



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

FELIPE LIMA ALVES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DO ÂNGULO DE FIBRA NA
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO COMPÓSITO LAMINADO DE FIBRA DE VIDRO
E RESINA POLIÉSTER.**

Russas

2019

FELIPE LIMA ALVES

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DO ÂNGULO DE FIBRA NA
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO COMPÓSITO LAMINADO DE FIBRA DE VIDRO E
RESINA POLIÉSTER.

Monografia apresentada ao curso de engenharia mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em engenharia mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo

RUSSAS

2019

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

A479a Alves, Felipe Lima.
Análise da influência da orientação do ângulo de fibra na resistência à tração do compósito laminado de fibra de vidro e resina poliéster. / Felipe Lima Alves. – 2019.
61 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo.

1. Compósito . 2. Fibra de vidro. 3. Poliéster . 4. Ensaio de tração. I. Título.

CDD 620.1

FELIPE LIMA ALVES

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DO ÂNGULO DE FIBRA NA
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO COMPÓSITO LAMINADO DE FIBRA DE VIDRO E
RESINA POLIÉSTER.

Monografia apresentada ao curso de engenharia
mecânica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em engenharia mecânica.

Aprovada em: ___/___/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ms. Ramon Rudá Brito Medeiros
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Rosivaldo e Francisca.

AGRADECIMENTOS

Aproveito a oportunidade presente para fazer uma homenagem ao meu Pai - ROSIVALDO ALVES MAIA - a quem dedicarei boa parte dos meus esforços e pensamentos. Ao seu lado aprendi o que é ser feliz na essência da palavra, o senhor sempre será minha fonte de inspiração. O homem que herda metade da sua honra, carisma e determinação é digno da glória e autorrealização. Poucos vivem para serem inigualáveis, apenas aqueles que possuem o dom da percepção, o senhor acreditou no poder do trabalho duro para construção de uma vida bem-sucedida e plena. A dor da saudade é eterna, mas o orgulho de ser seu filho é indescritível.

A minha mãe que sempre está ao meu lado e sempre estarei ao lado dela, e a minha irmã.

Agradeço pelas inúmeras oportunidades conferidas a mim. Muitíssimo obrigado ao meu orientador, Prof. Dr. Candido Lobo.

Agradeço a todos professores que fizeram parte da minha formação acadêmica, vocês são parte essencial da minha história.

Agradeço ao diretor Prof. Dr. Lindberg Lima Gonçalves por agraciar o vale do Jaguaribe com o campus russas, inúmeras vidas foram e serão impactadas pela sua determinação.

Agradeço aos coordenadores de curso que exerceram a função durante minha graduação Prof. Dr. George Luiz e Prof. Dr. Edvan Cordeiro.

Agradeço a todos os membros do grupo SIPROEN – Arthur, Jefferson, Paulo, Ribamar e Louise.

Agradeço ao técnico Xavier do IFCE - Tabuleiro do Norte - pelo auxílio na realização dos ensaios desta pesquisa.

E por fim, agradeço a ciências exata e engenharia mecânica pela transformação de raciocínio lógico que me permitiram e pelo auxílio na compreensão dos princípios do universo.

“A imaginação é mais importante que o conhecimento”

Albert Einstein

RESUMO

Os materiais compósitos são uma das mais importantes descobertas para engenharia e ciências dos materiais, visto que, utiliza as melhores propriedades de dois ou mais materiais. Neste estudo buscou-se determinar a influência da orientação do ângulo de fibra na resistência a ruptura, modulo de elasticidade e alongamento máximo do compósito laminado. O compósito analisado é constituído de um tecido de fibra de vidro unidirecional com resina poliéster. O compósito foi fabricado por processo de laminação manual e curado a temperatura ambiente sob pressão por 8 horas. Para o ensaio de tração os corpos de prova foram construídos segundo a norma ASTM D 3039/D 3039M, sendo no total 25 exemplares distribuídos nas direções de 0°, 30°, 45°, 60° e 90°, em relação a carga aplicada pela máquina de ensaio. Os resultados mostraram uma grande influência da orientação do ângulo de fibra na resistência mecânica. O ensaio de tração mostrou que na orientação a 0 ° a resistência a ruptura média foi de 437.05 MPa, enquanto a 90 ° o valor obtido foi de apenas 3.53 MPa.

Palavras-chave: Compósitos. Fibra de vidro. Poliéster. Ensaio de tração.

ABSTRACT

Composite materials are one of the most important discoveries for engineering and material science, as they utilize the best properties of two or more materials. In this study, the influence of fiber angle orientation on the breaking strength, modulus of elasticity and maximum elongation was determined. The composite analyzed consists of a unidirectional fiberglass fabric with polyester resin. The laminate was manufactured by manual manufacturing process and cured at room temperature under pressure for 8 hours. For exposure tests of specimens were constructed according to ASTM D 3039 / D 3039M, and in total 25 examples are distributed in sections of 0 °, 30 °, 45 °, 60 ° and 90 °, in relation to load. applied by the testing machine. The selected results greatly influence the orientation of the fiber angle on the mechanical strength. The test showed that at 0 ° orientation the average breaking strength was 437.05 MPa, while a 90 ° resistance value was only 3.53 MPa.

Keywords: Composite. Fiberglass. Polyester. Tensile test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Infográfico dos materiais utilizados na fabricação do Boeing 787.....	19
Figura 2 - Reação química do poliéster insaturado.	21
Figura 3 - Estrutura químicas de ácidos: A) Estrutura molecular ácido isoftálico; B) Estrutura molecular ácido ortoftálico; C) Estrutura molecular ácido tereftálico D) Estrutura molecular do bisfenol A.	22
Figura 4 - Disposição do alinhamento das fibras na matriz.....	24
Figura 5 - Nível de análise da estrutura de um compósito laminado.....	25
Figura 6 - Sistema de coordenadas locais para compósitos.....	26
Figura 7 - Sistema de coordenada global para compósitos laminados.	26
Figura 8 - Pilha de lâminas na configuração [90/+45/-45/0].	27
Figura 9 - Compósito com configuração on-axis.	27
Figura 10 - Gráfico tensão x angulo de orientação das fibras.	28
Figura 11 - Compósito com configuração off-axis.....	29
Figura 12 - Processo de fabricação manual de um compósito laminado.....	31
Figura 13 - Molde para fabricação de compósitos fechado.....	32
Figura 14 - Possíveis modos de falha no ensaio de tração.	33
Figura 15 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa.	34
Figura 16 - A) Placa de 300 x 300 mm de compósito laminado fibra de vidro/resina poliéster B) Tecido de fibra de vidro unidirecional VEW 130 C) Trama do tecido.	35
Figura 17 - Molde para processo de fabricação manual composto por placa de aço, placa de vidro e esbarros.....	36
Figura 18 - Processo de cura sob pressão.	37
Figura 19 - Processo de fabricação manual.	37
Figura 20 - Fluxograma das etapas de fabricação de um compósito laminado por método manual.	38
Figura 21 - Arranjo do modelo de extração de corpos de prova no angulo correto	38
Figura 22 - Corpos de prova após extração.	39
Figura 23 - Máquina utilizada no ensaio a tração.....	40
Figura 24 - Peso da amostra do tecido de fibra de vidro.	43
Figura 25 - Modo de falha com as fibras orientadas a 0°.	51

Figura 26 - A) Modo de falha com as fibras orientadas a 30 graus; B) Modo de falha com as fibras orientadas a 45 graus C) Modo de falha com as fibras orientadas a 60 graus D) Modo de falha com as fibras orientadas a 90 graus.....52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico tensão x deformação para o angulo de fibra orientado a 0°	46
Gráfico 2 - Gráfico tensão x deformação para o angulo de fibra orientado a 30°	47
Gráfico 3 - Gráfico tensão x deformação para o angulo de fibra orientado a 45°	48
Gráfico 4 - Gráfico tensão x deformação para o angulo de fibra orientado a 60°	49
Gráfico 5 - Gráfico tensão x deformação para o angulo de fibra orientado a 90°	50
Gráfico 6 - Gráfico tensão de ruptura vs ângulo de orientação da fibra.	53
Gráfico 7 - Gráfico modulo de elasticidade vs ângulo de orientação da fibra ângulo.	54
Gráfico 8 - Gráfico alongamento máximo vs ângulo de orientação da fibra.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de matrizes poliméricas.	20
Tabela 2 - Propriedades das principais fibras.	23
Tabela 3 - Descrição dos possíveis modos de falha.....	33
Tabela 4 – Dimensões sugeridas para construção dos corpos de prova.	39
Tabela 5 - Inferências estatísticas das medidas referentes a largura em milímetro (mm).	42
Tabela 6 - Inferências estatísticas das medidas referentes a espessura em milímetro (mm).	43
Tabela 7 - Peso das fibras contidas em cada corpo de prova em gramas (g).....	44
Tabela 8 - Fração volumétrica de fibras de cada corpo de prova.	44
Tabela 9 - Peso de cada corpo de prova, em gramas (g).....	44
Tabela 10 - Densidade volumétrica de cada corpo de prova, em g/cm ³	45
Tabela 11 - Dados obtidos no ensaio de tração para a orientação de fibra a 0°.	46
Tabela 12 - Dados obtidos no ensaio de tração para a orientação de fibra a 30°.	47
Tabela 13 - Dados obtidos no ensaio de tração para a orientação de fibra a 45°.	49
Tabela 14 - Dados obtidos no ensaio de tração para a orientação de fibra a 60°.	50
Tabela 15 - Dados obtidos no ensaio de tração para a orientação de fibra a 90°.	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1.	Objetivos	17
1.1.1.	Objetivo geral	17
1.1.2.	Objetivo específico	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1.	Materiais compósitos	18
2.2.	Matriz	19
2.2.1.	Resinas termofixas	20
2.2.2.	Resinas termoplásticos	22
2.3.	Reforço	23
2.3.1.	Fibra de vidro	24
2.4.	Interface matriz reforço	25
2.5.	Laminados	25
2.5.1.	Laminados unidirecionais on-axis	27
2.5.2.	Laminados unidirecionais off-axis	28
2.5.3.	Propriedades e equações para caracterização de um laminado	29
2.6.	Laminação manual	30
2.7.	Modo de falha	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1.	Materiais	35
3.2.	Método de fabricação	36
3.2.1.	Processo de extração dos corpos de prova	38
3.3.	Métodos de ensaios	39
1.3.1	Ensaio de tração	39
1.3.2	Ensaio de determinação de Fração Volumétrica de fibras	40

1.3.3 Densidade geométrica.....	41
4 RESULTADOS	42
4.1. Propriedades físicas	42
4.1.1. Dimensões dos corpos de prova	42
4.1.2. Fração volumétrica	43
4.1.3. Densidade volumétrica	44
4.2. Propriedades mecânicas	45
4.2.1. Ensaio a tração.....	45
4.2.2. Modos de falha	51
4.2.3. Tensão de ruptura vs angulo de orientação da fibra	52
4.2.4. Modulo de elasticidade vs angulo de orientação da fibra.....	53
4.2.5. Alongamento máximo vs ângulo de orientação da fibra	54
5 CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A indústria atual impõe enormes desafios para o desenvolvimento de novos materiais que apresentem versatilidade e resistência mecânica nos seus diversos usos. Muitos destes desafios são impostos em condições severas, como atividades que apresentam elevadas cargas, altas temperaturas, pressões e ambientes corrosivos. Nesse contexto, os materiais compósitos representam um salto na engenharia e ciências dos materiais.

Os compósitos se destacam essencialmente devido fatores econômicos, a exemplo da indústria aeronáutica que utilizando os compósitos obtiveram redução no peso total das aeronaves acarretando uma economia de combustível e implicando em uma maior carga útil (NIU, 1992), e fatores de desempenho, visto que esses materiais apresentam uma elevada resistência mecânica.

Um compósito pode ser definido como a junção de dois ou mais componentes com distintas propriedades físicas e morfológicas separados por uma interface (CHEREMISINOFF, 1995). Basicamente é formado por uma matriz de composição polimérica responsável por transmitir os esforços para a outra fase, o reforço, que é designado a suporta maior parte da carga aplicada. A combinação de dois materiais diferentes permite obter propriedades únicas como baixo peso específico, alta resistência mecânica e elevada resistência a corrosão (Daniel, 2006).

Segundo a Associação Latino-americana de Materiais Compósitos – ALMACO, em 2017, o setor de compósitos no Brasil faturou R\$ 2,598 bilhões. O mercado de transporte, principalmente para o setor do agronegócio como tratores e colheitadeiras tem impulsionado o mercado, há também grande expectativa na aplicação destes para o setor de infraestrutura urbana, como a aplicação em postes para rede elétrica. Ainda segundo relatório da Transparency Market Research – TMR, o mercado global de compósitos foi avaliado em R\$ 189,2 bilhões de reais em 2016, e espera-se alcançar uma avaliação de R\$ 408 bilhões de reais em 2025.

A combinação de fibra de vidro com resina poliéster apresenta uma das configurações mais baratas e utilizadas em aplicações comerciais, essa mistura é denominada plástico reforçado com fibra de vidro (KEMERICH et al, 2013). Este compósito permite a fabricação de uma grande gama de produtos, com diversos formatos e tamanhos, como: Barcos, caixas d'água, piscinas e componentes estruturais.

