



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

SAYMON ARIEL RODRIGUES MADEIRO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DA FIBRA DE VIDRO NA
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE LAMINADOS COMPÓSITOS COM MATRIZ DE
RESINA EPÓXI**

FORTALEZA

2023

SAYMON ARIEL RORIGUES MADEIRO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DA FIBRA DE VIDRO NA
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE LAMINADOS COMPÓSITOS COM MATRIZ DE
RESINA EPÓXI**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.

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)

M153a Madeiro, Saymon Ariel Rodrigues.
Avaliação da influência da orientação da fibra de vidro na resistência à tração de laminados compósitos com matriz de resina epóxi / Saymon Ariel Rodrigues Madeiro. – 2023.
70 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. Marcelo José Gomes da Silva.

1. Compósitos laminados. 2. Resina epóxi. 3. Fibras de vidro. 4. Ensaios de tração. 5. Temperatura de transição vítrea. I. Título.

CDD 669

SAYMON ARIEL RODRIGUES MADEIRO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DA FIBRA DE VIDRO NA
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE LAMINADOS COMPÓSITOS COM MATRIZ DE
RESINA EPÓXI**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.

Aprovada em: 20/07/2023.

BANCA EXAMINADORA

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

PhD. Jorge Luiz Cardoso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Santino Loruan Silvestre de Melo
Doutor em Engenharia e Ciência de Materiais

A minha mãe,
Irlanda Rodrigues de Melo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe, Irlanda Rodrigues de Melo, que sempre esteve ao meu lado, pelo carinho, pelo companheirismo, pela formação e, principalmente, pela minha educação. Espero honrar toda dedicação e sacrifícios durante essa jornada.

Ao Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva, pela excelente orientação, pelo voto de confiança e incentivo enquanto fui seu orientando.

Aos participantes da banca examinadora PhD. Jorge Luiz Cardoso e Dr. Santino Loruan Silvestre de Melo, pelo tempo, valiosas colaborações e sugestões.

Agradeço a minha família, pelo amparo durante meu período de graduação. Agradeço a Raimundo Nonato Feitosa, que me apoiou e incentivou.

Agradeço aos amigos conquistados durante o período de graduação, em especial destaque Beatriz Sousa, Breno Lucena, Bruno Linhares, Daniel Aquer, Emerson Santana, Leandro Rodrigues e Lucas Moraes. A todos deixo a minha gratidão por sempre estarem presentes nos momentos difíceis e nas alegrias desta caminhada.

À Universidade Federal do Ceará, pelo apoio financeiro com a manutenção da Bolsa de Iniciação Científica durante o meu curso de graduação.

Ao Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM), pela disponibilização de sua estrutura e equipe para realização dos ensaios de tração.

Aos meus colegas de trabalho que deram todo apoio e incentivo para o desenvolvimento deste estudo.

“Se a aparência e a essência das coisas coincidissem, a ciência seria desnecessária.” (KARL MARX).

RESUMO

A indústria eólica é uma das principais áreas de aplicação de materiais compósitos. Os componentes das pás de aerogeradores são, geralmente, compósitos laminados de resina epóxi reforçados com fibras de carbono ou fibras de vidro. À vista disto, o presente trabalho objetivou analisar as propriedades mecânicas de laminados de matriz de resina epóxi reforçados com tecidos de fibra de vidro. Para isso, foram produzidas placas laminadas de matriz de resina epóxi e reforço de fibra de vidro na forma de tecidos unidirecionais (UD) e bidirecionais (BIAX), utilizando o processo de Modelagem por Transferência de Resina Assistida à Vácuo (VARTM). Por meio de ensaios de tração a 0° e a 90°, visou-se avaliar a influência da orientação do tecido de fibra de vidro na matriz de resina epóxi no comportamento mecânico dos laminados fabricados e determinar as propriedades mecânicas destes. Ademais, utilizando o ensaio de Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC), verificou-se se estes laminados cumprem os requisitos para produção de componentes pré-fabricados de pás eólicas. Os resultados dos ensaios de tração mostraram uma intensa queda na resistência mecânica, em termos do Limite de Resistência à Tração (LRT) e da Tensão de Ruptura, quando os corpos de prova dos laminados UD foram submetidos a esforços trativos na direção perpendicular à orientação das fibras. Por sua vez, o laminado BIAX apresentou um valor médio de LRT muito menor do que aqueles verificados para as placas UD e valores intermediários de Tensão de Ruptura. Em relação aos resultados dos ensaios DSC, a comparação da temperatura de transição vítrea (T_g) com a temperatura de operação requerida para pré-fabricados (55°C) revelou que todos os laminados satisfizeram a condição necessária para serem utilizados para produção de componentes para pás eólicas.

Palavras-chave: compósitos laminados; resina epóxi; fibras de vidro; ensaio de tração; temperatura de transição vítrea.

ABSTRACT

The wind industry is one of the main industrial sectors where composite materials are applied. The wind turbines blades components are commonly laminated composites made of epoxy resin, reinforced with carbon or glass fibers. In view of this, the present work aimed to analyze the mechanical properties of laminated epoxy resin composites reinforced with glass fiber fabric. Laminated composites of epoxy resin with glass fiber fabric reinforcement were produced, in the unidirectional (UD) and bidirectional (BIAX) conditions, utilizing the Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) process. Employing tensile tests at 0° and 90°, was aimed is to evaluate the influence of the orientation of the glass fiber fabric applied on the epoxy resin matrix on the mechanical behavior of the developed laminates and determine their mechanical properties. Furthermore, through the Differential Scanning Calorimetry (DSC) test, the purpose was to verify if these laminates meet the requirements for production of wind blades pre-manufacturing. The tensile tests results showed a large decrease of strength, related to the tensile strength and rupture stress when the UD laminated composites were submitted to tensile stresses perpendicular to the orientation of the glass fibers. The BIAX laminated presented a much smaller tensile strength average value than those verified for UD laminates, along with intermediate values of rupture stress. Regarding the DSC results, the comparison between the glass transition (T_g) temperature and the required temperature for pre-fabricated components revealed that all the laminated composites satisfy the necessary condition for their utilization in wind blades components production.

Keywords: Laminated composites; epoxy resin; glass fibers; tensile test; glass transition temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	— Representação dos principais componentes de um aerogerador	14
Figura 2	— (a) Representação dos componentes de uma pá eólica e (b) pré-fabricado de raiz	15
Figura 3	— Representação esquemática de um material compósito	18
Figura 4	— Representação esquemática da disposição de diferentes morfologias de reforço na matriz de um material compósito	19
Figura 5	— Anel de oxirano	21
Figura 6	— Estrutura química de algumas resinas epóxi comuns: (a) DGEBA; (b) ECC e (c) DGEBA	22
Figura 7	— Representação dos tipos de tecidos de fibra de vidro	25
Figura 8	— Representação de um compósito laminado com camadas de reforço de diferentes orientações	26
Figura 9	— Limite de Resistência à Tração (LRT) em relação ao ângulo entre as fibras e a tensão aplicada	27
Figura 10	— Representação esquemática do processo VARTM	28
Figura 11	— Representação esquemática do plano de infusão	30
Figura 12	— Representação esquemática do ensaio de tração	31
Figura 13	— Corpo de prova de compósito polimérico para ensaio de tração conforme norma ASTM D3039: (a) vista superior e (b) vista lateral	31
Figura 14	— Exemplos de curvas tensão-deformação para materiais de comportamento linear e bilinear	32
Figura 15	— Modos de falhas de materiais compósitos poliméricos segundo a norma ASTM D3039	33
Figura 16	— Esquema de um equipamento genérico para análise de DSC com compensação de potência	34
Figura 17	— Curva genérica para um experimento DSC: (I) mudança de linha de base sem pico; (II) e (III) picos endotérmicos e (IV) pico exotérmico	35
Figura 18	— Curva genérica para um experimento DSC com alteração da linha de base	35
Figura 19	— Tecidos de fibra de vidro utilizados como reforços dos compósitos laminados: (a) UD e (b) BIAX	36

Figura 20	— (a) Plástico de vácuo com fina camada de fixador depositada e (b) camada de nylon	37
Figura 21	— (a) Camada inferior de nylon e camadas de tecido e (b) camadas de tecidos sobrepostas pela camada superior de nylon	38
Figura 22	— (a) Comparativo dimensional de um tecido de fibra de vidro e da manta “CFM” e (b) medida da diferença de tamanho nas extremidades .	39
Figura 23	— Espiral fixada na parte inferior	40
Figura 24	— Conexões onde foram acopladas as mangueiras	40
Figura 25	— Plástico de vácuo acima do plano de infusão	41
Figura 26	— Teste de vácuo: (a) marcador da bomba de vácuo e (b) sistema em vácuo	41
Figura 27	— (a) Início do processo de infusão e (b) continuação do processo de infusão	42
Figura 28	— Término do processo de infusão	43
Figura 29	— Manta térmica sobre as placas laminadas em produção	43
Figura 30	— Placas desmoldadas antes da rebarbação	44
Figura 31	— (a) Máquina de ensaio de tração do LEM/DEMM/UFC e (b) célula de carga	44
Figura 32	— Corpos de prova para ensaio de tração: (a) reforçados com tecido UD a serem ensaiados em 0° e (b) reforçados com tecido BIAX	46
Figura 33	— (a) Amostras para ensaio DSC e (b) cadinho de alumínio do equipamento de ensaio DSC	47
Figura 34	— (a) Aparecimento de bolhas durante o processo de infusão do laminado UD 1 e (b) ampliação da Figura 30 mostrando o aspecto superficial do laminado UD 1 após fabricado	48
Figura 35	— Término do ensaio de tração de um corpo de prova teste	49
Figura 36	— Corpos de prova UD 1 <i>post mortem</i> ensaiados a 0°	50
Figura 37	— Corpos de prova UD 1 <i>post mortem</i> ensaiados a 90°	52
Figura 38	— Corpos de prova UD 2 <i>post mortem</i> ensaiados a 0°	53
Figura 39	— Corpos de prova BIAX <i>post mortem</i>	54
Figura 40	— Gráfico comparativo das propriedades mecânicas dos corpos de prova ensaiados	59

Figura 41	— Gráficos Tensão <i>versus</i> Deformação	61
Figura 42	— Curvas resultantes dos ensaios de DSC	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	— Propriedades de algumas matrizes poliméricas termofixas e termoplásticas	23
Tabela 2	— Propriedades dos principais tipos de fibra	24
Tabela 3	— Códigos referentes aos modos de falha de um material compósito polimérico segundo a norma ASTM D3039	33
Tabela 4	— Propriedades da resina epóxi utilizada para fabricação das placas, segundo fabricante	36
Tabela 5	— Dimensões dos corpos de prova	45
Tabela 6	— Códigos de falha dos corpos de prova UD 1 ensaiados a 0°	51
Tabela 7	— Códigos de falha dos corpos de prova UD 1 ensaiados a 90°	51
Tabela 8	— Códigos de falha dos corpos de prova UD 2 ensaiados a 0°	53
Tabela 9	— Códigos de falha dos corpos de prova BIAX	55
Tabela 10	— Resumo dos modos de falha dos corpos de provas ensaiados	56
Tabela 11	— Propriedades mecânicas dos corpos de prova UD 1 ensaiados a 0° e a 90°	57
Tabela 12	— Propriedades mecânicas dos corpos de prova UD 2 ensaiados a 0° e a 90°	58
Tabela 13	— Propriedades mecânicas dos corpos de prova BIAX	59
Tabela 14	— Propriedades mecânicas dos corpos de provas ensaiados	60
Tabela 15	— Temperaturas de transição vítrea	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALMACO	Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos
AR	Alkalis Resistant
ASTM	American Society for Testing and Materials
BIAX	Bidirecional
CFM	Cubic Feet Per Minute
CP	Corpo de Prova
DSC	Differential Scanning Calorimetry
HS	High Strength
LRT	Limite de Resistência à Tração
Tf	Temperatura de fusão
Tg	Temperatura de transição vítrea
TRIAX	Tridirecional
UD	Unidirecional
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding

LISTA DE SÍMBOLOS

% Porcentagem

SUMÁRIO

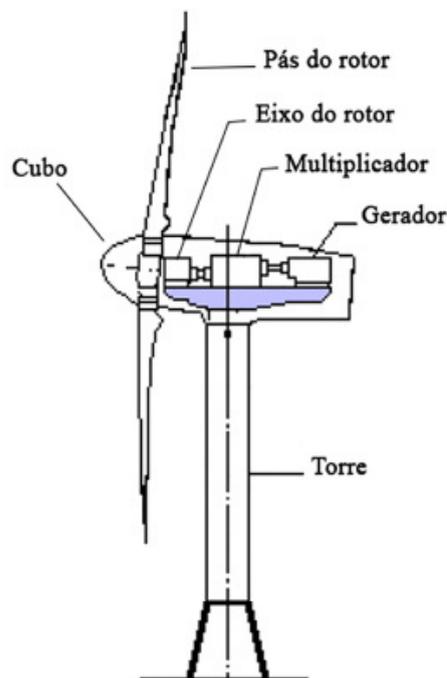
1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	Materiais compósitos	18
3.1.1	<i>Matrizes</i>	19
3.1.1.1	<i>Matrizes poliméricas</i>	20
3.1.1.1.1	Matrizes poliméricas aplicadas na indústria eólica	20
3.1.1.1.2	Resinas epóxi	21
3.1.2	<i>Reforços</i>	23
3.1.2.1	<i>Fibras de vidro</i>	24
3.1.3	<i>Compósitos laminados</i>	26
3.1.4	<i>Fabricação de materiais compósitos</i>	27
3.1.4.1	<i>Modelagem por Transferência de Resina Assistida à Vácuo</i>	28
3.1.5	<i>Ensaio de tração em compósitos poliméricos</i>	30
3.1.6	<i>Técnica de Calorimetria de Varredura Diferencial em compósitos poliméricos</i>	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	Materiais	36
4.2	Métodos	37
4.2.1	<i>Processo de infusão dos compósitos laminados</i>	37
4.2.2	<i>Ensaio de tração</i>	44
4.2.3	<i>Ensaio de DSC</i>	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1	Ensaio de tração	49
5.2	Ensaio de DSC	62
5.3	Considerações sobre os compósitos laminados produzidos	
6	CONCLUSÃO	65
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Um material compósito é material com duas ou mais fases, e suas propriedades são uma combinação das propriedades destas fases. Os primeiros materiais compósitos do mundo são datados de 6000 anos atrás, quando, no Egito, palhas e lama foram unidas para formar tijolos. Na atualidade, o acentuado crescimento das indústrias civil, naval, aeronáutica, aeroespacial e de energias, influenciado principalmente por acontecimentos históricos como as Grandes Guerras Mundiais, Revoluções Industriais e a Guerra Fria, gerou o intenso desenvolvimento de novos materiais compósitos (FAB HEADS, 2023). É válido ressaltar, ainda, que a elaboração e o aperfeiçoamento da fabricação dos materiais compósitos também foram motivados por fatores econômicos; para algumas finalidades, o uso destes materiais pode ser mais favorável, em termos da relação custo-benefício (ZWEBEN, 2015).

A indústria eólica, nos dias de hoje, é uma das principais áreas de aplicação de materiais compósitos. Os componentes das pás de aerogeradores fabricados na indústria eólica, são, geralmente, laminados de resina epóxi reforçados com fibras de carbono ou fibras de vidro. Na Figura 1, é apresentada uma representação dos principais componentes de um aerogerador.

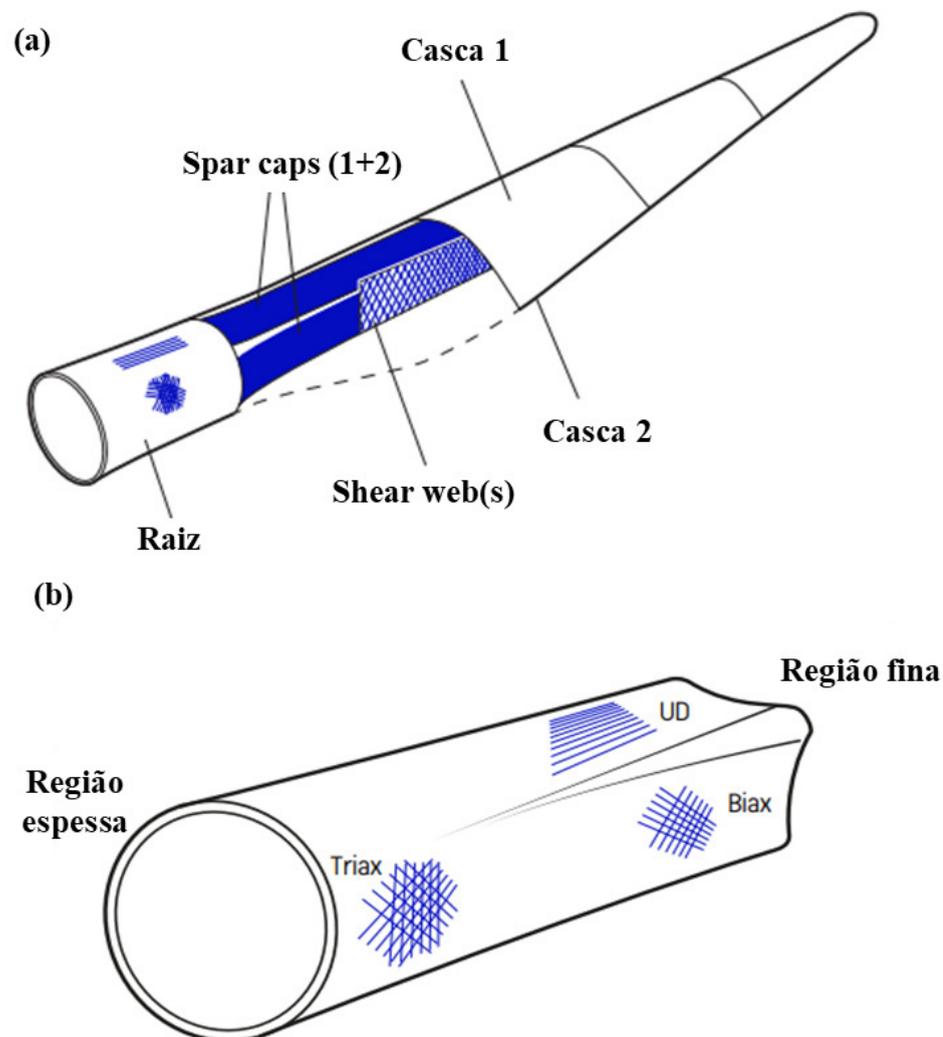
Figura 1 — Representação dos principais componentes de um aerogerador



Fonte: Castro (2009, com adaptações).

As pás eólicas são produzidas em duas linhas de produção: 1) as cascas constituídas de sucção e pressão e 2) os pré-fabricados, tais como as almas, raízes e *spar caps* (CORTIR, 2019). Na Figura 2a, são mostrados os componentes de uma pá eólica e, na Figura 2b, é apresentado o pré-fabricado de raiz, estudado neste trabalho, com destaque nos tipos de tecidos que são utilizados para sua fabricação: unidirecionais (UD), bidirecionais (BIAX) e tridirecionais (TRIAX).

Figura 2 — (a) Representação dos componentes de uma pá eólica e (b) pré-fabricado de raiz



Fonte: Cortir (2019, com adaptações).

Na indústria eólica, muitas vezes é necessário testar as propriedades das matérias-primas utilizadas na fabricação dos compósitos laminados que compõem as pás eólicas. Deste modo, é comum que determinadas empresas (clientes) solicitem às indústrias responsáveis por manufaturar estas pás que realizem a caracterização mecânica e térmica de

compósitos-teste, a fim de determinar a aplicabilidade destes. Isso também pode motivado por fatores econômicos: há verificações de matérias-primas, de modo a estudar a viabilidade de substituições, reduzindo os custos e, obviamente, mantendo a qualidade do componente produzido.

