição de pedregulhos aumenta significativamente a dureza. Uma vantagem da utilização deste tipo de reforço é seu baixo custo de formação e produção. Na produção de concreto, as rochas e pedregulhos são envolvidos em uma matriz de cimento. O agregado promove rigidez e resistência, enquanto a matriz mantém a estrutura unida e intacta (RAJAK *et al.*, 2019).

Por último, os compósitos laminados são constituídos de uma matriz termofixa com função desmoldante reforçados por fibras de vidro que são comumente moldadas por compressão (RAJAK *et al.*, 2019). Esta categoria de material compósito combina longas fibras de vidro e resinas insaturadas para produzir um produto final de alta resistência mecânica. Os compósitos

laminados são aplicados em grandes componentes estruturais onde uma grande razão peso-resistência é necessária, como aerogeradores na indústria eólica. Outro benefício é a otimização do design da conexão de componentes. Neste trabalho, em seguida uma subseção tratará detalhadamente este tipo de material compósito.

A Tabela 1 mostra diferentes tipos de reforços e matrizes utilizados para fabricar materiais compósitos, juntamente a suas aplicações e técnicas de fabricação.

Tabela 1 — Diferentes tipos de reforços e matriz utilizados em materiais compósitos com suas aplicações e técnicas de fabricação

Material Compósito		Propriedades melhoradas	Aplicações	Técnicas de Fabricação
Reforço	Matriz			
Fibra de Figue	Resina epóxi	Resistência ao impacto	Coletes à prova de balas	Prensa a quente
Fibra de lã de ovelha	Cimento	Resistência térmica	Argamassa ou gesso (construção civil)	Mistura mecânica
Partículas de TiO ₂	PEEK	Resistência ao desgaste	Aplicação tribológica	Extrusão mecânica e injeção em molde
Fibra de sisal	Poliéster	Resistência à tração, flexão e impacto	Conexões de transformadores	Moldagem por compressão
SiC/grafite (pó)	Cobre	Resistência ao desgaste	Trocadores de calor	Fundição
Fibras de juta	PLA	Resistência ao desgaste abrasivo	Aplicação tribológica	Fundição
Fibras de basalto	Resina vinil éster	Resistência ao fogo	Sistemas de filtração de gás quente	Infusão de resina a vácuo

Fonte: Rajak *et al.* (2019).

Considerando que este trabalho trata da produção de compósitos laminados reforçados com tecidos de fibra de vidro e fibra de carbono, a seguir serão fornecidas informações mais específicas sobre estes tipos de reforço.

3.1.2.1 Fibra de vidro

As fibras de vidro são os materiais mais utilizados para reforçar polímeros, totalizando 90% de materiais compósitos reforçados na indústria. Sua aplicação pode ser feita de várias formas, como longitudinal, forma de tecido ou filamentos picados para melhorar propriedades mecânicas e tribológicas. Em testes laboratoriais, fibras de vidro podem resistir a tensões de até 7000 N/mm², enquanto as fibras comerciais suportam de 2800 a 4000 N/mm² (PRASHANTH *et al.*, 2017).

Fibras de vidro são separadas em diferentes categorias de propriedades físicas e mecânicas, sendo a classe E mais popular. As classes A, C, R e S também estão incluídas, assim como detalhadas na Tabela 2.

Tabela 2 — Propriedades físicas de diversas classes de fibras de vidro

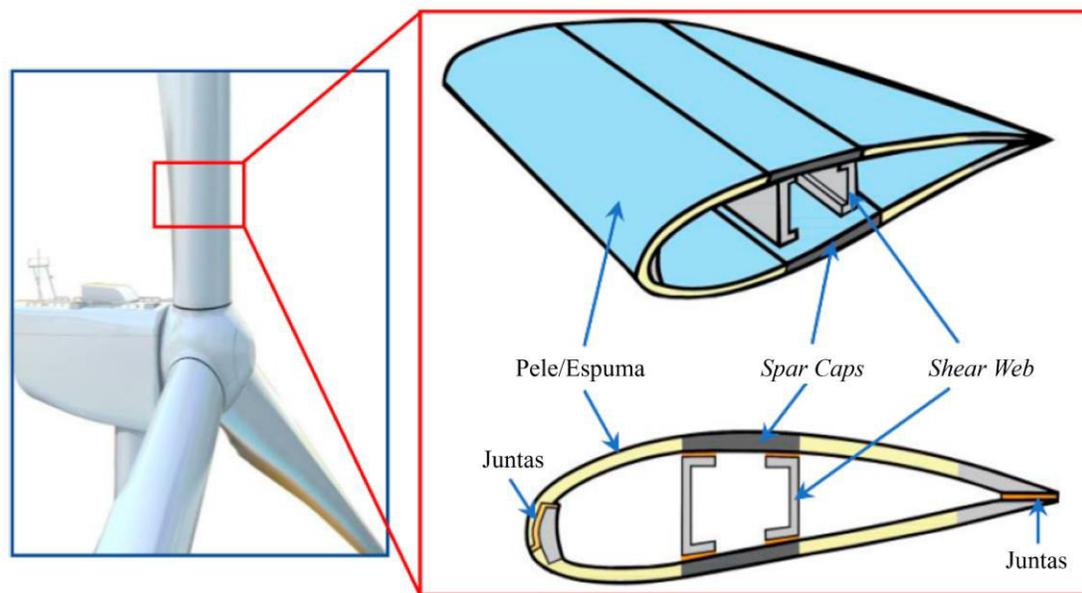
Classes de Fibra de Vidro	Propriedades Físicas
Classe A	Alta durabilidade, resistência e resistividade elétrica
Classe C	Alta resistência à corrosão
Classe D	Baixa constante dielétrica
Classe E	Alta resistência e resistividade elétrica
Classe AR	Resistência alcalina
Classe R	Altas resistências mecânica e à corrosão em ambientes ácidos
Classe S	Alto limite de resistência à tração

Fonte: Prashanth *et al.* (2017).

O tempo de vida útil de uma turbina eólica é de 20 anos. Suas lâminas são compostas por materiais compósitos, cujos reforços são, em grande maioria, fibras de vidro da classe E, embora a tendência seja combinar este material com fibras de carbono, sendo este último comentado na próxima seção. Resinas termofixas como epóxi, poliéster ou viniléster são polímeros comumente encontrados em compósitos neste setor industrial (BEAUSON *et al.*, 2014).

A Figura 6 apresenta uma seção esquemática de uma lâmina de turbina eólica. Os *spar caps* consistem de uma superposição de compósitos laminados com fibras de vidro uniaxiais ou multiaxiais com espuma de policloreto de vinila como núcleo, assim como o *shear web*. As flanges dos *shear webs*, cuja função é de suportar a carga exercida nas lâminas, são fabricadas a partir de laminados com fibras de vidro unidirecionais (BEAUSON *et al.*, 2014).

Figura 6 — Desenho estrutural de uma lâmina de turbina eólica



Fonte: Teng *et al.* (2023).

Em proporção, polímeros reforçados com fibras de vidro representam, pelo menos, dois terços do peso total da pá eólica (BEAUSON *et al.*, 2014). Uma lâmina de 80 metros de comprimento pode pesar cerca de 25 toneladas, quando fabricada de forma mista, com laminados reforçados com fibra de vidro e de carbono.

A performance de pás eólicas reside nas propriedades dos materiais utilizados em circunstâncias reais de operação. Portanto, a escolha de que tipo de material a ser utilizado é um fator determinante. Reddy *et al.* (2021) mostram aumento de 30% na resistência mecânica e 15% na rigidez de amostras de compósitos fabricados a partir de fibras de vidro da classe R ao comparar com a classe E - sendo esta última a mais aplicada na indústria eólica. A título de informação, a

Tabela 3 fornece dados a respeito das propriedades físicas e mecânicas das diversas classes de fibra de vidro.

Tabela 3 — Propriedades físicas de diversas classes de fibras de vidro

Classe	Densidade (g/cm ³)	LRT (GPa)	Módulo de Young (GPa)	Elongação (%)	Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁷ /°C)	Coefficiente de Poisson	Índice de Refração
Classe E	2,58	3,445	72,3	4,8	54	0,2	1,558
Classe C	2,52	3,310	68,9	4,8	63	–	1,533
Classe S	2,46	4,890	86,9	5,7	16	0,22	1,521
Classe A	2,44	3,310	68,9	4,8	73	–	1,538
Classe R	2,54	4,135	85,5	4,8	33	–	1,546
Classe EC	2,72	3,445	85,5	4,8	59	–	1,579
Classe AR	2,70	3,241	73,1	4,4	65	–	1,562

Fonte: Prashanth *et al.* (2017).

3.1.2.2 Fibra de carbono

As fibras de carbono são materiais promissores para melhoria de propriedades, quando combinados com matrizes poliméricas. Resistência mecânica, rigidez, estabilidade dimensional e resistência à corrosão são exemplos de excelentes características de performance obtidas a partir de sua aplicação. Muitas vezes, sua fragilidade pode ser compensada pela combinação com resinas epóxi, as quais, como já mencionado, possuem boa tenacidade (ZHIYUAN *et al.*, 2017).

De acordo com van de Werken *et al.* (2019), a adição de fibra de carbono a uma matriz polimérica provoca um aumento na condutividade térmica. Isto implica em uma redução nas tensões residuais do componente após fabricação e durante a operação. Percentuais de 20% de volume de fibra de carbono são responsáveis por uma redução substancial no coeficiente de expansão térmica. Isto ocasiona a diminuição na formação de trincas à medida que a espessura de um componente aumenta. Ocorre também a minimização de gradientes de temperatura, ajudando assim o polímero a atingir etapas de aquecimento e resfriamento mais rapidamente. O principal resultado deste fator é a otimização de velocidade de impressão (em casos onde manufatura aditiva se aplica, embora este processo de fabricação não seja muito comum em escala industrial) e de

tolerâncias geométricas. Rajak *et al.* (2019) confirmam um crescimento no módulo de Young de 78 a 113% em compósitos de polipropileno/fibra de carbono preparados por injeção em molde microcelular.

As fibras de carbono podem ser classificadas em fibras contínuas ou descontínuas, como ilustrado anteriormente na Figura 2, ou de acordo com o comprimento. A utilização de compósitos com fibras descontínuas é vista em aplicações onde propriedades isotrópicas são necessárias. Por outro lado, compósitos com fibras contínuas são amplamente utilizados em componentes de baixo volume onde os esforços mecânicos são unidirecionais ou bidirecionais (ALMUSHAIKEH *et al.*, 2023).

Entretanto, o uso excessivo de fibras de carbono como reforço possui aspectos negativos no que diz respeito ao custo de fabricação de equipamentos, uma vez que o processo de obtenção deste material é de elevado custo, e também está relacionado à recuperação e reciclagem de fibras de carbono. Até 2050, é previsto um desperdício de 983 mil toneladas de compósitos de resina epóxi reforçados com fibra de carbono. Estudos de recuperação são extensivamente realizados para criar uma forma eficiente de recuperar estes reforços. O desafio se encontra no fato de que a resina epóxi curada possui muitas ligações cruzadas em sua estrutura, resultando em um material insolúvel e infusível, o qual se torna difícil de reciclar (TIAN *et al.*, 2022).

Dentro do contexto da indústria eólica, esta classe de reforço está inserida nos compósitos que compõem os *spar caps* das lâminas de turbinas eólicas e na produção de uma série de outros pré-fabricados de aerogeradores, mencionando novamente a Figura 6. A utilização de fibras de carbono propõe uma oportunidade de construção do equipamento com menor peso, mantendo a larga escala (TENG *et al.*, 2023).