A fabricação de um material compósito laminado apresenta uma versatilidade de fabricação não encontrada em outras classes de materiais. A modificação em parâmetros como tipo

de fibra e matriz, porcentagem volumétrica de cada constituinte e ângulo de orientação das fibras em relação a carga aplicada exercem grande influência nas propriedades mecânicas finais. Logo, diversificar as combinações destes parâmetros permite analisar o comportamento do material quando submetido a diversas situações e conseqüentemente, avaliar a influência destes no comportamento mecânico dos compósitos, permitindo assim um maior portfólio de dados para os projetistas.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo analisar a influência do ângulo de fibra nas propriedades obtidas por ensaio de tração do laminado constituído por fibra de vidro unidirecional com resina poliéster.

1.1.2. Objetivo específico

- I. Fabricar corpos de prova com ângulo de orientação da fibra de vidro, sob os ângulos de 0°, 30°, 45°, 60° e 90°;
- II. Determinar a influência da orientação do ângulo de fibra nas propriedades mecânicas do compósito, a saber, resistência a ruptura, módulo elástico e alongamento máximo;
- III. Determinar as propriedades físicas do compósito, sendo elas, densidade volumétrica e fração volumétrica de fibras.

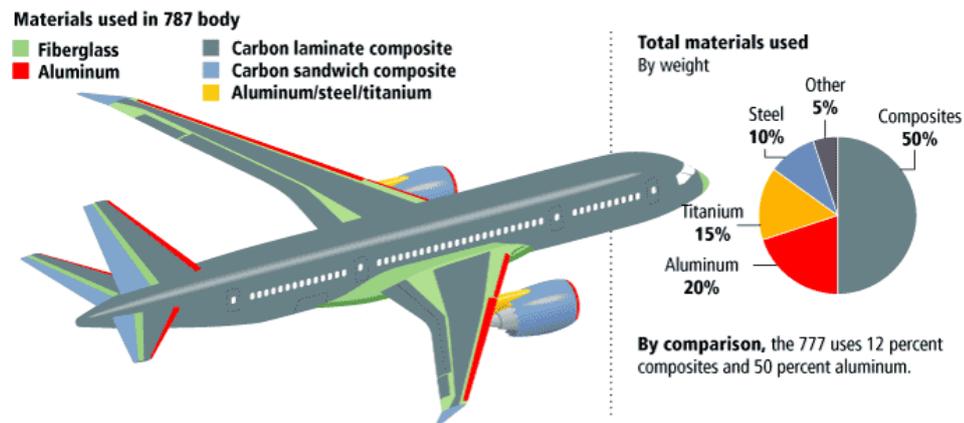
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Materiais compósitos

O surgimento de materiais compósitos, bem como as tecnologias de projeto e fabricação, é um dos avanços mais importantes na história dos materiais (KUTZ, 2015). As propriedades dos compósitos são derivadas dos seus dois constituintes, a fase contínua ou matriz, sendo esta responsável por transmitir os esforços para a outra fase, o reforço ou fase dispersa. (VENTURA, 2009). Os materiais compósitos têm como características excelentes propriedades mecânicas e físicas, com destaque para relação de baixo peso específico e alta resistência mecânica, ainda possui fabricação simples e com alta versatilidade para atender aos requisitos de projeto. No geral, os compósitos exibem grande resistência ao desgaste, corrosão e exposição a altas temperaturas. Essas características únicas fornecem ao engenheiro mecânico oportunidades de projeto impossíveis com os materiais monolíticos (não reforçados) (KUTZ, 2015).

Atualmente, os materiais compósitos possuem grande destaque na indústria aeroespacial, visto que as fibras de alta resistência constituídas de carbono, vidro, kevlar ou cerâmica podem criar aeronaves mais leves e eficientes, auxiliando na redução de consumo de combustível e no alcance de uma maior velocidade (NIU,1992). Segundo Justin Hale, vice chefe do departamento de mecânica da companhia Boing, no Boeing 787 Dreamliner, os compósitos de fibra são usados para até 50% do peso total como indicado na Figura 1. Também é observado aplicações em componentes de máquinas, motores de combustão interna, estruturas de automóveis, trens e componentes mecânicos, como freios, eixos de acionamento, volantes, tanques e vasos de pressão.

Figura 1- Infográfico dos materiais utilizados na fabricação do Boeing 787.



Fonte: Companhia aérea Boeing.

2.2. Matriz

A matriz em um compósito é a fase contínua, que fornece distribuição uniforme de carga aos componentes do reforço devido uma adequada adesão entre constituintes diferentes. A matriz, protege a superfície do composto contra abrasão, danos mecânicos e corrosão ambiental (AKOVALI, 2001). As matrizes poliméricas geralmente são materiais viscoelásticos relativamente fracos e de baixa rigidez (KUTZ, 2015). Em um compósito laminado as características termomecânicas são governadas pela matriz.

Segundo Akovali (2001), a matriz deve cumprir diversos requisitos dependendo da aplicação do compósito, entre eles:

- I. Ser aderente ao segundo constituinte;
- II. Fluir facilmente para completa penetração e eliminação de vazios;
- III. Ser suficientemente elástico;
- IV. Ter baixo encolhimento;
- V. Ser facilmente processável;
- VI. Possuir resistência química adequada;
- VII. Capacidade para baixas e altas temperaturas;
- VIII. Estabilidade dimensional.

Uma classificação simples para as matrizes poliméricas as divide em termofixos e termoplásticos (MATTHEWS; RAWLINGS, 1994).

2.2.1. Resinas termofixas

Resinas termofixas ou termorrígidas têm como principal característica a transformação irreversível quando submetidas às influências de calor, isso devido à formação de ligações covalentes (BILLMEYER, 1984).

Os termofixos mais encontrados na indústria são epóxi, poliéster e resinas fenólicas. Estas resinas são de baixo custo, tem resistência à umidade e raios ultravioletas, apresentam resistência a corrosão, além de fácil manuseio e processamento (GAMA, 2018). Contudo, segundo Kutz (2015) estes são materiais viscoelásticos relativamente fracos e de baixa rigidez. Essas resinas são fornecidas em estado líquido, entretanto após adição de catalisador ou acelerador, são transformadas para o estado sólido. As propriedades das principais resinas termofixas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades de matrizes poliméricas.

	Densidade [g/cm³]	Modulo de Young [GPa]	Tensão de ruptura [MPa]	Elongação [%]
Epoxy (1)	1.1 - 1.4	3 - 6	35 - 100	1 - 6
Polyester (1)	1.2 - 1.5	2 - 4.5	40 - 90	2
Polypropylene (2)	0.9	1 - 4	25 - 38	>300
Nylon (2)	1.14	1.4 - 2.8	60 - 75	40 - 80
Polycarbonate (2)	1.06 - 1.2	2.2 - 2.4	45 -70	50 -100
Polyetherimide (2)	1.27	3.3	110	60

Nota: (1) = termofixa, (2) = termoplástica

Fonte: Adaptado de Kutz, 2015.

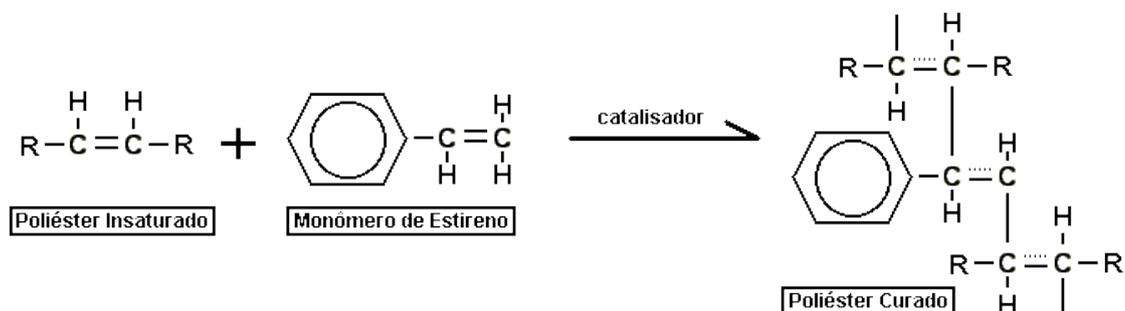
De acordo com Akovali, (2001), os polímeros de matriz termoendurecíveis são geralmente considerados em três grupos:

- I. Matrizes termofixas de baixa temperatura (poliésteres);
- II. Matrizes termofixas de temperatura média (fenólicas);
- III. Matrizes termofixas de alta temperatura (poliamida e bis-maleimidadas).

Os poliésteres insaturados são os polímeros mais amplamente utilizados na indústria, sua estrutura básica é composta por três componentes, a princípio por um ácido insaturado que possui pontos reativos com ligação dupla, em segundo plano por um glicol ou bi-álcool, que aumenta a cadeia polimérica, e, por último um ácido saturado que influencia o nível de espaçamento das moléculas entre os ácidos insaturados (NASSEH, 2007). A viscosidade do poliéster é função do estireno, para os termofixos é usado o monômero vinílico, que serve de solvente e agente de copolimerização no processo de cura (REIS, 2016).

A resina de poliéster curado é representada por um poliéster insaturado dissolvido em um monômero de estireno, como demonstrado na Figura 2. Pertencem à família do poliéster insaturado as resinas ortoftálicas, isoftálicas, bisfenólicas e tereftálicas, suas respectivas estruturas moleculares são mostradas na Figura 3, sendo a resina ortoftálica a mais comum.

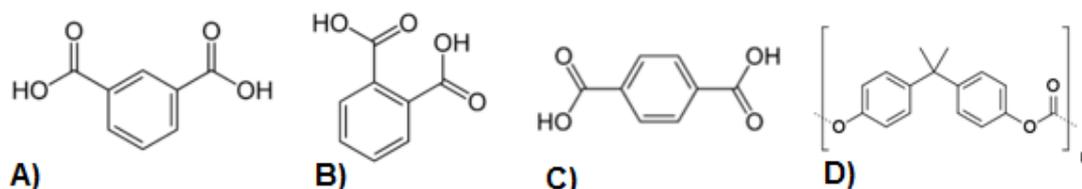
Figura 2 - Reação química do poliéster insaturado.



Fonte: Adaptado de Silaex química LTDA.

As resinas ortoftálicas não apresentam bom desempenho em meios ácidos e alcalinos, nem na presença de solventes aromáticos e halogenados, no mais apresentam ainda baixa resistência ao calor (PINTO, 2002). Contudo, quando devidamente formuladas, apresentam propriedades mecânicas muito boas (KEMERICH, 2013). As isoftálicas e as tereftálicas tem adequada resistência em ambientes úmidos e moderadamente agressivos, enquanto que as bisfenólicas possuem uma maior inércia química e suportam ambientes muito agressivos (IBEX, 2019).

Figura 3 - Estrutura químicas de ácidos: A) Estrutura molecular ácido isoftálico; B) Estrutura molecular ácido ortoftálico; C) Estrutura molecular ácido tereftálico D) Estrutura molecular do bisfenol A.



Fonte: Adaptado de Akovali, 2015.

Geralmente os poliésteres insaturados tem inibidores na sua formulação para dar maior estabilidade de armazenamento, evitando uma reação entre o monômero e a parte polimérica antes da adição de catalisador (NASSEH, 2007). A resina é curada pelo uso de um radical livre catalisador, cuja taxa de decomposição determina o tempo de cura (KUTZ,2015). O processo de cura tem por característica a liberação de calor, ou seja, é uma reação exotérmica, esse comportamento é devido uma queda na viscosidade, motivada pelo aumento da temperatura interna da formulação (COSTA et al,1999). Os catalisadores usados são geralmente do grupo peróxido ou mais conhecidos como MEKP. Os tempos de cura podem variar de apenas 15 segundos a um mês e podem variar da temperatura ambiente até 150 °C. Depois que o poliéster estiver curado, é um sólido duro e transparente com uma cor clara (CHEREMISINOFF, 1995).

2.2.2. Resinas termoplásticas

Os termoplásticos amolecem e fluem quando calor e pressão são aplicados em mudanças reversíveis. Estes componentes são opções mais baratas, cujas características compreendem baixa densidade, boa resistência química e um balanço entre rigidez e tenacidade (EL-MAJDOUBI; VU-KHANH, 2003). Estes são divididos em três classes principais: amorfa, cristalina e cristal líquido (KUTZ, 2015).

2.3. Reforço

O segundo constituinte do compósito é o reforço. Estes são responsáveis por suportar a maior parte dos carregamentos aplicados ao compósito, geralmente possuem forma de fibras, partículas e tecidos (GAMA, 2018). As fibras utilizadas em reforços mecânicos são constituídas de fibra de carbono, fibra de vidro e aramida, tendo suas principais propriedades demonstradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades das principais fibras.

Material	Densidade (g/cm³)	Tensão de ruptura (MPa)	Modulo de elasticidade (GPa)	Ponto de fusão (°C)
POLÍMEROS				
Kevlar	1.44	4480	124	500
Nylon	1.14	83	3.5	249
Polietileno	0.97	21-48	0.3-0.7	147
VIDRO				
E-glass	2.55	3450	72.4	<1725
S-glass	2.50	4480	86.9	<1725
CARBONO				
HS (alta tensão de ruptura)	1.75	5650	276	3700
HM (alto modulo)	1.9	1860	531	3700

Fonte: Adaptado de Kutz, 2015.

A resistência e rigidez fornecida ao compósito podem sofrer alterações de acordo com parâmetros da fibra tais como, tipo, tamanho, diâmetro grau de concentração e disposição na matriz (ASKELAND, 2011). Estes componentes possuem disposições na matriz de várias maneiras, como fibras aleatoriamente distribuídas ou orientadas em uma direção de interesse, ou ainda, como particulado, fibras descontínuas e fibras contínuas, ilustrado na Figura 4 (VANDERLEI, 2016).