O presente trabalho objetiva analisar as propriedades mecânicas de compósitos laminados bastante aplicados na fabricação de componentes estruturais das pás eólicas de aerogeradores; neste caso, este estudo é focado mais especificamente no pré-fabricado de raiz da pá eólica (região que é fixada no rotor). Para isso, serão produzidas placas de compósitos laminados de matriz de resina epóxi reforçados com fibra de vidro na forma de tecidos unidirecionais (UD) e bidirecionais (BIAX), utilizando o processo de Modelagem por Transferência de Resina Assistida à Vácuo (VARTM). O comportamento mecânico e o modo de falha dos compósitos laminados serão avaliados por meio de ensaios de tração; visa-se determinar o Limite de Resistência à Tração, a Tensão de Ruptura e o Alongamento de Ruptura. Ademais, utilizando o ensaio de Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC), pretende-se determinar a temperatura de transição vítrea (T_g).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho objetiva analisar as propriedades mecânicas de compósitos laminados de matriz de resina epóxi e reforço de fibra de vidro, os quais são bastante aplicados na fabricação de componentes estruturais de aerogeradores.

2.2 Objetivos específicos

- Produzir placas de compósitos laminados de matriz de resina epóxi e reforço de fibra de vidro na forma de tecidos unidirecionais (UD) e bidirecionais (BIAX), utilizando o processo de Modelagem por Transferência de Resina Assistida à Vácuo (VARTM);
- Avaliar a influência da orientação do tecido de fibra de vidro na matriz de resina epóxi no comportamento mecânico e no modo de falha dos compósitos laminados, por meio de ensaios de tração;
- Utilizando os resultados dos ensaios de tração, determinar o Limite de Resistência à Tração, a Tensão de Ruptura e o Alongamento de Ruptura dos corpos de prova produzidos;
- Determinar a temperatura de transição vítrea (T_g) dos compósitos fabricados, por meio do ensaio de Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC).

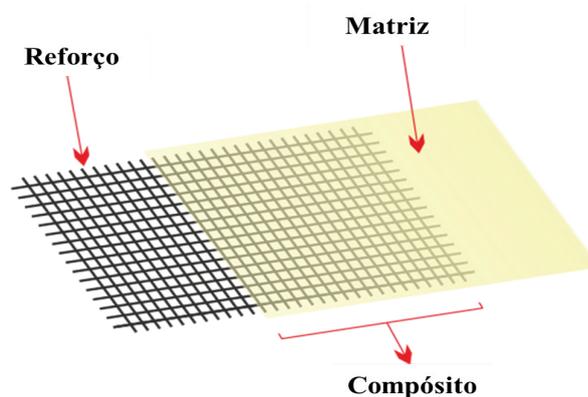
3 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção contém a fundamentação teórica que embasou o presente trabalho e que é necessária para a discussão dos resultados mostrados posteriormente. São apresentados os principais conceitos acerca dos materiais compósitos e suas propriedades, bem como suas aplicações na indústria eólica.

3.1 Materiais compósitos

Callister e Rethwisch (2012) definem material compósito um material multifásico cujas propriedades são significativamente uma combinação das propriedades das fases constituintes. Os compósitos geralmente possuem uma fase contínua, chamada de matriz, e pelo menos uma fase descontínua, chamada de reforço, de morfologia filamentar, particulada ou fibrosa (BERTHELOT, 1999). A Figura 3 mostra uma representação esquemática de um material compósito.

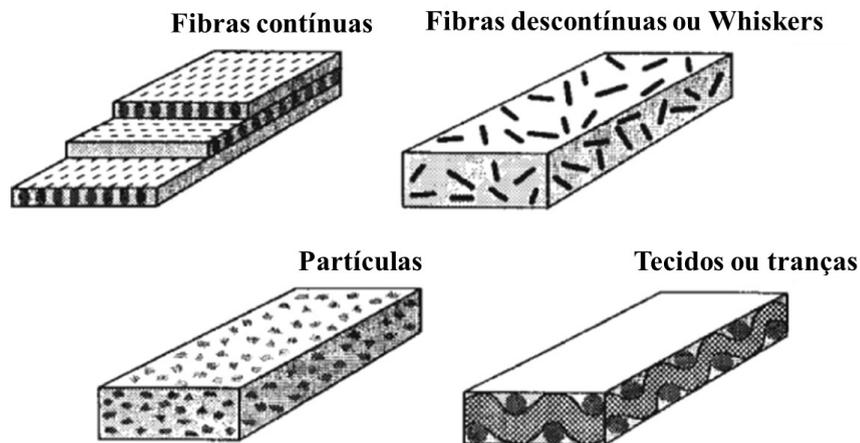
Figura 3 — Representação esquemática de um material compósito



Fonte: OXYBLACK (2023, com adaptações).

Os compósitos são materiais com propriedades mecânicas e físicas diferentes de materiais não-reforçados. Suas propriedades, tais como resistência à tração, à compressão, ao desgaste, à corrosão e à altas temperaturas, podem ser adaptadas para satisfazerem os requisitos operacionais de determinadas aplicações, de acordo com diferentes combinações de matriz, reforço e distribuição do reforço na matriz (ZWEBEN, 2015). A Figura 4 apresenta as diferentes possíveis morfologias de reforço, evidenciando a distribuição na matriz.

Figura 4 — Representação esquemática da disposição de diferentes morfologias de reforço na matriz de um material compósito



Fonte: Zweben (2015, com adaptações).

A fase matriz é responsável por definir a força do compósito, transmitir os esforços para o reforço, proteger o reforço, manter o reforço coeso e estável; por sua vez, o reforço é a fase mais resistente. Além das propriedades da matriz e do reforço, as propriedades finais dos compósitos são determinadas pela geometria das fibras e pela razão volumétrica matriz/reforço (VENTURA, 2009; ALMACO, 2020). A Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos (ALMACO) afirma que, em compósitos estruturais, cerca de 70 a 90% das cargas mecânicas são absorvidas pelo reforço — que garante a resistência a carregamentos mecânicos, ou seja, melhores propriedades de rigidez, resistência à tração, à compressão e ao impacto (ALMACO, 2020).

3.1.1 Matrizes

Conforme mencionado anteriormente, a matriz é a fase contínua de um material compósito, a qual transmite a carga ao reforço; inclusive, é ideal que haja uma boa adesão entre a matriz e o reforço, para que a matriz distribua os esforços mecânicos de modo uniforme (VENTURA, 2009; AKOVALI, 2001). Algumas outras funções desta fase também já foram evidenciadas. Porém, é válido ressaltar que a matriz ainda fornece ao material compósito resistência à abrasão e à corrosão ambiental (AKOVALI, 2001).

A classificação de um material compósito, muitas vezes, é feita considerando o tipo de material da matriz. Assim, as quatro categorias primárias de compósitos são: compósitos de matriz polimérica, compósitos de matriz cerâmica, compósitos de matriz metálica e compósitos de matriz de carbono. Dentre estas categorias, todas, com exceção dos

compósitos com matriz metálica, permitem a utilização de reforços poliméricos, metálicos, cerâmicos e de carbono. Reforços de carbono não são aplicados com matrizes metálicas (ZWEBEN, 2015).

Os compósitos de matriz polimérica, segundo Zweben (2015), são os mais amplamente utilizados — na maior parte dos casos, isso deve-se à capacidade desses materiais de serem processados em baixas temperaturas e baixas pressões, o que pode tornar o processo de fabricação menos dificultoso. Como o material compósito avaliado no presente trabalho é desta categoria, a seguir serão fornecidas algumas informações adicionais.

3.1.1.1 Matrizes poliméricas

As matrizes poliméricas podem ser termoplásticas, termofixas/termoendurecíveis ou elastômeros. A escolha de um destes tipos depende diretamente das especificações requerida pela aplicação do material compósito (HSISSOU *et al.*, 2021).

Denominam-se polímeros termoplásticos aqueles plásticos que, quando sujeitos a um aumento de temperatura e de pressão, possuem a capacidade de amolecer e fluir, e, mediante ao resfriamento e ao alívio da pressão, solidificam-se, formando produtos de geometria bem definida; estas transformações físicas são reversíveis. Os polímeros termofixos ou termoendurecíveis são plásticos que amolecem com o aquecimento, sofrem o processo de cura (que consiste em uma transformação química irreversível) e tornam-se rígidos, infusíveis e insolúveis, de modo que aquecimentos subsequentes não alteram seu estado físico novamente (CANEVAROLO JR., 2006).

Por sua vez, elastômeros são polímeros que, à temperatura ambiente, podem ser deformados repetidas vezes, atingindo comprimentos pelo menos duas vezes maiores que o original e, com a retirada do esforço, retornam ao tamanho original. Essa elevada elasticidade é conferida aos elastômeros pelo processo de vulcanização, que trata-se da adição de enxofre na estrutura química do polímero (CANEVAROLO JR., 2006; CALLISTER, RETHWISCH, 2012).

3.1.1.1.1 Matrizes poliméricas aplicadas na indústria eólica

Para a fabricação de materiais compósitos, as matrizes poliméricas de utilização mais viável são as termoplásticas e as termofixas. Voltado especificamente para a produção de componentes na indústria eólica, enfoque do presente estudo, é preferível a usar polímeros

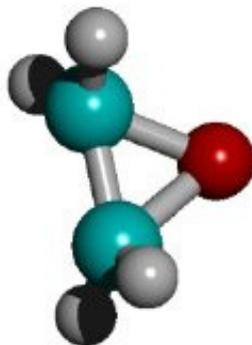
termofixos para compor a fase matriz, uma vez que o processo de cura sofrido por estes polímeros, quando ocorre a reticulação das cadeias fibrosas (formação de ligações cruzadas e aumento de massa molar), permite a obtenção de produtos infusíveis e rígidos (JOHNSON, 2020; d'ALMEIDA, 2005). Assim, garante-se que as peças de compósitos fabricadas conservarão suas propriedades quando postas em operação — isto é, em condições variantes de temperatura e pressão.

A escolha de polímeros termofixos para manufaturar componentes eólicos também pode ser justificada pela baixa viscosidade que estes apresentam, em comparação aos polímeros termoplásticos. Isto porque a baixa viscosidade é essencial para um bom fluxo durante o processo de fabricação do compósito, o qual, nesta indústria, muitas vezes é realizado por infusão. Dessa forma, além de preservar as propriedades do compósito, o uso de polímeros termofixos diminuem as chances de surgimento de defeitos durante a fabricação (JOHNSON, 2020).

3.1.1.1.2 Resinas epóxi

Neste trabalho, foram avaliados laminados de matriz de resina epóxi. Estas resinas são polímeros termofixos com alta resistência, aderência e proteção contra raios ultravioleta, dependendo da composição química. As cadeias poliméricas das resinas epoxi são caracterizadas pela presença de dois anéis de, pelo menos, três membros, os quais são denominados epóxi, epóxido, oxirano ou etano epóxi (d'ALMEIDA 2005). A Figura 5 apresenta a estrutura química de um anel de oxirano, composto por dois átomos de carbono (em verde) e um átomo de oxigênio (em vermelho).

Figura 5 — Anel de oxirano



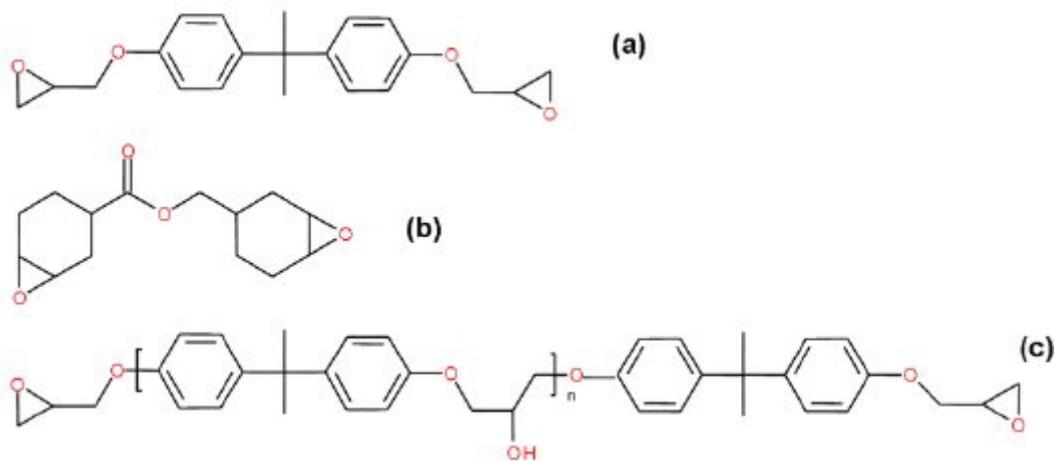
Fonte: González, Cabanelas e Baselga (2012).

Em geral, no processo de fabricação de um compósito com matriz epóxi, são usados agentes de cura, chamados de endurecedores. A adição de agentes endurecedores visa tornar as cadeias das estruturas destas resinas arranjos tridimensionais, que são responsáveis por proporcionar a estes materiais as propriedades de estabilidade, insolubilidade e infusibilidade mencionadas anteriormente (d'ALMEIDA, 2005).

A Figura 6 mostra a estrutura química de algumas resinas epóxi de comum utilização em diversas indústrias.

Figura 6 — Estrutura química de algumas resinas epóxi comuns:

(a) DGEBA; (b) ECC e (c) DGEBA



Fonte: González, Cabanelas e Baselga (2012).

Além da excelente adesão aos reforços, Moura, Morais e Magalhães (2011) destacam que as principais vantagens de utilizar resinas epóxi são a facilidade operacional, uma vez que são polímeros trabalháveis em pressões e temperaturas não tão elevadas, e as baixas contrações sofridas por estes polímeros durante o processo de cura. Entretanto, é necessário levar em consideração que as resinas epóxi absorvem umidade com certa facilidade, o que pode ser um fator muito prejudicial. É preciso, então, haver um forte controle da umidade durante o armazenamento e do processo de fabricação, caso contrário as propriedades físicas dos materiais compósitos produzidos podem ser comprometidas.

A título de comparação, a Tabela 1, apresentada a seguir, informa algumas propriedades físicas e mecânicas da resina epóxi e de diferentes matrizes. Estes dados serão utilizados nos próximos tópicos deste trabalho, para avaliar os valores obtidos nos procedimentos práticos.

Tabela 1 — Propriedades de algumas matrizes poliméricas termofixas e termoplásticas

Matriz	Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Elongação (%)	Condutividade térmica (W/m.K)	Coefficiente de expansão térmica (ppm/K)
Epóxi ¹	1,1 - 1,4	3 - 6	35 - 100	1 - 6	0,1	60
Poliéster ¹	1,2 - 1,5	2 - 4,5	40 - 90	2	0,2	100 - 200
Polipropileno ²	0,90	1 - 4	25 - 38	>300	0,2	110
Polícarbonato ²	1,06 - 1,20	2,2 - 2,4	45 - 70	50 - 100	0,2	70

Legenda: ¹termofixo; ²termoplástico.

Fonte: Zweben (2015, com adaptações).

3.1.2 Reforços

Outra forma de classificar materiais compósitos é analisar o tipo de reforço utilizado. Quanto a isso, Callister e Rethwisch (2012) subdividem os compósitos em três grupos: reforçados com partículas, reforçados com fibras e estruturais. Cada um destes grupos possui subgrupos, de acordo com a morfologia do reforço e sua disposição na matriz. Nos compósitos reforçados com fibra, as fibras podem ser longas (contínuas e alinhadas) e curtas (descontínuas). No caso do uso de fibras curtas, ainda há duas possibilidades de disposição: alinhadas ou orientadas aleatoriamente.

O presente trabalho analisou laminados compósitos reforçados com fibras. As propriedades destes compósitos variam conforme as características das fibras, tais como tipo, diâmetro, fração volumétrica e, como já abordado, distribuição na matriz — quanto a isso, têm-se que, quando as fibras não são dispostas de forma alinhada, o compósito possui propriedades anisotrópicas. De modo geral, o comportamento de compósitos mediante esforços mecânicos também é dependente da direção em que os carregamentos são aplicados (ASKELAND, WRIGHT, 2011; CALLISTER, RETHWISCH, 2012).

Na Tabela 2, são mostradas algumas propriedades dos principais tipos de fibras utilizados na atualidade.

Tabela 2 — Propriedades dos principais tipos de fibra

Tipo de fibra		Densidade (g/cm ³)	Módulo axial (GPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Coefficiente de expansão térmica axial (ppm/K)	Condutividade térmica axial (W/m.K)	Módulo de elasticidade (GPa)	Ponto de fusão (°C)
Vidro	Vidro E (<i>electrical</i>)	2,6	70	2000	5	0,9	72,4	<1725
	Vidro HS (<i>high strength</i>)	2,5	83	4200	4,1	0,9	86,9	<1725
Polímeros	Poliaramida (Kevlar)	1,4	124	3200	-5,2	0,04	124	500
	Polietileno de alta densidade	0,97	172	3000	-	-	0,3-0,7	147
Carbono	UHM (alto módulo de elasticidade)	1,9	590	3800	-1	18	531	3700
	UHS (alta tensão de ruptura)	1,8	290	7000	-1,5	160	276	3700

Fonte: Zweben (2015, com adaptações).

Materiais compósitos com as fibras presentes na Tabela 2 são empregados em várias indústrias. De acordo com a área de estudo do presente trabalho, destacam-se as fibras de vidro e de carbono, as quais são usadas na fabricação de pás eólicas (OLIVEIRA, 2017; COSTA, 2022).

3.1.2.1 Fibras de vidro

As fibras de vidro são uma classe muito versátil de fibras utilizadas extensivamente como reforço para resinas poliméricas, como epóxi e poliéster insaturado. Estas fibras são obtidas a partir da fusão de vidro e do processo de extrusão na filamentação. É possível fabricá-las com várias composições, alterando a quantidade das matérias-primas, que são: areia, rica em sílica; argila, que contém alumina; calcita, que fornece o óxido de cálcio, e a colemanita, que tem óxido de boro. Dessa forma, diferentes tipos de fibras de vidro apresentam diferentes desempenhos mecânicos (CEVAHIR, 2017; CHAWLA, 2016). Visando a fabricação de compósitos, são adicionados às fibras de vidro agentes que conferem aderência à matriz orgânica, como silanos (VILELA, 2017).

Chawla (2016) afirma que a rigidez da fibra de vidro é menor do que a de outras fibras de reforço, porém, utilizar este tipo de reforço é vantajoso pelo fato de combinar boa resistência à tração e ao impacto com baixa densidade. Além disso, possuem baixo custo, em comparação com as fibras de carbono, por exemplo (MANWELL, MCGOWAN, ROGERS, 2009).

As fibras de vidro podem ser classificadas em relação à filamentação como sendo: 1) Vidro E (*Electrical*), compostas de dióxido de silício com alcalinidade menor do que 2% e que possuem baixo custo e baixa resistência; 2) Vidro HS (*High Strength*), compostas por dióxido de silício e óxido de magnésio, com módulos de elasticidades e resistência à tração maiores do que as fibras Vidro E, e 3) Vidro AR (*Alkalis Resistant*), que são resistente à álcalis, portanto, adequadas para aplicação como reforços de concreto (ALMACO, 2020; OLIVEIRA, 2017) Na indústria eólica, são utilizadas fibras de vidro do tipo Vidro HS.

As fibras de vidro podem ser comercializadas de diferentes formas. Para a fabricação de pás eólicas, mais especificamente, são usados tecidos, mantas (fios picotados e unidos quimicamente, normalmente aplicados na laminação manual) e *rovings* (fios contínuos enrolados em bobinas) (ALMACO, 2020).

Os tecidos de fibra de vidro podem ser formados por fios de diferentes gramaturas trançados em diferentes angulações (ALMACO, 2020). Dessa forma, existem os tecidos unidirecionais (UD), cujos fios estão orientados em 0° entre si; os bidirecionais (BIAX), com fios orientados em 45° entre si, e os tridirecionais (TRIAX), com fios na direção 0° ou 90° e fios nas direções $\pm 45^\circ$. As estruturas dos tecidos UD, BIAX e TRIAX são apresentadas na Figura 7.

