



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

JOÃO PEDRO RODRIGUES DEODATO

EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO EM COMPÓSITO POLIMÉRICO
REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO: UM ESTUDO EXPERIMENTAL E
ANALÍTICO.

MOSSORÓ

2024

JOÃO PEDRO RODRIGUES DEODATO

EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO EM COMPÓSITO POLIMÉRICO
REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO: UM ESTUDO EXPERIMENTAL E ANALÍTICO.

Dissertação apresentada ao Programa De Pós-Graduação Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais. Área de Concentração: Materiais e Processos Para Sustentabilidade do Semiárido

Orientador: Prof. Dr. Zoroastro Torres Vilar

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Nogueira de Codes

MOSSORÓ

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

D418e Deodato, João Pedro Rodrigues .
Efeito da Concentração de Tensão em Compósito
Polimérico Reforçado com Fibra de Vidro: Um Estudo
Experimental e Analítico / João Pedro Rodrigues
Deodato. - 2024.
100 f. : il.

Orientador: Zoroastro Torres Vilar.
Coorientador: Rodrigo Nogueira de Codes.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais, 2024.

1. Compósitos . 2. DIC. 3. Fibra de vidro. 4.
Concentração de tensão. 5. Resina epóxi.. I. Vilar,
Zoroastro Torres , orient. II. Codes, Rodrigo
Nogueira de , co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JOÃO PEDRO RODRIGUES DEODATO

EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO EM COMPÓSITO POLIMÉRICO
REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO: UM ESTUDO EXPERIMENTAL E ANALÍTICO.

Dissertação apresentada ao Programa De Pós-Graduação Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais. Área de Concentração: Materiais e Processos Para Sustentabilidade do Semiárido

Aprovada em: 06 de Dezembro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Zoroastro Torres Vilar (Orientador)
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

Prof. Dr. Rodrigo Nogueira de Codes (Coorientador)
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

Prof. Dr. Fabricio José Nobrega Cavalcante
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

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

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, por todos os seus ensinamentos deixados.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por sempre iluminar meu caminho, pelo dom da vida e pelo conforto nas horas difíceis.

Aos meus familiares pela construção das fundações que me sustentaram durante essa jornada.

A Kaenna Ingrid da Silva Loureiro, por estar sempre ao meu lado e incentivar nos momentos mais difíceis da pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Zoroastro Vilar, e co-orientador, Prof. Dr. Rodrigo Nogueira de Codes, pelas orientações, por aceitarem o desafio e sempre se mostrarem disponíveis.

Ao Prof. Dr. Ramon Rudá Brito Medeiros, pela disposição e apoio no desenvolvimento da pesquisa

Agradeço aos professores e servidores dos Laboratórios Engenharia Mecânica Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) e da Universidade federal do Ceará (UFC - Campus Russas) e todos os outros que me incentivaram e apoiaram nesta caminhada.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPgCEM) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) na figura de seus professores e coordenadores.

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo
para todo o propósito debaixo do céu.”

(Salomão)

RESUMO

A crescente demanda pela utilização de materiais compósitos torna essencial uma melhor compreensão do seu comportamento sob diversas condições de carga e serviço, bem como nas diferentes formas de conexão em projetos estruturais. Nessas condições, destacam-se as descontinuidades geométricas em seções transversais e longitudinais dos elementos estruturais. Duas características se mostram particularmente relevantes: a anisotropia dos materiais e a presença dessas descontinuidades geométricas. Este trabalho tem como objetivo geral avaliar as propriedades mecânicas, a anisotropia e a concentração de tensão causadas por um furo circular concêntrico em um laminado compósito reforçado com fibra de vidro, submetido a carga de tração uniaxial. Utilizando ensaios de tração uniaxial auxiliados pela técnica DIC (Digital Image Correlation), foram analisados o limite de resistência à tração, o módulo de elasticidade, o módulo de cisalhamento, o coeficiente de Poisson e a deformação na ruptura em amostras com e sem descontinuidades. Os resultados mostraram que a presença de descontinuidades geométricas reduziu significativamente o limite de resistência à tração e a deformação na ruptura tanto na resina epóxi quanto nos laminados de fibra de vidro. No entanto, os laminados com fibras orientadas a $\pm 45^\circ$ apresentaram melhor desempenho em relação à resistência residual após a introdução do furo, devido à sua capacidade de redistribuição das tensões. A técnica DIC permitiu uma visualização detalhada dos campos de deformação, revelando maior concentração de tensões ao redor do furo nas amostras com maior razão d/W . Além disso, o fator de concentração de tensão (K_t) foi calculado para as diferentes configurações, destacando que os laminados com orientação $0/90^\circ$ foram os mais sensíveis à presença do furo.

Palavras-chave: Compósitos. DIC. Fibra de vidro. Concentração de tensão. Resina epóxi.

ABSTRACT

The increasing demand for composite materials makes it essential to better understand their behavior under various loading and service conditions, as well as in the different forms of connections in structural projects. In these conditions, geometric discontinuities in the transverse and longitudinal sections of structural elements stand out. Two significant characteristics in specific design conditions are anisotropy and the presence of geometric discontinuities. This study aims to evaluate the mechanical properties, anisotropy, and stress concentration caused by a concentric circular hole in a glass fiber-reinforced composite laminate subjected to uniaxial tensile loading. Uniaxial tensile tests were performed, assisted by the Digital Image Correlation (DIC) technique, to analyze the tensile strength, modulus of elasticity, shear modulus, Poisson ratio and fracture strain in samples with and without discontinuities. The results showed that the presence of geometric discontinuities significantly reduced the tensile strength and fracture strain in both the epoxy resin and glass fiber laminates. However, the laminates with $\pm 45^\circ$ fiber orientation exhibited better residual strength performance after the introduction of the hole due to their ability to redistribute stress. The DIC technique provided detailed visualization of the strain fields, revealing higher stress concentrations around the hole in samples with a greater d/W ratio. Additionally, the stress concentration factor (K_t) was calculated for the different configurations, highlighting that the $0/90^\circ$ laminates were the most sensitive to the presence of the hole.