Figura 4 - Disposição do alinhamento das fibras na matriz.



Fonte: Adaptado de Daniel, 2006.

2.3.1. Fibra de vidro

Devido ao seu baixo custo, alta resistência à tração, alta resistência ao impacto e boa resistência química, as fibras de vidro são amplamente utilizadas em aplicações comerciais (CAMPBELL, 2010). Comparada com as fibras de carbono, tem um menor módulo de rigidez e propriedades a fadiga inferior. Existem muitos compostos químicos que formam os vidros, por exemplo, a sílica, o oxinitrito e o fosfato, porém a sílica é a mais importante para uso em compósitos.

Os dois grupos de fibra de vidro mais utilizados para fins de reforço, são respectivamente o tipo E formada por borossilicato de cálcio com baixo teor de óxido alcalino e é a mais amplamente utilizada na indústria (AKOVALI, 2001). A fibra de Vidro tipo S é formada por $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$, tem 40% mais resistência que a fibra tipo E e custo mais elevado (CAMPBELL, 2010; MATTHEWS; RAWLINGS, 1994).

Segundo a empresa do ramo de compósitos, Central Glass Co, a fibra de vidro longa é uma fibra em forma de filamento fino de 6 a 24 microns, estas são produzidas pela ejeção de

vidro fundido, que é derretido em um forno de 1.600 graus centígrados, através de bocais de platina a 3.000 m por minuto.

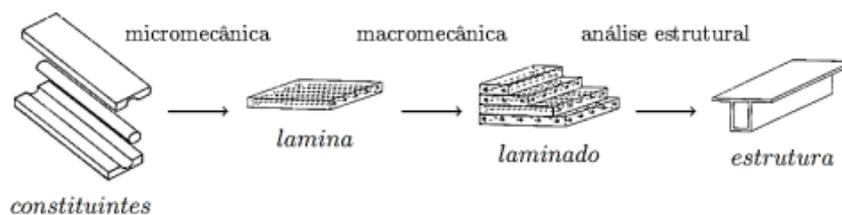
2.4. Interface matriz reforço

A interface matriz/reforço é um fator determinante na resistência do compósito, visto que é responsável por transmitir os esforços da matriz para as fibras (MARINUCCI, 2011 apud BRANDÃO, 2015). Sua localização é no limiar entre os dois constituintes, ou seja, região resultante da interação reforço/matriz, com composição química e morfologia diferentes (CAHN, 1993 apud RAZERA, 2006). Dois fatores são os principais responsáveis pela boa interação dos dois componentes, sendo eles o grau de molhabilidade das superfícies e as forças coesivas responsáveis pela adesividade desta região (BRANDÃO, 2015).

2.5. Laminados

Um compósito laminado é constituído por duas ou mais lâminas empilhadas em orientações preferenciais. As propriedades de um laminado dependem basicamente da espessura, orientação e da sequência de empilhamento, esses parâmetros podem ser mensurados de acordo com a carga aplicada, o que gera maior flexibilidade de projeto (BARRETO; DUNCAN, 2017; SANTOS, 2017). Um laminado pode ser observado por duas perspectivas, conforme Figura 5. A micromecânica analisa o reforço e a matriz em um nível microscópico, portanto, através das propriedades da resina e da fibra estima-se as propriedades da lâmina. A macromecânica analisa o compósito em escala macroscópica, ou seja, o comportamento mecânico é determinado em função do arranjo de lâminas (GALLI, 2016).

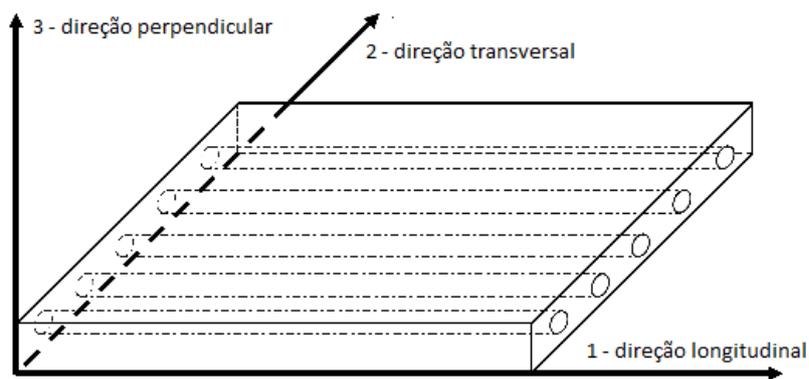
Figura 5 - Nível de análise da estrutura de um compósito laminado.



Fonte: adaptado de Kollár, 2003.

Os compósitos laminados apresentam comportamento ortotrópico, visto que, as propriedades num plano são iguais, mas distintas das que ocorrem numa direção ortogonal a esse plano (BARRETO; DUCAN,2017). Portanto, é importante definir um sistema de coordenadas que descreva as principais direções dos laminados. Os eixos principais do material são: 1) direção longitudinal à fibra, 2) direção transversal à fibra e 3) direção perpendicular à fibra, demonstrado na Figura 6. Dessa forma, esta descrito o sistema de coordenadas local.

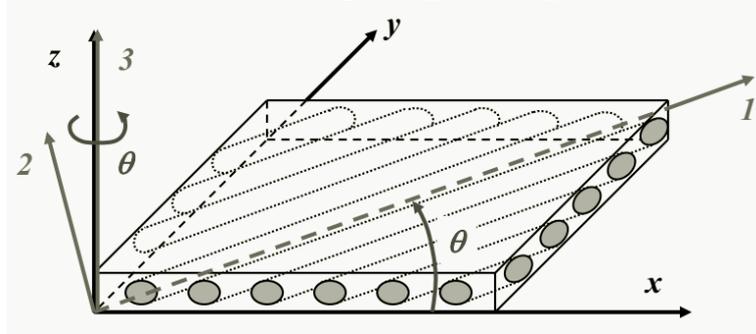
Figura 6 - Sistema de coordenadas locais para compósitos.



Fonte: Adaptado de Almeida, 2017.

Um sistema de coordenadas global tipo $\{x, y, z\}$ é necessário, para definir a orientação da fibra, conforme Figura 7, sendo considerado o ângulo entre a direção longitudinal da fibra e o eixo x (SIQUEIRA, 2009).

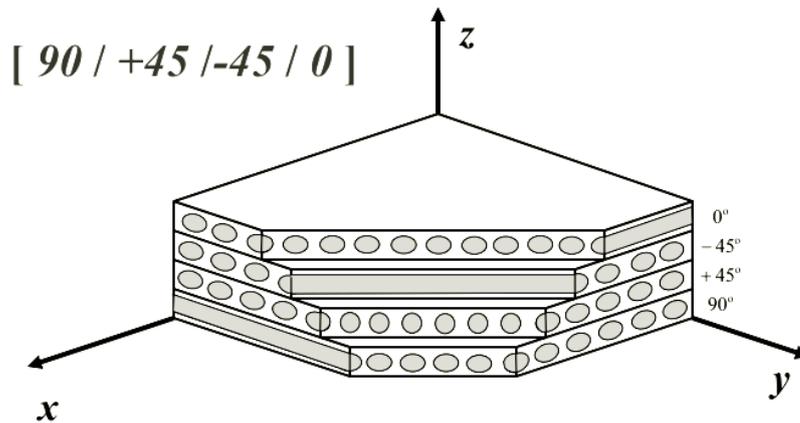
Figura 7 - Sistema de coordenada global para compósitos laminados.



. Fonte: Adaptado de Almeida,2017.

Um conjunto de lâminas podem ser descritas pela orientação dos ângulos e ordenados do fundo do laminado para o topo. Logo, a nomenclatura é representada por $[\alpha / \beta / \dots / \omega]$ onde α representa o ângulo de orientação da primeira camada, β representa o ângulo da segunda camada, e assim por diante. (SANTOS, 2016). A Figura 8 representa a nomenclatura $[90/+45/-45/0]$.

Figura 8 - Pilha de lâminas na configuração $[90/+45/-45/0]$.

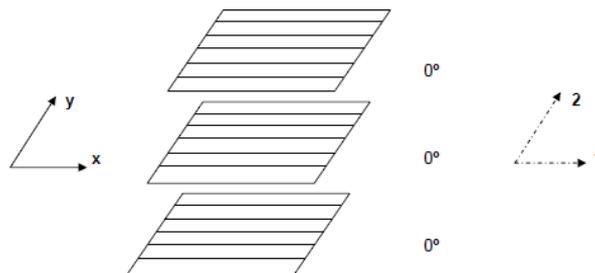


Fonte: Adaptado de Almeida, 2017.

2.5.1. Laminados unidirecionais on-axis

Todas as lâminas possuem a mesma direção e o ângulo entre as coordenadas locais e a as coordenadas globais é 0° , ou seja, são coincidentes, conforme Figura 9 (LEITÃO, 2007).

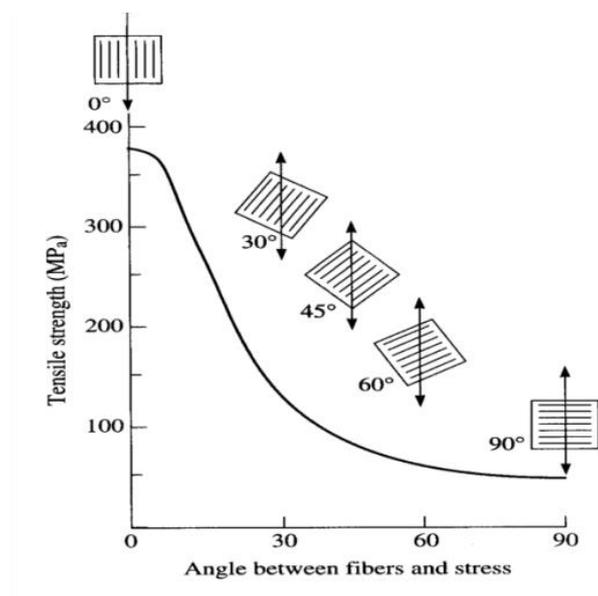
Figura 9 - Compósito com configuração on-axis.



Fonte: Retirado de Leitão (2007).

As lâminas unidirecionais (0°) são muito fortes e rígidas na direção 0° , no entanto, são muito fracas na direção 90° , visto que, nessa condição a carga deve ser suportada majoritariamente pela matriz polimérica que é muito mais fraca (CAMPBELL, 2010). Portanto as orientações unidirecionais fornecem más propriedades se a carga aplicada não for na direção das fibras, como desmostrado na Figura 11.

Figura 10 - Gráfico tensão x ângulo de orientação das fibras.

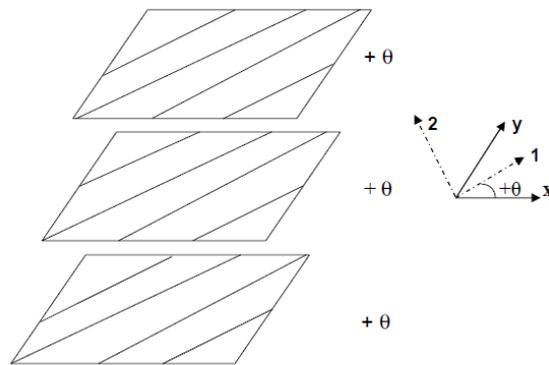


Fonte: Adaptado de Askeland.

2.5.2. Laminados unidirecionais off-axis

Nos laminados unidirecionais off-axis, os sistemas de coordenadas não são mais coincidentes, há um ângulo de orientação das fibras que está deslocado de um determinado valor entre os eixos do sistema local e do sistema global, demonstrado na Figura 10 (LEITÃO, 2007).

Figura 11 - Compósito com configuração off-axis.



Fonte: Retirado de Leitão (2007).

2.5.3. Propriedades e equações para caracterização de um laminado

Segundo Daniel (2006), os laminados unidirecionais são caracterizados pelas seguintes propriedades:

- I. E_1, E_2, E_3 = Módulo de Young ao longo das direções principais do laminado;
- II. G_{12}, G_{23}, G_{13} = Módulo de cisalhamento nos planos 1-2, 2-3 e 1-3, respectivamente;
- III. $\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$ = Coeficiente de Poisson (o primeiro algarismo refere-se à direção do carregamento, enquanto o segundo refere-se às direções das tensões. Esses valores são diferentes de $(\nu_{21}, \nu_{32}, \nu_{31})$);
- IV. F_{1t}, F_{2t}, F_{3t} = Resistência à tração ao longo das direções principais do laminado;
- V. F_{1c}, F_{2c}, F_{3c} = Resistência à compressão ao longo das direções principais do laminado;
- VI. F_{12}, F_{23}, F_{31} = Resistência ao cisalhamento nos planos 1-2, 2-3 e 3-1, respectivamente.

Assim, algumas propriedades dos compósitos laminados podem ser visualizadas pelas seguintes equações:

Porcentagem de volume da fibra: $V_f = \frac{\text{Volume das fibras}}{\text{Volume do compósito}}$ Equação 1;

Porcentagem de peso da fibra: $W_f = \frac{\text{Peso das fibras}}{\text{Peso do compósito}}$ Equação 2;

Porcentagem de volume da matriz: $V_m = \frac{\text{Volume das matriz}}{\text{Volume do compósito}}$ Equação 3;

Porcentagem de peso da matriz: $W_m = \frac{\text{Peso das matriz}}{\text{Peso do compósito}}$ Equação 4;

Porcentagem de vazios = $1 - V_f - V_m = \frac{\text{Volume dos vazios}}{\text{Volume do compósito}}$ Equação 5.