Figura 7 — Representação dos tipos de tecidos de fibra de vidro

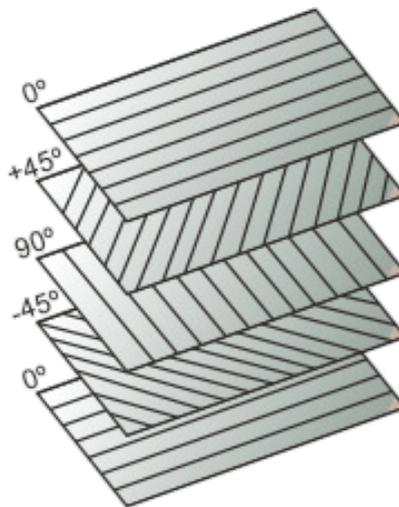


Fonte: Costa (2022).

3.1.3 Compósitos laminados

Os materiais compósitos avançados, geralmente, são fabricados na forma de laminados, nos quais são usadas várias camadas de fibra, muitas vezes com disposição projetada para proporcionar boas propriedades mecânicas mediante esforços em várias direções. Na produção de laminados, cada camada (*layer*) de reforço é posicionada e, então, fortemente pressionada contra a matriz (BARRETO, DUNCAN, 2017). A Figura 8 mostra algumas possíveis orientações para as camadas de reforço.

Figura 8 — Representação de um compósito laminado com camadas de reforço de diferentes orientações

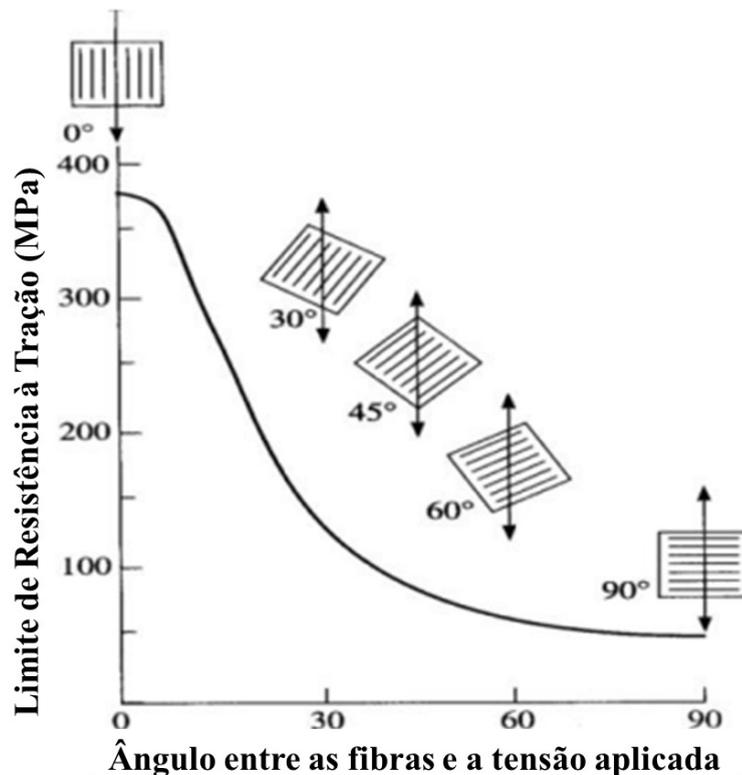


Fonte: OXYBLACK (2023, com adaptações).

As propriedades de um material laminado dependem das propriedades adesivas da matriz sobre as fibras, das fibras utilizadas em cada camada, da geometria e do ângulo de colocação das camadas subsequentes, da razão entre o volume de reforço (fibras) e o volume da matriz (resina), da temperatura de cura e da compressão aplicada durante o processo de cura (OXYBLACK, 2023; BARRETO, DUNCAN, 2017).

A necessidade de se optar por compósitos laminados para a fabricação de determinados componentes pode ser melhor discutida através da análise do gráfico contido na Figura 9, que correlaciona o Limite de Resistência à Tração (LRT) com o ângulo entre as fibras e a tensão aplicada. De acordo com este gráfico, é possível compreender que lâminas unidirecionais (isto é, as lâminas que contém fibras orientadas 0° entre si) possuem alto LRT quando tracionadas no sentido de disposição das fibras, e que o contrário acontece quando a carga é aplicada perpendicular (90°) ao sentido das fibras.

Figura 9 — Limite de Resistência à Tração (LRT) em relação ao ângulo entre as fibras e a tensão aplicada



Fonte: Askeland e Wright (2011, com adaptações).

Portanto, a utilização de compósitos laminados flexibiliza o projeto de componentes (BARRETO, DUNCAN, 2017). Na indústria eólica, as pás de turbinas são compósitos laminados.

3.1.4 Fabricação de materiais compósitos

As tecnologias tradicionais de fabricação de materiais compósitos poliméricos são, principalmente, a moldagem por extrusão, a moldagem por injeção, a moldagem por prensagem à quente, entre outras. O processamento por moldagem é amplamente utilizado na fabricação de componentes. No entanto, existe certa dificuldade na modelagem de peças complexas (WU *et al.*, 2023).

Segundo define Marinucci (2011), os processos de fabricação de compósitos poliméricos reforçados com fibras podem ocorrer de duas formas: com um sistema de pré-impregnação das fibras, denominado de *dry system*, e com um sistema de impregnação das fibras apenas durante a produção, chamado de *wet system*. No *dry system*, a fibra é previamente impregnada com a matriz (resina). As vantagens deste modo de fabricação é o

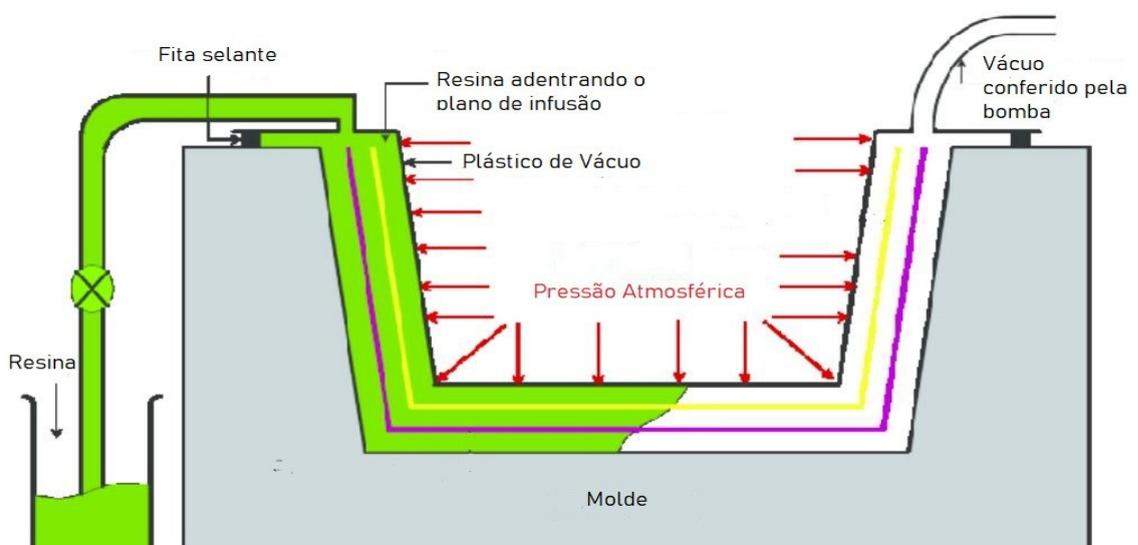
controle do conteúdo de materiais voláteis, das frações volumétricas de matriz e reforço (gerando laminados uniformes) e do tempo de gelatinização. Por outro lado, no *wet system*, as fibras e matriz são combinadas apenas no momento da fabricação do componente. Este modo implica baixos custos operacionais, porém, exige técnicas para garantir a molhabilidade e a adesão das fibras.

Marinucci (2011) também classifica as formas fabricação de materiais compósitos de acordo com os moldes utilizados, existindo, assim, os processos com molde aberto e os processos com moldes fechados. A escolha de um destes processos está relacionada às especificações exigidas pela peça a ser manufaturada, principalmente às dimensões e ao acabamento superficial. A laminação por contato ou manual (*hand lay-up*), a laminação por projeção (*spray-up*) e a infusão são exemplos de processos com molde aberto (REIS, 2016). Dentre estes, o uso processo de infusão à vácuo é imensamente difundido na indústria eólica.

3.1.4.1 Modelagem por Transferência de Resina Assistida à Vácuo

De modo geral, na infusão, a resina entra em contato com o laminado (reforço) através de canais de entrada e escoar até os canais de saída. Um dos principais processos de infusão é a Modelagem por Transferência de Resina Assistida à Vácuo (VARTM, do inglês *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*), o qual permite a produção de componentes de grande porte com menores os custos associados à fabricação de moldes, pois, como é apresentado na Figura 10, a parte superior do molde é uma bolsa de vácuo (REIS, 2016).

Figura 10 — Representação esquemática do processo VARTM



Fonte: Marinho (2021).

Ainda que não haja a presença de um molde superior, conforme ilustra a Figura 8, o VARTM é considerado um processo com molde fechado. E, antes de explicá-lo com mais detalhes, é preciso compreender, ainda que superficialmente, as etapas que o antecedem e o sucedem durante a fabricação de componentes usados na indústria eólica.

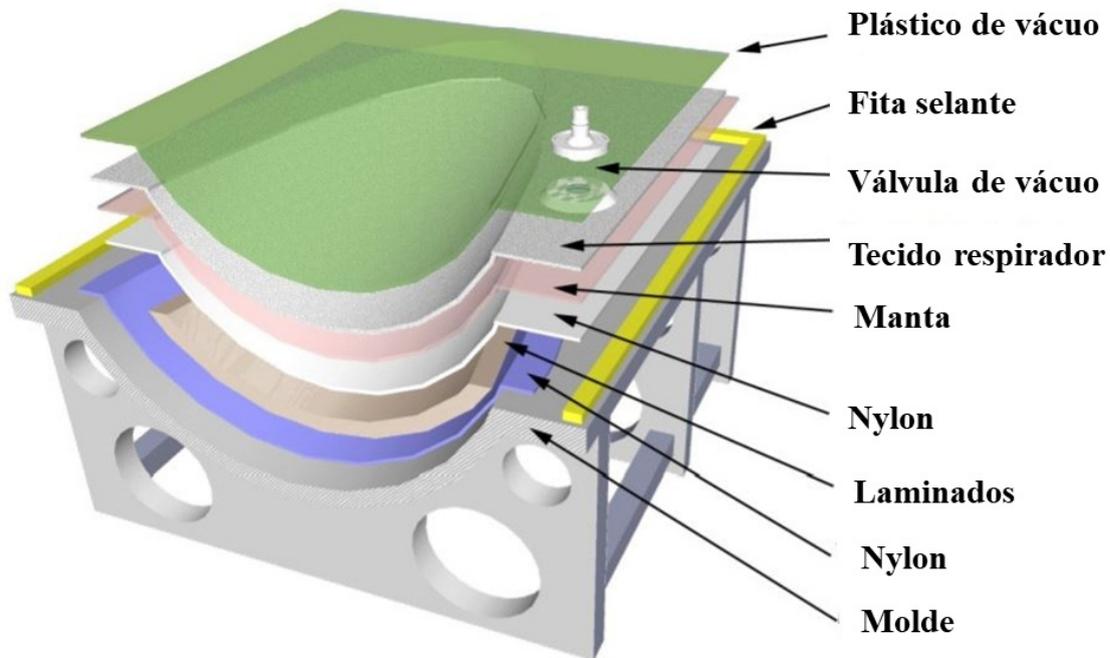
Marinho (2021) elencou os macro-processos de manufatura de pás eólicas, em específico, os quais são:

- 1) Corte de tecidos de fibra de vidro e separação dos demais materiais a serem utilizados no processo de infusão;
- 2) Posicionamento de camadas sobre o molde (*lay-up*);
- 3) Montagem do plano de infusão, que consiste em: camada de nylon, manta, tecido respirador, plástico de vácuo e selante;
- 4) Infusão;
- 5) Cura;
- 6) Desmoldagem dos componentes menores;
- 7) Colagem e fechamento, no caso de componentes que precisem ser acoplados à pré-fabricados;
- 8) Rebarbação;
- 9) Cortes, furações, montagem e reparos, caso requeridos;
- 10) Acabamento: geralmente, trata-se do lixamento do componente e de sua proteção com algum recobrimento para conferir melhores propriedades (como tinta contra raios solares, por exemplo);
- 11) Balanceamento;
- 12) Embalagem.

Portanto, a preparação para o processo de infusão consiste, basicamente, na separação e posicionamento de matérias-primas. Após a alocação das camadas de tecidos de fibras de vidro no molde, é feita a montagem do plano de infusão, de acordo com a ordem apresentada na Figura 11. Neste, a camada de nylon tem a função de conferir rugosidade à matriz que será infundida, “imprimindo” ranhuras na superfície da pá e possibilitando, posteriormente, que outros componentes possam ser afixados com boa aderência. A manta é um plástico anti-aderente utilizado para conter a resina durante a infusão e a cura; também permite a remoção de gases voláteis. E, uma vez que requer-se vácuo, o tecido respirador permitem o bom escoamento do ar. Por fim, o plástico de vácuo, o qual funciona como a parte

superior do molde, é posicionado em cima das demais camadas e, então, selado com selantes (MARINHO, 2021; SONG, 2003).

Figura 11 — Representação esquemática do plano de infusão



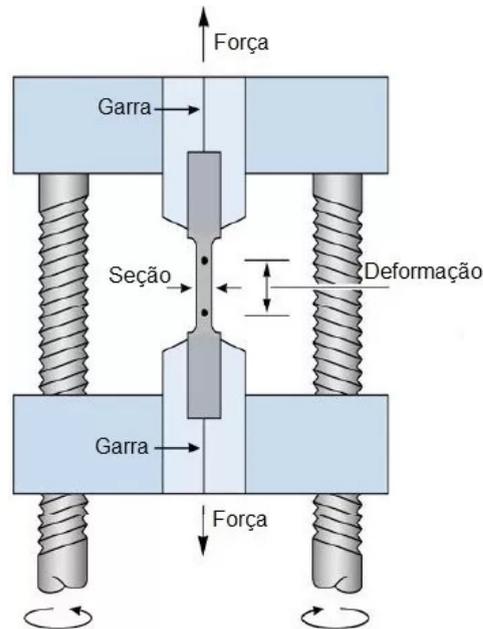
Fonte: Marinho (2021, com adaptações).

Em sequência à montagem do plano de infusão, o processo de infusão propriamente dito é iniciado: primeiro, é retirado todo o ar do sistema, aplicando o vácuo através de bombas, depois a resina, em função da variação de pressão, é impulsinada no canal de entrada, conforme representa a Figura 8, mostrada anteriormente. Desse modo, a resina molha completamente os tecidos. Finalizada a infusão, o material compósito laminado polimérico com matriz termofixa sofre o processo de cura (MARINHO, 2021; SONG, 2003).

3.1.5 Ensaio de tração em compósitos poliméricos

As propriedades mecânicas mais utilizadas na classificação dos materiais compósitos são a tensão de ruptura, a deformação de ruptura, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson (que mede a deformação transversal em relação à direção longitudinal de aplicação da carga). A verificação de todas estas propriedades pode ser feita por meio de ensaio de tração, o qual consiste na aplicação de um esforço de tração ao longo de um corpo de prova (CP), conforme ilustra a Figura 12 (GALLI, 2016; CALLISTER, RETHWISCH, 2012).

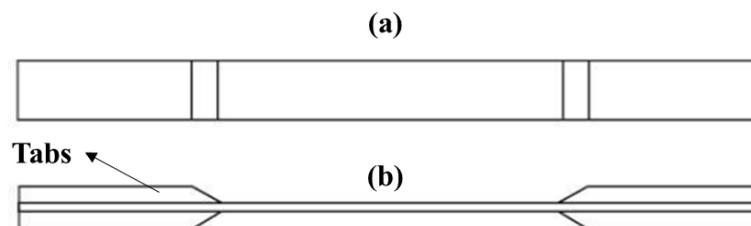
Figura 12 — Representação esquemática do ensaio de tração



Fonte: BIOPDI (2023).

A norma ASTM D3039 é responsável por padronizar a metodologia de ensaio de tração em materiais compósitos poliméricos o máximo possível. Segundo esta norma, a geometria do corpo deve corresponder à seção reta apresentada na Figura 13; caso fossem utilizados corpos de prova do tipo “gravata”, mostrados anteriormente na Figura 12 e comuns para materiais metálicos, a fratura poderia ocorrer precocemente. Nas extremidades do corpo de prova, a norma ainda evidencia que sejam colados *tabs*, para que haja uma mais uniforme distribuição das cargas no material durante o ensaio.

Figura 13 — Corpo de prova de compósito polimérico para ensaio de tração conforme norma ASTM D3039: (a) vista superior e (b) vista lateral



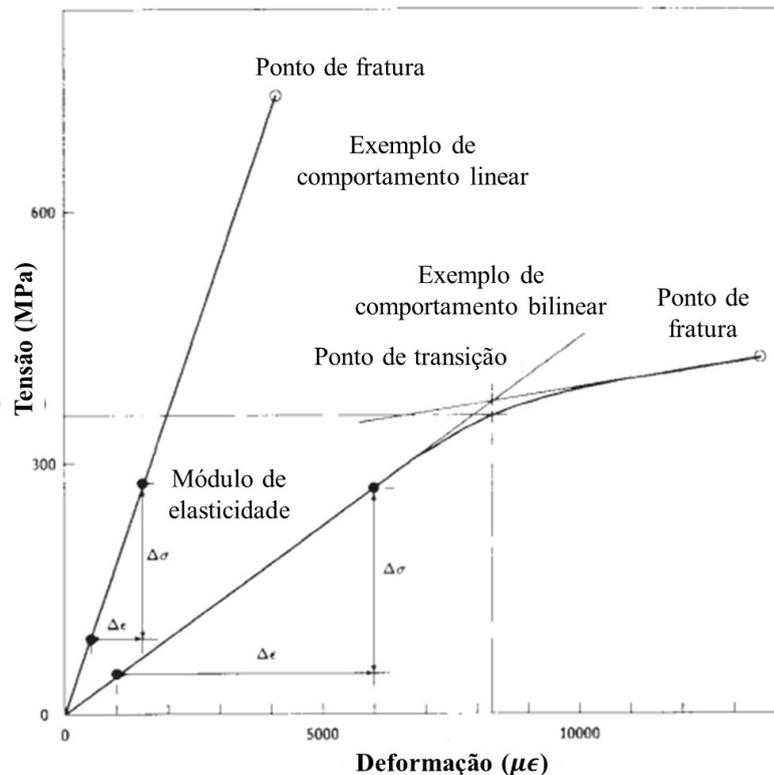
Fonte: Carlsson, Adams e Pipes (2003, com adaptações).

Os *tabs* também são materiais compósitos poliméricos, normalmente reforçados com fibra de vidro, e são essenciais porque as garras do maquinário do ensaio de tração, se em

contato direto com o material compósito polimérico a ser ensaiado, podem alterar seu modo de falha, devido à aderência e à criação de pontos de tensão na região do corpo de prova dentro da garra. Ou seja, os *tabs* sofrem a deformação aplicada pelas garras, de modo que não há concentração de tensão no material a ser ensaiado naquela região, tornando-o intacto até o início da aplicação do esforço de tração (GALLI, 2016). Infelizmente, a fabricação de *tabs* para a realização de ensaios de tração pode requerer um ferramental e um planejamento dimensional mais sofisticado. No presente trabalho, devido à restrições de material e de equipamentos, não foi possível anexar os *tabs* nas extremidades dos corpos de prova. Os efeitos desse fato serão devidamente comentados na discussão dos resultados.