Keywords: Composites. DIC. Glass fiber. Stress Concentration. Epoxy resin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Alguns exemplos de materiais compósitos: (a) compensado de folheado de madeira, (b) concha de abalone. (c) fibra de vidro e (d) concreto (reduzido em 50%).	24
Figura 2 – Representações esquemáticas das fases de um compósito	25
Figura 3 – Tipos de fibras utilizadas na fabricação de compósitos	27
Figura 4 – Três configurações de fibra comuns para reforço de compósito são: (a) fibras contínuas, (b) fibras discretas ou curtas e (c) tecido tramado, que é usado para criar uma estrutura laminada.	29
Figura 5 – Hand lay up – method.	34
Figura 6 – As principais propriedades mecânicas obtidas em um ensaio de tração: (1) Módulo de elasticidade, E ; (2) Tensão limite de escoamento, LE ; (3) Limite de resistência à tração, LRT ; (4) Ductilidade; e (5) módulo de resiliência. . .	35
Figura 7 – Três geometrias de compósito idealizadas.	36
Figura 8 – A curva de tensão deformação para um compósito reforçado com fibra. . .	37
Figura 9 – O Coeficiente de Poisson (ν) caracterizado pela contração perpendicular à extensão causada por uma tensão de tração.	37
Figura 10 – Fatores típicos de concentração de tensão.	40
Figura 11 – Chapa fina em tração ou compressão simples com um furo central transversal. .	41
Figura 12 – Distribuição de tensões próximo a um furo em uma placa infinita.	42
Figura 13 – Placa finita mostrando a concentração real de tensão em um furo.	43
Figura 14 – Representação esquemática das configurações de DIC. (a) Configuração 2D-DIC com uma câmera orientada perpendicularmente à superfície de uma amostra. (b) Configuração 3D-DIC com duas câmeras.	44
Figura 15 – Duas imagens digitais sucessivas com os subconjuntos de pixels quadrados marcados (quadrados brancos) e outros subconjuntos de pixels sobrepostos (quadrados com hachuras) da análise de Correlação Digital de Imagem (DIC). .	46
Figura 16 – Diagrama dos procedimentos realizadas	47
Figura 17 – Tecido de fibra de vidro-E sarja 3x1	48
Figura 18 – Fabricação do LFV: (a) aplicação da resina, (b) sobreposição de camadas de tecido e (c) placa curada	50

Figura 19 – Medidas dos CP's para os ensaios realizados: (a) Tração uniaxial laminado compósito (ASTM D3039/D3039M-2017); (b), (c) e (d) Tração uniaxial na presença do furo concentrico (ASTM D5766-2018); (e) Tração uniaxial resina epóxi; (f) Densidade volumétrica (ASTM D792-2020)	50
Figura 20 – Disposição dos CP's retirados do LFV.	51
Figura 21 – Organização da nomenclatura dos CP's do LFV.	52
Figura 22 – Conjunto para fabricação dos CP's de Resina Epóxi	53
Figura 23 – Organização da nomeclatura dos CP's de Resina Epóxi.	53
Figura 24 – Corpos de prova para a realização do ensaio de tração uniaxial no LFV. . . .	54
Figura 25 – Aparato para determinação da densidade da resina e do compósito	56
Figura 26 – Etapas da calcinação: (a) forno utilizado; (b) amostras após a cacinação . .	57
Figura 27 – Ensaio de tração em EMIC DL 30000 com auxílio da técnica DIC.	58
Figura 28 – Posicionamento dos extensômetros virtuais.	61
Figura 29 – Posicionamento da linha de deformação ao longo do CP.	61
Figura 30 – Placa do compósito obtido após a cura da resina.	62
Figura 31 – Corpos de prova antes da aplicação da textura: (a) Tração Laminado; (b) Tração Laminado com furo $d/W=0,16$; (c) Tração Laminado com furo $d/W=0,33$; (d) Tração Laminado com furo $d/W=0,50$	63
Figura 32 – Corpos de prova de resina epóxi antes da aplicação da textura: (a) Tração Resina com furo $d/W=0,16$; (b) Tração resina com furo $d/W=0,33$; (c) Tração Resina com furo $d/W=0,50$	63
Figura 33 – Comparativo entre valores de densidade.	64
Figura 34 – Resultado de TG para a resina curada.	65
Figura 35 – Diagrama tensão-deformação à tração da resina epóxi.	67
Figura 36 – Diagrama tensão-deformação à tração do LFV.	68
Figura 37 – Diagrama tensão-deformação à tração dos CP's: (a) TF.36.RE; (b) TF.18.RE e (c) TF.12.RE.	70
Figura 38 – Propriedades da CP's de Resina Epóxi com e sem furo: (a) Limite de Resistência à Tração (σ_{LRT}); (b) Módulo de Elasticidade (E_{yy}); (c) Deformação na Ruptura (ϵ_{rup}).	71
Figura 39 – Diagrama tensão-deformação à tração dos CP's: (a) TF.36.LFV.0/90; (b) TF.18.LFV.0/90; (c) TF.12.LFV.0/90.	71