2.6. Laminação manual

A laminação manual, é um dos mais antigos métodos de fabricação de compósitos. Este processo de laminação consiste na aplicação de camadas de resina e reforço, aplicadas manualmente sobre a superfície do molde, uma a uma, até obter-se a espessura desejada do componente (AKOVALI, 2001). A moldagem por contato emprega um dos mais baratos tipos de processo, geralmente cura à temperatura ambiente, no entanto, o calor pode ser aplicado para acelerar o processo de cura (CHEREMISINOFF, 1995).

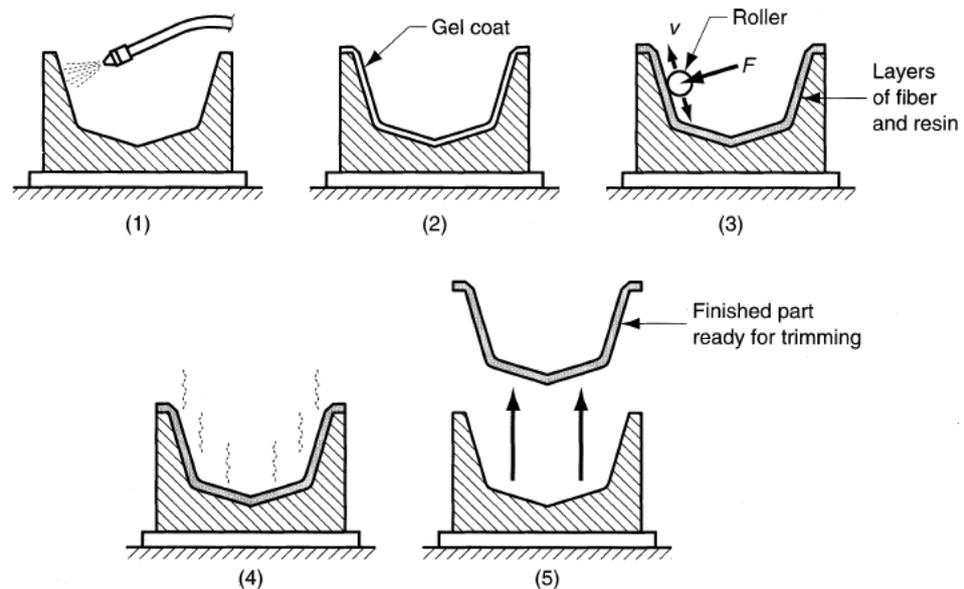
Para execução da laminação manual segue-se cinco etapas, como demonstrado na Figura 12.

- I. Limpeza do molde para melhor acabamento superficial;
- II. Aplicação de desmoldante para facilitar a extração do compósito, geralmente é utilizado apenas um filme de álcool polivinílico (PVAL) aplicado na superfície do molde (VOGEL, 2002).
- III. O terceiro passo inicia após a secagem parcial do desmoldante, em seguida, se dá o processo de empilhamento ou lay-up de camadas sucessivas de resina e

fibra, onde cada camada é consolidada por um rolo, garantindo que a resina impregne na fibra e as bolhas de ar sejam removidas das lâminas (AKOVALI, 2001).

- IV. A quarta etapa exige cuidado, devido ao caráter exotérmico do processo de cura. Assim, só é possível realizar de 4 a 5 camadas por sessão de laminação manual sob o risco de provocar empenamentos, distorções e contrações acentuadas no produto moldado (ABMACO, 2009 apud BITTENCOURT, 2015).
- V. Por último, a etapa de extração do componente e acabamento superficial

Figura 12 - Processo de fabricação manual de um compósito laminado.

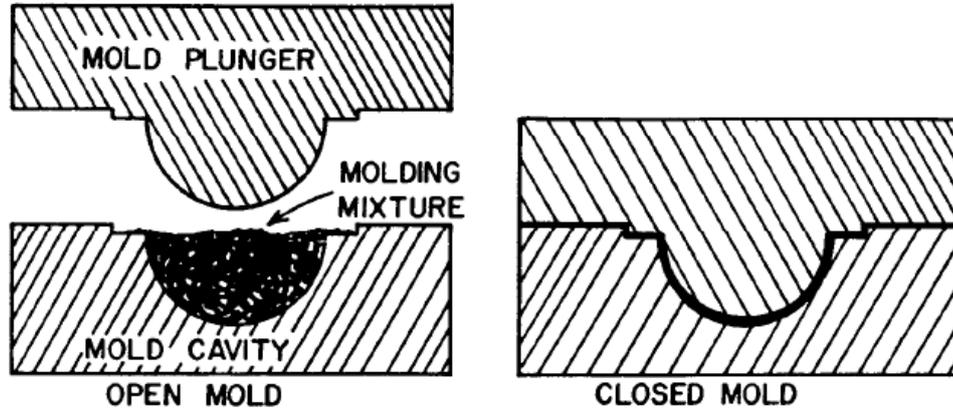


Fonte: Adaptado de Akovali, 2015.

Geralmente este processo é realizado em molde aberto, porém, eles apresentam a vantagem de apenas uma superfície apresentar bom acabamento superficial. A laminação manual também pode ser realizada em molde fechado, conforme Figura 13, com as vantagens de obter superfície lisa dos dois lados do laminado. No mais, ainda é possível a aplicação de carga

sobre o molde por meio de prensas hidráulicas, assim o processo de cura sobre pressão pode reduzir a quantidade de vazios.

Figura 13 - Molde para fabricação de compósitos fechado.



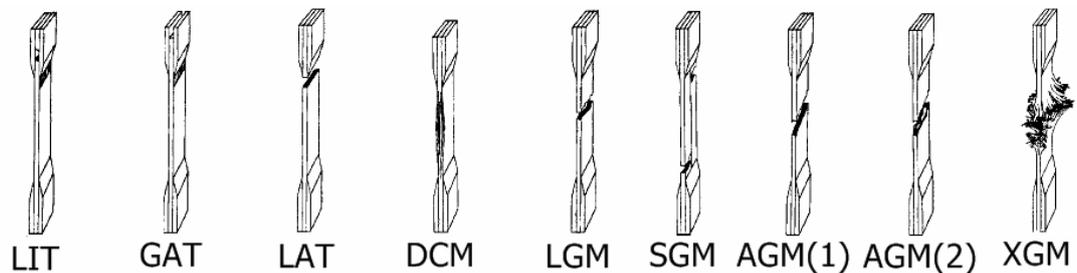
Fonte: Adaptado de Cheremisinoff, 1995.

2.7. Modo de falha

Os compósitos laminados geralmente exibem muitas falhas locais antes da ruptura em duas ou mais peças distintas. Assim, a “primeira falha” não corresponde necessariamente a “falha final”. As “falhas locais” são chamadas de danos e o desenvolvimento de falhas locais adicionais com aumento de carga ou tempo é chamado de “acumulo de dano” (HERAKOVICH, 1998).

A fratura da fibra ocorre sob carga de tração quando a tensão de tração axial máxima permitida da fibra é excedida. Os mecanismos de falha em nível micro incluem fratura da fibra, flambagem (torção), arrancamento da fibra, separação desta, ou ainda descolagem da matriz, trinca da matriz e trincas radiais (HERAKOVICH, 1998).

A norma D 3039/D 3039M define os possíveis modos de falha no ensaio a tração de compósitos, representado na Figura 14, e a Tabela 3 descreve os modos de falhas.

Figura 14 - Possíveis modos de falha no ensaio de tração.

Fonte: Adaptado da norma D 3039/D 3039M.

Tabela 3 - Descrição dos possíveis modos de falha.

Código	Definição de código (normativo)	Definição de código
LIT	<i>Lateral – inside – top</i>	Lateral dentro da lingueta da garra superior.
GAT	<i>Grip/Tab - at grip/tab - top</i>	Desaderência da lingueta na garra superior.
LAT	<i>Lateral - at grip – top</i>	Lateral na base da lingueta da garra superior
DGM	<i>Edge delamination – gage – middle</i>	Delaminação na borda do corpo de prova e no meio do galgo
LGM	<i>Lateral - gage – middle</i>	Lateral e no meio do galgo
SGM	<i>Longitudinal splitting - gage – middle</i>	No meio do galgo com fendas longitudinais
AGM	<i>Angled - gage – middle</i>	Angular e no meio do galgo
XGM	<i>Explosive - gage – middle</i>	Explosiva e no meio do galgo

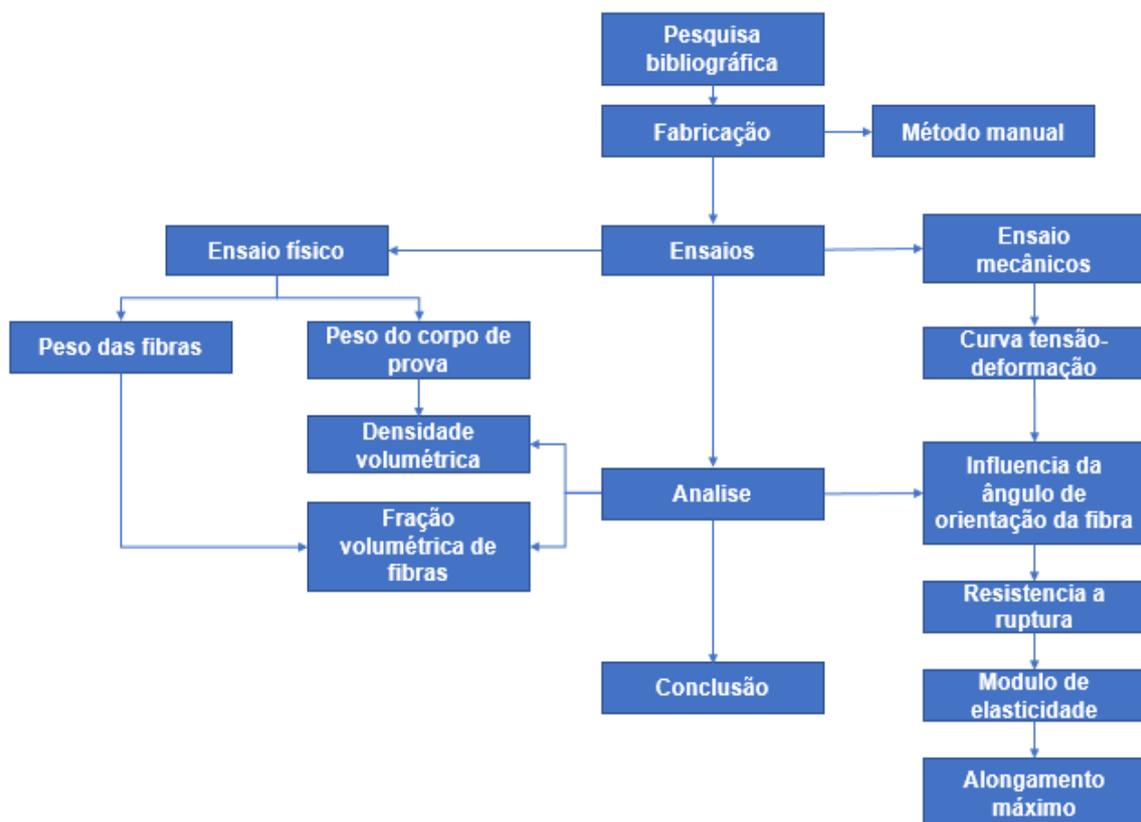
Fonte: Adaptado de Gama.

Os corpos de prova que apresentarem os modos de falha LIT e GAT deverão ser descartados das análises.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A priori, realizou-se uma extensa pesquisa bibliográfica sobre o tema proposto. A pesquisa se desenvolveu com caráter experimental, sendo classificada como pesquisa quantitativa. Em seguida, iniciou-se o processo de fabricação dos corpos de prova por método manual. Com isto, deu-se prosseguimento aos ensaios, divididos em duas categorias - ensaios físicos, abordando a obtenção dos pesos das fibras e corpos de prova, e os ensaios mecânicos que forneceram a curva tensão x deformação. Posteriormente, essas informações foram analisadas, a nível dos ensaios físicos analisou-se a densidade volumétrica e fração volumétrica de fibras, enquanto a análise dos ensaios mecânicos teve foco na influência da orientação da fibra na resistência a ruptura, módulo de elasticidade e alongamento máximo. Por fim, foi elaborada uma conclusão dos fatos. Essas etapas estão associadas conforme a Figura 15.

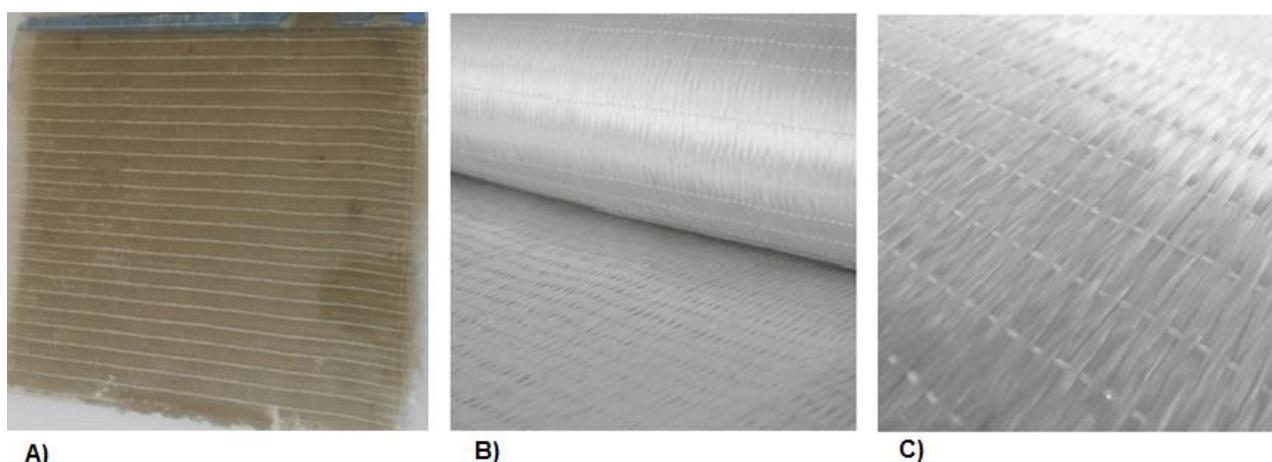
Figura 15 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa.