Os resultados de ensaios de tração são expressos em curvas tensão-deformação. O comportamento mecânico da grande maioria dos materiais compósitos é linear elástico, o que implica curvas tensão-deformação na forma de uma reta. Porém, para alguns materiais compósitos, é possível que a curva tensão-deformação sofra mudanças consideráveis em sua inclinação, o que caracteriza um comportamento denominado bilinear (GALLI, 2016). A seguir, a Figura 14 mostra estes exemplos de curvas tensão-deformação.

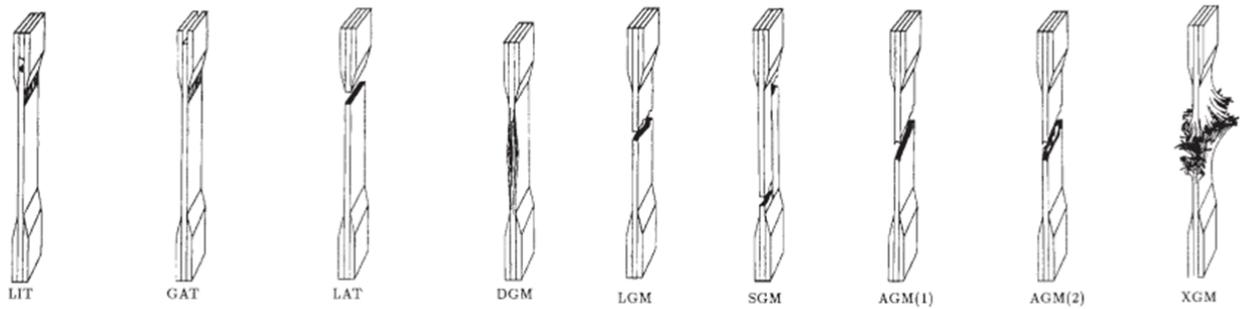
Figura 14 — Exemplos de curvas tensão-deformação para materiais de comportamento linear e bilinear



Fonte: ASTM D3039 (2000, com adaptações).

A norma ASTM D3039 descreve os modos de falha dos materiais compósitos poliméricos e alguns destes são mostrados na Figura 15. Os respectivos códigos de descrição de falhas estão contidos na Tabela 3.

Figura 15 — Modos de falhas de materiais compósitos poliméricos segundo a norma ASTM D3039



Fonte: ASTM D3039 (2000).

Tabela 3 — Códigos referentes aos modos de falha de um material compósito polimérico segundo a norma ASTM D3039

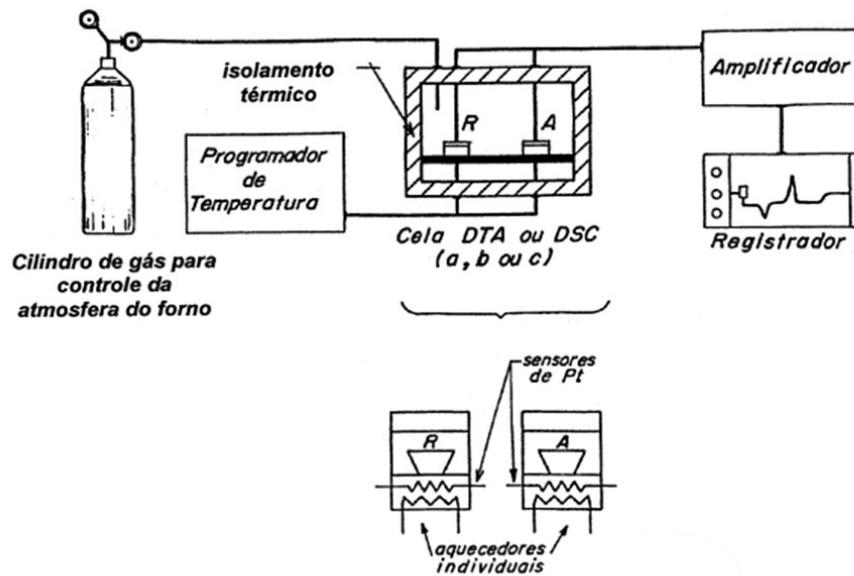
Primeiro caractere		Segundo caractere		Terceiro caractere	
Modo de falha	Código	Área da falha	Código	Localização da falha	Código
Angulado	A	Dentro da região em contato com a garra	I	Região inferior	B
		No limite entre a região em contato com a garra e o comprimento útil	A	Região superior	T
Delaminação na borda	D	<1W da região de contato com a garra	W	Esquerda	L
<i>Gripping</i>	G	Comprimento útil	G	Direita	R
Lateral	L	Múltiplas áreas	M	Central	M
Multi-modo	M (xyz)	Variada	V	Variada	V
Espalhamento longitudinal	S	Desconhecida	D	Desconhecida	U
Explosivo	X				
Outro	O				

Fonte: ASTM D3039 (2000, com adaptações).

3.1.6 Técnica de Calorimetria de Varredura Diferencial em compósitos poliméricos

A Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC, do inglês *Differential Scanning Calorimetry*) é uma técnica de análise térmica na qual o fluxo de calor aplicado em uma amostra é medido em função da temperatura ou do tempo (BERNAL, 2002). Uma representação esquemática de um equipamento para análise DSC é apresentada na Figura 16.

Figura 16 — Esquema de um equipamento genérico para análise de DSC com compensação de potência

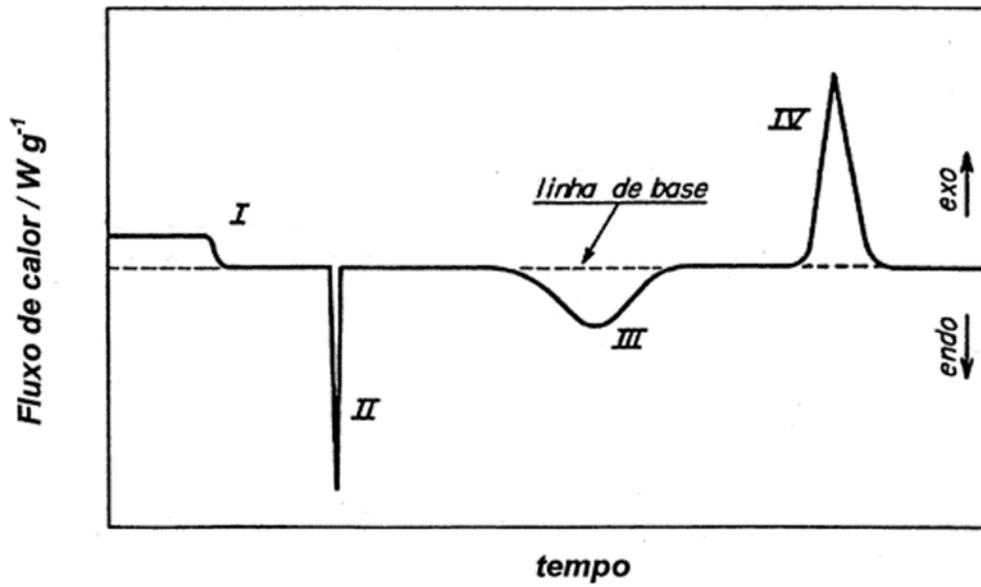


Fonte: Bernal *et al.* (2002, com adaptações).

Uma das principais propriedades dos materiais plásticos medida pela técnica DSC é a temperatura de transição vítrea (T_g). A temperatura de transição vítrea e a temperatura de fusão (T_f) são duas características muito importantes para projetar as condições operacionais de materiais compósitos de matriz polimérica. A T_g é uma das propriedades mais importantes dos materiais amorfos e semicristalinos, e é definida como a temperatura em que o material passa de um estado vítreo (amorfo) para um estado maleável (deformável ou emborrachado), sem que haja alterações microestruturais (CALLISTER, RETHWISCH, 2012)

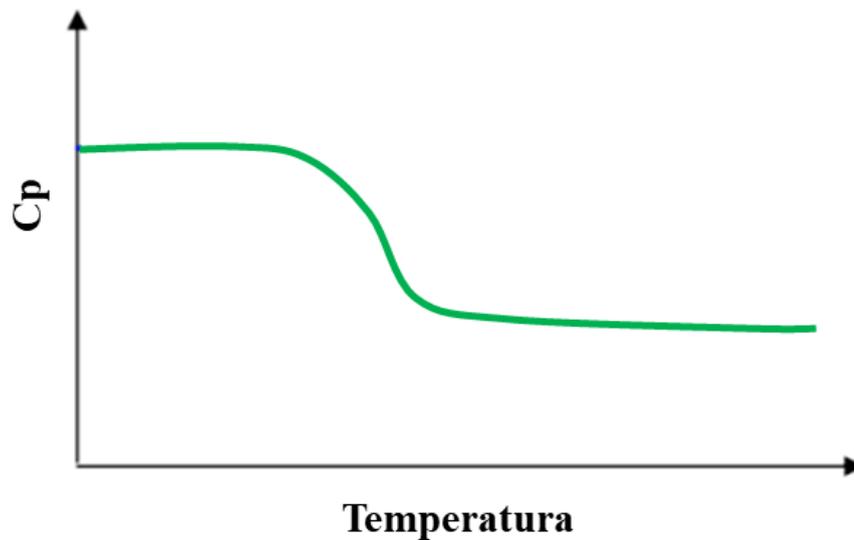
Nos dados resultantes do ensaio DSC, a temperatura de transição vítrea é aquela verificada quando ocorre uma mudança de calor específico à pressão constante (C_p), representada graficamente pela mudança da linha de base. As Figuras 17 e 18 mostram curvas genéricas para experimentos DSC com mudança de linha de base.

Figura 17 — Curva genérica para um experimento DSC: (I) mudança de linha de base sem pico; (II) e (III) picos endotérmicos e (IV) pico exotérmico



Fonte: Bernal *et al.* (2002).

Figura 18 — Curva genérica para um experimento DSC com alteração da linha de base



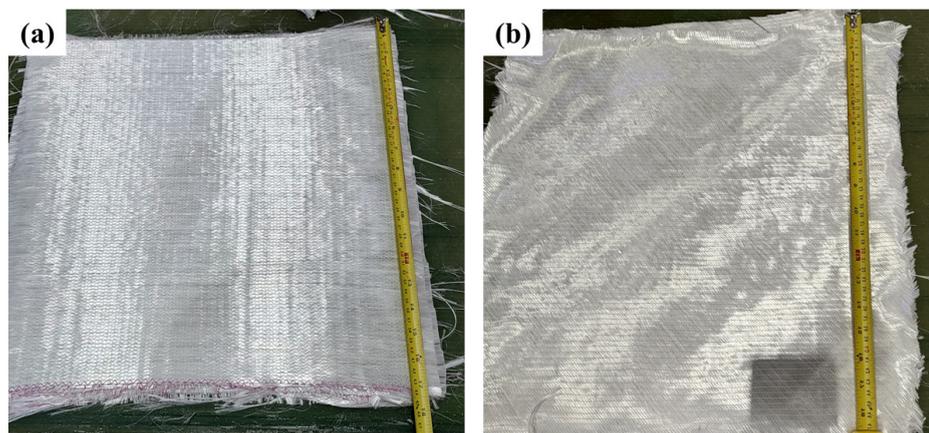
Fonte: elaborada pelo autor.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Foram produzidas 3 (três) placas de compósitos laminados reforçados com tecidos de fibra de vidro e matriz de resina epóxi. As placas, de seção quadrada com 450 mm de lado, foram fabricadas nas seguintes configurações: duas com tecidos unidirecionais (UD), denominadas de UD 1 e UD 2, e uma com tecido bidirecional (BIAX), denominada BIAX. Os tecidos utilizados são mostrados na Figura 19. As dimensões das placas foram definidas tendo como base a quantidade de corpos de prova necessárias para realização dos ensaios de tração e do ensaio de DSC.

Figura 19 — Tecidos de fibra de vidro utilizados como reforços dos compósitos laminados: (a) UD e (b) BIAX



Fonte: elaborada pelo autor.

Os tecidos possuíam gramatura de 800 g/m². Além disso, o nome comercial da resina epóxi utilizada é “EPOXI RESIN MGS RIMR 035C USA”, e o seu endurecedor é chamado de “ENDUR EPOXY RESIN MGS RIMH 037”. Algumas propriedades da resina epóxi especificadas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 — Propriedades da resina epóxi utilizada para fabricação das placas, segundo fabricante

Densidade (g/cm ³)	Resistência à Flexão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Tração (MPa)	Alongamento na Fratura (%)
~ 1,15	~ 115	~ 3,1	~ 70	7 - 10

Fonte: elaborada pelo autor.

Acerca das placas produzidas, é importante ressaltar que, inicialmente, planejava-se que as duas placas UD não possuísem nenhuma distinção, ou seja, fossem fabricadas mediante as mesmas condições. Apesar disso, houve questões operacionais durante o processo de infusão que geraram diferenças nestas placas; isto será explicado com detalhes nos próximos tópicos.

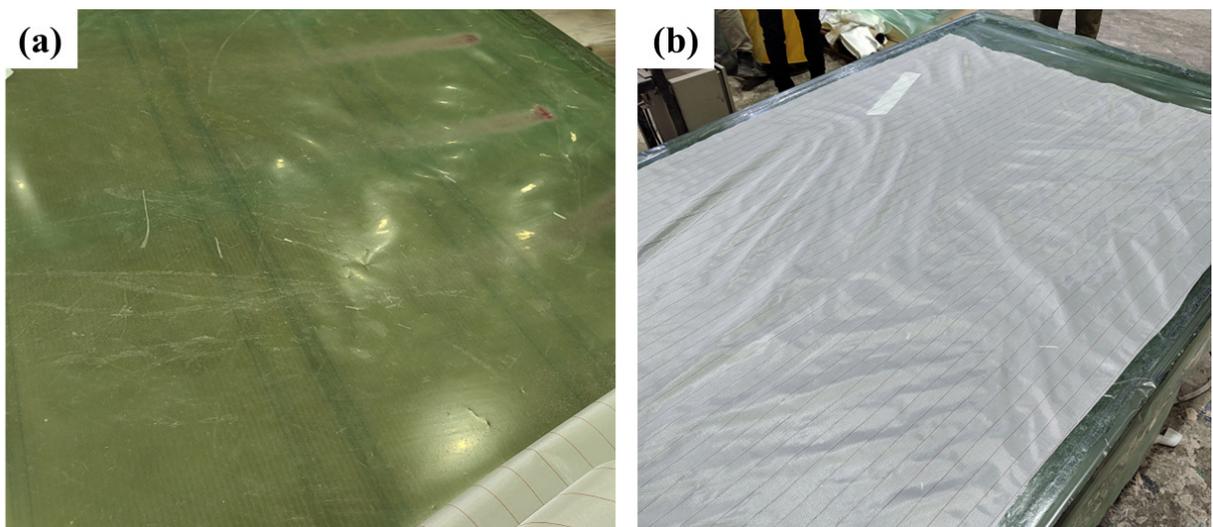
4.2 Métodos

4.2.1 Processo de infusão dos compósitos laminados

O processo de infusão foi realizado em uma indústria de produção de pás eólicas, a qual não pode ser especificada devido a sigilos empresariais.

Inicialmente, limpou-se a mesa (que funciona como molde inferior) onde seria feita a montagem do plano de infusão, para remoção de resquícios de pó e de contaminantes. Depois, posicionou-se o plástico de vácuo, visando facilitar o processo de desmolde. Acima deste, foi depositada uma fina camada de fixador para acomodação da camada de nylon — a qual é necessária para proteção da face interior do compósito a ser produzido. Na Figura 20a, é possível observar o plástico de vácuo com a camada de fixador, e, na Figura 20b, mostra-se a camada de nylon.

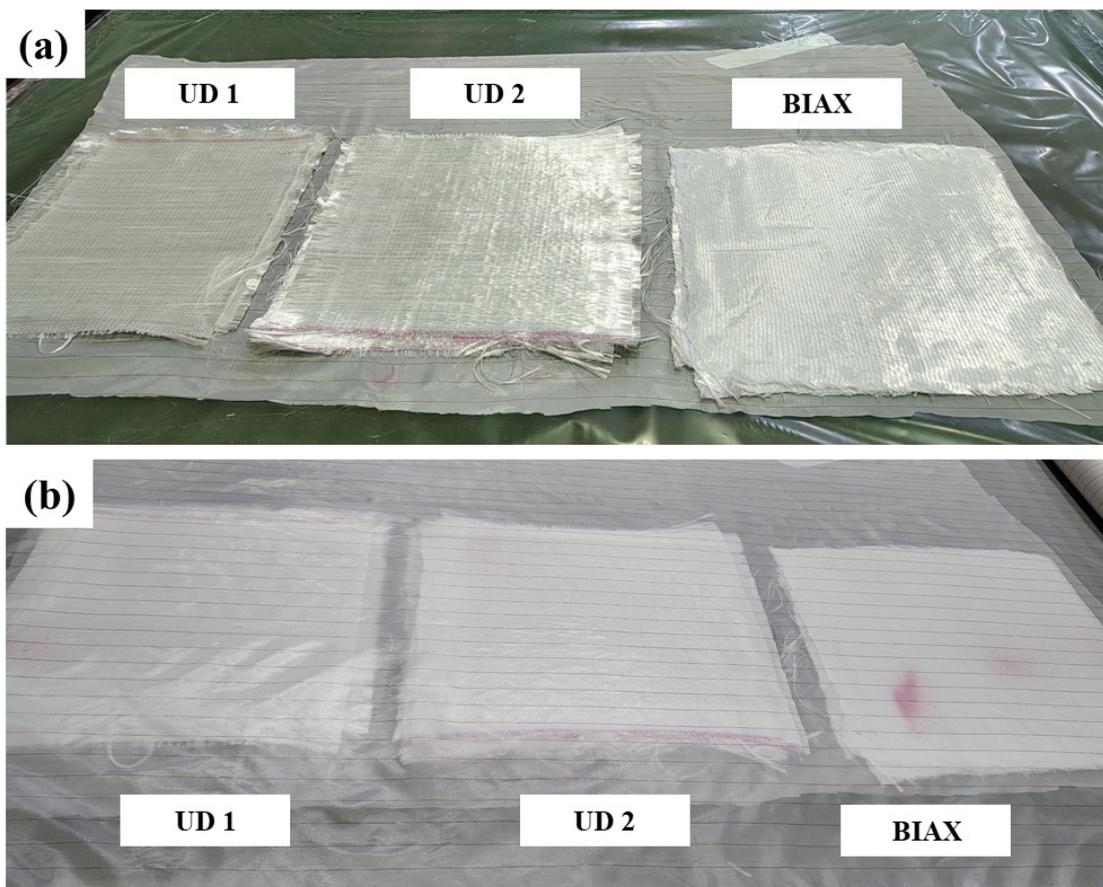
Figura 20 — (a) Plástico de vácuo com fina camada de fixador depositada e (b) camada de nylon



Fonte: elaborada pelo autor.

Em seguida, foi realizado o posicionamento das camadas de tecido de forma manual (*hand lay-up*). Foram confeccionadas, como mencionado anteriormente, duas placas compósitas com tecido unidirecional e uma placa com tecido bidirecional. Assim, foram feitas três pilhas, lado a lado, cada qual com 6 (seis) camadas de tecido; os tecidos haviam sido cortados previamente nas dimensões adequadas. Acima das camadas de tecido, foi colocada outra camada de nylon, desta vez para proteção da face superior do laminado. As pilhas formadas após o *hand lay-up* são apresentadas na Figura 21.