Figura 40 – Propriedades da CP's do LFV.0/90° com e sem furo: (a) Limite de Resistência à Tração (σ_{LRT}); (b) Módulo de Elasticidade Longitudinal (E_{yy}); (c) Deformação na Ruptura (ϵ_{rup}).	73
Figura 41 – Diagrama tensão-deformação à tração dos CP's: (a) TF.36.LFV.45; (b) TF.18.LFV.45; (c) TF.12.LFV.45.	74
Figura 42 – Propriedades da CP's do LFV.45° com e sem furo: (a) Limite de Resistência à Tração (σ_{LRT}); (b) Módulo de Elasticidade Longitudinal (E_{yy}); (c) Deformação na Ruptura (ϵ_{rup}).	75
Figura 43 – Resistência residual para a matriz epóxi e os laminados.	76
Figura 44 – Distribuição de tensão em torno do furo: (a) TF.36.RE; (b) TF.18.RE; (c) TF.12.RE.	78
Figura 45 – Distribuição de tensão em torno do furo: (a) TF.36.LFV0/90; (b) TF.18.LFV0/90; (c) TF.12.LFV0/90.	78
Figura 46 – Distribuição de tensão em torno do furo: (a) TF.36.LFV.45; (b) TF.18.LFV.45; (c) TF.12.LFV.45.	80
Figura 47 – Comparativo dos K_t analítico e experimental para Resina Epóxi, LFV.0/90° e LFV.45°.	81
Figura 48 – Curvas do Fator geométrico de concentração de tensão K_t analítico e experimental para (a) Resina Epóxi, (b) LFV.0/90° e (c) LFV.45°.	82
Figura 49 – Campos de deformação em torno do furo para o TF.36.RE nas direções: (a) x ; (b) y e (c) xy	84
Figura 50 – Campos de deformação em torno do furo para o TF.18.RE nas direções: (a) x ; (b) y e (c) xy	84
Figura 51 – Campos de deformação em torno do furo para o TF.12.RE nas direções: (a) x ; (b) y e (c) xy	85
Figura 52 – Campos de deformação em torno do furo para o TF.36.LFV.0/90° nas direções: (a) x ; (b) y e (c) xy	86
Figura 53 – Campos de deformação em torno do furo para o TF.18.LFV.0/90 nas direções: (a) x ; (b) y e (c) xy	87
Figura 54 – Campos de deformação em torno do furo para o TF.12.LFV.0/90 nas direções: (a) x ; (b) y e (c) xy	87

Figura 55 – Campos de deformação em tono do furo para o TF.36.LFV.45 nas direções:	
(a) x ; (b) y e (c) xy	88
Figura 56 – Campos de deformação em tono do furo para o TF.18.LFV.45 nas direções:	
(a) x ; (b) y e (c) xy	89
Figura 57 – Campos de deformação em tono do furo para o TF.12.LFV.45 nas direções:	
(a) x ; (b) y e (c) xy	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça	28
Tabela 2 – Composições de fibras de vidro de reforço	32
Tabela 3 – Propriedades de diferentes tipos de vidro	33
Tabela 4 – Procedimentos experimentais normatizado.	47
Tabela 5 – Características e propriedades dos componentes e do sistema de resina e endurecedor.	48
Tabela 6 – Características e propriedades do tecido de fibra de vidro.	49
Tabela 7 – Descrição dos CP's em todas as condições de análise.	54
Tabela 8 – Quantidade de corpos de provas utilizados no ensaio de tração dos compósitos.	54
Tabela 9 – Parâmetros utilizados na DIC.	60
Tabela 10 – Tabela com a densidade dos materiais.	64
Tabela 11 – Tabela com os percentuais mássicos dos constituintes do LFV.	66
Tabela 12 – Tabela com os percentuais volumétricos dos constituintes do LFV.	66
Tabela 13 – Propriedades mecânicas à tração da matriz epóxi.	67
Tabela 14 – Propriedades mecânicas à tração do LFV.	68
Tabela 15 – Propriedades mecânicas à tração da matriz epóxi com descontinuidade geométrica.	70
Tabela 16 – Propriedades mecânicas à tração do laminado compósito LFV.0/90° com descontinuidade geométrica.	72
Tabela 17 – Propriedades mecânicas à tração do laminado compósito LFV.45° com descontinuidade geométrica.	74
Tabela 18 – Resistência Residual.	76
Tabela 19 – Concentradores de tensão experimentais e analíticos.	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
CP	Corpo de prova
CP's	Corpos de prova
LFV	Laminado de fibra de vidro
PLA	Poliácido láctico (do inglês <i>Polylactic Acid</i>)
PRF	Polímeros reforçados com fibras
PRFC	Polímeros reforçados com fibras de carbono
PRFV	Polímeros reforçados com fibras de vidro
RE	Resina Epóxi
T.LFV.0/90	Corpo de prova sem furo do laminado de fibra de vidro (orientação 0/90°)
T.LFV.45	Corpo de prova sem furo do laminado de fibra de vidro (orientação 45°)
T.RE	Corpo de prova sem furo de resina epóxi
TF.12.LFV.0/90	Corpo de prova com furo, largura de 12mm do laminado de fibra de vidro (orientação 0/90°)
TF.12.LFV.45	Corpo de prova com furo, largura de 12mm do laminado de fibra de vidro (orientação 45°)
TF.12.RE	Corpo de prova com furo e largura de 12mm de resina epóxi
TF.18.LFV.0/90	Corpo de prova com furo, largura de 18mm do laminado de fibra de vidro (orientação 0/90°)
TF.18.LFV.45	Corpo de prova com furo, largura de 18mm do laminado de fibra de vidro (orientação 45°)
TF.18.RE	Corpo de prova com furo e largura de 18mm de resina epóxi
TF.36.LFV.0/90	Corpo de prova com furo, largura de 36mm do laminado de fibra de vidro (orientação 0/90°)
TF.36.LFV.45	Corpo de prova com furo, largura de 36mm do laminado de fibra de vidro (orientação 45°)
TF.36.RE	Corpo de prova com furo e largura de 36mm de resina epóxi
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
a	massa da amostra seca
d	Diâmetro do furo circular
D	Densidade do compósito
D_m	Densidade da matriz do laminado compósito
D_r	Densidade do reforço do laminado compósito
E	Módulo de elasticidade
E_m	Módulo de elasticidade da matriz
E_r	Módulo de elasticidade do reforço
E_{xx}	Módulo de elasticidade do material na direção transversal
E_{yy}	Módulo de elasticidade do material na direção longitudinal
f	frações de volumétricas dos constituinte
G_m	Módulo de cisalhamento transversal da matriz
G_r	Módulo de cisalhamento transversal do reforço
G_{xy}	Módulo de cisalhamento transversal do material no plano xy
K_t	Fator de concentração de tensão
K_{ts}	Fator de concentração de tensão de cisalhamento
K_t^∞	Fator de concentração de tensão para uma placa infinita
L	Comprimento
M_r	Fração mássica de matriz da amostra do laminado compósito
M_m	Fração mássica de matriz da amostra do laminado compósito
m_a	Massa da amostra
m_m	Massa da matriz
m_r	Massa do reforço
$P_{\text{máx. T}}$	Carga máxima de tração suportada pelo CP
V_f	Fração de volume das fibras