3.1. Materiais

Para confecção dos corpos de prova foram construídas cinco placas de dimensões de 300 x 300 mm, representado na Figura 16A. Para o reforço foi utilizado um tecido VEW 130 de fibra de vidro tipo E com trama unidirecional e filamentos transversais em termoplástico como na Figura 16B e 16C, fabricado por Barracuda Advanced Composites, com densidade de 450g/m², ainda foram empregado cinco laminas unidirecionais desta fibra por laminado. Para matriz foi selecionada a resina poliéster arapol 50504 e o catalisador amberox m60.

Figura 16 - A) Placa de 300 x 300 mm de compósito laminado fibra de vidro/resina poliéster B) Tecido de fibra de vidro unidirecional VEW 130 C) Trama do tecido.



A)

B)

C)

Fonte: Elaborada pelo autor e E-composite.

Foram utilizados recipientes de 100 ml para formação da mistura resina mais catalisador e uma haste de plástico para homogeneização da matriz. Um rolete de laminação foi utilizado para distribuir uniformemente a matriz no laminado e retirar as bolhas de ar. Uma espátula rígida de aço polido (4 polegadas) foi utilizada para remover o laminado do molde. Para o acabamento lateral e superficial foi utilizado a lixa T223 600 da marca Norton.

Para confecção do molde foram utilizadas duas placas de vidro temperado 300x400x4mm, com intuito de proporcionar um bom acabamento superficial, estas foram colocadas entre duas placas de aço 400x400x3mm para garantir maior resistência a flexão do molde e por fim garantir uma espessura uniforme ao conjunto. Para controle de espessura foi utilizado esbarros de 3 mm entre as placas do molde, Figura 17.

Figura 17 - Molde para processo de fabricação manual composto por placa de aço, placa de vidro e esbarros.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A prensa hidráulica com capacidade de 30 Toneladas P30T Ribeiro, mostrado Figura 18, foi empregada no processo de cura sob pressão do compósito.

Para extração dos corpos de prova, utilizou-se uma lixadeira 4.1/2 gws 6115 da marca Bosch com disco de corte 115x1x22 da marca Waves.

Para realização do ensaio de tração utilizou-se a máquina universal de ensaios eletromecânica e microprocessada, EMIC modelo DL 10000, com carga máxima 100kN. A garra utilizada para fixação dos corpos de prova foram as auto travantes por efeito cunha. O software utilizado para análise dos dados foi o TESC.

Em todo processo de fabricação foi empregado EPI's de segurança tais como, luvas, máscara e capa de proteção em pvc com mangas longas.

3.2. Método de fabricação

O processo de fabricação empregado foi o de contato manual e a cura do laminado foi realizado sob pressão por auxílio de uma prensa hidráulica com carga de uma tonelada, demonstrado na Figura 18.

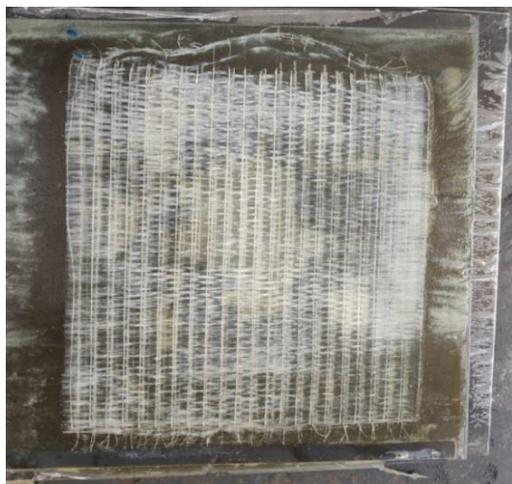
Figura 18 - Processo de cura sob pressão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a montagem do molde as duas placas de vidro foram cobertas por desmoldante do tipo PVAL incolor e após dez minutos foram empilhadas em sequência duas camadas, uma de matriz e uma de reforço. Na aplicação da camada de resina poliéster misturada ao catalisador, era processado quantidade suficiente apenas para a camada a ser trabalhada, visto que, o tempo de trabalho da matriz era curto. Do peso da mistura, a proporção de 1,2% corresponde ao catalisador. A camada de fibras foi posicionada de forma a se obter um máximo alinhamento do reforço. Ao final da última camada, Figura 19, o molde foi fechado e posicionado centralizado com a carga na prensa hidráulica. O processo de cura durou 8 horas.

Figura 19 - Processo de fabricação manual.



Fonte: elaborado pelo autor.

Todas as etapas para fabricação manual estão descritas no fluxograma a seguir na Figura 20.

Figura 20 - Fluxograma das etapas de fabricação de um compósito laminado por método manual.

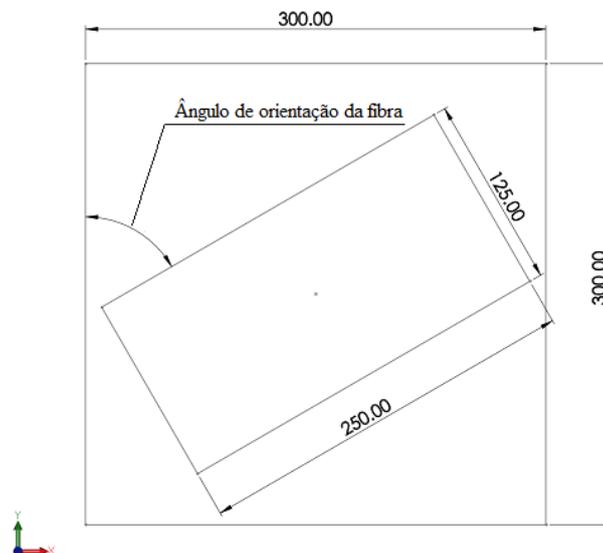


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1. Processo de extração dos corpos de prova

Após o processo de fabricação finalizado, com auxílio de esquadros foi desenhado nas placas os ângulos de 0° , 30° , 45° , 60° e 90° . Com o ângulo definido foi recortado um retângulo $250 \times 12,5 \text{ mm}$, mostrado na Figura 21, e posteriormente foram extraídos 5 corpos de prova em sequência.

Figura 21 - Arranjo do modelo de extração de corpos de prova no ângulo correto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a extração, os corpos de prova foram tagueados de acordo com o ângulo e a quantidade, como demonstrado na Figura 22, facilitando assim a identificação e controle durante o ensaio de tração.

Figura 22 - Corpos de prova após extração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3. Métodos de ensaios

1.3.1 Ensaio de tração

Como determina a norma D 3039/D 3039M, para cada ângulo de fibra analisado são necessários 5 corpos de prova, assim, as 5 direções em estudo totalizam 25 corpos de prova. A norma determina dimensões adequadas para estes, descritas na Tabela 4. Cada dimensão deve ser coletada em 5 pontos diferentes ao longo de cada corpo de prova. A velocidade de ensaio é de 2 mm/mim.

Tabela 4 – Dimensões sugeridas para construção dos corpos de prova.

Orientação da fibra	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Altura da tab (mm)
0° unidirecional	15	250	1	56
90° unidirecional	25	175	2	25
Aleatórios	25	250	2.5	--

Fonte: Adaptado da norma D 3039/D 3039M.

Por seguinte, todos os corpos de prova, individualmente, foram posicionados entre as garras da máquina de tração com uma distância de 125 mm, tornando 50% da superfície do corpo de prova em contato com as garras, evitando seu deslizamento.

Para obter a mesma fração volumétrica de fibras todos corpos de prova possuem as mesmas dimensões pré-definidas.

Figura 23 - Máquina utilizada no ensaio a tração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao final dos ensaios, os corpos de prova foram coletados para caracterização dos modos de falha.

1.3.2 Ensaio de determinação de Fração Volumétrica de fibras

Sabendo o volume do corpo de prova, peso e densidade das fibras inseridas no compósito é possível determinar a fração volumétrica através da Equação 6.

$$V_f = \frac{m_f}{V_{cp} \cdot \rho_f} \quad \text{Equação 6.}$$

Onde.

V_f = Volume das fibras, em cm^3 ;

V_{cp} = Volume do corpo de prova, em cm^3 ;

m_f = Massa das fibras, em g;

ρ_f = Densidade das fibras, em g/cm^3 .

Para determinar a massa de fibras é necessário conhecer a densidade (em unidades de massa por unidade de área), as dimensões e quantidade de camada de fibra no corpo de prova, conforme Equação 7.

$$m_f = Q_c \cdot D_s \cdot A_u \quad \text{Equação 7.}$$

Onde

Qc = Quantidade de camadas no laminado – nº de camadas;

Ds = Densidade de superfície, em g/cm^2 ;

Au = Área da superfície de cada camada de fibras, em cm^2 .

A fração volumétrica de fibras é diretamente proporcional as propriedades mecânicas do compósito, visto que o reforço forma o componente estrutural. Em princípio, quanto maior o teor de fibras, melhor será o desempenho do compósito (Garcez, 2005). Normalmente o volume de fibras varia entre 30% a 65% (Herakovich, 1998).

1.3.3 Densidade geométrica

A massa específica ou densidade de uma substância é determinada mediante a Equação 8.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Equação 8.}$$

Onde,

m = massa (unidade de massa)

v = volume (unidade de volume)

No sistema SI (sistema internacional de unidades) a unidade para densidade é descrita em função de Kg/m^3 ou g/cm^3 .

4 RESULTADOS

4.1. Propriedades físicas

4.1.1. Dimensões dos corpos de prova

Como determina a norma ASTM D 3039/D 3039M, cada corpo de prova foi medido em 5 pontos distintos com um paquímetro. Posteriormente, os dados coletados sofreram inferências estatísticas. Logo, as dimensões de cada corpo de prova são determinadas pela média dos 5 pontos coletados.

A Tabela 5 demonstra a média, desvio padrão e coeficiente de variação das medidas referente a largura dos corpos de prova, com coeficiente de variação médio de 0,09%.

Tabela 5 - Inferências estatísticas das medidas referentes a largura em milímetro (mm).

		0 °	30 °	45 °	60 °	90 °
CP 01	Média	25.52	25.23	25.76	26.16	25.84
	Desvio padrão	0.113	0.149	0.148	0.430	0.235
	coeficiente variação	0.004	0.006	0.006	0.016	0.009
CP 02	Média	25.28	25.49	26.13	25.52	25.86
	Desvio padrão	0.212	0.172	0.327	0.152	0.072
	coeficiente variação	0.008	0.007	0.012	0.006	0.003
CP 03	Média	25.59	25.62	26.34	25.63	26.26
	Desvio padrão	0.232	0.153	0.222	0.392	0.355
	coeficiente variação	0.009	0.006	0.008	0.015	0.014
CP 04	Média	25.29	25.32	26.31	25.06	26.53
	Desvio padrão	0.064	0.301	0.290	0.109	0.064
	coeficiente variação	0.003	0.012	0.011	0.004	0.002
CP 05	Média	25.47	25.32	26.34	26.15	25.19
	Desvio padrão	0.178	0.153	0.222	0.392	0.355
	coeficiente variação	0.007	0.006	0.008	0.015	0.014

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 6 demonstra a média, desvio padrão e coeficiente de variação das medidas referente a espessura dos corpos de prova, com coeficiente de variação médio de 2,1%.

Tabela 6 - Inferências estatísticas das medidas referentes a espessura em milímetro (mm).

Corpos de prova	Inferências estatísticas	0 °	30 °	45 °	60 °	90 °
CP 01	Média	3.114	3.092	3.040	3.076	3.160
	Desvio padrão	0.061	0.036	0.058	0.023	0.077
	coeficiente variação	0.019	0.012	0.019	0.007	0.024
CP 02	Média	3.150	3.000	3.144	3.060	2.966
	Desvio padrão	0.052	0.034	0.071	0.178	0.065
	coeficiente variação	0.017	0.011	0.023	0.058	0.022
CP 03	Média	3.196	3.100	3.038	3.030	3.071
	Desvio padrão	0.037	0.050	0.086	0.038	0.110
	coeficiente variação	0.012	0.016	0.028	0.013	0.036
CP 04	Média	3.134	3.128	3.062	3.036	3.140
	Desvio padrão	0.066	0.045	0.036	0.109	0.046
	coeficiente variação	0.021	0.014	0.012	0.036	0.015
CP 05	Média	3.276	3.226	3.008	3.006	2.912
	Desvio padrão	0.058	0.061	0.075	0.062	0.052
	coeficiente variação	0.018	0.019	0.025	0.021	0.018

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2. Fração volumétrica

Para determinar a densidade superficial do tecido de fibra de vidro, utilizou-se uma amostra com dimensões 110,56mmx75,76mm e peso de 3.548g, Figura 24, resultando em uma densidade superficial de 0.0423 g/cm².

Figura 24 - Peso da amostra do tecido de fibra de vidro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por tanto, mediante a Equação 7, o peso das fibras em cada corpo de prova foi determinado, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Peso das fibras contidas em cada corpo de prova em gramas (g).