Figura 21 — (a) Camada inferior de nylon e camadas de tecido e (b) camadas de tecidos sobrepostas pela camada superior de nylon

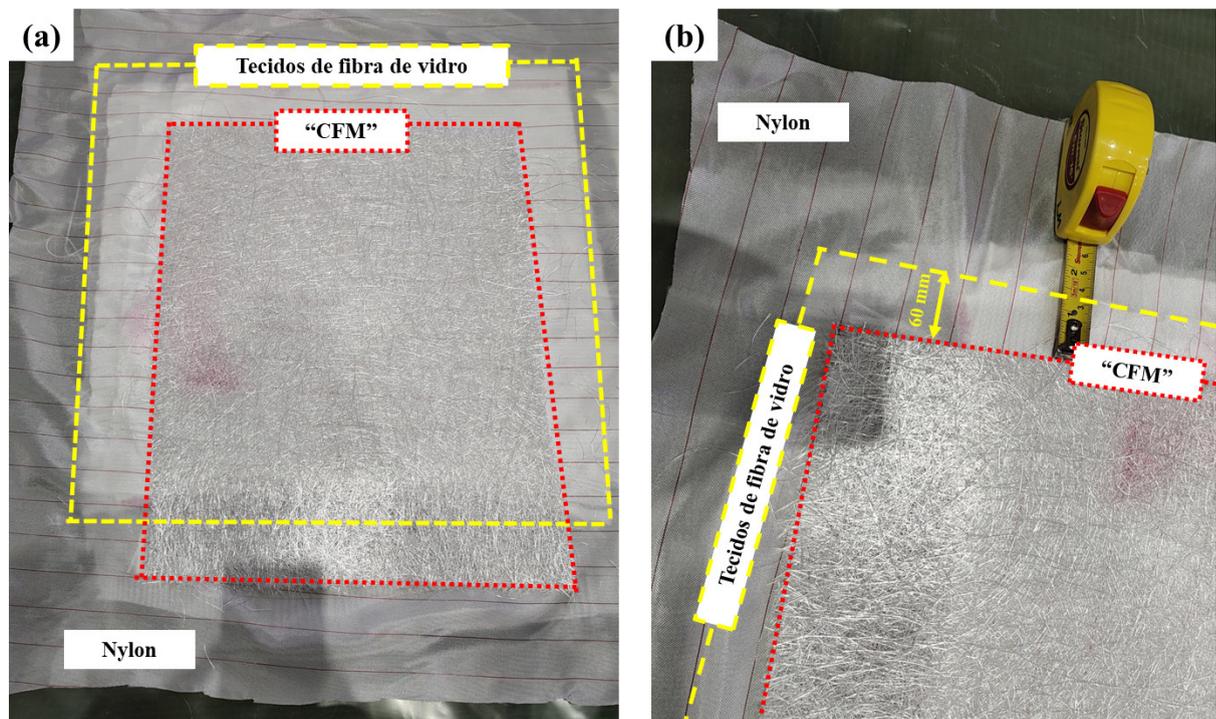


Fonte: elaborada pelo autor.

Na sequência, foi feita a acomodação de uma manta que auxilia o processo de infusão, comumente chamada de CFM na indústria eólica (na verdade, a sigla CFM refere-se a *Cubic Feet Per Minute*, que é uma medida do volume de fluxo de ar determinada por quantos pés cúbicos de ar passam por um ponto estacionário em um minuto; quanto maior a circulação de ar, maior será o CFM). Esta manta garante um bom fluxo durante o processo de infusão, garantindo o espalhamento da resina. Neste trabalho, a camada de CFM foi

mensurada de modo a ser 60 mm menor nas extremidades superiores e laterais do que as camadas de tecido de fibra de vidro, o que é mostrado na Figura 22.

Figura 22 — (a) Comparativo dimensional de um tecido de fibra de vidro e da manta “CFM” e (b) medida da diferença de tamanho nas extremidades

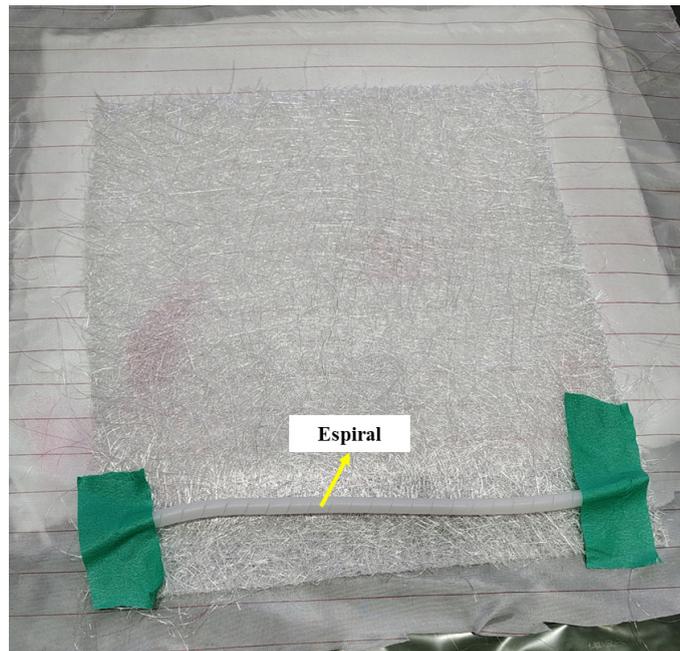


Fonte: elaborada pelo autor.

Outro componente utilizado para garantir um bom fluxo de resina no processo de infusão é a espiral. Fixada na parte inferior, como apresenta a Figura 23, a espiral garante uma melhor distribuição da resina na infusão, evitando que o fluxo seja turbulento e permitindo uma distribuição uniforme ao longo do comprimento do compósito laminado.

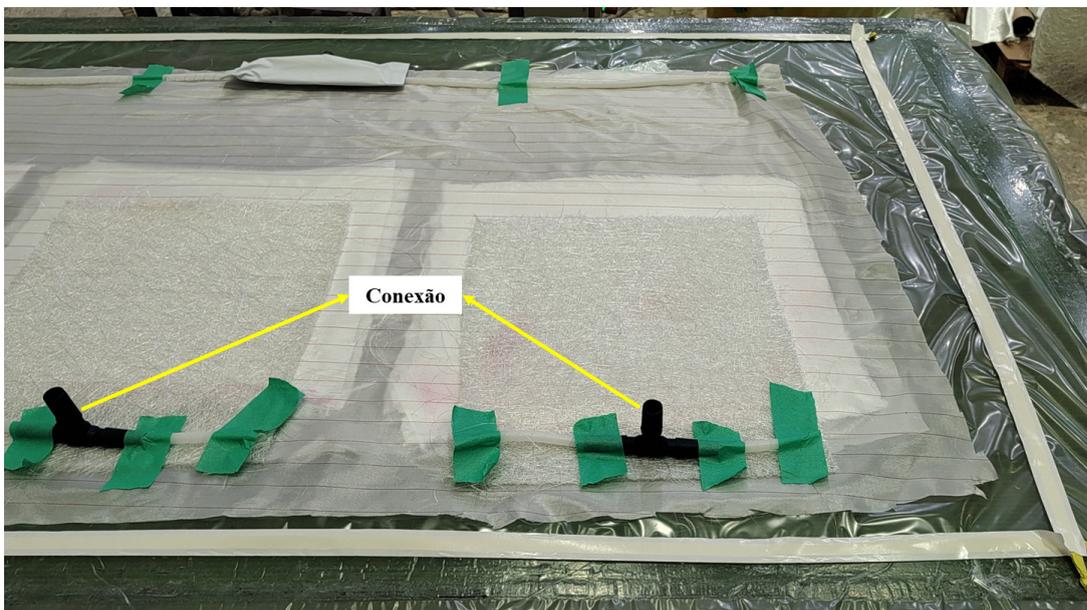
Após o posicionamento da espiral, foi colocado um adesivo térmico, denominado bambam, em torno do laminado, para que fosse possível promover o vácuo. Foram acopladas conexões às espirais, conforme evidencia a Figura 24, visando permitir a conexão com mangueiras de alimento de resina.

Figura 23 — Espiral fixada na parte inferior



Fonte: elaborada pelo autor.

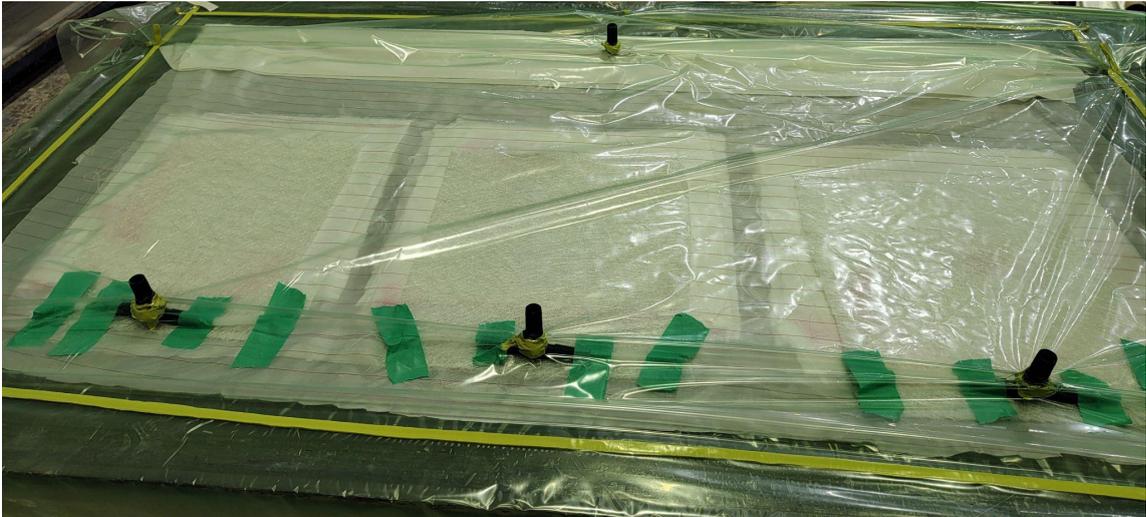
Figura 24 — Conexões onde foram acopladas as mangueiras



Fonte: elaborada pelo autor.

Por fim, realizou-se a inclusão do plástico de vácuo (que funciona como parte superior do molde) acima de todo o plano de infusão, conforme a Figura 25. Para permitir o fluxo de resina, foram feitos pequenos furos nos locais de encontro das conexões, as quais foram transpassadas pelo plástico. Para possibilitar o processo de infusão via tacho, foram acopladas mangueiras e válvulas nas conexões. O bambam, adesivo térmico, também foi colocado em volta das mangueiras, buscando evitar possíveis vazamentos ou perda de vácuo.

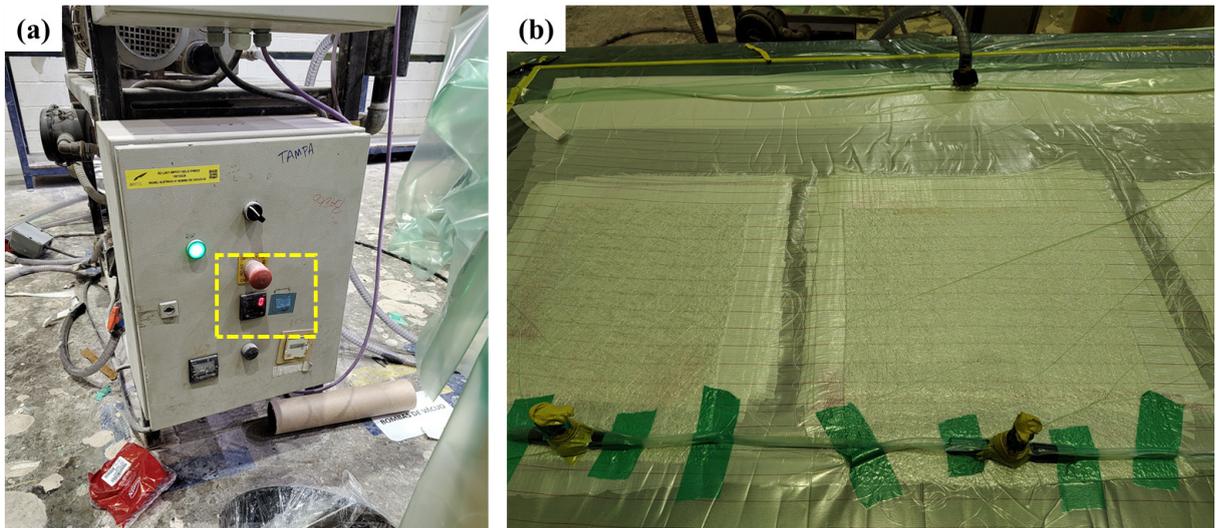
Figura 25 — Plástico de vácuo acima do plano de infusão



Fonte: elaborada pelo autor.

Antes de iniciar o processo de infusão, foi realizado um teste de vácuo, ligando a bomba de vácuo rotativa WEG, modelo RA 100, a qual foi acoplada na conexão destinada à sucção do vácuo. O teste foi bem sucedido, como evidencia a Figura 26a, onde o marcador no painel da bomba de vácuo mostra o valor 0, indicando que o vácuo foi alcançado.

Figura 26 — Teste de vácuo: (a) marcador da bomba de vácuo e (b) sistema em vácuo



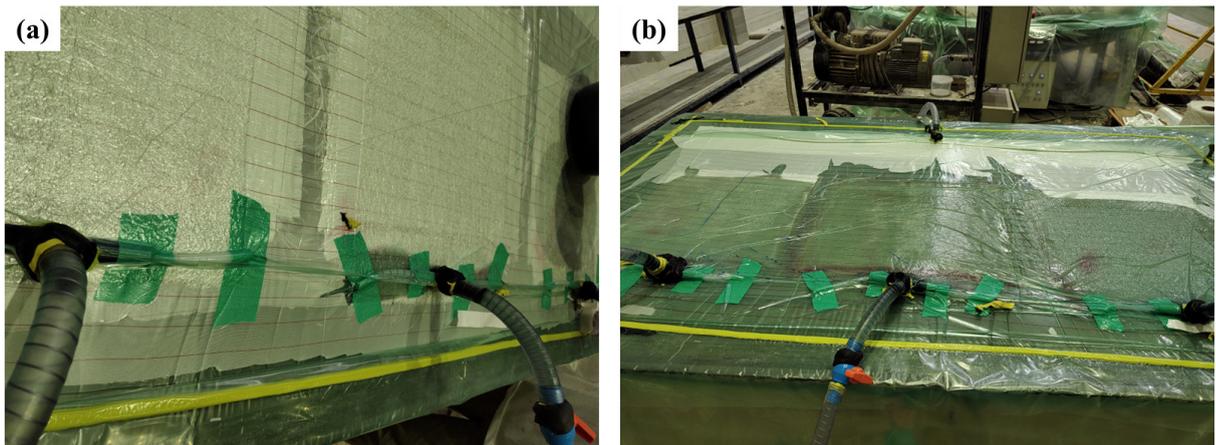
Fonte: elaborada pelo autor.

Uma vez que o teste de vácuo foi validado, o selamento de todas as conexões foi reforçado e a resina epóxi (fase matriz) foi preparada. A resina epóxi, de denominação comercial especificada anteriormente, foi misturada ao seu catalisador (endurecedor) e alocada dentro dos tachos. As mangueiras acopladas aos pontos de entrada de resina foram

mergulhadas nos tachos. Depois, as válvulas foram abertas para que a resina fluísse através das mangueiras.

Primeiro, foi feita a infusão da peça central, de tecido UD (chamada de UD 2, neste trabalho). Conforme as Figuras 27a e Figura 27b, durante o processo é possível visualizar o processo de espalhamento da resina ao longo do comprimento da peça no sentido da entrada acoplada à bomba de vacuo. A infusão da segunda placa de UD (placa da esquerda nas Figuras apresentada, chamada de UD 1), inicialmente, decorreu sem problemas. No entanto, durante o processo, foi detectado um pequeno ponto de vazamento, o qual foi caracterizado pela excessiva quantidade de bolhas presentes na distribuição da resina. A partir daí, concluiu-se que, possivelmente, este laminado apresentaria defeitos de bolhas.

Figura 27 — (a) Início do processo de infusão e (b) continuação do processo de infusão



Fonte: elaborada pelo autor.

A terceira infusão ocorreu na placa reforçada com o tecido BIAx; a infusão desta peça se deu de modo uniforme, não sendo identificados problemas que afetassem a qualidade do laminado. Na Figura 28, visualiza-se a distribuição da resina em toda a peça central, de modo a destacar as características visuais dos últimos momentos da infusão.

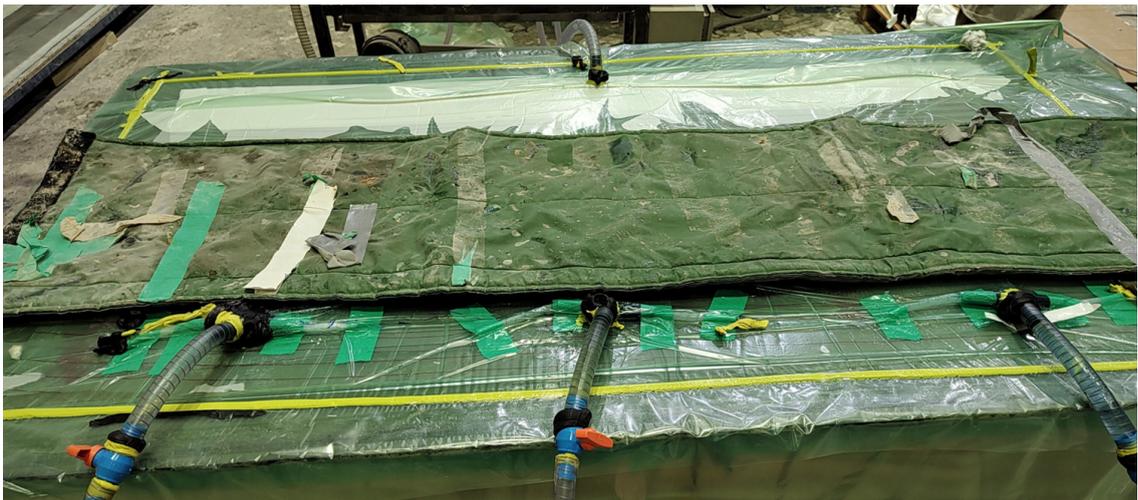
Figura 28 — Término do processo de infusão



Fonte: elaborada pelo autor.

Após processo de infusão, as peças em produção foram cobertas com uma manta térmica para acelerar o processo de cura, o que é mostrado na Figura 29. O tempo de cura foi de 4 (quatro) horas.

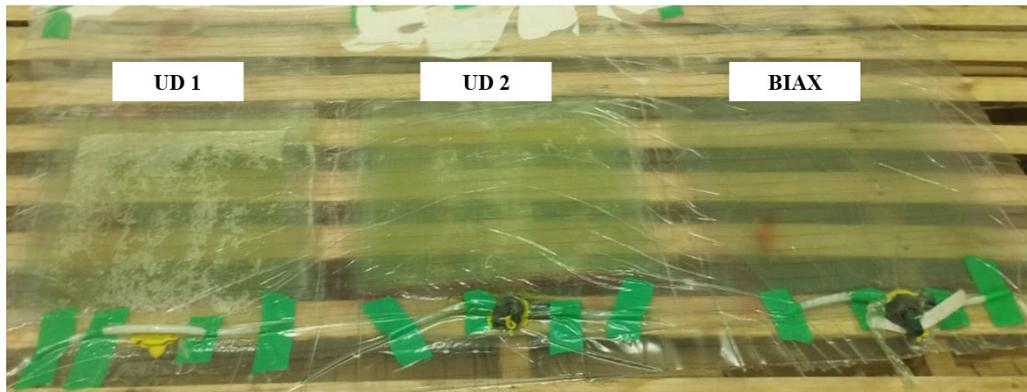
Figura 29 — Manta térmica sobre as placas laminadas em produção



Fonte: elaborada pelo autor.

Finalizado o processo de cura, todos os equipamentos utilizados foram retirados e os compósitos laminados foram desmoldados. As placas desmoldadas são apresentadas na Figura 30.