Atualmente, a parte crucial de aplicação de compósitos reforçados com fibra de carbono em pás eólicas é a área dos *spar caps*, embora a possível substituição de fibras de carbono por fibras de vidro seja pauta de estudos na área de produção de diversos outros componentes. Comparados a compósitos reforçados com fibra de vidro, os compósitos poliméricos de matriz de resina epóxi reforçados com fibra de carbono apresentam melhor rigidez em conjunto e são mais leves (TENG *et al.*, 2023). No entanto, existem algumas desvantagens, incluindo as previamente

listadas, na utilização de fibras de carbono como reforços para estes compósitos. A Tabela 4 fornece uma descrição mais detalhada destas desvantagens.

Tabela 4 — Análise de vantagens e desvantagens de lâminas eólicas fabricadas com compósitos à base de fibra de carbono

Vantagens	Descrição	Desvantagens	Descrição
Melhora a rigidez e resistência à fadiga da lâmina, com redução de massa	Comparada à fibra de vidro, a densidade é cerca de 30% menor, a resistência mecânica é 40% maior e o módulo de Young é de 3 a 8 vezes maior, assim melhorando a resistência ao desgaste e vida útil	Alto preço	O custo da fibra de carbono é significativamente maior
Output de energia balanceado e suave	Melhora a performance aerodinâmica da lâmina, reduz a pressão na torre e eixo, melhora a eficiência	Requerimentos para processo de fabricação	Processo de pré-fabricação por molde requer tempos longos de moldagem
Lâminas de baixa velocidade de vento podem ser fabricadas	Fabricar lâminas de maior escala para baixas velocidades de vento para reduzir custos de geração de energia	Baixa transparência	Transparência da fibra de carbono muito baixa; não é possível ver o interior do produto final
Reduz danos nas lâminas por raios	Possível de realizar aterramento nos aerogeradores	Baixa capacidade de precisão no design	Difícil de fabricar geometrias complexas; performance reduzida pós-deformação
Reduzir custos de transporte e instalação	A lâmina é leve, a qual pode implicar em redução de custos	Requerimentos para armazenamento	Os parâmetros temperatura e umidade do ambiente devem ser controlados
Amortecimento de vibração	Ressonância entre torre e frequência natural pode ser evitada	Baixa permeabilidade	Menor permeabilidade do que fibra de vidro, tratamento de superfície é necessário

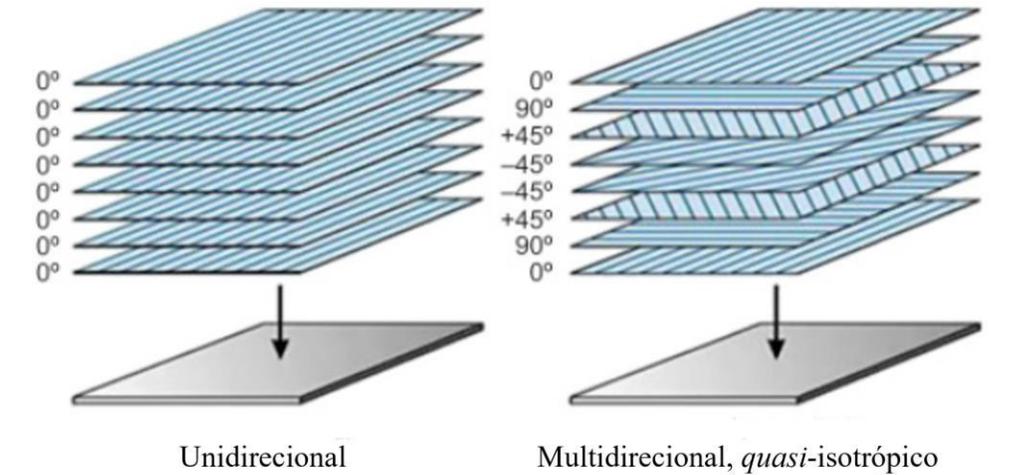
Fonte: Teng *et al.* (2023).

3.1.3 Compósitos laminados

Compósitos laminados são a forma mais frequente de aplicação destes materiais em lâminas de aerogeradores. Este tipo de compósito é fabricado pela união em conjunto de camadas fibrosas, e então, combinação com o material que compõe a matriz (RANA, FANGUEIRO, 2016). A combinação destas fibras pode ser realizada em uma ou mais orientações em relação ao eixo do

componente (0° , 45° , 90°), de modo a proporcionar boas propriedades mecânicas em mais de uma direção de força aplicada. A Figura 7 ilustra com detalhes estas disposições de fibras.

Figura 7 — Representação esquemática de compósitos laminados



Fonte: Rana e Fanguero (2016).

Compósitos laminados são caracterizados por alta resistência e rigidez em seu plano longitudinal. Contudo, sua principal desvantagem é detectada na baixa performance na direção da espessura do material. A delaminação de diferentes camadas ao serem impostas à carga é um dos principais modos de falha de compósitos laminados. Diferentes métodos de compressão de camadas são utilizados para reduzir o problema de delaminação, ao custo de propriedades longitudinais dos laminados (RANA, FANGUEIRO, 2016).

O fenômeno de delaminação é resultado de um conjunto de características intrínsecas aos laminados. Tensões entre laminados devido ao *mismatch* de propriedades mecânicas e térmicas ocorrem em pontas livres, junções, sítios de nucleação de trincas e também sob a ação de tensões fora do eixo longitudinal (DZENIS, RENEKER, 1998). Dzenis e Reneker (1998) introduziram fibras de pequeno diâmetro para reforço entre laminados.

Apesar dos compósitos laminados convencionais possuírem ângulos de orientação de fibra de 0° , 45° e 90° , não existe limitação para posicionamento de laminados. Irisarri *et al.* (2009) propuseram uma otimização das propriedades de laminados submetidos a cargas compressivas. Maximizar flambagem crítica e minimizar peso foram considerados os principais objetivos. Os

autores sucederam em melhorar o comportamento em relação à flambagem por meio da obtenção da ótima orientação de fibras dispersas em suas amostras, diferindo dos ângulos convencionais previamente mencionados.

3.1.4 Fabricação de compósitos pelo processo *hand lay-up*

O *hand lay-up* é um dos processos de fabricação de materiais compósitos de molde aberto. Segundo Elkington *et al.* (2015), o processo *hand lay-up* consiste no posicionamento manual de camadas individuais ou pilhas de uma forma de reforço chamada de *prepreg* — que se trata de fibras agrupadas pré-impregnadas com resina e dispostas em uma camada unidirecional ou tecidas. Dessa forma, envolve a manipulação manual de cada forma de compensado de modo que não haja nenhuma bolsa de ar entre as camadas ou entre a primeira camada e a superfície do molde, assim como ilustra a Figura 8.

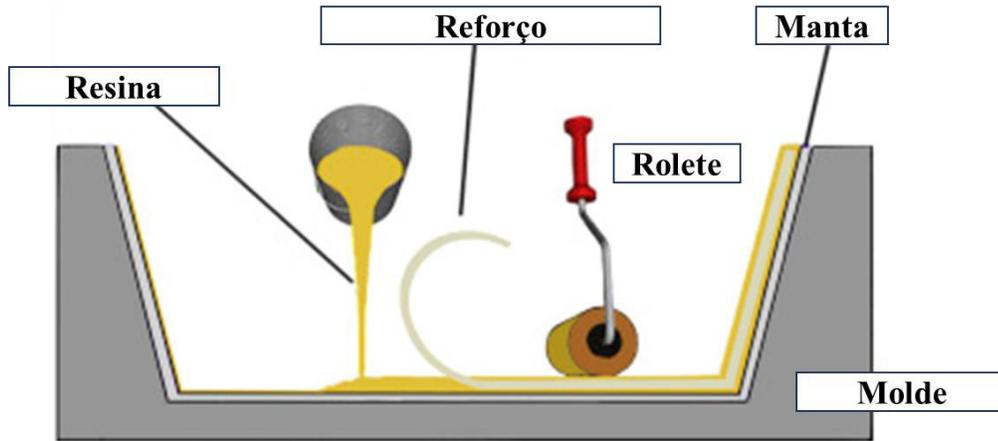
Figura 8 — Produção de um compósito reforçado com fibra de vidro por meio do processo *hand lay-up*



Fonte: BLG Fiber Glass (2023).

Conforme a Figura 9, este processo consiste na aplicação sucessiva, dentro do molde, de uma camada de resina líquida termofixa e de uma camada de reforço — vidro, aramida ou carbono na forma de manta de fios picados ou de tecido *roving*. Então, o compósito é resultante da imposição manual de força mecânica do operador, auxiliado por um rolete ou pincel (MILAN, GRAZZIOTIN, 2008).

Figura 9 — Representação esquemática do processo *hand lay-up*



Fonte: Jawaid, Thariq e Saba (2019, com adaptações).

Por meio do processo *hand lay-up*, é possível produzir componentes complexos, uma vez que é bastante adaptável a mudanças de design, e de alta qualidade. Contudo, a taxa de produção geralmente é baixa e os custos com materiais e mão-de-obra são elevados. Além disso, como é um processo manual, é possível que defeitos ou discrepâncias durante a fabricação sejam causados por falha humana (ELKINGTON *et al.*, 2015). Mesmo assim, o *hand lay-up* ainda é amplamente empregado na manufatura de compósitos. Sua aplicação inclui a indústria eólica, na área de fabricação de componentes de pás de aerogeradores.

Neste trabalho, o processo *hand lay-up* foi utilizado para fabricar as duas placas compósitas analisadas. O procedimento experimental detalhado consta na seção de Materiais e Métodos.

3.1.5 Propriedades dos materiais compósitos

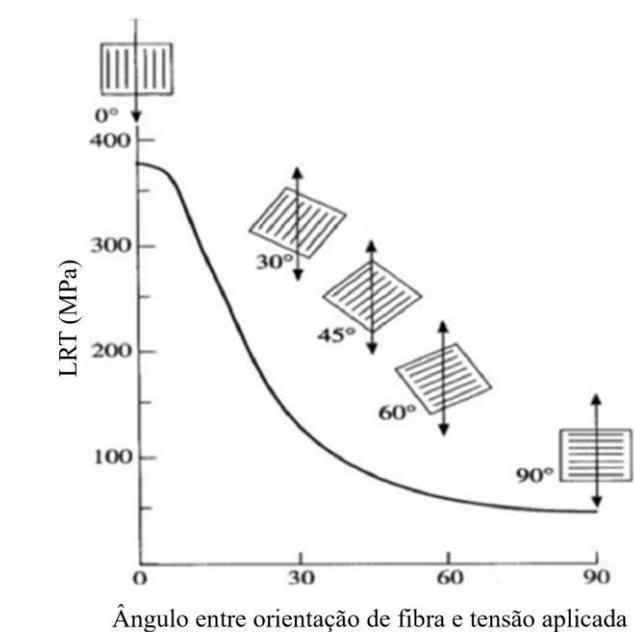
Estudos acerca de propriedades dos materiais compósitos, especialmente laminados, analisam copiosamente o fenômeno de delaminação, considerado o principal mecanismo de falha presente. Diferentes tipos de cargas de impacto expõem componentes a situações críticas, e, por conta do comportamento heterogêneo, anisotrópico e — algumas vezes — frágil do material, danos devido a impacto são considerados ameaças aos materiais compósitos (MINAK, AHMADI, 2016).

Os reforços influenciam diretamente nas propriedades dos materiais compósitos, principalmente quanto à orientação de fibras e sequenciamento de laminados. Abarte (1994)

apresenta um modelo para ocorrência de delaminação na interface entre duas fibras laminadas. Entre duas camadas, pode-se considerar que forças atuando em dois fios de diferentes orientações irão se cruzar. Devido a curvaturas em cada camada (influência do formato do componente), a tensão nas diferentes direções provoca forças de rasgamento, induzindo à delaminação. Para fibras de mesma orientação, as duas forças atuarão no sentido de manter os laminados em união e não favorecer a delaminação. Isto leva à conclusão que compósitos com fibras de mesma orientação possuem menor tendência à falha por delaminação (ABARTE, 1994).