V_m	Fração volumétrica da matriz da amostra do laminado compósito
V_r	Fração volumétrica do reforço da amostra do laminado compósito
V_v	Fração de vazios do laminado compósito
W	Largura de placa finita submetida à tração
w	Massa do afundador parcialmente imerso na água
δ_i	Deslocamento medido pelo extensômetro no ponto i
$\Delta\sigma$	Variação de tensão dentro da região linear
$\Delta\varepsilon$	Variação de deformação dentro da região linear do gráfico
$\Delta\varepsilon_t$	Variação de deformação lateral entre dois pontos na região linear elástico
$\Delta\varepsilon_l$	Variação de deformação longitudinal entre os dois pontos usados para determinar $\Delta\varepsilon_t$
ε	Deformação
ε_i	Deformação linear em um dado ponto i
$\varepsilon_{\text{máx}}$	Deformação máxima longitudinal na seção transversal que contém o furo
$\varepsilon_{\text{méd}}$	Deformação normal média na seção transversal que contém o furo
ε_{rup}	Deformação na ruptura
ε_i	Deformação no ponto i
ρ	Densidade
σ	Tensão
σ^∞	Tensão uniforme a qual a chapa de largura infinita está submetida
σ_{LRT}	Limite de resistência à tração
$\sigma_{\text{máx}}$	Tensão máxima localizada devido à descontinuidade geométrica
σ_m	Tensão média na menor seção transversal que contém a descontinuidade geométrica
σ_n	Tensão normal e uniforme na chapa de largura finita submetida à região fora do furo
σ_N	Média do limite de resistência à tração dos corpos de prova com descontinuidade geométrica

σ_y	Distribuição de tensão ao longo da seção transversal para uma placa de largura finita, para $x > R$
τ	Tensão de cisalhamento
γ	Deformação por cisalhamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	OBJETIVOS	23
2.1	OBJETIVO GERAL	23
2.1.1	Objetivos Específicos	23
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
3.1	COMPÓSITOS	24
3.1.1	Compósitos Reforçados com Fibras	27
3.1.2	Matriz Polimérica	30
3.1.2.1	Resina Epóxi	31
3.1.3	Fibra de Vidro	31
3.1.4	Processos de fabricação	33
3.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS	35
3.2.1	Módulo de elasticidade	35
3.2.2	Coefficiente de Poisson	37
3.2.3	Módulo de cisalhamento	38
3.3	CONCENTRADOR DE TENSÃO	39
3.3.1	Furos em Laminados	41
3.4	TÉCNICA DIGITAL IMAGE CORRELATION (DIC)	44
3.4.1	Correlação Digital de Imagem Bidimensional - DIC-2D	45
4	METODOLOGIA	47
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS NO COMPÓSITO LAMINADO	48
4.2	FABRICAÇÃO DO COMPÓSITO LAMINADO	49
4.3	OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	50
4.4	TERMOGRAVIMETRIA DA RESINA	55
4.5	ENSAIO DE DENSIDADE VOLUMÉTRICA	55
4.6	CALCINAÇÃO	56
4.7	ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL	58
4.8	CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM	60
5	RESULTADOS	62
5.1	FABRICAÇÃO DO COMPÓSITO POR LAMINAÇÃO MANUAL	62