Figura 30 — Placas desmoldadas antes da rebarbação

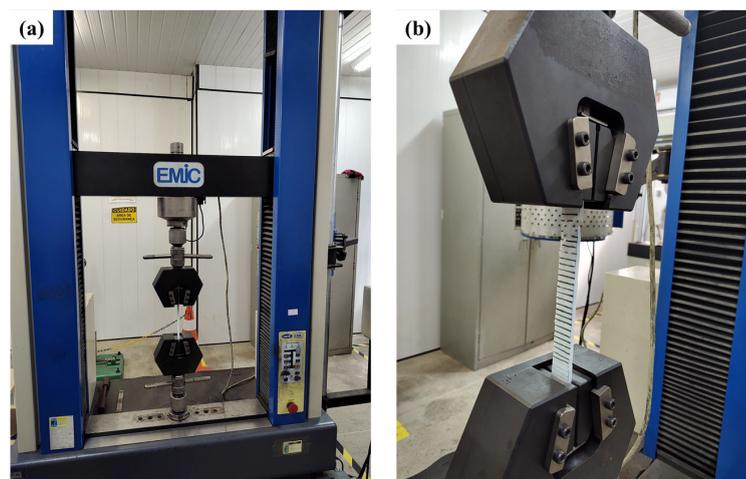


Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.2 Ensaios de tração

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), utilizando o equipamento EMIC, mostrado na Figura 31. Antes dos ensaios, foi verificado se a célula de carga da máquina operava na faixa de cargas necessária para fraturar o tipo de material analisado neste trabalho, a partir de uma análise na literatura, mais especificamente no trabalho de Pinheiro (2022), do LRT de compósitos laminados semelhantes a estes.

Figura 31 — (a) Máquina de ensaio de tração do LEM/DEMM/UFC e (b) célula de carga



Fonte: elaborada pelo autor.

Para os ensaios de tração, foram cortados 5 (cinco) corpos de prova de cada placa. Os corpos de prova possuíam, aproximadamente, 250 mm de comprimento, 25 mm de largura e, no mínimo, 2 mm de espessura, conforme determina a norma ASTM D3039. A Tabela 5

contém as dimensões específicas de cada corpo de prova. As placas reforçadas com tecidos UD foram ensaiadas com a força axial aplicada em 0° e 90° , em relação ao sentido das fibras, com o objetivo de analisar a anisotropia dos compósitos laminados produzidos.

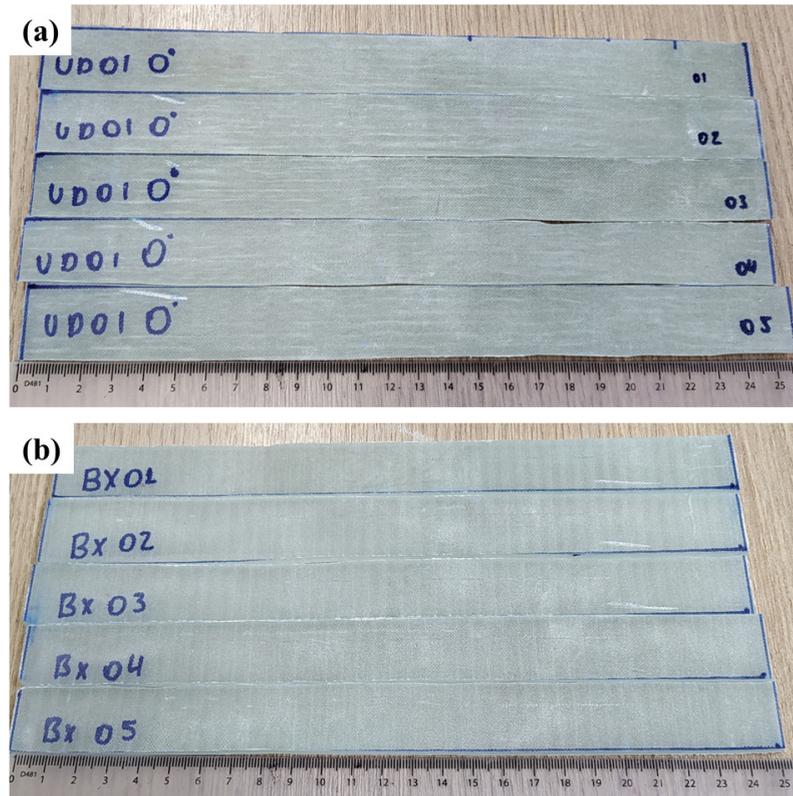
Tabela 5 — Dimensões dos corpos de prova

Placa	Corpo de Prova	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
UD 1 (0°)	1	253	23,02	4,49
	2	251	22,81	4,48
	3	250	23,31	4,51
	4	257	23,32	4,56
	5	253	22,41	4,51
UD 1 (90°)	1	230	21,71	4,31
	2	235	22,52	4,37
	3	238	22,33	4,29
	4	242	22,82	4,26
	5	237	22,44	4,35
UD 2 (0°)	1	257	20,57	4,63
	2	255	19,09	4,46
	3	256	21,61	4,63
	4	257	23,64	4,53
	5	254	23,32	4,76
UD 2 (90°)	1	260	21,71	4,65
	2	261	22,51	4,56
	3	260	23,33	4,64
	4	262	19,75	4,73
	5	263	21,94	4,59
BIAX	1	251	21,35	3,75
	2	253	22,37	3,86
	3	253	21,14	3,86
	4	254	23,72	3,98
	5	255	23,64	3,89

Fonte: elaborada pelo autor.

Portanto, 25 (vinte e cinco) corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração. A Figura 32 mostra alguns corpos de prova após o corte nas dimensões adequadas para este ensaio.

Figura 32 — Corpos de prova para ensaio de tração: (a) reforçados com tecido UD a serem ensaiados em 0° e (b) reforçados com tecido BIAX



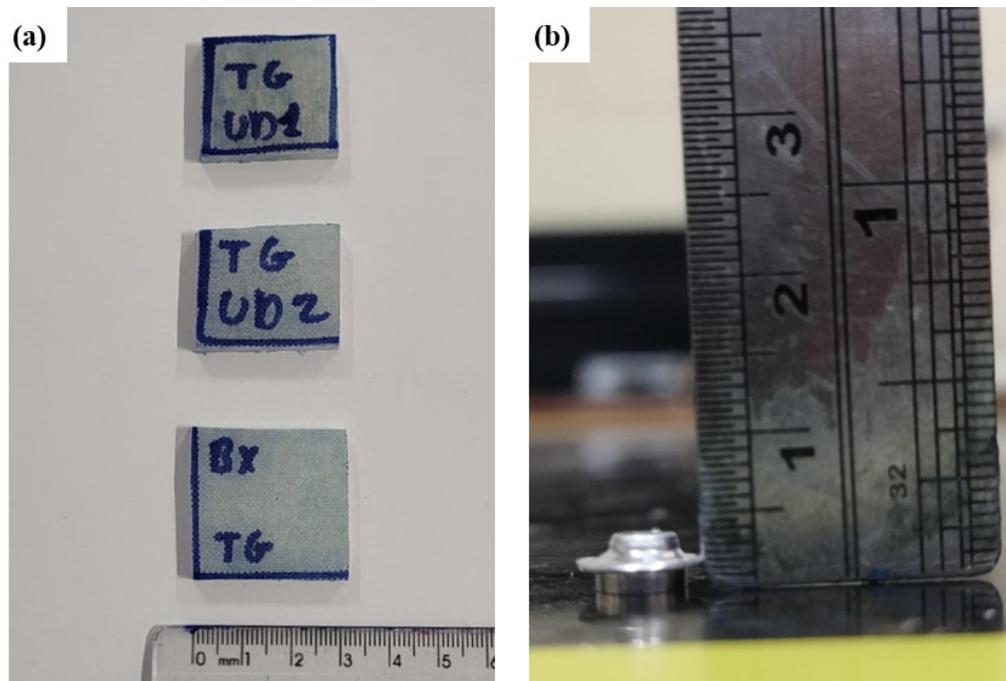
Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.3 Ensaios de DSC

Os ensaios de DSC foram realizados seguindo a norma ASTM D2584 e utilizando o maquinário do Laboratório de Materiais da indústria de fabricação de pás eólicas que não será explicitamente mencionada devido a sigilos comerciais.

Para o DSC, foi cortado um pedaço de seção quadrada, com 3 mm de lado, de cada placa produzida, totalizando as 3 (três) amostras visualizadas na Figura 33a. Destas amostras, foram cortados pedaços menores, das dimensões do cadinho de alumínio apresentado na Figura 33b. Depois, os pequenos pedaços foram alocados e conformados no cadinho com o auxílio de um balancim manual.

Figura 33 — (a) Amostras para ensaio DSC e (b) cadinho de alumínio do equipamento de ensaio DSC



Fonte: elaborada pelo autor.

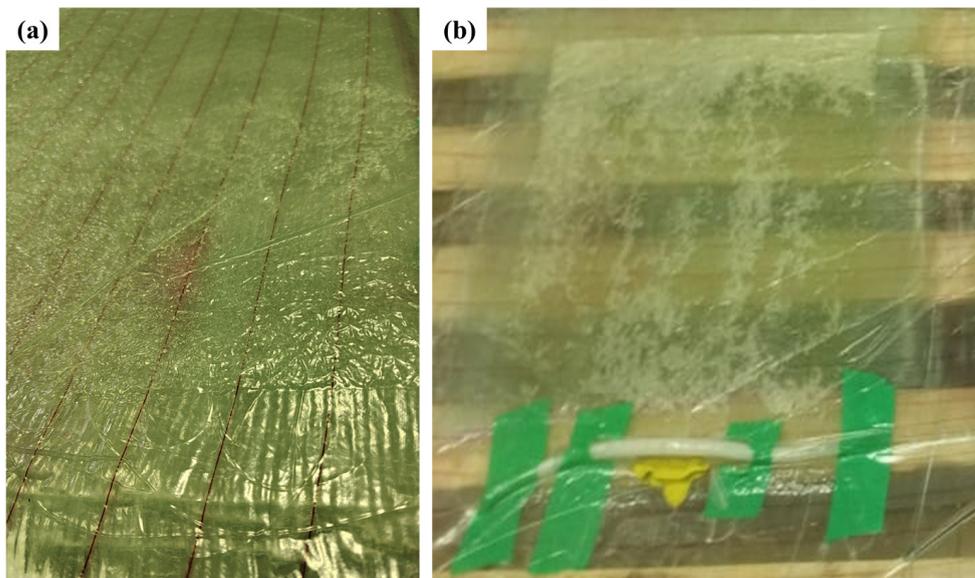
Neste ensaio, as amostras foram aquecidas da temperatura ambiente, 28°C, até a temperatura de 180°C, com uma taxa de aquecimento de 20°C/min.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes de mostrar e discutir os resultados dos experimentos, é necessário ressaltar que o compósito laminado UD 1 apresentou defeitos de vazios (bolhas) decorrentes de um vazamento no processo de infusão, como já mencionado. Coelho (2020) destaca que as principais causas para a formação de vazios e porosidades são o ar dissolvido no interior da resina, os produtos de reação resultantes do processo de cura e a volatilização de componentes de baixo peso molecular da resina ou de inclusões orgânicas, que ocorre em elevadas temperaturas de cura. Contudo, no presente trabalho, acredita-se que o defeito de bolhas tenha realmente sido causado pelo pequeno furo identificado, o qual permitiu a entrada de ar atmosférico durante a infusão.

Portanto, a caracterização das propriedades mecânicas das placas fabricadas correspondem a: compósitos laminados reforçados com tecidos de fibra de vidro unidirecionais e com a presença de defeitos de bolhas (UD 1); compósitos laminados reforçados com tecidos de fibra de vidro unidirecionais e sem defeitos (UD 2) e compósitos laminados reforçados com tecidos de fibra de vidro bidirecionais e sem defeitos (BIAX). A Figura 34a mostra com mais detalhes os índices de que ocorreu uma quebra do vácuo durante a infusão do laminado UD 1. Na Figura 34b, as regiões esbranquiçadas indicam onde possivelmente houve entrada de ar.

Figura 34 — (a) Aparecimento de bolhas durante o processo de infusão do laminado UD 1 e (b) ampliação da Figura 30 mostrando o aspecto superficial do laminado UD 1 após fabricado



Fonte: elaborada pelo autor.

5.1 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração ocorreram sem adversidades e, dentre os corpos de prova testados, foram verificados diversos modos de falha. A Figura 35 apresenta o término do ensaio de tração de um corpo de prova de teste, ensaiado apenas para verificar as condições de fixação nas garras da máquina. Uma vez que o teste foi bem sucedido, deu-se continuidade aos ensaios.

Figura 35 — Término do ensaio de tração de um corpo de prova teste



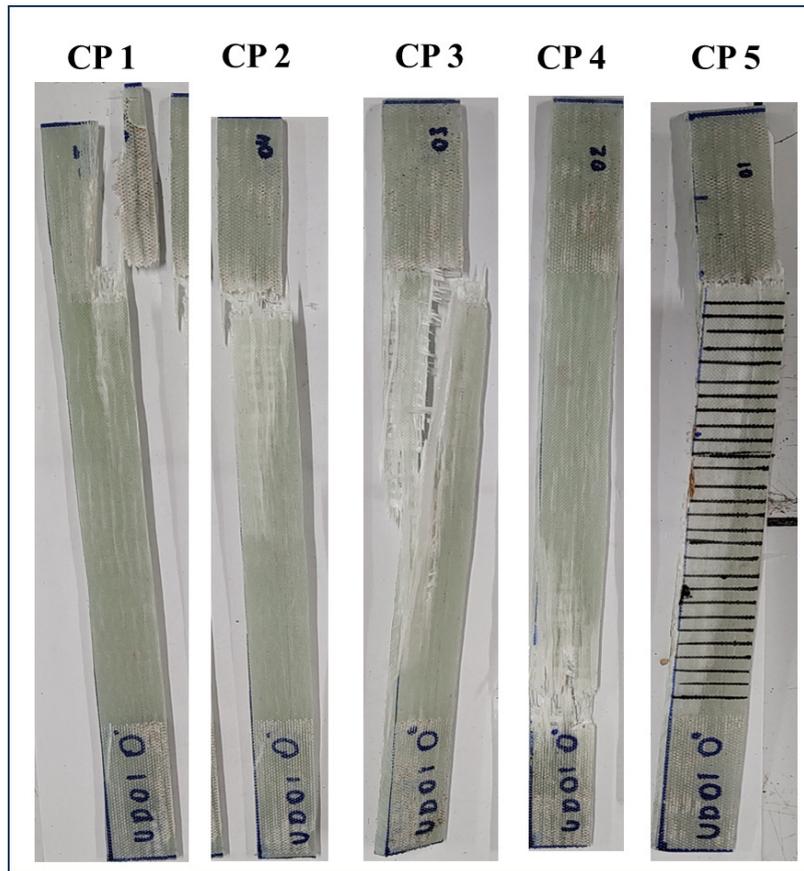
Fonte: elaborada pelo autor.

A seguir, os resultados dos ensaios de tração serão apresentados na forma de imagens dos corpos de prova ensaiados e, também, de tabelas e gráficos contendo as propriedades mecânicas calculadas por meio dos dados de medidos.

Para cada tipo de laminado e condição ensaiada, conforme a Tabela 5, foram elaboradas imagens *post mortem* (registro do corpo de prova após ensaio). Em seguida, estas imagens foram correlacionadas com a Figura 15 e com a Tabela 3, retiradas da norma ASTM D3039. Assim, identificaram-se os modos de falhas dos 25 (vinte e cinco) corpos de prova, além de outras características da falha.

A Figura 36 mostra os corpos de prova do lamidado UD 1 ensaiados a 0° , os quais, em sua maioria, falharam na região superior, próximo à região de fixação na garra.

Figura 36 — Corpos de prova UD 1 *post mortem* ensaiados a 0°



Fonte: elaborada pelo autor.

O comportamento da falha foi distinto entre os corpos de prova, principalmente se observado o CP 3. Este corpo de prova, assim como os demais, apresentou uma falha iniciada na região limite entre o contato com a garra e o comprimento útil, mas a fratura estendeu-se até o seu centro, repartindo-o de forma angulada. A distinção na falha entre estes corpos de prova pode ter sido causada devido a diversos fatores. O principal fator identificado, no caso do presente trabalho, é a possibilidade da distribuição não-uniforme dos vazios (bolhas) presentes entre os tecidos de fibra de vidro na placa laminada UD 1 ter influenciado diretamente a resistência mecânica dos corpos de prova, de modo que aqueles com maior densidade de defeitos (mais vazios) eram mais frágeis do que aqueles com menos defeitos (menos vazios). Isso pode ter ocorrido porque os vazios atuam como pontos concentradores de tensão, afetando o comportamento mecânico dos laminados (COELHO, 2020).

A Tabela 6 apresenta os códigos de falha dos corpos de prova UD 1 ensaiados a 0°, descritos de acordo com a norma ASTM D3039.

Tabela 6 — Códigos de falha dos corpos de prova UD 1 ensaiados a 0°

Corpo de prova	Modo de falha	Código	Área da falha	Código	Localização da falha	Código
1	Lateral	L	Dentro da região em contato com a garra	I	Região superior	T
2	Lateral	L	No limite entre a região em contato com a garra e o comprimento útil	A	Região superior	T
3	Angulado	A	No limite entre a região em contato com a garra e o comprimento útil	A	Região superior	T
4	Lateral	L	No limite entre a região em contato com a garra e o comprimento útil	A	Região inferior	B
5	Lateral	L	No limite entre a região em contato com a garra e o comprimento útil	A	Região superior	T

Fonte: elaborada pelo autor.

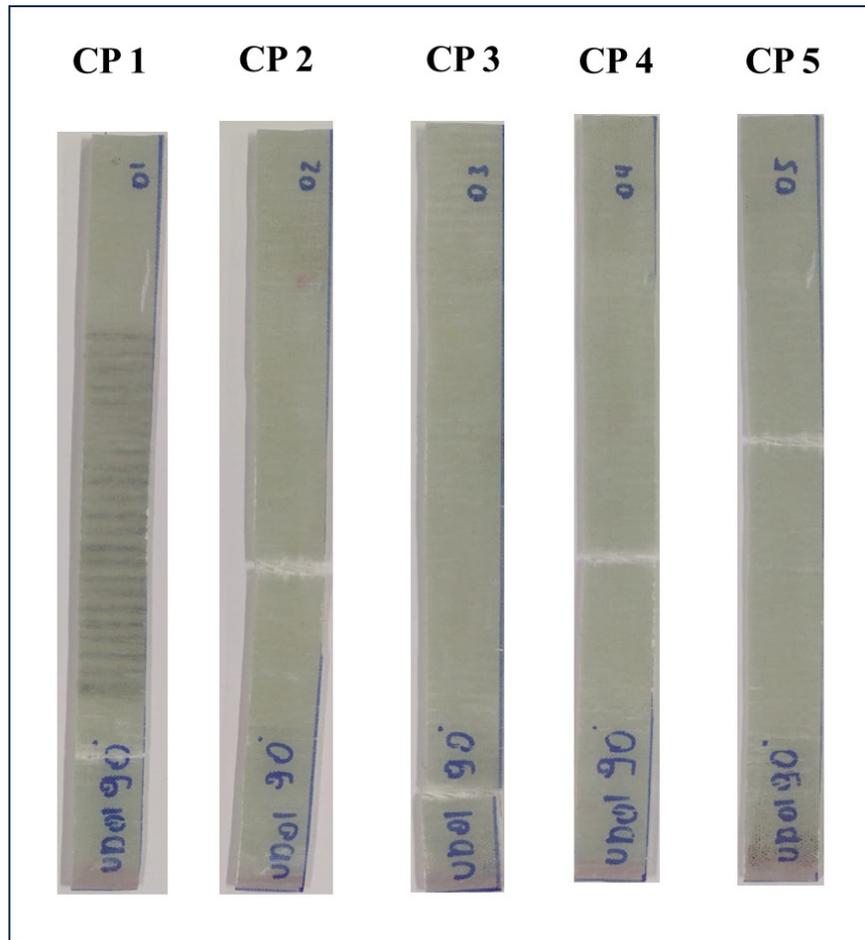
Também foram identificadas diferenças nas falhas dos corpos de prova do laminado UD 1 ensaiados a 90°. Conforme mostram a Figura 37 e a Tabela 7, é possível perceber que as falhas ocorreram ou dentro da região de contato com a garra ou no comprimento útil, variando ainda entre a região central e a região inferior dos corpos de prova. Os códigos de falha verificados foram LIB e LGM.