Tendo em vista esta análise, é possível deduzir que a relação entre orientação de fibras em relação à tensão aplicada também se torna importante em projetos de máquinas nas quais a utilização de materiais compósitos é recorrente. A Figura 10 mostra que o Limite de Resistência à Tração é maior quando a tensão aplicada é paralela à orientação das fibras - isto é, compreendendo um ângulo de 0° . À medida que o ângulo aumenta, a resistência à tração diminui.

Figura 10 — Relação entre Limite de Resistência à Tração (LRT) e ângulo entre orientação de fibra e tensão aplicada

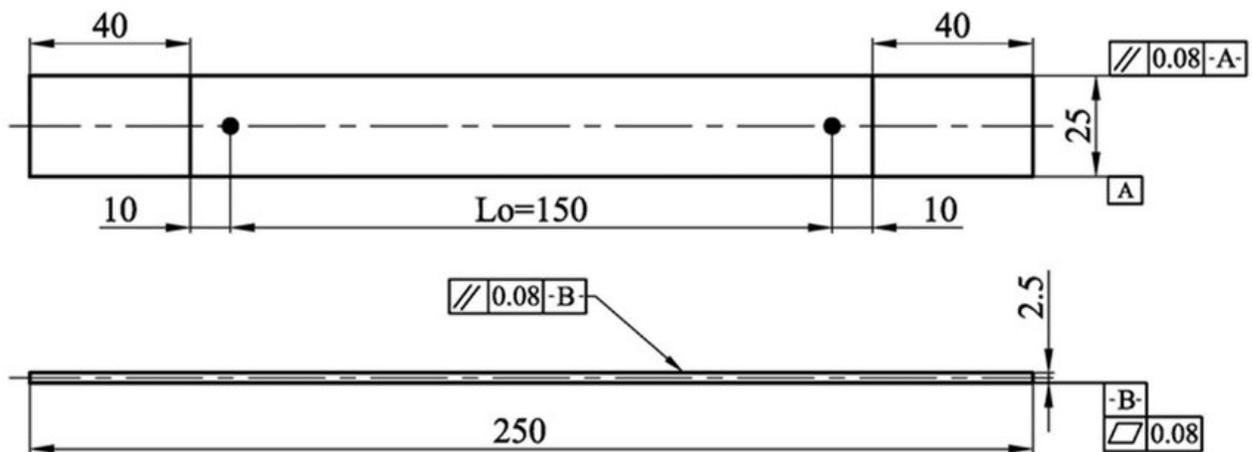


Fonte: Askeland e Wright (2016, com adaptações).

3.1.5.1 Ensaio de tração

A norma ASTM D3039, responsável por padronizar ensaios de tração em materiais compósitos, recomenda a utilização de corpos de prova de seção transversal retangular constante, como informa a Figura 11 (as dimensões mostradas correspondem ao trabalho utilizado como referência, portanto, as deste trabalho podem variar). O dimensionamento deve ser calculado de tal modo que a falha ocorra dentro de seu comprimento útil. O comprimento total do corpo de prova deve ser suficiente para evitar empenamentos durante o ensaio devido a excentricidades inerentes ao seu engate na máquina de ensaios (ASTM, 2014).

Figura 11 — Desenho esquemático de corpo de prova para ensaio de tração em material compósito



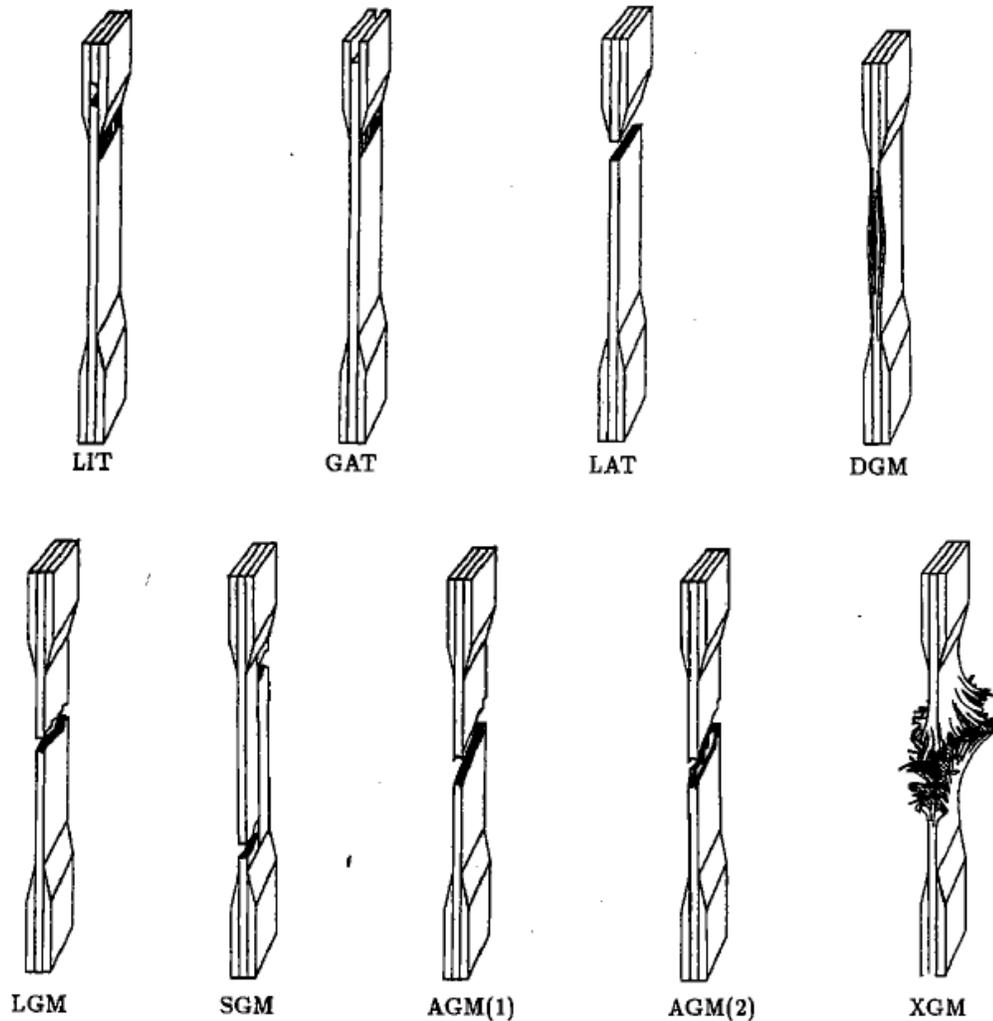
Fonte: Alarifi (2021).

Para materiais cuja orientação de fibra é unidirecional (ou tendência para falha na direção da fibra), é recomendada a utilização de dispositivos nomeados *tabs*, nas extremidades dos corpos de prova, para evitar má distribuição de carga durante o ensaio e provocar a ruptura do material fora do comprimento útil. Existem algumas configurações de compósitos, como laminados multidirecionais, reforçados com tecidos ou fibras descontínuas que podem ser testadas sem o acoplamento com *tabs*. O material considerado mais consistente para fabricação destes engates auxiliares é o compósito de matriz polimérica reforçado com fibra de vidro de classe E, sendo o reforço enrolado ou não, em uma orientação de laminados em 0° ou 90° (ASTM, 2014).

A norma ASTM D3039 também descreve os diferentes modos de falha de um material compósito de matriz polimérica submetido a ensaio de tração. Um total de nove nomenclaturas,

com três letras cada, representam combinações de área, local e modo de fratura do corpo de prova. A Figura 12 elucida estas informações com ilustrações dos modos de falha, e a Tabela 5 informa detalhadamente o significado de cada nomenclatura.

Figura 12 — Códigos de falha de ensaios de tração de materiais compósitos: modos típicos de falha



Fonte: ASTM (2014).

Tabela 5 — Descrição dos códigos referentes aos modos típicos de falha em materiais compósitos submetidos a ensaio de tração

Primeiro Caractere		Segundo Caractere		Terceiro Caractere	
Modo de Falha	Código	Área da Falha	Código	Local da Falha	Código
Angulada	A	Dentro do engate/tab	I	Inferior	B
Delaminação na borda	D	No engate/tab	A	Superior	T
Engate/tab	G	Distância de menos de uma vez a espessura do CP do engate/tab	W	À esquerda	L
Lateral	L	Comprimento útil	G	À direita	R
Multi-modo	M (xyz)	Múltiplas áreas	M	Meio	M
Espalhamento longitudinal	S	Várias	V	Várias	V
Explosivo	X	Desconhecido	U	Desconhecido	U
Outros	O				

Fonte: ASTM (2014).

3.1.5.2 Ensaio de DSC

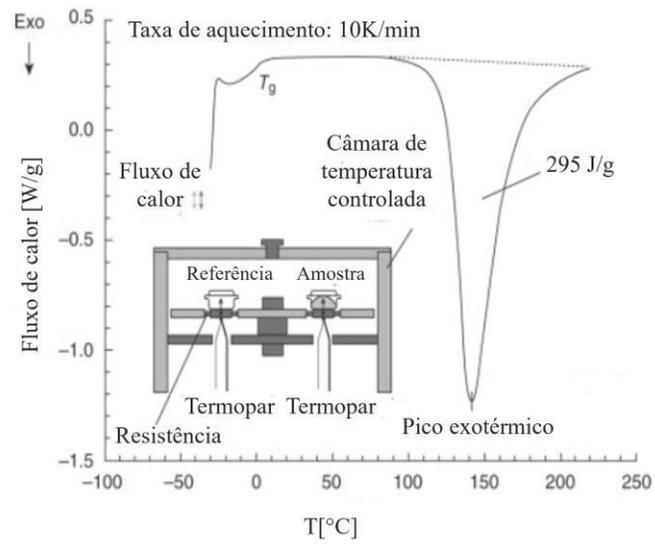
O ensaio de calorimetria de varredura diferencial (DSC, do inglês *Differential Scanning Calorimetry*) mede a relação entre temperatura/fluxo de calor associado a transições térmicas em um material. Uma utilização comum desta técnica inclui investigação, seleção, comparação e avaliação da performance de materiais durante pesquisa ou operação (SINGH, RANJAN, 2023).

A técnica de DSC possui uma variedade de aplicações na análise de materiais compósitos de matriz termoplástica ou termofixa. Para matrizes termoplásticas, o grau de cristalinidade é uma medida importante. Considerando matrizes termofixas, a técnica é aplicada para análise de resinas não-curadas e curadas. Análises de DSC são realizadas constantemente por fabricantes como método de controle de qualidade para determinar a qualidade e integridade, histórico de armazenamento e potencial processabilidade de produto (PARKER, 2000).

As propriedades mencionadas acima podem ser resumidas em dois parâmetros essenciais de avaliação de materiais compósitos: a temperatura de transição vítrea (T_g), sendo esta a temperatura de um material amorfo/semicristalino na qual há a transição de estado vítreo para deformável sem alterações microestruturais; e a sua temperatura de fusão - T_f (CALLISTER, RETHWISCH, 2012). Para além disto, é possível determinar mudanças de fase, estabilidade térmica, cinética de cura, entre outras propriedades de materiais compósitos (SINGH, RANJAN, 2023).

Uma representação deste ensaio e seu resultado é fornecida na Figura 13. Nele, uma amostra de referência e uma de teste são acopladas em dois sensores de platina dentro de uma câmara de temperatura controlada, com uma determinada taxa de aquecimento. À medida que a temperatura aumenta, os sensores detectam duas reações à pressão constante, sendo a primeira delas a transição vítrea (T_g) e a segunda como a reação de ligações cruzadas, com alto pico exotérmico (STARK, BOHMEYER, 2013).