Corpos de prova	0 °	30 °	45 °	60 °	90 °
CP 01	14.859	14.690	14.997	15.230	15.047
CP 02	14.717	14.842	15.216	14.859	15.055
CP 03	14.897	14.916	15.339	14.921	15.292
CP 04	14.725	14.741	15.320	14.590	15.445
CP 05	14.832	14.740	15.337	15.228	14.668

Fonte: Elaborado pelo autor.

A densidade volumétrica da fibra de vidro tipo E é definida na literatura como 2.55 g/cm³. Portanto, a fração volumétrica de fibras é definida, conforme a Equação 6, e demonstrado na Tabela 8. O maior e menor valor de fração volumétrica de fibras são, respectivamente, 0.303 e 0.277, com média de 29.4%.

Tabela 8 - Fração volumétrica de fibras de cada corpo de prova.

Corpos de prova	0 °	30 °	45 °	60 °	90 °
CP 1	0.293	0.299	0.298	0.290	0.285
CP 2	0.293	0.305	0.284	0.298	0.304
CP 3	0.285	0.293	0.291	0.300	0.289
CP 4	0.294	0.294	0.289	0.306	0.280
CP 5	0.279	0.285	0.294	0.296	0.318
Média	0.294				
Desvio padrão	0.0088				
coeficiente de variação	0.0300				

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3. Densidade volumétrica

Para a determinação da densidade volumétrica, os corpos de prova foram pesados, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Peso de cada corpo de prova, em gramas (g).

Corpos de prova	0 °	30 °	45 °	60 °	90 °
CP 1	30	30	30	30	22
CP 2	32	30	32	30	20
CP 3	30	32	32	30	20

Continua

CP 4	30	32	32	28	22
CP 5	32	30	32	30	20

Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo, conhecendo o peso e volume de cada corpo de prova, as densidades foram calculadas e são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Densidade volumétrica de cada corpo de prova, em g/cm³.

Corpos de prova	0 °	30 °	45 °	60 °	90 °
CP 1	1.510	1.538	1.532	1.491	1.539
CP 2	1.607	1.569	1.558	1.536	1.490
CP 3	1.467	1.612	1.599	1.545	1.417
CP 4	1.514	1.616	1.588	1.472	1.509
CP 5	1.534	1.469	1.615	1.526	1.558
Média	1.536				
Desvio padrão	0.052				
coeficiente de variação	0.0341				

Fonte: Elaborado pelo autor.

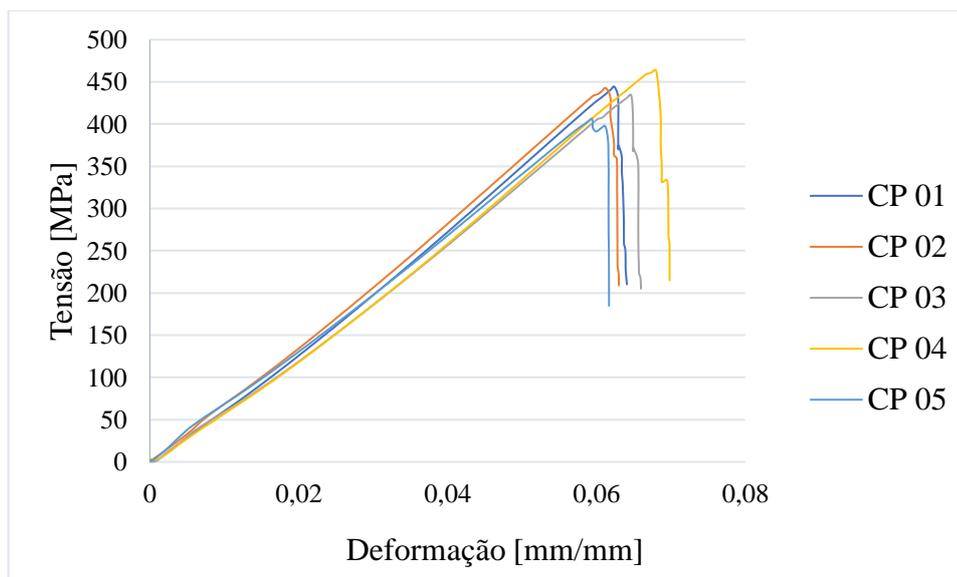
4.2. Propriedades mecânicas

4.2.1. Ensaio a tração

Com os ensaios de tração foi possível obter-se o diagrama Tensão x Deformação, tornando possível a obtenção, para cada corpo de prova, da carga máxima aplicada, o percentual de alongamento, a tensão de ruptura e o módulo de Young. Aplicou-se, então, inferência estatística nos dados obtidos. Abaixo são listados os resultados dos ensaios para cada angulação testada.

4.2.1.1. Ângulo de fibra orientado a 0 graus.

Com a carga aplicada no sentido das fibras, logo, com o ângulo de fibra orientado a 0 graus, obteve-se o gráfico tensão x deformação, mostrado no Gráfico 1. Como observado, o comportamento da curva é linear, resultado já esperado em concomitância com os estudos de Preto (2013).

Gráfico 1 - Gráfico tensão x deformação para o ângulo de fibra orientado a 0°.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 11 apresenta as principais informações obtidas no ensaio. O compósito apresentou uma tensão de ruptura média de 437.05 MPa e coeficiente de variação de 5,25%. A média do módulo de elasticidade foi 7114.16 MPa e coeficiente de variação de 4.83%. A instabilidade no início da curva se dá pelo ajustamento dos corpos de prova às garras de tração. No mais, a queda repentina de tensão no final da região linear indica que o compósito analisado é um material frágil.

Tabela 11 - Dados obtidos no ensaio de tração para a orientação de fibra a 0°.

Corpos de prova	Força máxima (N)	Alongamento máximo (mm/mm)	Tensão de ruptura (Mpa)	Módulo de elasticidade (Mpa)
CP 01	35314	0.0624	444.30	7410.46
CP 02	35255	0.0613	442.72	7494.81
CP 03	35499	0.0647	434.05	6806.14
CP 04	36736	0.0680	463.42	7125.90
CP 05	33449	0.0595	400.75	6733.51
Média	35251	0.0632	437.05	7114.16
Desvio padrão	1175	0.0033	22.95	343.73
Coeficiente de variação	0.033	0.0523	0.0525	0.0483

Fonte: Elaborada pelo autor.

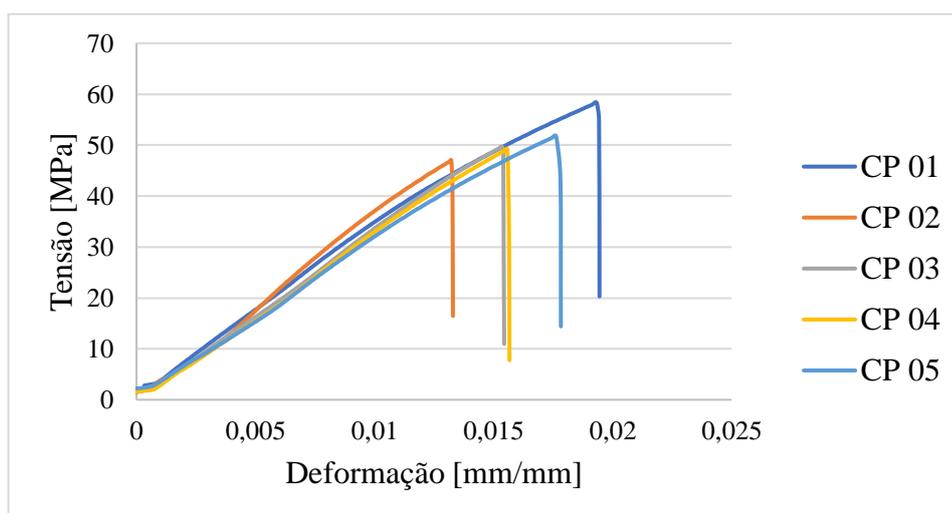
Os corpos de prova CP 04 e CP 05 foram os de maior e menor resistência, 463.42 e 400.75 MPA, respectivamente. Essa diferença pode ser explicada pela diferença das frações

volumétricas de fibra de vidro, mostrado na Tabela 8, com CP 4 e CP 05 apresentando 29.1 e 27.6 % respectivamente.

4.2.1.2. Ângulo de fibra orientado a 30 graus.

Com a carga aplicada com o ângulo de fibra orientado a 30 graus, obteve-se o gráfico tensão x deformação, mostrado no Gráfico 2. Assim, igualmente observa-se um comportamento linear da curva.

Gráfico 2 - Gráfico tensão x deformação para o ângulo de fibra orientado a 30°.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 12 apresenta as principais informações obtidas no ensaio. O compósito apresentou uma tensão de ruptura média de 51.21 MPa e coeficiente de variação de 8,41%. A média do módulo de elasticidade foi 3588.23 MPa e coeficiente de variação de 5.65%. O comportamento do gráfico segue o mesmo padrão analisado no gráfico orientado a 0 graus, portanto, também corresponde a um material frágil.

Tabela 12 - Dados obtidos no ensaio de tração para a orientação de fibra a 30°.

Corpos de prova	Força máxima (N)	Alongamento máximo (mm/mm)	Tensão de ruptura (Mpa)	Módulo de elasticidade (Mpa)
CP 01	4548.9	0.019333	58.30164	3464.511
CP 02	3597.7	0.013222	47.03614	3903.828
CP 03	3949.3	0.015356	49.72164	3599.487
CP 04	3897.5	0.015577	49.20638	3607.043

Continua

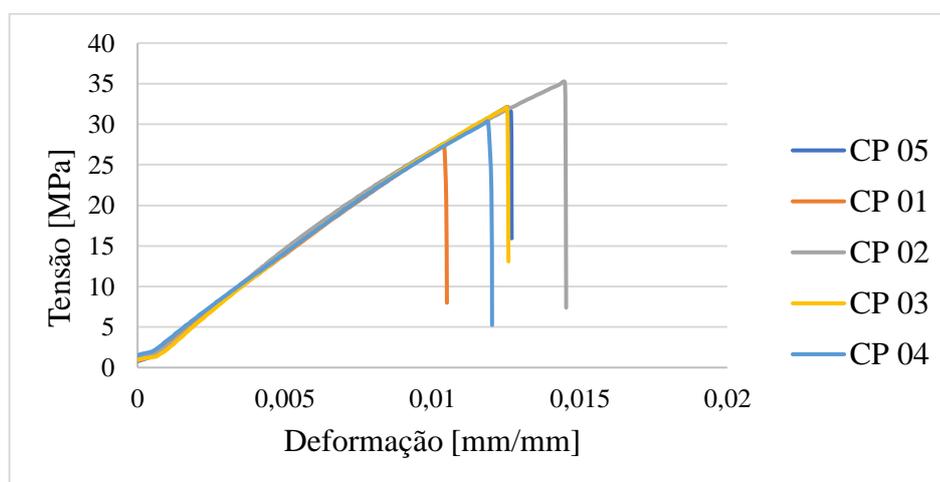
CP 05	4230.6	0.017623	51.79334	3366.264
Média	4045	0.0162	51.21	3588.23
Desvio padrão	360	0.0023	4.31	202.89
Coefficiente de variação	0.089	0.1439	0.0841	0.0565

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1.3. Ângulo de fibra orientado a 45 graus

Com a carga aplicada sob o ângulo de fibra orientado a 45 graus, obteve-se o gráfico de tensão x deformação, expresso no Gráfico 3, no qual observa-se o comportamento linear da curva.

Gráfico 3 - Gráfico tensão x deformação para o ângulo de fibra orientado a 45°.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 13 apresenta as principais informações obtidas no ensaio. O compósito apresentou uma tensão de ruptura média de 31.42 MPa e coeficiente de variação de 9,10%. A média do módulo de elasticidade foi 2622.01 MPa e coeficiente de variação de 2,32%. A instabilidade inicial da curva e o comportamento frágil do material segue as mesmas explicações dos anteriores.

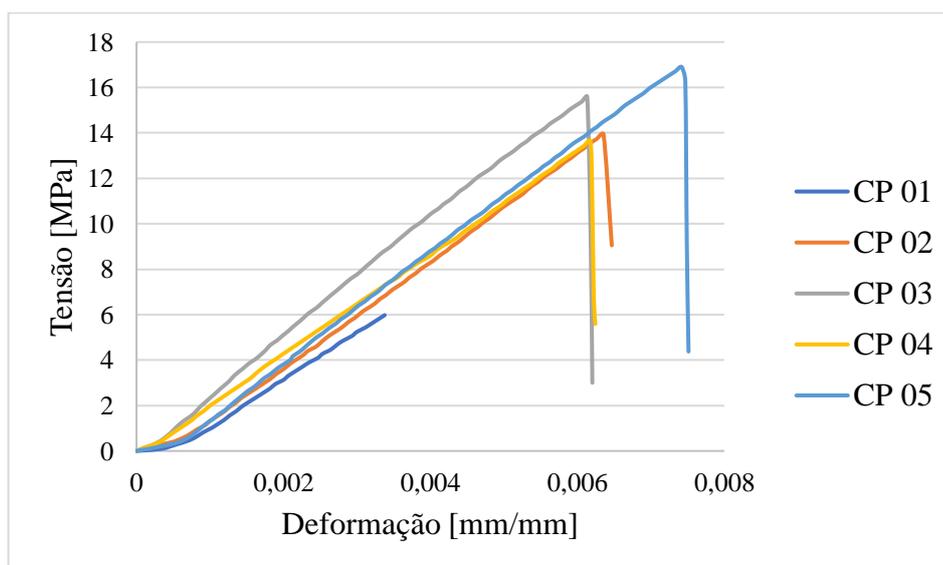
Tabela 13 - Dados obtidos no ensaio de tração para a orientação de fibra a 45°.