5.2	FABRICAÇÃO DOS CPS DE RESINA EPÓXI POR INJEÇÃO	63
5.3	DENSIDADE DA MATRIZ EPÓXI E DO LAMINADO COMPÓSITO . . .	64
5.4	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG) DA MATRIZ	65
5.5	FRAÇÕES MÁSSICA E VOLUMÉTRICA DOS CONSTITUINTES DO LAMINADO	66
5.6	ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL	66
5.6.1	Resina Epóxi - TF.RE	66
5.6.2	Laminado de fibra de Vidro - T.LFV.0/90 e T.LFV.45	67
5.7	ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL PARA OS CP's COM DESCONTINUI- DADE GEOMÉTRICA	69
5.7.1	Resina Epóxi - TF.RE	69
5.7.2	Laminado de Fibra de Vidro - T.LFV.0/90°	71
5.7.3	Laminado de Fibra de Vidro - T.LFV.45°	73
5.8	RESISTÊNCIA RESIDUAL	75
5.9	PERFIL DE DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO EXPERIMENTAL E ANALÍTICO	77
5.9.1	Resina Epóxi (RE)	77
5.9.2	Laminado Compósito LFV.0/90	78
5.9.3	Laminado Compósito LFV.45	79
5.10	CONCENTRADOR DE TENSÃO	80
5.11	DISTRIBUIÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM TORNO DO FURO COM AU- XILIO DA DIC	83
5.11.1	DIC - Descontinuidade Geométrica na matriz epóxi	83
5.11.2	DIC - Descontinuidade Geométrica no LFV.0/90°	85
5.11.3	DIC - Descontinuidade Geométrica no LFV.45	88
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
6.1	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	91
6.2	DENSIDADE, FRAÇÕES MÁSSICA E VOLUMÉTRICA DOS CONSTI- TUENTES	91
6.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS À TRAÇÃO	91
6.4	INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DA DESCONTINUIDADE GEOMÉTRICA	92
6.5	PERFIL DE DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO EXPERIMENTAL E ANALÍTICO	92
6.6	CONCENTRADOR DE TENSÃO	92

6.7	DISTRIBUIÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM TORNO DO FURO	93
7	TRABALHOS FUTUROS	94
	REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos compósitos como uma classe distinta de materiais ocorreu na metade do século XX, com a fabricação de compósitos multifásicos projetados de maneira deliberada, como os polímeros reforçados com fibras de vidro. Materiais com propriedades específicas e incomuns são indispensáveis para uma ampla gama de aplicações em alta tecnologia, como nas indústrias aeroespacial, submarina, de bioengenharia e transporte. Por exemplo, engenheiros aeronáuticos estão cada vez mais em busca de materiais estruturais que possuam baixa densidade, elevada resistência, rigidez, resistência à abrasão e ao impacto, além de serem altamente resistentes à corrosão. Essa combinação de características é bastante desafiadora.(CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Nos últimos 20 anos, os materiais compósitos têm desempenhado um papel crucial no desenvolvimento de tecnologias avançadas em diversos setores, como o automotivo, aeronáutico e de energia renovável. Esses materiais são amplamente valorizados por sua alta relação resistência/peso, durabilidade e adaptabilidade às mais variadas condições de serviço. Leveza, alta resistência, resistência à corrosão e durabilidade ao longo de sua vida útil são os principais benefícios dos polímeros reforçados com fibras (PRF). Formas de polímero reforçado com fibra de vidro ou carbono (PRFV ou PRFC) são amplamente utilizadas em aplicações estruturais. O PRFV é mais comum devido às suas propriedades de isolamento elétrico e transparência eletromagnética. Além disso, a produção do PRFV demanda menos energia em comparação com o PRFC (QURESHI, 2022).

De acordo com Dinita *et al.* (2023) e Shackelford (2022), uma das principais vantagens dos materiais compósitos é a capacidade de ajustar suas propriedades por meio da seleção dos materiais que os compõem. Essa escolha impacta diretamente as propriedades mecânicas do compósito final. Para os compósitos poliméricos reforçados com fibras, os principais fatores que influenciam seu desenvolvimento são: o tipo de reforço (fibras contínuas ou picadas, disponíveis em mantas ou tecidos); a escolha do tipo de fibra (tecidos com uma única fibra ou múltiplas fibras – tecidos híbridos); o tipo de resina utilizada; a proporção de fibras e de matriz; a orientação das fibras em relação à direção da carga aplicada (anisotropia); e a presença de descontinuidades geométricas (entalhes, furos, etc.).

Ao utilizar esses materiais em projetos de engenharia, eles estarão sujeitos a tensões e deformações que frequentemente são alteradas devido às descontinuidades geométricas presentes no projeto, como a colocação de rebites ou parafusos em diversos tipos de acoplamentos. Tais

descontinuidades geométricas são muitas vezes indispensáveis para viabilizar conexões entre componentes estruturais, podendo se manifestar de diferentes maneiras, como furos, ranhuras e diversos tipos de entalhes. A presença dessas descontinuidades nas seções dos elementos estruturais é, geralmente, um dos principais fatores que impactam diretamente a resistência mecânica do material, conforme mencionado por Norton (2020), e isso também é válido para materiais compósitos.

A influência das descontinuidades geométricas em laminados compósitos poliméricos é um tema de grande interesse. Por isso, o estudo do comportamento mecânico de laminados compósitos com um único furo circular tem atraído significativa atenção. Esse tipo de descontinuidade geométrica foi amplamente investigado por Fontes (2017), Targino *et al.* (2019), Tinô e Aquino (2016) e Khechai *et al.* (2018b), que analisaram a influência da variação no diâmetro do furo circular com o objetivo de avaliar o impacto da razão d/W .

Este trabalho investiga o efeito de concentradores de tensão em dois materiais distintos: um polímero puro à base de resina epóxi e um laminado compósito de fibra de vidro. Além disso, será investigado o efeito da anisotropia no laminado, variando a orientação das fibras em $0/90^\circ$ e 45° em relação à direção de aplicação da carga. Serão realizados ensaios experimentais com amostras apresentando e não apresentando um furo concêntrico, considerando três razões d/W para avaliar o comportamento mecânico e os modos de falha associados. Diferentemente de outros trabalhos, a razão d/W será modificada, reduzindo a largura da seção transversal dos corpos de prova e mantendo fixo o diâmetro do furo. As amostras serão submetidas a ensaios de tração uniaxial auxiliados pela técnica de Correlação Digital de Imagem (DIC), permitindo uma análise comparativa dos efeitos da concentração de tensão nos dois materiais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar as propriedades mecânicas, a anisotropia e a concentração de tensão causadas por um furo circular concêntrico em um laminado compósito reforçado com fibra de vidro, submetido a carga de tração uniaxial.