Figura 13 — Fluxo de calor do ensaio de DSC por temperatura em uma resina epóxi, de uma baixa temperatura até a completa reação de ligações cruzadas



Fonte: Stark e Bohmeyer (2013, com adaptações).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, estão explicitados os materiais utilizados neste estudo, bem como todos os detalhes a respeito dos procedimentos experimentais executados.

4.1 Materiais

Para realização das análises propostas no presente trabalho, foram produzidos 2 (dois) compósitos laminados na forma de placas com 250x250 mm. A fase matriz foi constituída da resina epóxi Epikote™ Resin MGS LR235 e do seu respectivo endurecedor Epikure Curing Agent MGS LH235 (agente de cura), cujas propriedades constam na Tabela 6.

Tabela 6 — Algumas propriedades da resina epóxi e do endurecedor utilizados, segundo fabricante

Material	Propriedades					
	Densidade (g/cm ³)	Viscosidade (mPa*s)	Índice refrativo	Módulo de elasticidade (GPa)	LRT (MPa)	Elongação na ruptura (%)
Resina epóxi	1,10 - 1,20	2300 - 3000	1,563 - 1,567	-	-	-
Endurecedor	0,98 - 1,03	50 - 200	1,507 - 1,513	-	-	-
Combinação da resina epóxi com o endurecedor	1,10 - 1,20	~ 600 (em 20 °C)	-	3,0 - 3,3	70 - 80	5 - 9

Fonte: elaborada pelo autor.

Uma das placas foi reforçada com tecidos de fibra de carbono BIAx de gramatura igual a 302 g/m², enquanto a outra foi reforçada com tecidos de fibras de vidro BIAx com gramatura de 810 g/m².

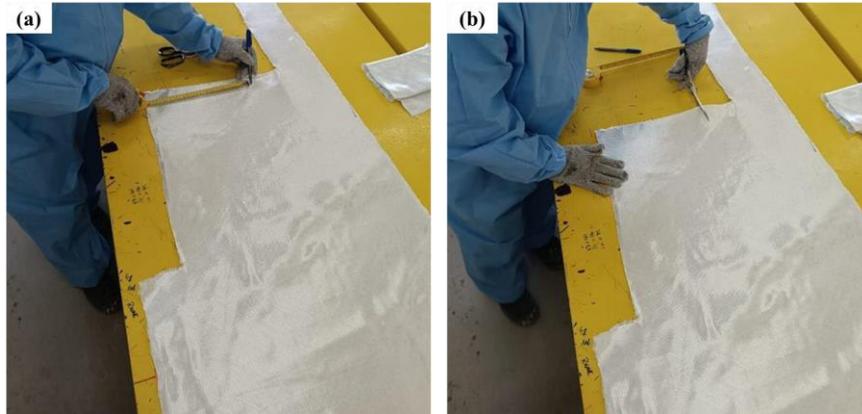
4.2 Métodos

4.2.1 Processo de fabricação dos compósitos laminados

Como já mencionado, os compósitos laminados foram produzidos por meio do processo de *hand lay-up*. Inicialmente, foram cortados os pedaços de tecidos a serem utilizados na fabricação das placas, que consistiam em quadrados com 250 mm de lado. A Figura 14 mostra os

procedimentos de medida, marcação e corte do tecido de fibra de vidro, o qual foi replicado para obtenção dos pedaços de tecido de fibra de carbono. Para cada placa, cortaram-se 5 (cinco) pedaços de tecido.

Figura 14 — Obtenção dos tecidos de fibra de vidro nas dimensões desejadas: (a) medição e (b) corte



Fonte: elaborada pelo autor.

Em seguida, os tecidos de fibra de vidro e de carbono foram empilhados e posicionados na mesa de laminação sobre um tecido de nylon, conforme pode ser observado na Figura 15. O tecido de nylon, neste trabalho, desempenhou a função de agir como um desmoldante, facilitando a retirada da placa da mesa de laminação após o término da fabricação. Geralmente, são utilizados desmoldantes e tecidos perfurados para esta função, e nylon para isolar os materiais a serem laminados sobre o plano de infusão.

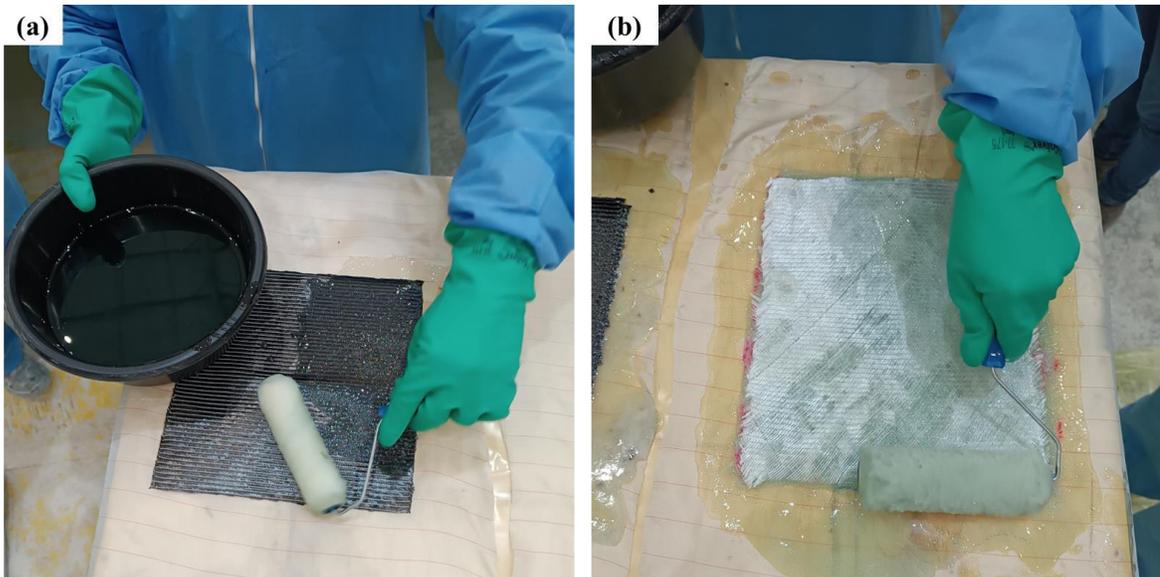
Figura 15 — Posicionamento dos tecidos na mesa de laminação



Fonte: elaborada pelo autor.

Com o auxílio de um rolo de lã, iniciou-se a aplicação da resina epóxi, que se deu comportando camada por camada de tecido. Assim, a resina (já misturada com seu endurecedor) foi distribuída com o rolo em cada camada de tecido, impregnando-a devidamente. Esta etapa do procedimento é apresentada na Figura 16.

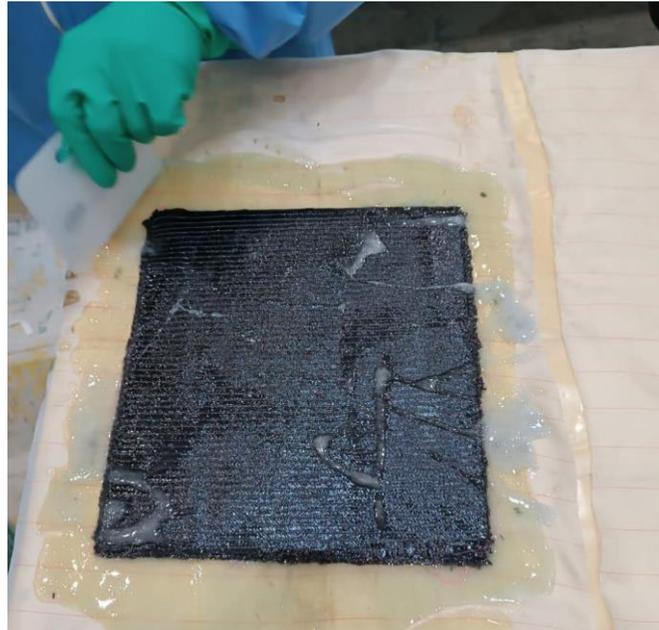
Figura 16 — Aplicação da resina nos (a) tecidos de fibra de carbono e nos (b) tecidos de fibra de vidro



Fonte: elaborada pelo autor.

Após a acomodação das cinco camadas de tecido, é feita a remoção do excesso de resina epóxi com a espátula de celulósida. A espatulagem, evidenciada na Figura 17, também objetiva retirar bolhas que possam existir entre as camadas de tecido e conferir homogeneidade às regiões entre as camadas e à superfície do laminado.

Figura 17 — Processo de espatulagem



Fonte: elaborada pelo autor.

Em sequência à espatulagem, a superfície do laminado foi coberta por uma camada de nylon, como mostrado na Figura 18, com o objetivo de evitar que impurezas advindas do ambiente de produção se depositem sobre o compósito fabricado.

Figura 18 — Colocação da camada superior de nylon

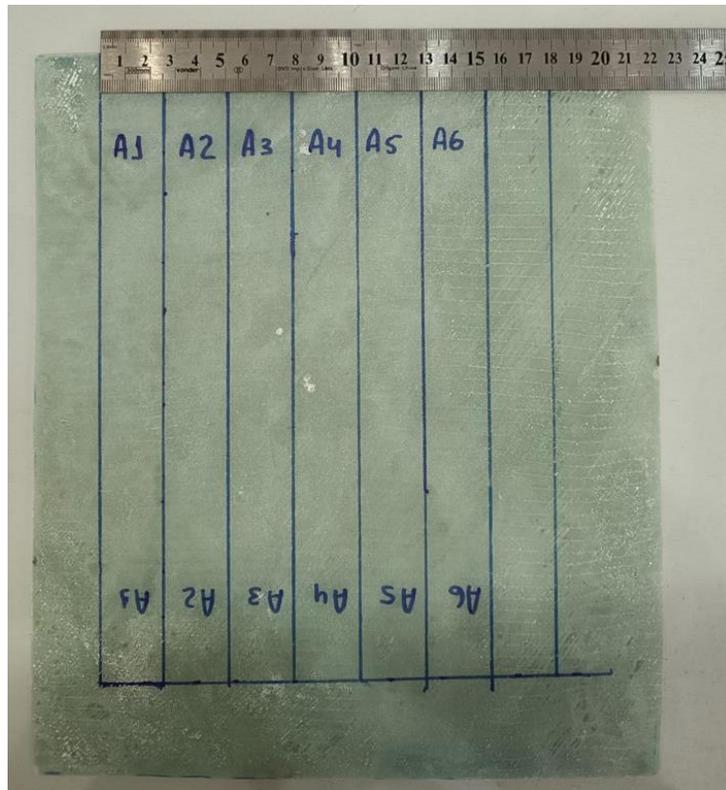


Fonte: elaborada pelo autor.

Ao final, as placas compósitas produzidas foram deixadas em repouso por 48 horas à temperatura ambiente e sem necessidade de vácuo. De acordo com as indicações do fabricante da resina epóxi, este tempo é mais do que suficiente para que se complete o processo de cura nestas condições (cura em temperatura ambiente). Em seguida, as placas foram submetidas à rebarbação e seccionamento para obtenção das amostras para os ensaios de tração e DSC.