Corpos de prova	Força máxima (N)	Alongamento máximo (mm/mm)	Tensão de ruptura (Mpa)	Módulo de elasticidade (Mpa)
CP 01	2143.1	0.0104008	27.36461	2660.33108
CP 02	2890.7	0.0144896	35.17524	2664.917462
CP 03	2568.7	0.0125328	32.08899	2649.048934
CP 04	2442.9	0.0118888	30.31661	2617.12213
CP 05	2546.5	0.0125536	32.13299	2518.637646
Média	2518	0.0124	31.42	2622.01
Desvio padrão	269	0.0015	2.86	60.73
Coefficiente de variação	0.107	0.1189	0.0910	0.0232

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1.4. Ângulo de fibra orientado a 60 graus

Com a carga aplicada com o ângulo de fibra orientado a 60 graus, obteve-se o gráfico tensão x deformação, mostrado no Gráfico 4. Como esperado, o comportamento da curva é linear.

Gráfico 4 - Gráfico tensão x deformação para o angulo de fibra orientado a 60°.

Fonte: Elaborado pelo autor.

As principais informações obtidas no ensaio estão expressas na Tabela 14. O compósito apresentou uma tensão de ruptura média de 14.85 MPa e coeficiente de variação de 8,65%. A média do módulo de elasticidade foi 2447.95 MPa e coeficiente de variação de 9,45%. A instabilidade no início da curva é devido ao ajustamento dos corpos de prova às garras de tração. A

queda repentina de tensão no final da região linear indica que o compósito analisado é um material frágil.

Tabela 14 - Dados obtidos no ensaio de tração para a orientação de fibra a 60°.

Corpos de prova	Força máxima (N)	Alongamento máximo (mm/mm)	Tensão de ruptura (Mpa)	Módulo de elasticidade (Mpa)
CP 01	481.175	0.0033776	5.98	2007.56
CP 02	1088.15	0.006356	13.93	2336.36
CP 03	1210.33	0.0061344	15.58	2697.25
CP 04	1036.35	0.0061776	13.62	2183.59
CP 05	1280.65	0.0074696	16.29	2574.63
Média	1153.87	0.00653	14.85	2447.95
Desvio padrão	111.64	0.00063	1.285	231.32
Coefficiente de variação	0.0967	0.09654	0.0865	0.09450

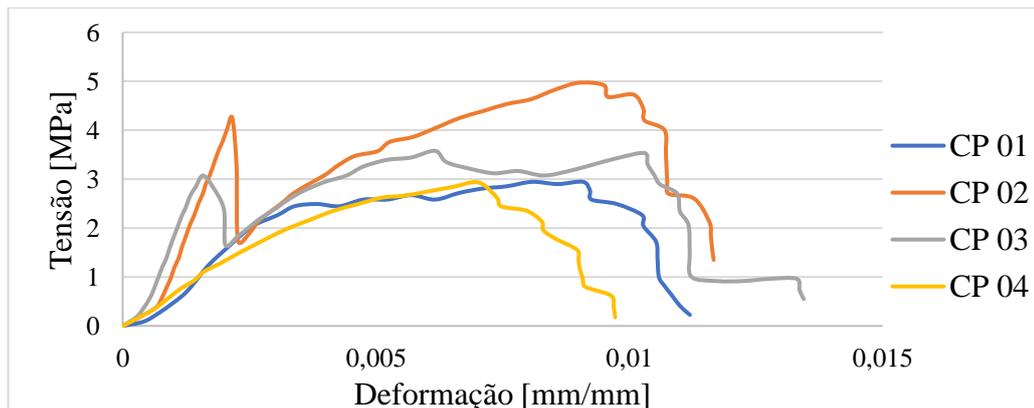
Fonte: Elaborado pelo autor.

O corpo de prova CP 01 sofreu uma falha prematura e foi eliminado das análises estatísticas.

4.2.1.5. Ângulo de fibra orientado a 90 graus.

Com a carga aplicada com o ângulo de fibra orientado a 90 graus, encontrou-se o gráfico tensão x deformação, mostrado no Gráfico 5. Como observado, o comportamento das curvas é linear apenas no início, após a zona linear os CP 02 e CP 03 apresentaram perda repentina de resistência seguida por uma recuperação. Nota-se ainda que após a zona linear as curvas não possuem mais padrão de comportamento.

Gráfico 5 - Gráfico tensão x deformação para o ângulo de fibra orientado a 90°.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 15 apresenta as principais informações obtidas no ensaio. O compósito apresentou uma tensão de ruptura média de 3.53 MPa e coeficiente de variação de 23.87%. o modulo de elasticidade não foi calculado devido o comportamento predominante não linear das curvas tensões x deformação.

Tabela 15 - Dados obtidos no ensaio de tração para a orientação de fibra a 90°.

Corpos de prova	Força máxima (N)	Alongamento máximo (mm/mm)	Tensão de ruptura (Mpa)	Módulo de elasticidade (Mpa)
CP 01	240.59	0.009086	2.946	--
CP 02	362.73	0.010083	4.729	--
CP 03	285	0.010305	3.533	--
CP 04	244.29	0.007026	2.932	--
CP 05	--	--	--	--
Média	283.153	0.00913	3.535	--
Desvio padrão	56.73873	0.00150	0.84386	--
Coeficiente de variação	0.20	0.16399	0.23871	--

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2. Modos de falha

A norma ASTM D 3039/D 3039M indica a necessidade de identificar os modos de falha para validação dos dados obtidos nos ensaios de tração.

Conforme a Figura 25, observa-se que o modo de fratura dos corpos de prova orientados a 0° foi a XGM (Explosiva e no meio do galgo), as fibras foram tensionadas até a ruptura catastrófica destas.

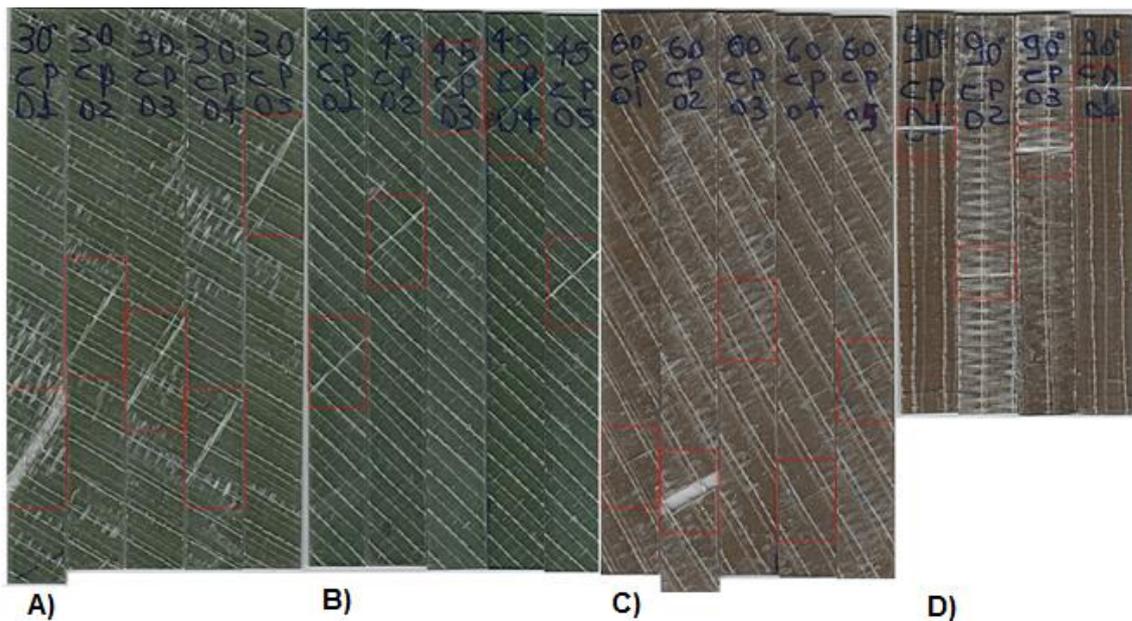
Figura 25 - Modo de falha com as fibras orientadas a 0°.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Figura 26, observa-se que o modo de fratura para os demais corpos de prova mais próximo aos classificados na norma foi do tipo AGM (Longitudinal angular no meio do corpo de prova), porém, a localização da fratura variou ao longo do corpo de prova. A localização da fratura é indicada pelos quadrados vermelhos. As fissuras possuem o mesmo ângulo de orientação da fibra e não há fibras rompidas.

Figura 26 - A) Modo de falha com as fibras orientadas a 30 graus; B) Modo de falha com as fibras orientadas a 45 graus C) Modo de falha com as fibras orientadas a 60 graus D) Modo de falha com as fibras orientadas a 90 graus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

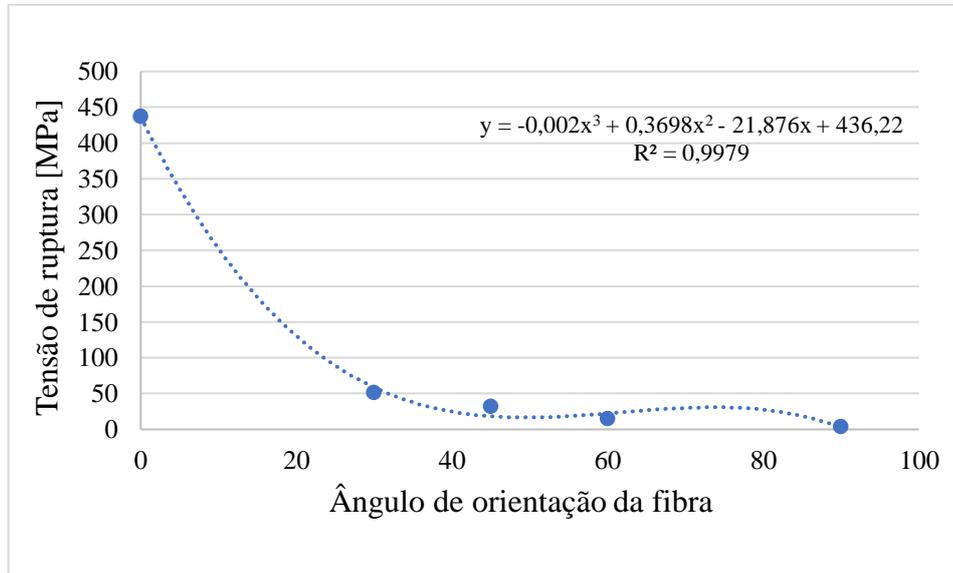
O mecanismo de falha acontece na interface da matriz/reforço por esforços de cisalhamento, como resultado disto, as fibras não são o fator determinante na composição da resistência a tração. Alguns corpos de prova apresentaram uma condição não desejada, a fratura dentre a região das garras, porém não foi observado nestes corpos de prova uma queda significativa da resistência a ruptura.

4.2.3. Tensão de ruptura vs ângulo de orientação da fibra

O Gráfico 6, mostra o efeito do ângulo de orientação das fibras na tensão de ruptura. Como esperado a maior resistência é observada quando a carga está alinhada com as fibras, resultado este já previsto em acordo com os estudos de Barreto (2017). Com o desalinhamento da carga aplicada em 30° a resistência do laminado diminuiu 88.28%, tal redução é evidenciada

pela alta inclinação da curva entre os ângulos de 0° e 30°. Os próximos ângulos de orientação de fibras 45°, 60° e 90° apresentaram menor redução de resistência, em comparação com os anteriores.

Gráfico 6 - Gráfico tensão de ruptura vs ângulo de orientação da fibra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A correlação entre as duas variáveis pode ser descrita pela Equação 9, com coeficiente de determinação de 99,79%.

$$y = -0,002x^3 + 0,3698x^2 - 21,876x + 436,22 \quad \text{Equação 9}$$

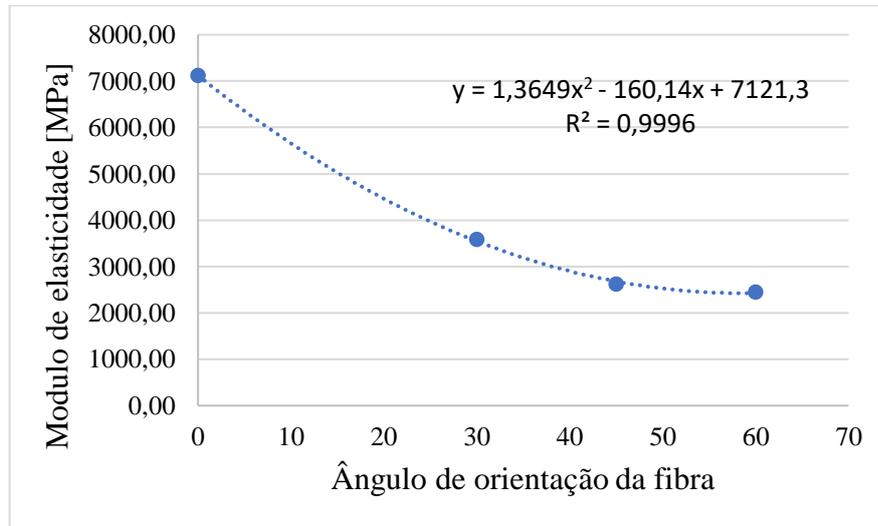
Onde

Y = tensão de ruptura [MPa]

X = ângulo de orientação da fibra [graus]

4.2.4. Modulo de elasticidade vs angulo de orientação da fibra

O Gráfico 7, mostra o efeito do ângulo de orientação das fibras no modulo de elasticidade do compósito. Como esperado o maior valor é observada quando a carga está alinhada com as fibras. À medida que o ângulo de orientação decai até o ângulo de 30° há uma grande perda de rigidez no material, após isso o modulo de Young diminui com menor intensidade. Entre 45° e 60° observa-se uma estabilidade na rigidez. Não foi determinado o modulo de rigidez para o ângulo de 90°.