2.1.1 Objetivos Específicos

- Fabricar e determinar os constituintes do laminado, incluindo os percentuais de fibras, resina e vazios, além de suas respectivas densidades volumétricas;
- Investigar as propriedades mecânicas de um polímero a base de resina epóxi (RE), quando submetidos a carregamento de tração uniaxial, com e sem a presença de furo concêntrico variando a largura da seção longitudinal dos CP's;
- Avaliar as propriedades mecânicas de um laminado compósito polimérico reforçado com tecido bidirecional de fibras de vidro-E, nas configurações LFV.0/90° e LFV.45°, submetidos a carregamento de tração uniaxial, com e sem a presença de furo concêntrico variando a largura da seção longitudinal dos CP's;
- Estudar a Resistência Residual (RS) e do fator de concentração de tensão (K_t) da matriz epóxi e do laminado em duas orientações, na presença de um furo concêntrico, à medida que a relação d/W é variada;
- Analisar o perfil de distribuição de tensão ao longo da seção transversal que contém a descontinuidade geométrica, fazendo uso de métodos analítico e experimental;
- Avaliar os campos de deformações em torno da descontinuidade geométrica, obtidos através da técnica de *Digital Image Correlation* (DIC);

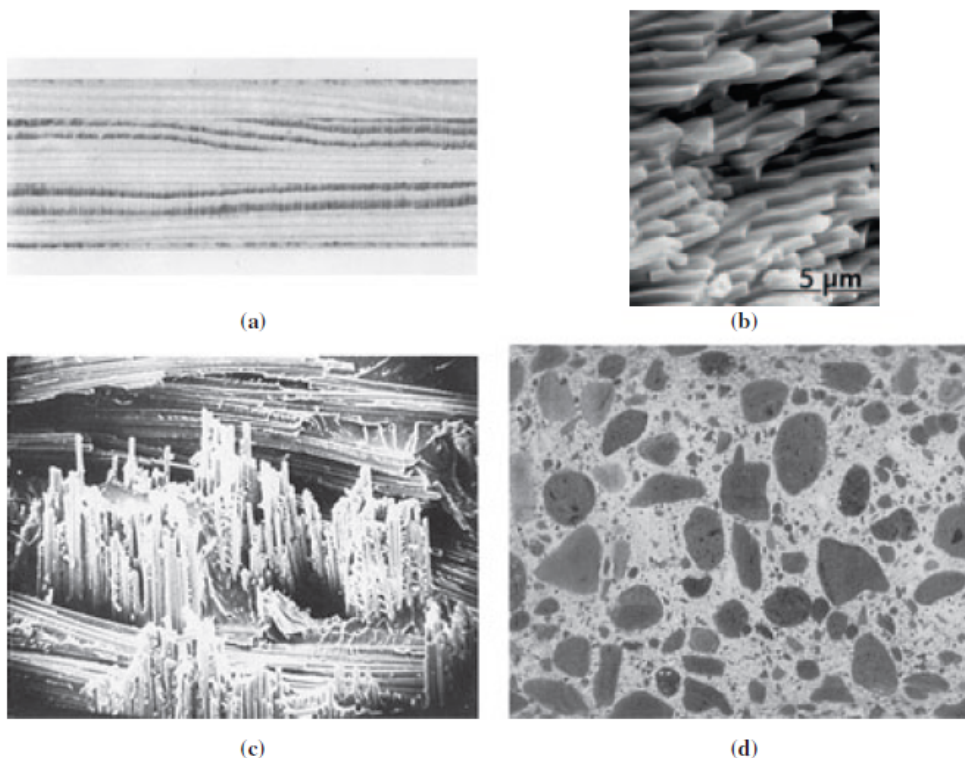
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 COMPÓSITOS

Como o termo indica, um material compósito é diferente do material convencional macroscopicamente homogêneo. Atualmente, os materiais compósitos referem-se a materiais que contêm fibras fortes — contínuas ou não contínuas — embutidas em um material mais fraco ou matriz. A matriz mantém o arranjo geométrico das fibras e transmite a essas fibras a carga que atua no compósito. O material compósito resultante apresenta desempenho mecânico intermediário, ou seja, superior ao da matriz, mas diferente e muitas vezes inferior ao da reforço fibroso. Geralmente, esse material também apresenta algumas outras propriedades específicas (GAY, 2022).

Os materiais compostos podem ser selecionados para fornecer combinações incomuns de rigidez, resistência, densidade, desempenho em alta temperatura, resistência à corrosão, dureza ou condutividade. Casca de abalone, madeira, ossos e dentes são exemplos de compósitos naturais (WRIGHT; ASKELAND, 2021). As microestruturas de compósitos selecionados são mostradas na Figura 1.

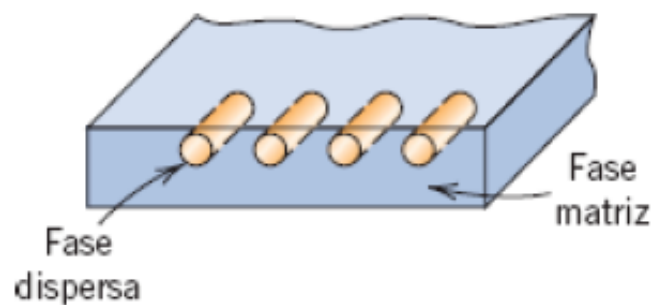
Figura 1 – Alguns exemplos de materiais compósitos: (a) compensado de folheado de madeira, (b) concha de abalone. (c) fibra de vidro e (d) concreto (reduzido em 50%).