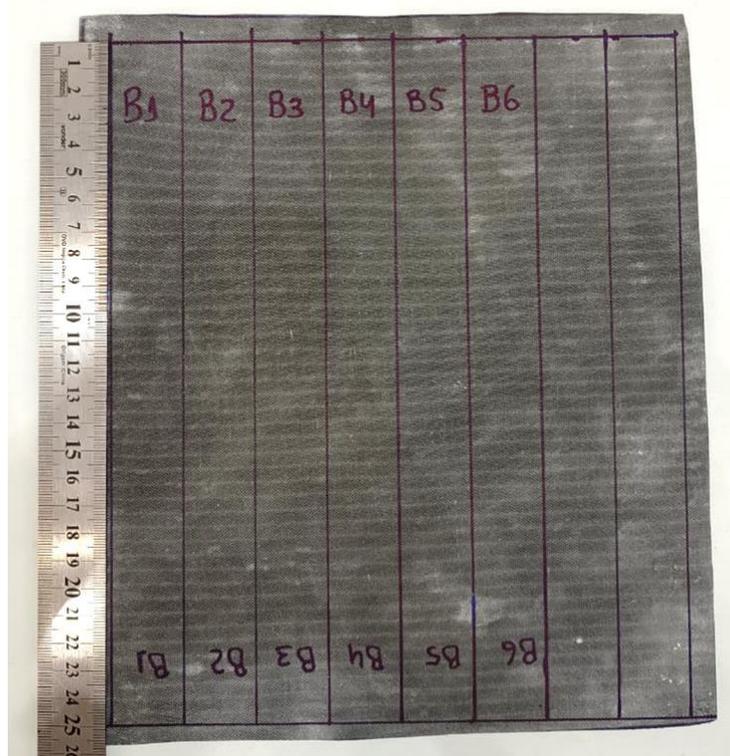
Primeiramente, foram removidas as rebarbas presentes nas placas, deixando-as nas dimensões projetadas. Depois, foram marcados os tamanhos dos corpos de prova de tração conforme a norma ASTM D3039 (mais informações sobre estes corpos de prova serão fornecidas no próximo subtópico deste trabalho). As Figuras 19 e 20 contêm as marcações realizadas nas placas.

Figura 19 — Marcação dos corpos de prova para ensaios de tração na placa reforçada com fibra de vidro



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 20 — Marcação dos corpos de prova para ensaios de tração na placa reforçada com fibra de carbono



Fonte: elaborada pelo autor.

Tanto a remoção das rebarbas quanto o corte dos corpos de prova foram realizados utilizando uma esmerilhadeira com disco de corte acoplado, assim como mostrado na Figura 21.

Figura 21 — Remoção de rebarbas e corte de corpos de prova



Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.2 Ensaio de tração

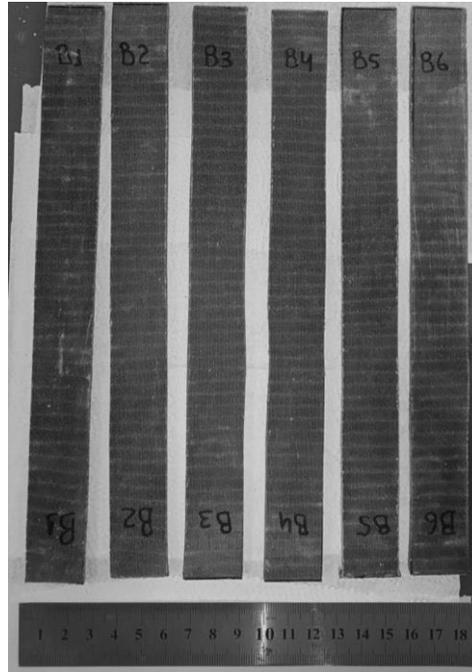
Conforme determina a norma ASTM D3039, os corpos de prova de compósitos de matriz polimérica precisam possuir, aproximadamente, 250 mm de comprimento, 25 mm de largura e uma espessura mínima de 2 mm para serem submetidos ao ensaio de tração normatizado. A Tabela 7 informa as dimensões dos corpos de prova medidas após o corte. Para cada placa, cortaram-se 6 (seis) corpos de prova, mostrados nas Figuras 22 e 23.

Tabela 7 — Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de tração

Compósito laminado reforçado com fibra de vidro			
Corpo de prova	Dimensões (mm)		
	Comprimento	Largura	Espessura
A1	251	24,16	4,80
A2	250	23,61	4,85
A3	250	24,29	4,95
A4	251	25,03	4,80
A5	250	24,60	4,84
A6	250	25,29	4,50
Compósito laminado com fibra de carbono			
Corpo de prova	Dimensões (mm)		
	Comprimento	Largura	Espessura
B1	251	26,14	3,69
B2	251	24,91	3,65
B3	251	25,41	3,59
B4	252	25,40	3,70
B5	251	25,19	3,64
B6	251	26,02	3,56

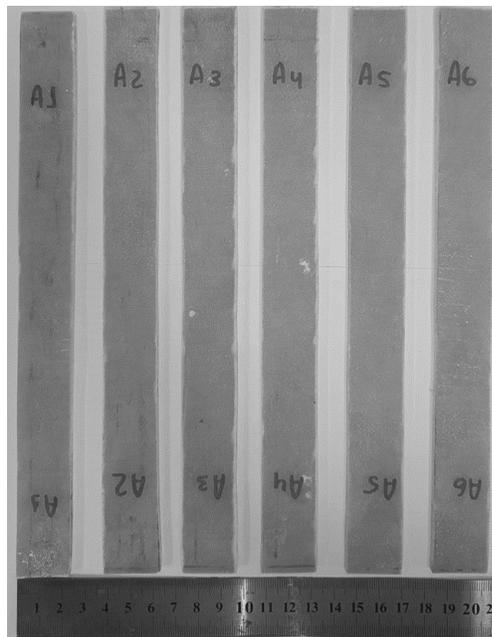
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 22 — Corpos de prova para ensaios de tração do compósito laminado reforçado com tecidos de fibra de carbono



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 23 — Corpos de prova para ensaios de tração do compósito laminado reforçado com tecidos de fibra de vidro



Fonte: elaborada pelo autor.

É válido ressaltar que não foram fabricados *tabs* para fixação nas extremidades dos corpos de prova, conforme requisitado pela norma ASTM D3039, devido a limitações no processo de fabricação. Os efeitos da não utilização de *tabs* são devidamente discutidos na próxima seção do presente trabalho.

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMM) da Universidade Federal do Ceará (UFC), no equipamento EMIC DL 10000, apresentado na Figura 24.

Figura 24 — Equipamento para ensaio de tração utilizado

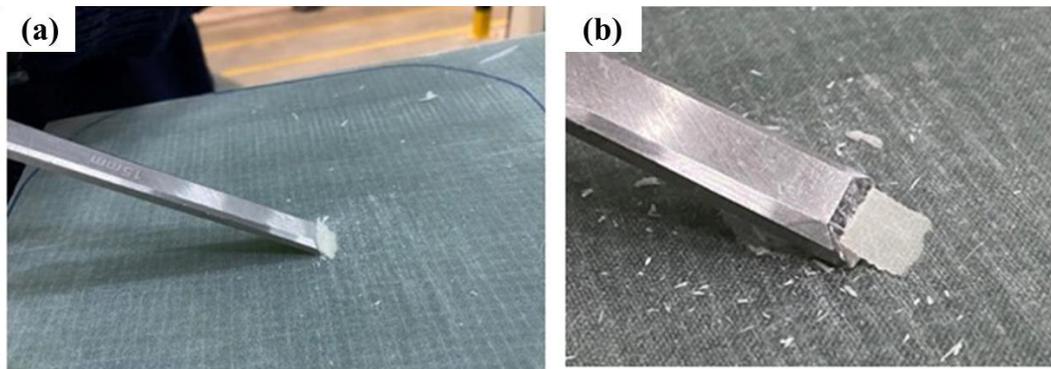


Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.3 Ensaios de DSC

As amostras para os ensaios de DSC foram obtidas dos pedaços remanescentes das placas após os cortes dos corpos de prova para os ensaios de tração. A Figura 25 ilustra o procedimento de coleta das amostras, o qual se inicia com a extração de um pequeno fragmento da placa, do qual, em seguida, é removida apenas a parte que corresponde à primeira camada do laminado. É necessário que a amostra da primeira camada seja, aproximadamente, de 20x10 mm.

Figura 25 — Procedimento de remoção de amostras ensaios DSC: (a) extração da amostra e (b) remoção da primeira camada do laminado



Fonte: elaborada pelo autor.

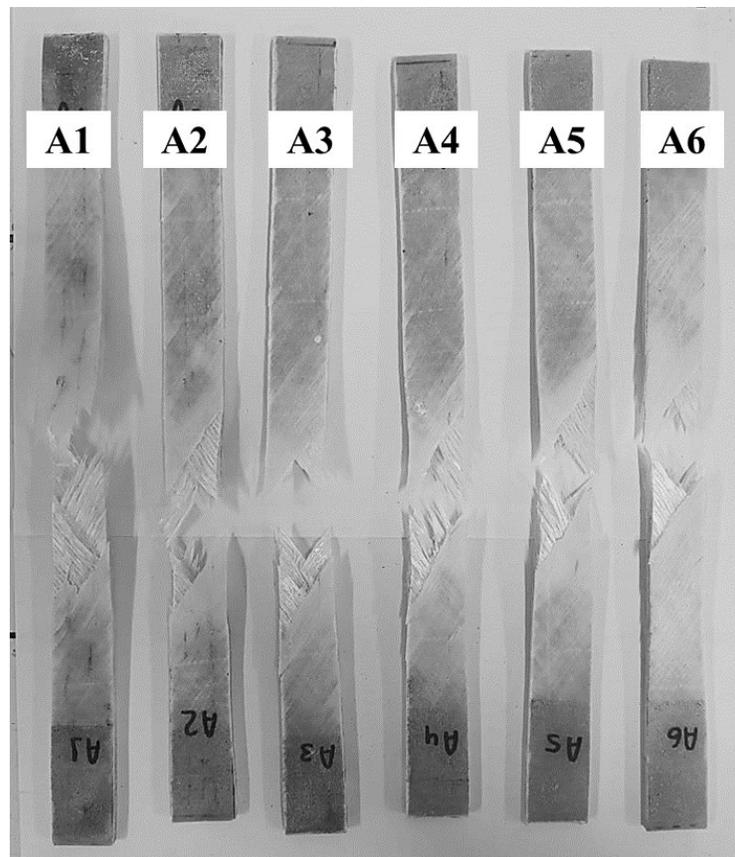
Os ensaios de DSC foram realizados no maquinário DSC TA Instruments X3 do Laboratório de Materiais de uma indústria de fabricação de pás eólicas. A metodologia dos ensaios seguiu a norma ASTM D2584. As amostras foram aquecidas da temperatura ambiente, 25°C, até a temperatura de 250°C com uma taxa de 10°C/min.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaio de tração

A seguir, a Figura 26 mostra os corpos de prova *post mortem*, ou seja, fraturados após os ensaios de tração, do compósito laminado reforçado com tecidos de fibra de vidro. As fraturas observadas durante os ensaios foram analisadas conforme a norma ASTM D3039 e as conclusões a respeito do modo, área e local das falhas são apresentadas na Tabela 8.

Figura 26 — Corpos de prova do compósito laminado reforçado com tecidos de fibra de vidro após ensaios de tração



Fonte: elaborada pelo autor.

Como pode ser observado na Figura 26 e nas informações contidas na Tabela 8, as falhas dos corpos de prova foram descritas pelo mesmo código, sendo este o XGM, que diz respeito às falhas explosivas na região central do comprimento útil do corpo de prova — parte do corpo de prova longe das extremidades fixadas pelas garras. Este fato é um dos indicadores que a não-utilização de tabs, neste caso, não influenciou o ensaio dos corpos de prova. Quando um corpo de

prova é afetado pela ausência de tabs, ele tem sua estrutura (integridade física) comprometida devido a deformação local promovida pelos esforços de compressão promovido pelas garras nas extremidades, e é comum que a falha ocorra em locais próximos à estas extremidades que funcionam como concentradores de tensão.