Tabela 7 — Códigos de falha dos corpos de prova UD 1 ensaiados a 90°

Corpo de prova	Modo de falha	Código	Área da falha	Código	Localização da falha	Código
1	Lateral	L	Dentro da região em contato com a garra	I	Região inferior	B
2	Lateral	L	Comprimento útil	G	Região central	M
3	Lateral	L	Dentro da região em contato com a garra	I	Região inferior	B
4	Lateral	L	Comprimento útil	G	Região central	M
5	Lateral	L	Comprimento útil	G	Região central	M

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 37 — Corpos de prova UD 1 *post mortem* ensaiados a 90°



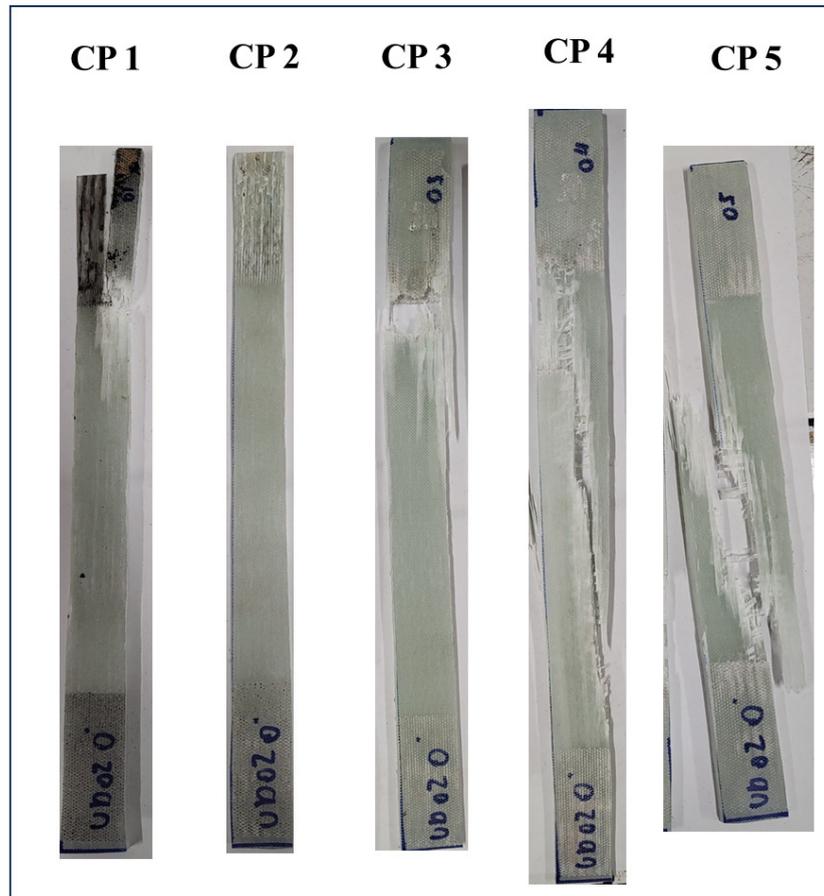
Fonte: elaborada pelo autor.

Serão apresentados adiante os corpos de prova retirados do laminado UD 2, reforçado com tecidos de fibra de vidro unidirecionais e sem defeitos superficiais detectados após ensaios de tração. A Figura 38 contém as imagens dos corpos de prova UD 2 ensaiados a 0°, onde percebe-se que dois fraturam na região de contato com a garra e três sofreram fraturas de modo angular, sendo um na região superior e dois no comprimento útil.

Assim como consta na Tabela 8, houve uma variação no modo de falha deste grupo de corpos de prova. Os CPs 3, 4 e 5 sofreram falhas bastante semelhantes. Enquanto isso, os CPs 1 e 2 apresentaram fraturas nas regiões de fixação no equipamento; isso pode decorrer da influência da deformação que a garra aplica no corpo de prova ao fixá-lo. Os efeitos desse fator serão discutidos com mais detalhes posteriormente neste tópico.

Nos corpos de prova UD 2 ensaiados a 0°, ocorreram duas falhas de código SIT, uma falha de código AAT e uma falha AGM.

Figura 38 — Corpos de prova UD 2 *post mortem* ensaiados a 0°



Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 8 — Códigos de falha dos corpos de prova UD 2 ensaiados a 0°

Corpo de prova	Modo de falha	Código	Área da falha	Código	Localização da falha	Código
1	Espalhamento longitudinal	S	Dentro da região em contato com a garra	I	Região superior	T
2	Espalhamento longitudinal	S	Dentro da região em contato com a garra	I	Região superior	T
3	Angulado	A	No limite entre a região em contato com a garra e o comprimento útil	A	Região superior	T
4	Angulado	A	Comprimento útil	G	Região central	M
5	Angulado	A	Comprimento útil	G	Região central	M

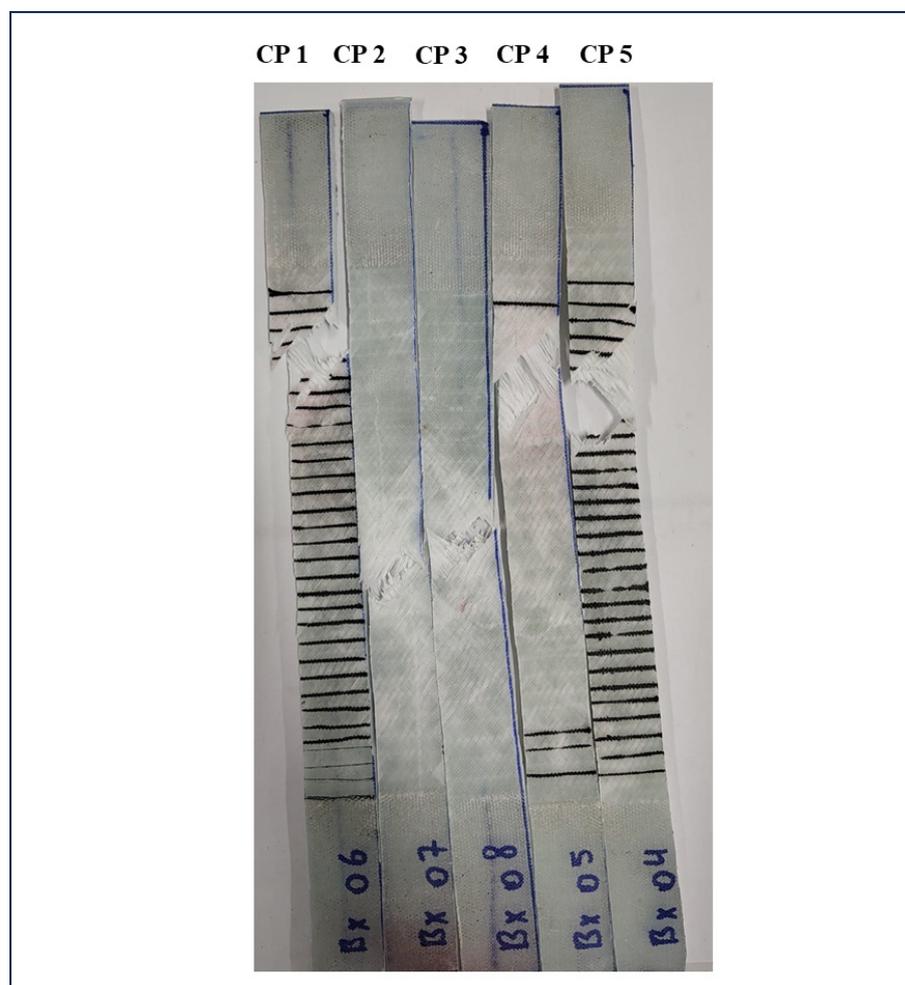
Fonte: elaborada pelo autor.

Infelizmente, não foram feitos registros *post mortem* dos corpos de prova UD 2 ensaiados a 90°. Por isso, estes serão melhor discutidos apenas em termos das propriedades

mecânicas obtidas dos dados dos ensaios de tração. Porém, estes CPs apresentaram falhas semelhantes às verificadas para a condição UD 1 ensaiada a 90°, com fraturas laterais no comprimento útil, na região inferior ou na região central.

A Figura 39 mostra os corpos de prova BIAx após ensaio de tração. Como pode-se observar, estes foram os corpos de prova que apresentaram os resultados mais semelhantes entre si; todos fraturaram no modo angulado, no comprimento útil e nas regiões superior ou central.

Figura 39 — Corpos de prova BIAx *post mortem*



Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 9 informa os códigos de falha dos corpos de prova BIAx, os quais são AGT e AGM.

Tabela 9 — Códigos de falha dos corpos de prova BIAX

Corpo de prova	Modo de falha	Código	Área da falha	Código	Localização da falha	Código
1	Angulado	A	Comprimento útil	G	Região superior	T
2	Angulado	A	Comprimento útil	G	Região central	M
3	Angulado	A	Comprimento útil	G	Região central	M
4	Angulado	A	Comprimento útil	G	Região superior	T
5	Angulado	A	Comprimento útil	G	Região superior	T

Fonte: elaborada pelo autor.

As imagens dos corpos de prova *post mortem* revelaram que, para alguns tipos de compósitos laminados tracionados e condições do ensaio, possivelmente a não utilização de *tabs* (placas finas de fibra de vidro fixadas em ambos os lados e em ambas extremidades dos corpos de prova, dimensionados na norma ATSM D3039) implicou efeitos negativos. Neste trabalho, principalmente para os corpos de prova UD 1 ensaiados a 0°, as fraturas ocorreram na região de contato com a garra ou em regiões próximas à região de contato com a garra, e este é um resultado que pode gerar discussões a respeito da confiabilidade dos ensaios de tração realizados.

Quando se utilizam os *tabs*, são eles que sofrem a deformação aplicada pela pressão que as garras exercem nas extremidades durante a fixação dos corpos de prova no maquinário do ensaio de tração, tornando o material a ser ensaiado intacto até o início da aplicação da carga. A ausência de *tabs* faz com que os CPs, placas finas, sejam localmente comprimidos, o que pode alterar as dimensões das extremidades e criar pontos de concentração de tensão. Isso torna o desempenho mecânico destas regiões diferente do restante do corpo de prova, de modo que as extremidades são mais frágeis.

Por consequente, o não uso de *tabs* pode causar adversidades na determinação do modo de falha de corpos de prova, uma vez que os resultados obtidos podem não ser realmente representativos, porque não se sabe se a fratura ocorrer na região do corpo de prova dentro da garra é uma característica do material ou resultante dos efeitos supracitados. Tal fato é constantemente ignorado em avaliações mecânicas de materiais na indústria e em pesquisas acadêmicas; muitas vezes, devido à maior complexidade de produzir CPs completamente de acordo com a norma ASTM D3039, a avaliação mecânica de compósitos poliméricos é feita com corpos de prova do mesmo tipo dos que foram confeccionados neste estudo.

A Tabela 10, mostrada a seguir, traz uma espécie de refinamento das informações dos modos de falha apresentadas anteriormente, fruto de análises mais críticas dos resultados de ensaio, desconsiderando as falhas que ocorreram na região de contato com a garra — é claro que não há completa precisão nesta metodologia, mas essa avaliação pode fornecer maiores esclarecimentos.

Tabela 10 — Resumo dos modos de falha dos corpos de provas ensaiados

Corpos de prova	Modo de falha	Área da falha	Localização da falha
UD 1 (0°)	Lateral	No limite entre a região em contato com a garra e o comprimento útil	Região superior ou inferior
UD 1 (90°)	Lateral	Comprimento útil ou dentro da região de contato com a garra	Região central ou inferior
UD 2 (0°)	Angulado	Comprimento útil ou no limite entre a região em contato com a garra e o comprimento útil	Região central
UD 2 (90°)*	Angulado	Comprimento útil ou no limite entre a região em contato com a garra e o comprimento útil	Região central
BIAx	Angulado	Comprimento útil	Região central ou superior

Legenda: *Apenas observado durante a realização do ensaio, mas não registrado neste trabalho.

Fonte: elaborada pelo autor.

Em termos de propriedades mecânicas, determinaram-se o Limite de Resistência à Tração (LRT), da Tensão de Ruptura e do Alongamento de Ruptura dos 25 (vinte e cinco) corpos de prova por meio dos ensaios de tração.

A Tabela 11 apresenta as propriedades mecânicas dos corpos de prova UD 1 ensaiados a 0° e a 90°. Os resultados mostraram-se coerentes: avaliando os valores médios e os desvios padrões do LRT e da Tensão de Ruptura, conclui-se que os corpos de prova UD ensaiados a 0° (em relação à orientação da fibra na matriz) possuem propriedades mecânicas muito melhores. No caso do LRT, verificaram-se valores cerca de 500 MPa maiores para os CPs tracionados a 0°. Isso ocorre porque as propriedades de um material compósito reforçado com fibras são anisotrópicas, fortemente dependentes da orientação do reforço. Como o esforço de tração, para estes corpos de prova, foi aplicado exatamente no sentido de orientação da fibra, a resistência mecânica medida foi maior.

Inclusive, como foi mostrado na Figura 37, os CPs UD 1 ensaiados a 90° apresentaram falhas com a mesma morfologia, sendo a superfície de fratura, avaliando em uma visão superior, um corte “reto”, feito exatamente na direção de orientação das fibras — que, neste caso, estavam perpendiculares à direção de aplicação do esforço de tração. Ademais, as propriedades mecânicas denotam que a capacidade de absorver energia antes da fratura, a capacidade de deformar antes de fraturar, é menor para os CPs tracionados a 0°.

Tabela 11 — Propriedades mecânicas dos corpos de prova UD 1 ensaiados a 0° e a 90°

Placa	Corpo de Prova	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)
UD 1 (0°)	1	582,05	80,48	5,78
	2	570,78	5,044	5,44
	3	571,82	7,72	3,54
	4	492,56	32,82	3,06
	5	552,38	26,50	3,50
Média		553,92	30,51	4,26
Desvio Padrão		± 35,93	± 30,36	± 1,25
UD 1 (90°)	1	55,56	5,76	0,81
	2	52,82	5,47	0,79
	3	49,48	21,70	0,89
	4	56,56	20,69	1,44
	5	70,23	23,23	1,47
Média		56,93	15,37	1,08
Desvio Padrão		± 7,92	± 8,95	± 0,34

Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 12 contém as propriedades mecânicas dos corpos de prova UD 2 ensaiados a 0° e a 90°. Assim como para os corpos de prova da placa UD 1, os corpos de prova ensaiados com um esforço trativo aplicado a 0°, na direção de orientação das fibras na matriz, apresentaram maior resistência mecânica, e os corpos de prova ensaiados a 90° possuíram menor capacidade de deformar antes de fraturarem.

Tabela 12 — Propriedades mecânicas dos corpos de prova UD 2 ensaiados a 0° e a 90°

Placa	Corpo de Prova	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Alongamento de Ruptura (%)
UD 2 (0°)	1	609,12	39,58	4,26
	2	671,66	226,26	11,13
	3	518,15	13,20	2,93
	4	601,74	52,06	5,56
	5	495,60	51,93	3,17
Média		579,25	76,41	5,41
Desvio Padrão		± 71,88	± 85,21	± 3,36
UD 2 (90°)	1	52,49	3,20	1,01
	2	54,42	7,28	0,93
	3	47,37	6,35	0,86
	4	56,55	13,56	0,97
	5	49,28	14,85	0,85
Média		52,02	9,048	0,924
Desvio Padrão		± 3,73	± 4,96	± 0,07

Fonte: elaborada pelo autor.

Em comparação aos CPs UD 1, para os ensaios de tração a 0°, os corpos de prova UD 2 tiveram maior LRT; considerando os valores médios de LRT, essa diferença é de mais de 25 MPa. Isso pode se dever ao fato do compósito laminado UD 1 possivelmente conter defeitos advindos do processo de infusão (vazios). Porém, considerando os desvios padrões, estes valores de LRT são mais próximos.

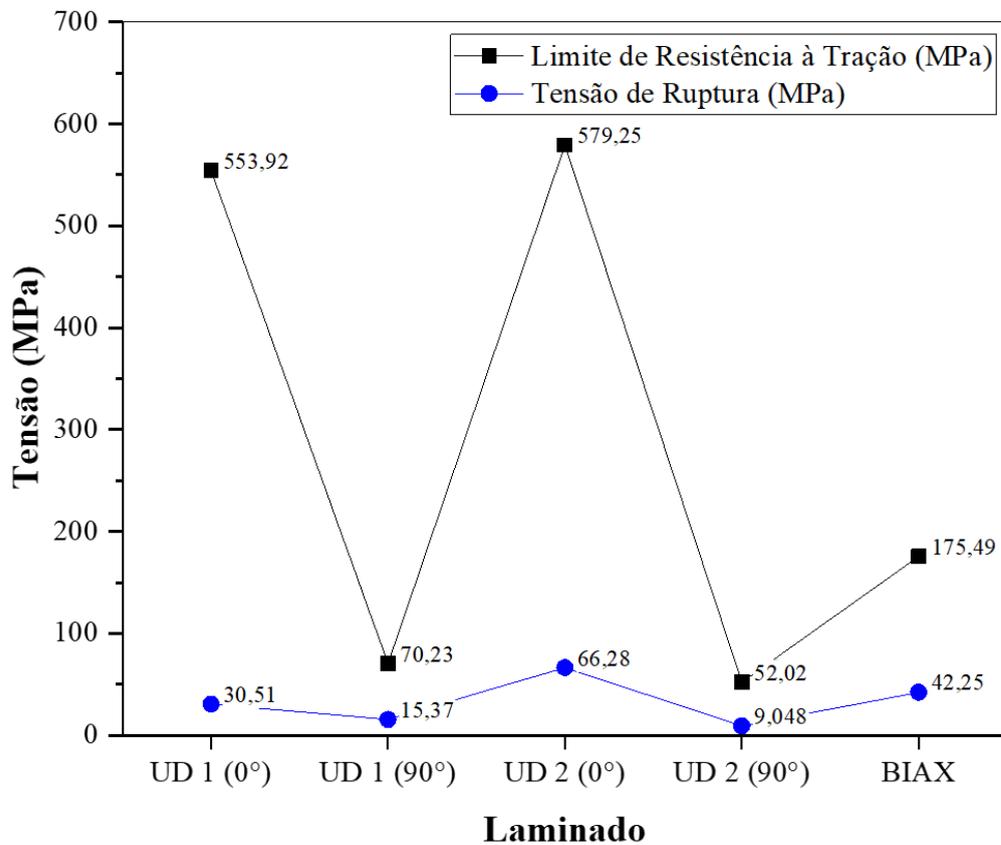
Em relação à Tensão de Ruptura, os CPs UD 2 apresentaram um valor médio duas vezes maior que os CPs UD 1. Para os corpos de prova ensaiados a 0° destes laminados, não verificou-se uma grande diferença entre os valores de LRT e os valores de Tensão de Ruptura.

A Tabela 13 mostra as propriedades mecânicas dos corpos de prova BIAx. E, como modo de sumarizar os resultados dos ensaios de tração, a Figura 40 e Tabela 14 apresentam comparativos entre os valores médios de LRT e de Tensão de Ruptura para todas as condições testadas.