Fonte: Retirado de Wright e Askeland (2021).

Conforme Callister e Rethwisch (2018), diversos materiais compósitos são formados por somente duas fases; uma fase constante, chamada de matriz, que envolve a outra fase, comumente denominada de fase dispersa ou reforço. As propriedades das fases constituintes definem as propriedades dos compósitos, dependendo da quantidade relativa e da geometria da fase dispersa. Entendem-se por geometria da fase dispersa o formato, o tamanho, a disposição e a orientação das partículas. A Figura 2 traz a representação esquemática das fases de um compósito.

Figura 2 – Representações esquemáticas das fases de um compósito



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2018).

O comportamento mecânico dos compósitos reforçados depende da resistência e do módulo de Young das fibras, da estabilidade e da resistência da matriz. Orientações e composições adequadas das fibras proporcionam características desejadas e propriedades funcionais dos compósitos equivalentes ao aço, com maior rigidez do que o alumínio e menor densidade relativa do que o aço. Os compósitos reforçados com fibra são mais acessíveis e muito populares devido à sua resistência muito alta em comparação com outros compósitos de matriz polimérica (MORAMPUDI *et al.*, 2021).

Nos compósitos, o papel da matriz é dar forma à parte composta, proteger os reforços do meio ambiente e conceder a transferência de cargas para o reforço e tenacidade ao material. As fibras, com seu alto módulo de elasticidade, contribuem significativamente para as propriedades mecânicas (DINITA *et al.*, 2023).

Quando comparamos os compósitos aos metais, mostram diversas particularidades, como: menor peso, moldáveis em formas complexas, baixa condutividade térmica, expansão térmica e boa resistência à fadiga. Entretanto, esses materiais também apresentam limitações, como o valor dos materiais, um elevado tempo de preparação e danos invisíveis (SIMÊNCIO, 2016).

De acordo com Reddy (2003), os materiais compósitos são comumente formados em três tipos diferentes: (1) compósitos fibrosos, que consistem em fibras de um material em outro material de matriz; (2) compósitos particulados, que são compostos de partículas de tamanho macro de um material em outro material de matriz; e (3) compósitos laminados, que são constituídos por camadas de diferentes materiais, incluindo os compósitos dos dois primeiros tipos.

A natureza dos compósitos com seus componentes básicos matriz e reforço, que estão disponíveis em uma ampla variedade de produtos semiacabados, permitem a fabricação de peças compósitas através de uma ampla gama de diferentes processos (BHATTACHARYYA; FAKIROV, 2012). Com relação a classificação dos compósitos, Barbero (2017) afirma que os materiais compósitos podem ser classificados de várias maneiras, sendo os principais fatores os seguintes:

- Reforço
 - Fibras longas contínuas
 - Orientação de fibra unidirecional;
 - Orientação bidirecional de fibra (tecido, tapete costurado, etc.);
 - Orientação aleatória (manta de fio contínuo);
 - Fibras descontínuas
 - Orientação aleatória (por exemplo, esteira de fios picados);
 - Orientação preferencial (por exemplo, placa de fios orientados);
 - Partículas
 - Orientação aleatória
 - Orientação preferencial
- Laminado
 - Lâmina unidirecional: uma única lâmina (também chamada de camada ou dobra), ou várias lâminas com o mesmo material e orientação em todas as lâminas.
 - Laminado: várias lâminas empilhadas e coladas, onde pelo menos algumas lâminas têm orientação ou material diferente.
 - Compósitos a granel, para os quais as lâminas não podem ser identificadas, incluindo compósitos compostos de moldagem a granel, compósitos reforçados com partículas e assim por diante.

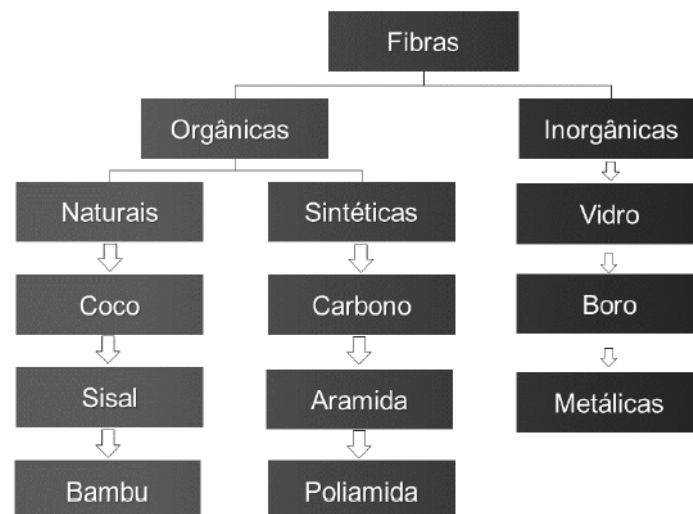
- Estrutura híbrida
 - Material diferente em várias lâminas (por exemplo, bimetálicos).
 - Reforço diferente em uma lâmina (por exemplo, boro misturado e fibras de carbono).

Os principais fatores que impulsionam o uso de compósitos são a redução de peso, resistência à corrosão e redução do número de peças. Outras vantagens incluem transparência eletromagnética, fortalecimento para impacto, resistência à erosão e ao desgaste, amortecimento acústico e de vibração, vida útil aprimorada à fadiga, isolamento térmico/acústico, baixa expansão térmica, baixa ou alta condutividade térmica, auto-reparação, baixa ou alta permeabilidade, resistência ao fogo e retardamento do fogo, ablação, proteção contra raios, resposta magnetoelétrica, entre outras (BARBERO, 2017).