Tabela 8 — Modos de falha do compósito laminado reforçado com tecidos de fibra de vidro, segundo descrições da norma ASTM D3039

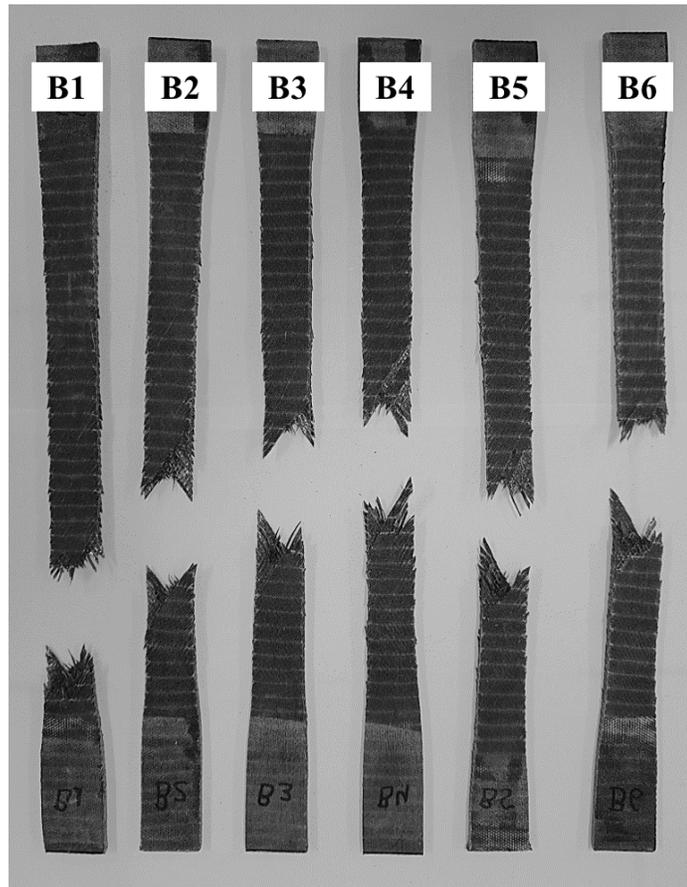
Corpo de prova	Código de falha	Descrição da falha
A1	XGM	Modo de falha: Explosivo Área da falha: Comprimento útil Local da falha: Meio
A2	XGM	Modo de falha: Explosivo Área da falha: Comprimento útil Local da falha: Meio
A3	XGM	Modo de falha: Explosivo Área da falha: Comprimento útil Local da falha: Meio
A4	XGM	Modo de falha: Explosivo Área da falha: Comprimento útil Local da falha: Meio
A5	XGM	Modo de falha: Explosivo Área da falha: Comprimento útil Local da falha: Meio
A6	XGM	Modo de falha: Explosivo Área da falha: Comprimento útil Local da falha: Meio

Fonte: elaborada pelo autor.

As análises visuais dos corpos de prova de tração do laminado reforçado com fibra de vidro mostram que houve uma excelente concordância dos resultados quanto aos módulos de falha. O fato das falhas ocorrerem da mesma forma para estes corpos de prova pode indicar que o procedimento de fabricação deste compósito foi realizado adequadamente, não havendo a existência de grandes variações ao longo da placa produzida.

A Figura 27 apresenta os corpos de prova *post mortem* do compósito laminado produzido com reforço de tecido de fibras de carbono.

Figura 27 — Corpos de prova do compósito laminado reforçado com tecidos de fibra de carbono após ensaios de tração



Fonte: elaborada pelo autor.

Em seguida, a Tabela 9 informa as descrições das falhas verificadas para os corpos de prova do compósito laminado reforçado com tecidos de fibra de carbono. Para este laminado, cinco das falhas foram descritas como XGM, o mesmo código de falha obtido para os corpos de prova reforçados com fibra de vidro. No entanto, uma das falhas foi caracterizada como sendo do tipo XGB, ocorrendo na parte inferior do corpo de prova, próximo à extremidade em contato com a garra. Tal fato pode ser explicado pela discussão feita anteriormente sobre a não-utilização de *tabs*, o que pode influenciar o comportamento do corpo de prova durante o ensaio, ou pela presença de algum defeito localização nesta região oriundo do processo de fabricação da placa laminada — que também pode funcionar como um concentrador de tensão. A presença de algum defeito, no entanto,

requer análises mais específicas para ser confirmada. Porém, considerando que cinco dos seis corpos de prova apresentaram o mesmo código de falha, ainda é possível afirmar que os resultados dos ensaios de tração foram coerentes, não sendo a discrepância de um corpo de prova tão considerável a ponto de anular as conclusões obtidas com o presente trabalho.

Tabela 9 — Modos de falha do compósito laminado reforçado com tecidos de fibra de carbono, segundo descrições da norma ASTM D3039

Corpo de prova	Código de falha	Descrição da falha
B1	XGB	Modo de falha: Explosivo Área da falha: Comprimento útil Local da falha: Inferior
B2	XGM	Modo de falha: Explosivo Área da falha: Comprimento útil Local da falha: Meio
B3	XGM	Modo de falha: Explosivo Área da falha: Comprimento útil Local da falha: Meio
B4	XGM	Modo de falha: Explosivo Área da falha: Comprimento útil Local da falha: Meio
B5	XGM	Modo de falha: Explosivo Área da falha: Comprimento útil Local da falha: Meio
B6	XGM	Modo de falha: Explosivo Área da falha: Comprimento útil Local da falha: Meio

Fonte: elaborada pelo autor.

Comparando os dois tipos de corpos de prova ensaiados, notou-se que, embora praticamente descritos pelo mesmo código de falha, durante a realização dos ensaios de tração que os corpos de prova do compósito laminado reforçado com tecidos de fibra de carbono foram capazes de deformar mais até a ruptura e que suas falhas foram menos explosivas, em comparação aos corpos de prova do laminado reforçado com tecidos de fibra de vidro. Esta diferença, inclusive, pode ser confirmada pelos resultados contidos nas Tabelas 10 e 11, que contêm as propriedades mecânicas de ambos os tipos de corpos de prova obtidas por meio dos ensaios de tração.

De acordo com os dados apresentados nas Tabelas 10 e 11, percebe-se que a deformação específica na ruptura média para os corpos de prova reforçados com fibra de vidro é 0,136 mm/mm (13,6%), enquanto é 0,269 mm/mm (26,9%) para os corpos de prova reforçados com fibra de carbono.

Tabela 10 — Propriedades mecânicas dos corpos de prova reforçados com fibra de vidro

Corpo de prova	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Deformação Específica na Ruptura (mm/mm)
A1	141	30	5357	0,155
A2	136	29	4970	0,130
A3	132	29	4822	0,130
A4	139	32	5336	0,115
A5	146	31	5239	0,125
A6	154	33	5347	0,160
Média	141,30	30,48	5168	0,136
Desvio Padrão	± 7,74	± 1,51	± 239,5	± 0,017

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 11 — Propriedades mecânicas dos corpos de prova reforçados com fibra de carbono

Corpo de	Limite de	Tensão de	Módulo de	Deformação
-----------------	------------------	------------------	------------------	-------------------

prova	Resistência à Tração (MPa)	Escoamento (MPa)	Elasticidade (MPa)	Específica na Ruptura (mm/mm)
B1	175	30	3603	0,255
B2	172	95	2299	0,256
B3	170	28	4063	0,260
B4	166	88	1986	0,275
B5	164	86	2319	0,275
B6	157	91	1674	0,295
Média	167,33	69,66	2657,33	0,269
Desvio Padrão	± 6,44	± 31,65	± 951,91	± 0,015

Fonte: elaborada pelo autor.

É interessante avaliar os resultados obtidos por meio da metodologia deste trabalho com os dados da literatura apresentados anteriormente. Por exemplo, comparando os dados presentes na Tabela 6 com os das Tabelas 10 e 11, é possível concluir que ambas as combinações de matriz e reforço resultaram em melhores propriedades mecânicas do que a fase matriz sozinha (para os dados de combinação da resina epóxi com endurecedor, com exceção do módulo de elasticidade médio dos corpos de prova de prova com fibra de carbono. O Limite de Resistência à Tração (LRT) da fase matriz (70 MPa) dobrou para o CPs reforçados com fibra de vidro (141,30 MPa) e aumentou em 139,04% para os CPs reforçados com fibra de carbono (167,33 MPa).

A Tabela 12 apresenta os valores médios das propriedades mecânicas medidas e permite uma melhor avaliação comparativa das propriedades mecânicas das placas produzidas. Em termos do LRT, os corpos de prova reforçados com fibra de vidro apresentaram um valor médio semelhante aos corpos de prova reforçados com fibra de carbono, sendo a diferença 26,03 MPa (18,42%). Entretanto, a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade verificados para o compósito laminado reforçado com tecidos de fibra de carbono são consideravelmente maiores do que para o compósito reforçado com tecidos de fibra de vidro.

Tabela 12 — Propriedades mecânicas médias de ambos os tipos de corpos de prova avaliados

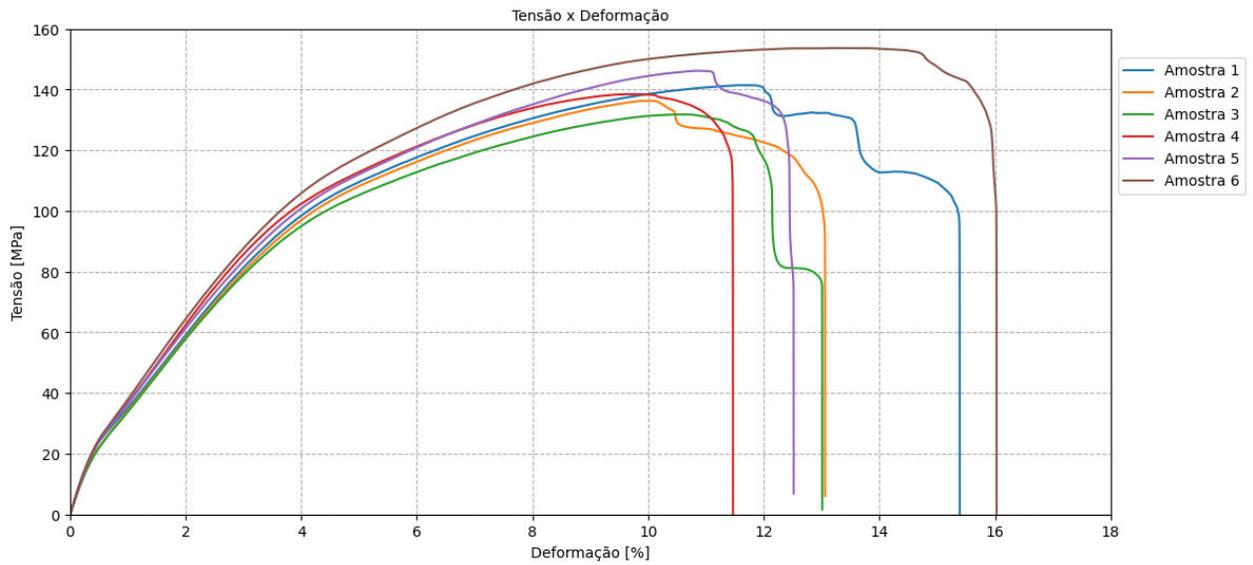
Tipo de Reforço		Limite de Resistência à Tração (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação Específica na Ruptura (mm/mm)
Fibra de vidro	Média	141,30	30,48	5,17	0,136
	Desvio Padrão	± 7,74	± 1,51	± 0,24	± 0,017
Fibra de carbono	Média	167,33	69,66	2,66	0,269
	Desvio Padrão	± 6,44	± 31,65	± 0,95	± 0,015

Fonte: elaborada pelo autor.

Os gráficos de Tensão *versus* Deformação e Carga *versus* Deslocamento obtidos por meio dos ensaios de tração são respectivamente apresentados a seguir nas Figuras 28 e 29 para os corpos de prova reforçados com fibra de vidro e nas Figuras 30 e 31 para os corpos de prova reforçado com fibras e vidro.