Gráfico 7 – Gráfico modulo de elasticidade vs ângulo de orientação da fibra ângulo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A correlação entre as duas variáveis pode ser descrita pela Equação 10, com coeficiente de determinação de 99,96%.

$$y = 1.3649x^2 - 160.14x + 7121.3 \quad \text{Equação 10.}$$

Onde,

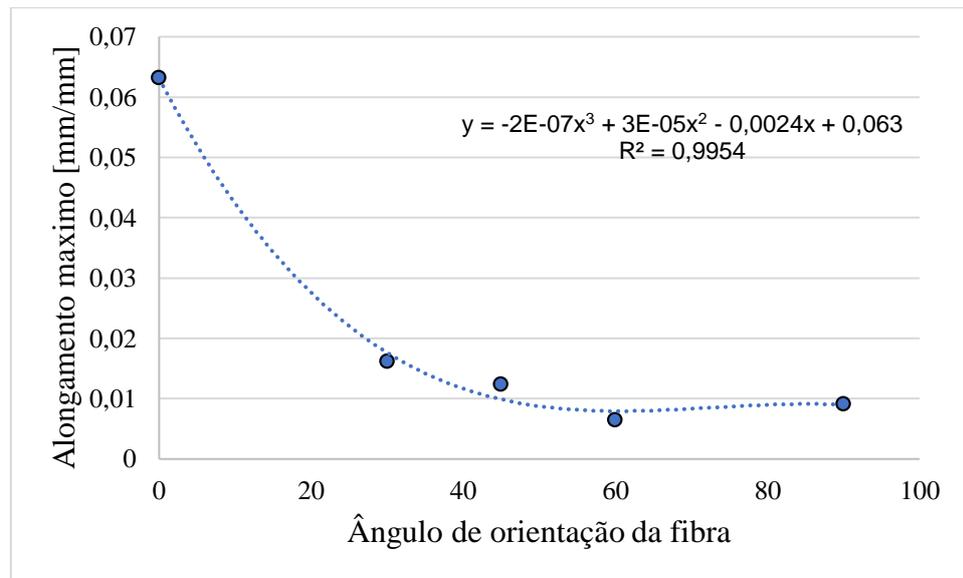
Y = Módulo de elasticidade [MPa]

X= ângulo de orientação da fibra [graus]

4.2.5. Alongamento máximo vs ângulo de orientação da fibra

O Gráfico 8, mostra o efeito do ângulo de orientação das fibras no alongamento percentual do compósito, como esperado o maior valor é observado quando a carga está alinhada com as fibras. À medida que o ângulo de orientação decai, entre 0° até o ângulo de 30°, há uma grande perda percentual de alongamento máximo, após isso o módulo de Young diminui com menor intensidade até atingir o ângulo de 60°. Dentre 60° e 90° observa-se um ligeiro aumento no alongamento.

A correlação entre as duas variáveis pode ser descrita pela Equação 11, com coeficiente de determinação de 99,54%.

Gráfico 8 - Gráfico alongamento máximo vs ângulo de orientação da fibra.

Fonte: Elaborado pelo autor.

$$y = -2 \cdot 10^{-7}x^3 + 3 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0024x + 0,063 \quad \text{Equação 11.}$$

Onde,

Y = alongamento máximo [MPa]

X = ângulo de orientação da fibra [graus]

5 CONCLUSÃO

Os resultados descrevem o comportamento do laminado constituído por fibra de vidro tipo E unidirecional com matriz polimérica de poliéster, com a fração volumétrica de fibras média de 29,09% e método de fabricação manual curado sob pressão.

Conforme as observações nos ensaios de tração, a orientação do ângulo de fibra apresenta grande efeito na resistência a tração do compósito de fibra de vidro/poliéster. Constatou-se que o decaimento da resistência a ruptura, modulo elástico e alongamento máximo é essencialmente grande entre os ângulos de 0° e 30°. Nesses, para resistência a ruptura observou-se uma diminuição de 88.28%. Conclui-se ainda que entre os ângulos de 30° e 90° a resistência a tração decaiu com mais suavidade.

A curva tensão x deformação apresentou comportamento predominante linear para todos os ângulos exceto 90°. Os ensaios de tração para a orientação de 90° apresentaram grande coeficiente de variação.

Pode-se inferir ainda que o modulo elástico do laminado analisado é baixo, apresentando valor de 7114.16 MPa a e 2447.95 MPa a 0 e 60 ° respectivamente. Além disso, o compósito apresentou baixa densidade volumetria, com valor de 1.53g/cm³.

No processo de fabricação, o método manual foi de fácil execução, contudo ficou nítido a falta de reprodutibilidade e difícil aplicação para produção em série. O molde proposto, apresentou baixo coeficiente de variação para espessura dos corpos de prova.

Sendo assim, conclui-se que quando as fibras estão alinhadas com a carga, o compósito em estudo tende a apresentar altos valores de resistência a tração (437.05 MPa), porém a aplicação em projetos estruturais pode ser comprometida devido à grande influência da orientação na resistência à ruptura, logo, o laminado unidirecional fica limitado apenas à aplicação de carga no mesmo sentido das fibras, situação que dificilmente é requerida em projetos.

Sugestões para trabalhos futuros

O estudo proposto neste trabalho fomenta a necessidade de diversas outras análises. Portanto, algumas possíveis sugestões para trabalho posteriores são:

- I. Ensaio de flexão para os mesmos ângulos analisados neste estudo;
- II. Influência de diferentes frações volumétricas de fibra na resistência a tração;
- III. Análise de diversas orientações para formação de um compósito menos dependente da orientação do ângulo de fibras tais como: [0,90,0,90,0,90], [0,90,90,+45,-45,90,90,0] e ademais configurações angle-ply e cross-ply;
- IV. Influência do método de fabricação nas propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS

AKOVALI, Güneri. **Handbook of composite**. 1. ed. Ankara: Rapra Technology Limited, 2001. 196 p. ISBN 1859572634.

ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. **Ciência e engenharia dos materiais**. 3. ed. Cengage Learning, 2011.

BARRETO, Augusto Cezar Rotolo; DUNCAN, Matheus de Carvalho. **Caracterização do comportamento mecânico de materiais compósitos ortotrópicos**. Orientador: Prof. Paulo Pedro Kenedi. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Centro Federal De Educação Tecnológica Celso Suckow Da Fonseca, Rio de Janeiro, 2017. p. 50. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016041.pdf> Acesso em: 07 out. 2019.

BILLMEYER, F. W. **Textbook of polymer science**. 6. ed. John Wiley & Sons, 1970.

BITTENCOURT, Ana Paula Peixoto. **Estudo comparativo de processos de obtenção de compósitos fibra de vidro/poliéster**. Orientador: Prof. Dr. Alberto Souza Schmidt. 2002. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Naval) - Universidade Federal De Santa Catarina, Joinville, 2002. p. 68. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/133862> Acesso em: 04 out. 2019.

BRANDÃO, Amanda Torre. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos de polipropileno reforçados com fibras do bagaço de cana-de-açúcar**. Orientador: Prof. Dra. Daniella Regina Mulinari. 2015. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) - Fundação Oswaldo Aranha, Volta Redonda, 2015. p. 55. Disponível em: http://sites.unifoa.edu.br/portal_ensino/mestrado/memat/arquivos/dissertacao/amanda_brandao.pdf Acesso em: 04 out. 2019.

CAMPBELL, F. C. **Structural composite materials**. 1. ed. United States of America: ASM International, 2010. 612 p. ISBN 139781615030378.

CHEREMISINOFF, Paul N.; CHEREMISINOFF, Nicholas P. **Fiberglass reinforced plastics**. 1. ed. United States of America: Noyes Publications, 1995. 258 p. v. 1. ISBN 0815513895.

COSTA, Michelle L. et al. **Métodos de estudo da cinética de cura de resinas epóxi. Polímeros: ciência e tecnologia**, 8 fev. 1999. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/po/v9n2/7935.pdf> Acesso em: 05 out. 2019.

DANIEL, Isaac M.; ORI, Lshai. **Engineering mechanics of composite materials**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2006. 387 p. v. 1. ISBN 9780195150971.

ELMAJDOUBI, M.; VU-KHANH, T. **Effect of cooling rate on fracture behaviour of polypropylene**. Canadá: Elsevier Science, 2003.

GALLI, Cecilia Antunes. **Caracterização das propriedades mecânicas de compósitos de matriz de epóxi com fibras de carbono unidirecionais**. Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz Bastian. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia de materiais) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. p. 49. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016041.pdf> Acesso em: 07 out. 2019.

GAMA, Daniel Pereira Nunes. **Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche**. Orientador: João Marciano Laredo dos Reis. 2017. 71 p. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017. Disponível em: <http://www.mec.uff.br/pdfteses/DanielPereiraNunesGama2017.pdf> Acesso em: 06 out. 2019.

GAMA, João Paulo De Freitas. **Compósitos poliméricos a base de tecido híbrido carbono/vidro: tração e compressão uniaxiais**. Orientador: Dra. Eve Maria Freire de Aquino. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte, Natal, 2018. p. 50. Disponível em: <https://monografias.ufrn.br/jspui/handle/123456789/6815> Acesso em: 07 out. 2019.

HERAKOVICH, Carl T. **Mechanics of fibrous composites**. 1. ed. United States of America: John Wiley & Sons, 1998. 480 p. ISBN 0471106364.

IBEXQUIMICA. 2019. Disponível em: <http://www.ibexquimica.com.br/pt/diversos> Acesso em: 10 out. 2019.

KEMERICH, Pedro Daniel da Cunha et al. **Fibras de vidro: caracterização, disposição final e impactos ambientais gerados**. Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/download/7590/pdf> Acesso em: 07 out. 2019.

KUTZ, Myer. **Mechanical engineers' handbook**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. 996 p. v. 1. ISBN 9781118907481.

LEITÃO, Eduardo da Silva. **Caracterização mecânica de compósitos poliméricos bobinados em diversas orientações de reforço**. Orientador: Prof. Dr. Gerson Marinucci. 2007. Dissertação de Mestrado (Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, São paulo, 2007. p. 131. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-18052012-093115/pt-br.php> Acesso em: 02 out. 2019.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. **Composite materials: engineering and science**. UK: Chapman and Hall, 1994.

NASSEH, Jorge. Barcos: **Métodos avançados de construção em compósitos**. 1. ed. Rio de Janeiro: 2007. 37 p.

NIU, Michael Chun-Yung. **Composite airframe structures**. 1. ed. Hong Kong: Conmilit Press LTD, 1992. 664 p. v. 1. ISBN 9627128066.

PINTO, Kelly Nanci Carneiro. **Reciclagem de resíduos de materiais compósitos de matriz polimérica: poliéster insaturado reforçado com fibras de vidro**. Orientador: Dr. Jesualdo Luiz Rossi. 2002. 75 p. Dissertação de Mestrado (Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Kelly%20Nanci%20Carneiro%20Pinto_M.pdf Acesso em: 05 out. 2019.

REIS, Ligia Reghin. **Obtenção e caracterização de compósitos de resina poliéster insaturada moldados pelo processo de infusão**. Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Ancelotti Junior. 2016. 98 p. Dissertação de Mestrado (Pós- Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal De Itajubá, Itajubá, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/472> Acesso em: 07 out. 2019.

SANTOS, Breno Bessa. **Estudo da influência do tipo de processo de fabricação de laminados de compósito nas propriedades mecânicas**. Orientador: Prof. Dr. Ricardo Emilio. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza, 2017. p. 63. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/29257> Acesso em: 06 out. 2019.

SANTOS, Roésio Oliveira. **Modelagem de tubos de materiais compósitos laminados considerando efeitos de temperatura e falhas**. Orientador: Prof. Dr. Sererino Pereira Calvalcanti Marques. 2016. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016. p. 123. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/1560> Acesso em: 07 out. 2019.

SIQUEIRA, Eder José. **Estudo dos critérios de falhas em compósitos pps/fibras de carbono utilizando elementos finitos**. Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva. 2009. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009. p. 183. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/97058> Acesso em: 10 out. 2019.

VANDERLEI, Rafael Marques. **Confecção e caracterização mecânica de compósitos de matriz epoxídica reforçada com fibras de rami**. Orientador: Prof. Dr. Fábio Cezar Ferreira. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Curso Superior de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná) - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Londrina, 2016. p. 47. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/7340/1/LD_COEMA_2016_2_15.pdf Acesso em: 07 out. 2019.

VENTURA, Ana Mafalda F. M. **Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas**. Ciência & Tecnologia Dos Materiais, Lisboa, v. 21, ed. 3, 2009. Disponível em: http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-83122009000200003 Acesso em: 07 out. 2019.

VOGEL, Gilmar Fernando. **Projeto e desenvolvimento de máquina para o corte de fios de fibra de vidro (roving), utilizada para a laminação de peças em plástico reforçado com fibras de vidro (fiberglass)**. Orientador: Prof. Dr. Alberto Souza Schmidt. 2002. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia de produção) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002. p. 172. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/8331> Acesso em: 08 out. 2019.