Tabela 13 — Propriedades mecânicas dos corpos de prova BIAX

Placa	Corpo de Prova	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Alongamento de Ruptura (%)
UD 1 (0°)	1	179,35	39,05	8,98
UD 1 (90°)	2	169,72	19,43	8,11
UD 2 (0°)	3	204,74	67,10	8,52
UD (90°)	4	165,05	26,48	9,38
BIAX	5	158,60	59,20	9,16
Média		175,50	42,25	8,83
Desvio Padrão		± 18,02	± 20,52	± 0,51

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 40 — Gráfico comparativo das propriedades mecânicas dos corpos de prova ensaiados

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 14 — Propriedades mecânicas dos corpos de provas ensaiados

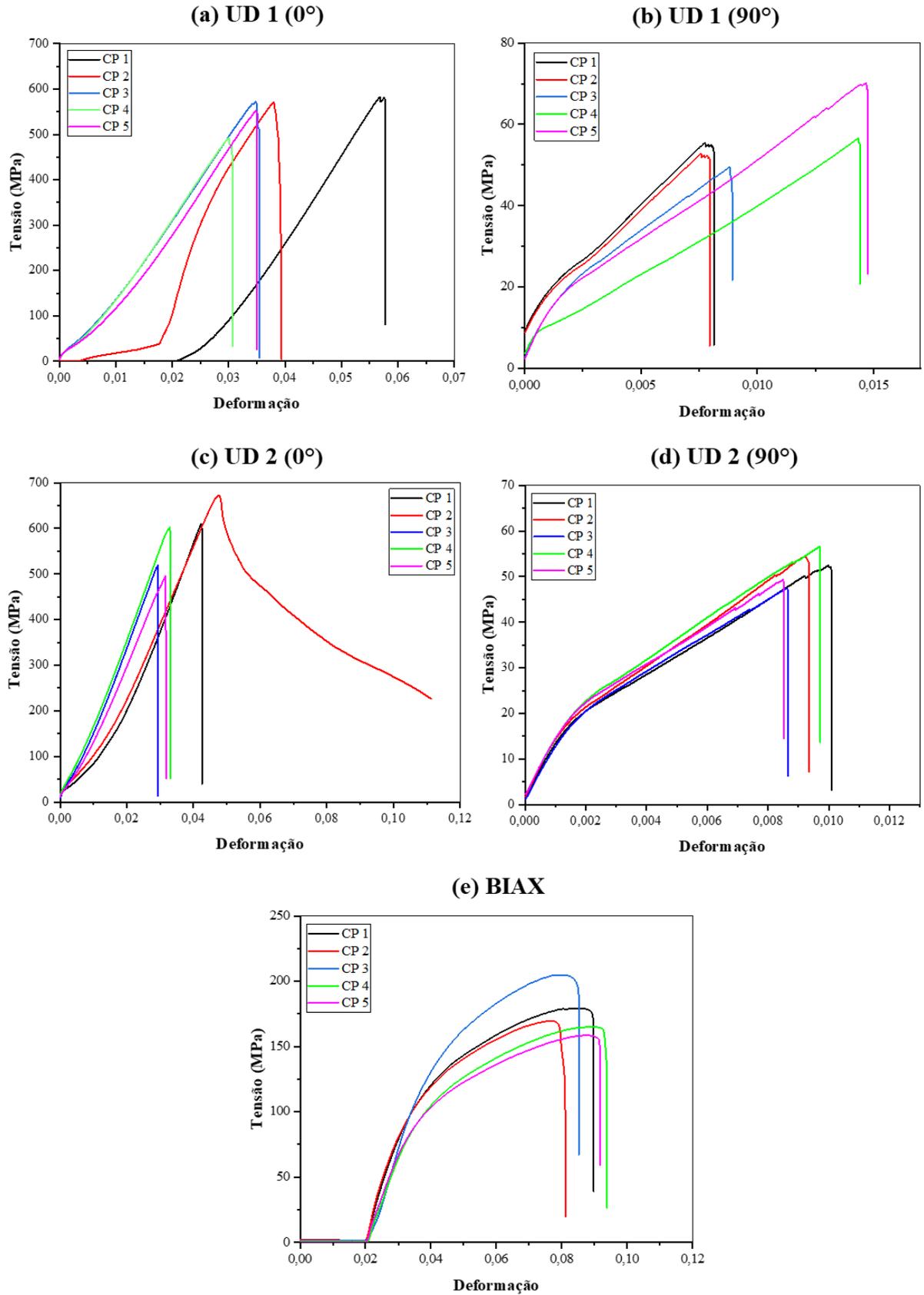
Placa	Limite de Resistência à Tração (MPa)		Tensão de Ruptura (MPa)		Alongamento de Ruptura (%)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
UD 1 (0°)	553,92	± 35,93	30,51	± 30,36	4,26	± 1,25
UD 1 (90°)	56,93	± 7,92	15,37	± 8,95	1,08	± 0,34
UD 2 (0°)	579,25	± 71,88	66,28	± 91,73	5,41	± 3,36
UD 2 (90°)	52,02	± 3,73	9,048	± 4,96	0,924	± 0,07
BIAX	175,50	± 18,02	42,25	± 20,52	8,83	± 0,51

Fonte: elaborada pelo autor.

Como mostrado nas Tabelas 13 e 14 e no gráfico da Figura 40, o LRT médio do compósito laminado BIAX apresentou um valor muito menor do que aqueles encontrados para os corpos de prova das placas UD 1 e UD 2 ensaiados a 0°, sendo 175,5 MPa. Por sua vez, a Tensão de Ruptura média é de 42,25 MPa, um valor intermediário entre os obtidos para os laminados UD 1 e UD 2.

Os gráficos de Tensão *versus* Deformação plotados de acordo com os resultados dos ensaios de tração estão presentes na Figura 41, onde são mostradas as curvas para todos os corpos de prova: (a) UD 1 ensaiados a 0°; (b) UD 1 ensaiados a 90°; (c) UD 2 ensaiados a 0°; (d) UD 2 ensaiados a 90° e (e) BIAX. Todas as curvas estão de acordo com as curvas presentes na literatura para materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras, as quais, inclusive, foram abordadas no tópico Referencial Teórico do presente trabalho.

Figura 41 — Gráficos Tensão *versus* Deformação



Fonte: elaborada pelo autor.

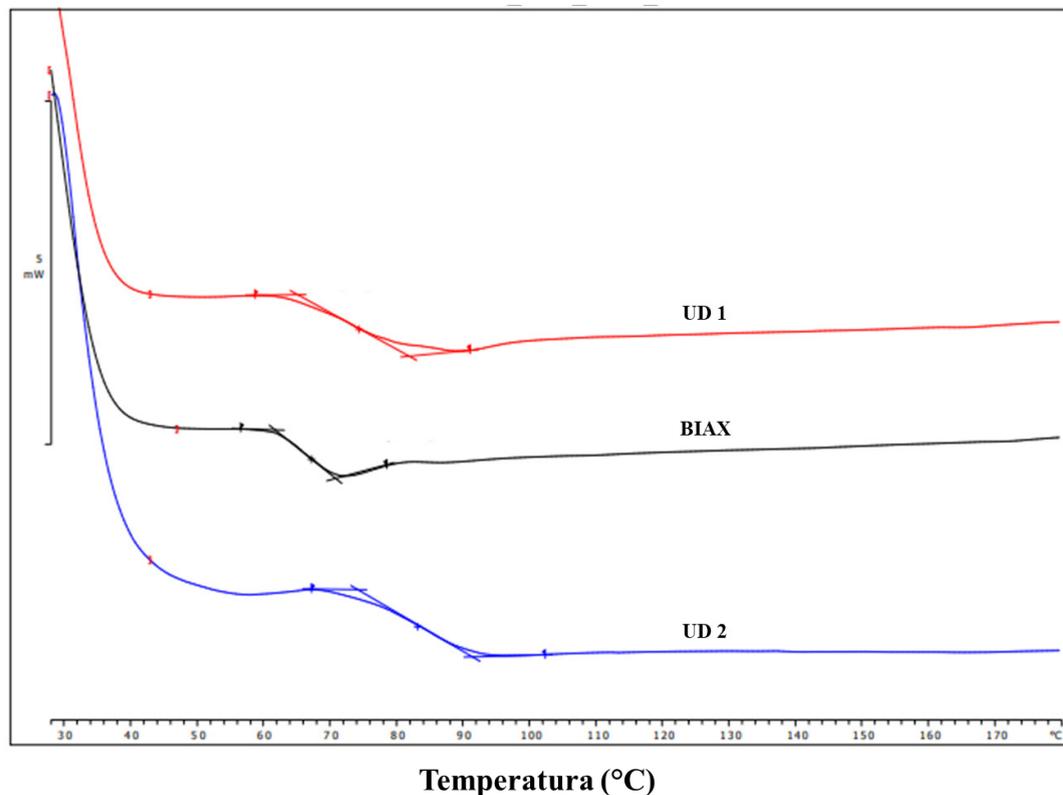
A título de comparação, os resultados encontrados para o LRT dos laminados estão muito próximos àqueles obtidos no trabalho de Pinheiro (2022), que também realizou ensaios de tração em compósitos laminados de matriz de resina epóxi reforçados com tecidos fibra de vidro UD e BIAX.

5.2 Ensaio de DSC

Neste trabalho, a análise dos resultados dos ensaios DSC foram feitas de acordo com as condições requeridas para componentes pré-fabricados utilizados da produção de pás eólicas, como o pré-fabricado de raiz. Os compósitos laminados aplicados nesta área da indústria eólica precisam manter suas propriedades mecânicas à temperaturas de operação de até 55 °C. Sendo assim, foram considerados aprovados no ensaio DSC os laminados com temperatura de transição vítrea maior ou igual à 55 °C, uma vez que, acima da T_g o material torna-se deformável.

A Figura 42 apresenta as três curvas resultantes dos experimentos DSC, nas quais as mudanças de linha de base representam uma queda do C_p e caracterizam a T_g .

Figura 42 — Curvas resultantes dos ensaios de DSC



Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 15 contém os valores exatos de temperatura de transição vítrea extraídos dos dados que deram origem às curvas presentes na Figura 42. Todos os laminados apresentaram valores de T_g maiores do que 55 °C, sendo, então, aprovados nas exigências do teste de DSC para a aplicação na indústria eólica mencionada anteriormente.

Tabela 15 — Temperaturas de transição vítrea

Placa	Temperatura de transição vítrea (°C)
UD 1	65,11
UD 2	74,15
BIAX	61,85

Fonte: elaborada pelo autor.

5.3 Considerações sobre as propriedades dos compósitos laminados produzidos

A partir de todos os resultados observados e discutidos anteriormente, foi possível comparar as propriedades dos compósitos laminados produzidos. Considerando a aplicação desejada, ou seja, a manufatura de pré-fabricados utilizados na montagem de pás de aerogeradores, tendo enfoque no pré-fabricado de raiz, todos os compósitos produzidos satisfizeram as características requeridas. Os compósitos UD apresentaram propriedades mecânicas bastante semelhantes, embora tenham sido verificados defeitos na placa UD 1. Por sua vez, o compósito BIAX apresentou resistência mecânica menor, em comparação com as placas UD.

Entretanto, para avaliar os laminados produzidos neste trabalho, é importante levar em consideração as condições de operação dos componentes fabricados com cada tipo de tecido. Compósitos reforçados com tecidos BIAX são elaborados para componentes estruturais (tais como o pré-fabricado de raiz) que precisam resistir adequadamente à esforços mecânicos aplicados em várias direções, o que não ocorre com compósitos reforçados com tecidos UD — até porque, assim como foi verificado no presente estudo, a resistência mecânica destes decai drasticamente quando submetido à esforços perpendiculares à direção da fibra na matriz.

Em relação à temperatura de transição vítrea, uma vez que todos os compósitos foram aprovados no teste DSC, todos são indicados para a aplicação estudada no presente trabalho. Porém, a placa UD 1, que apresentou maior T_g , resiste a maiores temperaturas. Isso

é um fator importante a ser avaliado, pois existe a possibilidade de serem verificadas temperaturas maiores que o limite de temperatura de operação pré-estabelecido de 55 °C durante a vida útil de um aerogerador.

6 CONCLUSÃO

De modo geral, o presente trabalho sucedeu em produzir placas de compósitos laminados de matriz de resina epóxi e reforço de fibra de vidro na forma de tecidos UD e BIAx, utilizando o processo VARTM. As principais conclusões das análises realizadas são elencadas a seguir:

- A avaliação da influência da orientação do tecido de fibra de vidro na matriz de resina epóxi foi feita realizando ensaios de tração a 0° e a 90° , e os resultados mostraram uma intensa queda na resistência mecânica, em termos do LRT e da Tensão de Ruptura, quando os corpos de prova dos laminados UD foram submetidos a esforços trativos na direção perpendicular à orientação das fibras;
- O LRT médio do laminado BIAx é 175,5 MPa, um valor muito menor do que os encontrados para os laminados UD 1 e UD 2 ensaiados a 0° , e a Tensão de Ruptura média deste laminado é de 42,25 MPa, um valor intermediário entre os obtidos para os outros;
- Todos os laminados foram aprovados no ensaio DSC, obtendo temperatura de transição vítrea maior do que a temperatura de operação de compósitos utilizados na produção de pré-fabricados para pás eólicas (55°C), tais como o pré-fabricado de raiz;
- Podem haver inconstâncias na determinação do modo de falha de corpos de prova, uma vez que não se sabe certas fraturas ocorreram na região do corpo de prova alocada dentro da garra ou na região próxima à garra porque isto é uma característica do material ou se esse fato é resultante dos efeitos da não utilização de *tabs*.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para complementar este trabalho, é necessário produzir corpos de prova completamente de acordo com a norma ASTM D3039, ou seja, corpos de prova que contenham *tabs* em suas extremidades. Dessa forma, será possível comparar os resultados apresentados no presente estudo com aqueles obtidos com novos ensaios, fornecendo maior confiabilidade à determinação dos modos de falha. Além disso, é importante registrar com imagens as fraturas dos corpos de prova do laminado UD 2 ensaiados a 90°, para enriquecer as discussões realizadas. Outras adições que contribuiriam bastante para as discussões é avaliação mais aprofundada dos defeitos observados no laminado UD 1 e seus efeitos e a análise das propriedades mecânicas dos compósitos laminados baseado em equacionamentos matemáticos.

REFERÊNCIAS

- AKOVALI, G. **Handbook of composite**. 1º ed. Ancara: Rapra Technology Limited, 2001.
- ALMACO. **Compósitos 2: Tecnologia de Processos**. 2º ed. 2020.
- d'ALMEIDA, J. R. M. Avaliação da hidrofiliçidade do sistema epóxi DGEBA/TETA em função da razão endurecedor/monômero epóxi. **Anais do 8º Congresso Brasileiro de Polímeros (CBPOL)**, Águas de Lindóia/SP, 2005. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2005/PDF/126.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2023.
- ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3º 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.
- BARRETO, A. C. R.; DUNCAN, M. C. **Caracterização do comportamento mecânico de materiais compósitos ortotrópicos**. 2017. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2017.
- BERNAL, C. COUTO, A. B. C.. BREVIGLIERI, S. T.; CAVALHEIRO, E. T. G. Influência de alguns parâmetros experimentais nos resultados de análises calorimétricas diferenciais - DSC. **Química Nova**, vol. 25, n. 5, p.849-855, 2002.
- BERTHELOT, J. M. **Mechanics of Composite Materials and Structures**. 3º ed. Vallouise: Springer, 1999.
- BIOPDI. **Ensaio de Tração**. 2023. Disponível em: <https://biopdi.com/ensaio-de-tracao/>. Acesso em: 01 jun. 2023.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 8º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2º ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.
- CARLSSON, L. A.; ADAMS, D. F.; PIPES, R. B. **Experimental Characterization of Advanced Composite Materials**. CRC Press, 3º ed., 2003.
- CASTRO, R. M. G. **Introdução à Energia Eólica: Energias Renováveis e Produção Descentralizada**. 4º ed. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.

CEVAHIR, A. Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites. **Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering**, p. 99-121, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101871-2.00005-9>. Acesso em: 05 abr. 2023.

CHAWLA, K. K. Glass Fibers. **Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses**, vol. 2, p. 676-680, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818542-1.02325-0>. Acesso em: 05 abr. 2023.

COELHO, B. M. A. **Deteção de defeitos em materiais compósitos usando tecnologia de ultrassons**. 2020. 180 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2020.

CORTIR. **Wind Turbine Blades: The Blades Handbook, a shared lingo for the future of wind**. 2019. Disponível em: https://www.bladena.com/uploads/8/7/3/7/87379536/cortir_handbook_2019.pdf. Acesso em: 05 jun. 2023.

COSTA, B. L. **Aplicação da metodologia 8d para resolução de defeitos em componentes para pás eólicas: um estudo de caso sobre a fabricação de spar caps**. 2022. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

FABHEADS. **The age of composite materials: History, Classification & Applications**. 2023. Disponível em: <https://fabheads.com/blogs/the-age-of-composite-materials-history-classification-applications>. Acesso em: 20 mar. 2023.

GALLI, C. A. Mecânicas de compósitos de matriz de epóxi com fibras de carbono unidirecionais. 2016. 49 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Engenharia de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

GONZÁLEZ, M. G.; CABANELAS, J. C.; BASELGA, J. Applications of FTIR on Epoxy Resins – Identification, Monitoring the Curing Process, Phase Separation and Water Uptake. **Infrared Spectroscopy – Materials Science, Engineering and Technology**, 2012. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/36178>. Acesso em: 26 mar. 2023.

HSISSOU, R.; SEGHIRI, R.; BENZEKRI, Z.; HILALI, M.; RAFIK, M.; ELHARFI, A. Polymer composite materials: A comprehensive review. **Composite Structures**, vol. 262, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382232100101X?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7cdef0f8dce06f8c. Acesso em: 27 mar. 2023.

JOHNSON, T. **Thermoplastic vs. Thermoset Resins**. 2020. Disponível em: <http://thoughtco.com/thermoplastic-vs-thermoset-resins-820405>. Acesso em: 25 mar. 2023.

MARINHO, T. **Os 12 macro-processos de manufatura de pás eólicas**. 2021. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/os-12-macro-processos-de-manufatura-das-p%C3%AAs-e%C3%B3licas-thayc-marinho>. Acesso em: 15 abril. 2023.

MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia**. 1° ed. São Paulo: Artliber Editora, 2011.

MOURA, M. F. S. F. de; MORAIS, A. B. de; MAGALHÃES, A. G. de. **Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico**. 2° ed. Publidisa, 2011.

OLIVEIRA, P. S. **Caracterização do Resíduo de Resina Epóxi com Fibra de Vidro Proveniente da Fabricação de Pás Eólicas e sua Incorporação em Argamassa de Cimento Portland**. 2017. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2017.

OXYBLACK. **Compósitos**. 2023. Disponível em: <https://www.oxyblack.com/index.php/pt/compositos>. Acesso em: 22 mar. 2023.

PINHEIRO, G. K. C. **Influência da Orientação da Fibra de Vidro na Resistência Mecânica de Laminados em Compósitos de Matriz Epóxi**. 2022. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

REIS, L. R. **Obtenção e caracterização de compósitos de resina poliéster insaturada moldados pelo processo de infusão**. 2016. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

SONG, X. **Vacuum assisted resin transfer Molding (VARTM): Model Development and Verification**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Faculdade do Instituto Politécnico e Universidade Estadual da Virgínia, Blacksburg, 2003.

VENTURA, A. M. F. M. **Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas**. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, v. 21, 3° ed, 2009.

VILELA, A. L. R. **Efeito do Tipo de Silano e do Tratamento Térmico nas Propriedades do Compósito Experimental Reforçado por Fibra de Vidro**. 2017. 67 f. Dissertação (Mestrado em Odontologia) – Programa de Pós-Graduação em Odontologia, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

WU, C.; XU, F.; WANG, H.; LIU, H.; YAN, F.; MA, C. **Manufacturing Technologies of Polymer Composites – A Review**. *Polymers*, 2023, 15, 712. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/3/712>. Acesso em: 14 abr. 2023.

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.