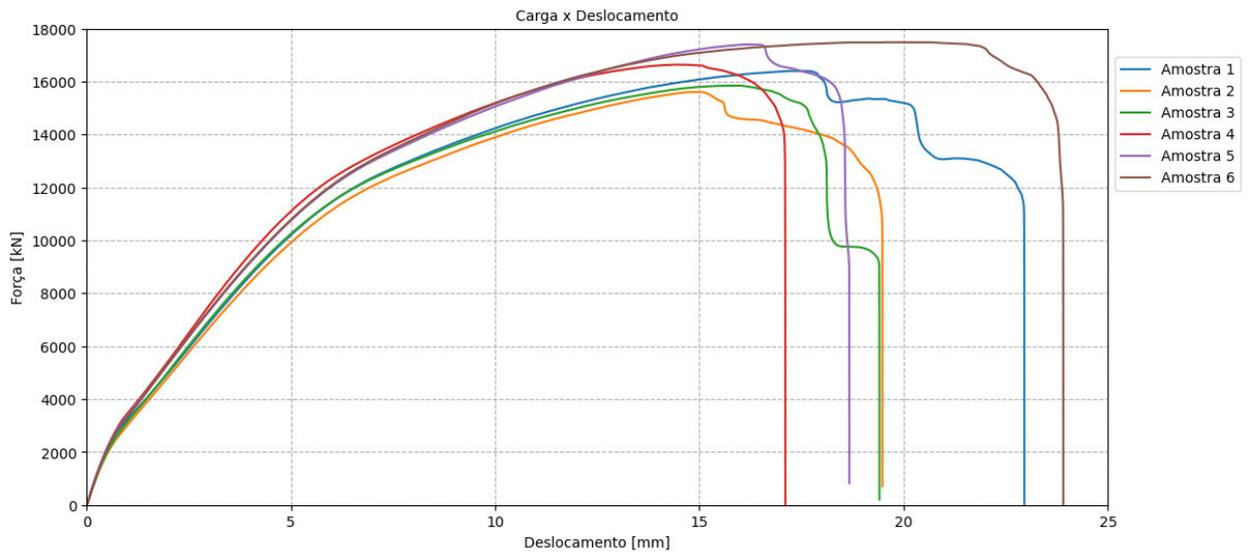
O comportamento das curvas para os corpos de prova reforçados com tecidos de fibra de vidro é diferente do comportamento verificado para os corpos de prova reforçados com tecidos de fibra de carbono. O formato das curvas após a tensão máxima (correspondente ao limite de resistência à tração) ser atingida indica que, pouco a pouco, as fibras de vidro se romperam e a falha de seu de modo mais explosivo. Enquanto isso, as curvas obtidas para os corpos de prova com fibra de carbono apresentaram os formatos mais convencionais para compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras BIAx.

Figura 28 — Gráfico Tensão *versus* Deformação obtido por meio dos ensaios de tração dos corpos de prova da placa laminada reforçada com fibras de vidro



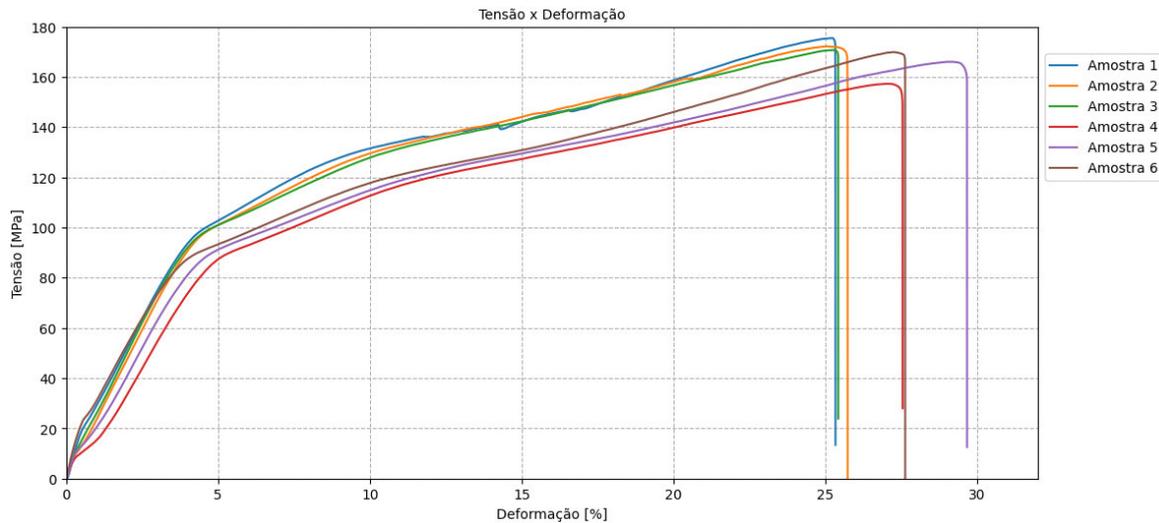
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 29 — Gráfico Carga *versus* Deslocamento obtido por meio dos ensaios de tração dos corpos de prova da placa laminada reforçada com fibras de vidro



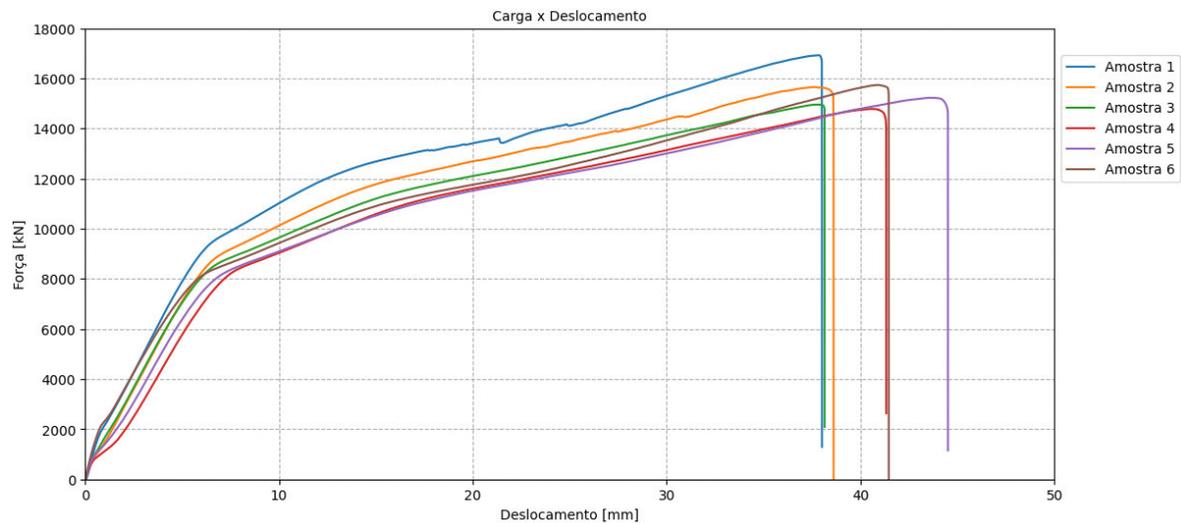
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 30 — Gráfico Tensão *versus* Deformação obtido por meio dos ensaios de tração dos corpos de prova da placa laminada reforçada com fibras de carbono



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 31 — Gráfico Carga *versus* Deslocamento obtido por meio dos ensaios de tração dos corpos de prova da placa laminada reforçada com fibras de carbono



Fonte: elaborada pelo autor.

Diante do discutido anteriormente, é possível concluir que a substituição do reforço de tecidos de fibra de carbono pelo reforço de tecidos de fibra de vidro pode ser viável para a fabricação de determinados componentes aplicados na indústria eólica, uma vez que sejam estudados os esforços mecânicos aos quais estes componentes serão submetidos. Ainda que tenham se apresentado menos resistentes, os corpos de prova manufaturados com tecidos de fibra de vidro possuem boas propriedades mecânicas. Considerando esse fator e, também, o alto custo da fibra de carbono, para

algumas aplicações pode ser mais benéfico fabricar compósitos laminados reforçados com fibra de vidro.

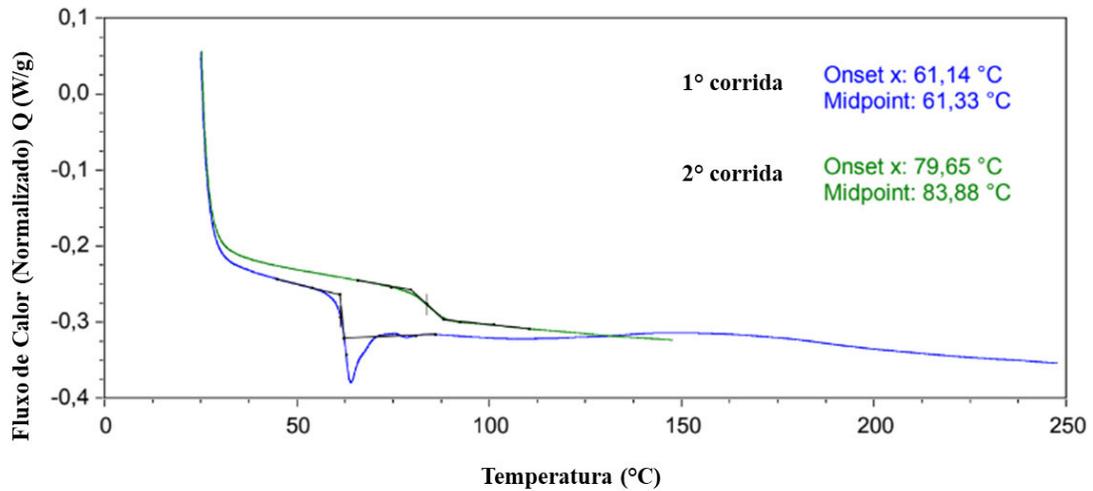
5.2 Ensaio de DSC

A temperatura de transição vítrea (T_g) foi determinada por meio do ensaio de DSC para ambas as placas de compósito laminados visando estipular o comportamento das placas de compósitos laminados produzidos mediante as condições de temperatura média de operação de aerogeradores no Brasil. Geralmente, as indústrias de fabricação de componentes de aerogeradores, tais como pás eólicas e seus subcomponentes, possuem uma temperatura operacional para testar os materiais fabricados. Esta temperatura operacional funciona como temperatura mínima e, então, a T_g deve ser maior ou igual do que ela para que o material seja aprovado no ensaio de DSC.

Neste trabalho, a temperatura de operação considerada foi de 55°C . Essa, portanto, é a temperatura mínima requisitada para a T_g e os laminados produzidos devem ser capazes de manter suas propriedades quando submetidas a ela. As Figuras 32 e 33 apresentam os gráficos resultantes dos ensaios DSC para o compósito laminado reforçado com fibra de vidro e para o compósito laminado reforçado com fibra de carbono, respectivamente. É válido lembrar que as mudanças de linha de base representam a queda do calor específico à pressão constante (C_p), portanto denotam a temperatura de transição vítrea.

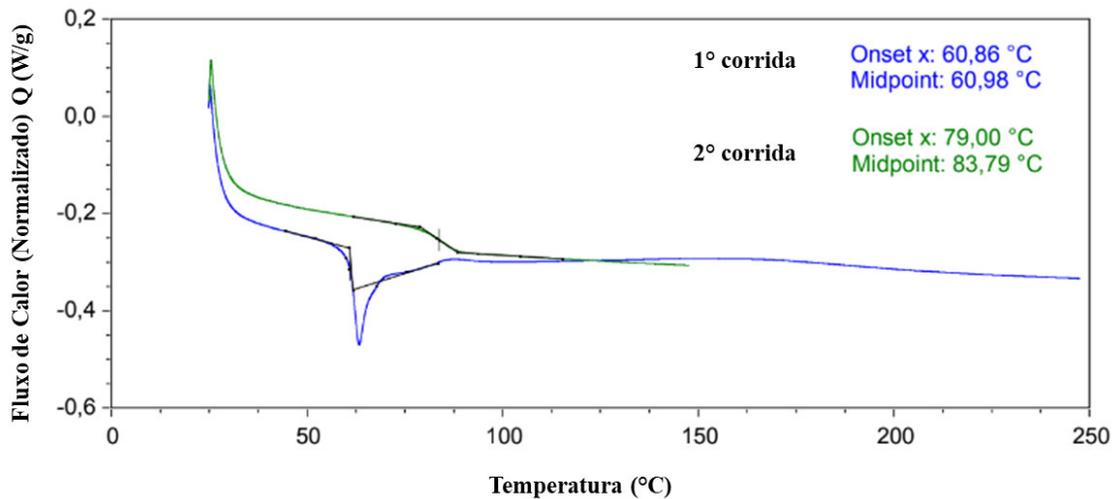
Além disso, nos gráficos, existem duas curvas, a da primeira e a da segunda corrida; a primeira corrida representa o ensaio do material como recebido, enquanto a segunda corrida permite comparar materiais diretamente entre si, que considera o efeito do aquecimento anterior, uma vez que o histórico de calor é muito importante na avaliação de como um material se comporta. O procedimento operacional padrão deste ensaio em plásticos comumente é executar um ciclo de aquecimento-resfriamento-aquecimento. É o segundo aquecimento que fornece a máxima temperatura ao qual o material pode ser submetido sem comprometer suas propriedades mecânicas.

Figura 32 — Gráfico Fluxo de Calor *versus* Temperatura obtido no ensaio DSC do compósito laminado reforçado com fibra de vidro



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 33 — Gráfico Fluxo de Calor *versus* Temperatura obtido no ensaio DSC do compósito laminado reforçado com fibra de carbono



Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 13, mostrada a seguir, sintetiza os resultados dos ensaios de DSC das duas corridas. É possível concluir que ambos os compósitos laminados produzidos foram aprovados neste ensaio, satisfazendo a condição necessária para operação. Ademais, percebe-se que, quanto à propriedade de T_g , os laminados não apresentaram diferenças significativas entre si. Sendo assim, o fator determinante na seleção do material adequado entre tecidos BIAx de fibra de vidro e tecidos

BIAX de fibra de carbono para compor a fase reforço dependerá dos requisitos de propriedades mecânicas estabelecidos para o componente a ser fabricado.

Tabela 13 — Resultado dos ensaios DSC dos compósitos laminados produzidos

Tipo de Reforço	Temperatura de Transição Vítrea (Tg)		Temperatura de Operação	Status do Ensaio
	1° corrida	2° corrida		
Fibra de vidro	61,33 °C	83,88 °C	55 °C	Aprovado
Fibra de carbono	60,98 °C	83,79 °C	55 °C	Aprovado

Fonte: elaborada pelo autor.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho alcançou o objetivo de produzir duas placas de compósitos laminados de matriz de resina epóxi, uma reforçada com tecidos bidirecionais de fibra de vidro e outra reforçada com tecidos bidirecionais de fibra de carbono, por meio do processo *hand lay-up*. De acordo com os resultados dos ensaios realizados, as principais conclusões obtidas foram:

- Segundo inspeção visual, os corpos de prova da placa de compósito laminado reforçada com fibras de vidro e os corpos de prova da placa de compósito laminado reforçada com fibras de carbono apresentaram falhas com o mesmo código, segundo a norma ASTM D3039, sendo este o XGM, que corresponde à falhas explosivas sofridas no meio do comprimento útil do corpo de prova;
- Os corpos de prova reforçados com fibra de vidro apresentaram um LRT médio de 141,30 MPa, enquanto o LRT médio dos corpos de prova reforçados com fibra de carbono foi de 167,33 MPa. A tensão de escoamento dos CPs reforçados fibra de carbono foi consideravelmente maior do que para os CPs reforçados com fibra de vidro, sendo a diferença verificada em 39,18 MPa (128,54%). Enquanto isso, o módulo de elasticidade foi 2,51 GPa (48,55%) menor para os CPs reforçados com fibra de carbono;
- O reforço utilizando tecidos de fibra de carbono pode ser substituído pelo reforço com fibras de vidro em determinadas aplicações da indústria de fabricação de componentes de aerogeradores, dependendo das propriedades mecânicas requeridas;
- Tanto o compósito laminado reforçado com tecido de fibra de vidro BIAX quanto o compósito laminado reforçado com tecido de fibra de carbono BIAX foram aprovados no ensaio DSC. Ambas apresentaram temperatura de transição vítrea muito semelhantes e maiores do que a temperatura de operação estabelecida nas duas corridas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para complementar a caracterização mecânica das placas de compósitos laminados produzidas, sugere-se a realização de ensaios de impacto e flexão, uma vez que estes são ensaios mecânicos comumente utilizados para avaliar as propriedades mecânicas de materiais frágeis. Ademais, indica-se usar os resultados de tensão e deformação obtidos por meio dos ensaios de tração para calcular o cisalhamento associado à fratura dos corpos de prova, conforme descrito na norma ISO 14129, dado que os componentes de uma pá eólica laminados com tecidos bidirecionais são projetados para operação mediante esforços de cisalhamento. Para estudar mais aprofundadamente as propriedades dos laminados produzidos, pode-se realizar o ensaio de void content, visando verificar e quantificar a presença de bolhas, que seriam um defeito oriundo do processo de fabricação. Além disso, poderia-se avaliar a proporção resina:fibra, como meio de caracterizar com maior precisão os laminados produzidos. Por fim, é relevante que demais discussões sobre a área do conhecimento que envolve este trabalho envolve um aprofundamento sobre os impactos ambientais, focando principalmente nos resíduos gerados na fabricação.

REFERÊNCIAS

- ABARTE, S. Impact on Laminated Composite Materials. **Appl Mech Rev**, vol. 44, n. 4, 1991.
- ALARIFI, I.M. Investigation into the Structural, Chemical and High Mechanical Reforms in B4C with Graphene Composite Material Substitution for Potential Shielding Frame Applications. **Molecules**, vol. 26, 7, 2021, p. 1921.
- ALMACO. **Compósitos 2: Tecnologia de Processos**. 2° ed. 2020.
- ALMUSHAIKEH, A.M.; ALASWAD, S.O.; ALSUHYBANI, M.S. Manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastics and its recovery of carbon fiber: a review. **Polymer Testing**, 122, 2023, 108029.
- ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3° ed. **Cengage Learning**, 2011.
- ASTM D2584. **Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins**. 2018.
- ASTM D3039/D3039M. **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. 2000.
- BEAUSON, J.; LILHOLT, H.; BRONSTED, P. Recycling solid residues recovered from glass fiber-reinforced composites - a review applied to wind turbine blade materials. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, vol. 33, Issue 16, pp. 1542-1556.
- BLG FIBERGLASS. **Hand Lay-Up / Fiberglass Reinforced Plastic**. 2023. Disponível em: <https://blgfiberglass.com/hand-lay-up-fiberglass-reinforced-plastic/> Acesso em: 28 ago. 2023.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 8° ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CANEVAROLO JR., S.V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ª ed. São Paulo, Artliber Editora, 2006.
- DZENIS, Y. A.; RENEKER, D. H. Delamination resistant composites prepared by small diameter fiber reinforcement at ply interfaces. **University of Nebraska - Lincoln, Patent**, 2001.
- GOMES, L. H. **Investimentos na matriz eólica superam R\$ 187,1 bi na última década**. 2021. Folha de São Paulo. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/mpme/2021/07/investimentos-na-matriz-eolica-superam-r-1871-bi-na-ultima-decada.shtml>. Acesso em: 10 ago. 2023.

IRISARRI, F.X.; BASSIR, D.H.; CARRERE, N. Multiobjective stacking sequence optimization for laminated composite structures. **Composites Science Technology**, vol. 69, 7, 2009, p. 983.

JAWAID, M.; THARIQ, M.; SABA, N. **Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites**. Woodhead Publishing, 2019. DOI: 10.1016/B978-0-08-102290-0.12001-X

JIN, F.; LI, X.; PARK, S. Synthesis and application of epoxy resins: a review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. Science Direct, vol. 29, 2015, pp. 1-11.

KUMAR, Y.K.; LOHCHAB, D.S. Influence of aviation fuel on mechanical properties of glass fiber-reinforced plastic composite. MsC. Thesis. **Research Gate**, 2016.

MATHUR, N.M.; BAIRWA, K.; RAJKUMAR. A literature review on Composite material and scope of Sugarcane Bagasse. **International Journal of Industrial Engineering Research and Development**, vol. 5, Issue 4, pp. 125-133.

MILAN, G. S.; GRAZZIOTIN, D. B. **Implantação da produção mais limpa em uma empresa do setor plástico**. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/346572975_Implantacao_da_Producao_Mais_Limpa_em_uma_Empresa_do_Setor_Plastico.

MINAK, G.; AHMADI, M. Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures. **Woodhead Publishing**, Elsevier, 2016.

PARKER, M.J. Comprehensive Composite Materials. **Reference Work**, Science Direct, 2000.
PERVAIZ, S.; QURESHI, T.A.; KASHWANI, G. 3D printing of fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: a status review. **Materials**, 2021, 14, 4520. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14164520>

PRASHANTH, S.; SUBBAYA, K.M.; NITHIN, K. Fiber-reinforced composites - a review. **Journal of Material Sciences and Engineering**, vol. 6, Issue 3, 2017.

RAJAK, D.K.; PAGAR, D.D.; KUMAR, R. Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. **Journal of Materials Research and Technology**, vol. 8, 2019, pp. 6354-6374.

RAJAK, D.P.; PAGAR, D.D.; MENEZES, P.L. Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties and applications. **Polymers**, 11, 1667, 2019.

RANA, S.; FANGUEIRO, R. Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering: Processing, Properties and Applications. **Book chapter**, Woodhead Publishing, 2016, pp. 1-15.

REDDY, S.S.; SURESH, R.; Use of composite materials and hybrid composites in wind turbine blades. **Materials Today: Proceedings**, vol. 46, 2021, pp. 2827-2830.

SANTOMAURO, A. C. **Compósitos: construção e energia eólica puxam a demanda**. 2021. Plástico. Disponível em: <https://www.plastico.com.br/compositos-construcao-e-energia-eolica-puxam-a-demanda/>. Acesso em: 10 ago. 2023.

SHABUDEEN, S. Polymers. **Engineering Chemistry for Textile and Fashion Technology**. Book Chapter, January, 2009.

SINGH, R.; RANJAN, N. Multi-material 3D printing of smart composites, **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**, Elsevier, 2023.

STARK, W.; BOHMEYER, W. Non-destructive evaluation of Polymer Matrix Composites. **Woodhead Publishing, Composites Science and Engineering**, Science Direct, 2013.

TENG, H.; LI, S.; CAO, Z. Carbon fiber composites for large-scale wind turbine blades: applicability study and comprehensive evaluation in China. **Journal of Marine Science and Engineering**, 2023, 11, 624.

TIAN, Z.; WANG, Y.; HOU, X. Review of chemical recycling and reuse of carbon fiber reinforced epoxy resin composites. **New Carbon Materials**, 2022, 37(6), pp. 1021-1045.

Van der WERKEN, N.; TEKINALP, H.; KHANBOLOUKI, P. Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: state of the art and perspective. **Review Article**, University of New Mexico, 2019.

VERMA, C.; OLASUNKANMI, L.O.; AKPAN, E.D. Epoxy resins as anticorrosive polymeric materials: a review. **Reactive and Functional Polymers**. Science Direct, vol. 156, 2020, 104741.

ZHIYUAN, Y.; RONGCHANG, L.; PENG, Z. Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Matrix Composites. **Materials Science: Advanced Composite Materials**, 2017.

ZWEBEN, C. Mechanical Engineer's Handbook, chapter 10: Composite Materials. 4° ed. **Nova Jersey: John Wiley & Sons**, vol. 1, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781118985960.meh110>. Acesso em: 20 mar. 2023.