3.1.1 Compósitos Reforçados com Fibras

Conforme Callister e Rethwisch (2018), os compósitos mais importantes, tecnologicamente, são aqueles em que o reforço está na forma de uma fibra. Frequentemente, o projeto dos compósitos reforçados com fibras tem objetivos que incluem alta resistência e/ou rigidez em relação ao peso. Essas características são apresentadas em termos dos fatores resistência específica e módulo específico, que equivalem, nessa ordem, às razões entre o limite de resistência à tração e a massa específica e entre o módulo de elasticidade e a massa. Desta forma, podemos usar os diferentes tipos de fibras, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Tipos de fibras utilizadas na fabricação de compósitos



Fonte: Retirado de Simêncio (2016).

Um laminado é composto por uma variedade arbitrariamente orientada de camadas ou laminas unidas. Cada camada pode ter uma espessura diferente, orientação das direções das fibras e propriedades anisotrópicas. Algumas camadas são posicionadas de modo que suas fibras estejam orientadas geralmente a 30°, 45° ou 60° em relação umas às outras. Isso aumenta a resistência do laminado às cargas aplicadas. Um caso especial de material anisotrópico é um material ortotrópico. Quando as fibras de todas as camadas estão posicionadas na mesma orientação, o laminado representa um material ortotrópico (UGURAL, 2022). A Tabela 1 mostra propriedades de algumas fibras e de materiais na forma maciça, demonstrando a importância das fibras para se obter as excelentes propriedades mecânicas dos compósitos fibrosos.

Tabela 1 – Propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça

Material	Módulo de elasticidade, E (GPa)	Resistência à tração, σ_u (GPa)	Densidade, ρ (kg/dm ³)	Módulo específico, E/ρ	Resistência específica, σ_u/ρ
Fibras:					
Vidro E	72	3.5	2.54	28.5	1.38
Vidro S	87	4.3	2.49	35.0	1.70
Carbono (Pitch CP-	690	2.2	2.15	321	1.00
Carbono (PAN C	345	2.3	1.85	186	1.24
Boro	393	3.1	2.70	146	1.15
Sílica	72.4	5.8	2.19	33	2.65
Tungstênio	414	4.2	19.3	21	0.22
Berílio	240	1.3	1.83	131	0.71
Kevlar® 49	131	3.6	1.45	90	2.48
Materiais convencionais:					
Aço	210	0.34 – 2.1	7.8	26.9	0.043 – 0.27
Ligas de Al	70	0.14 – 0.62	2.7	25.9	0.052 – 0.23
Vidro	70	0.7 – 2.1	2.5	28	0.28 – 0.84
Tungstênio	350	1.1 – 4.1	19.3	18.1	0.057 – 0.21
Berílio	300	0.7	1.83	164	0.38

Fonte: Retirado de Moura (2010)

Os polímeros geralmente são selecionados como matriz, pois têm baixa densidade e boa adesão com as fibras. Os polímeros podem ser classificados como termorrígidos e termoplásticos, resultando em diferentes propriedades e processos de fabricação para materiais compósitos (HWANG, 2023).

Nos últimos 20 anos, investigações sobre compósitos poliméricos reforçados com fibras sintéticas (CPRF) utilizando materiais como fibras de vidro, carbono ou aramida têm demonstrado a criação de compósitos com resistência e rigidez excepcionais. Várias investigações têm sido realizadas para melhorar a ligação entre a interface da fibra e da matriz, modificando sua interação química, expandindo a região de transferência de carga das fibras e implementando

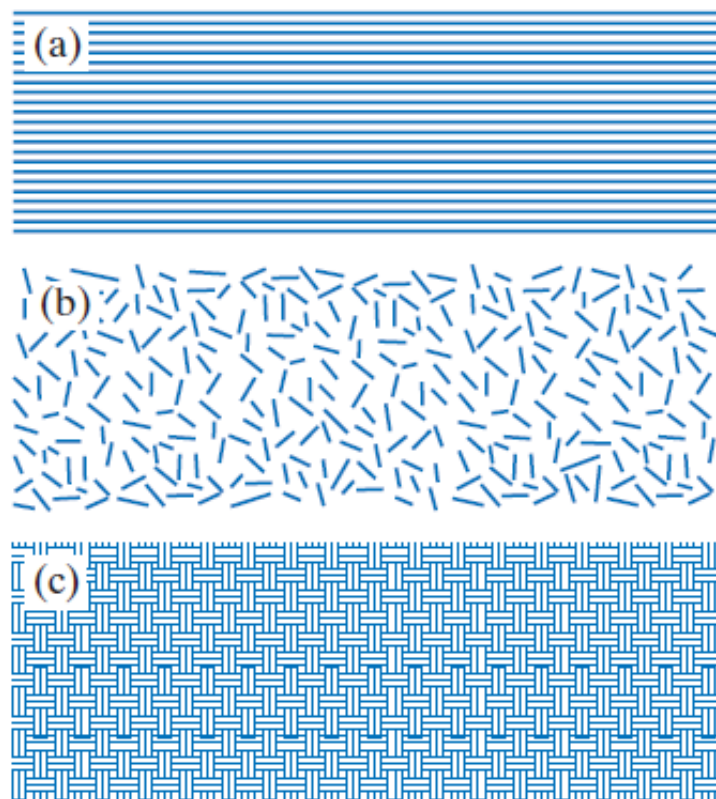
ambos os métodos simultaneamente (SHARMA *et al.*, 2023).

Segundo Barbero (2017), uma das principais razões para os compósitos apresentarem propriedades excelentes é resultado do fato das fibras terem propriedades mecânicas muito superiores às dos mesmos materiais na forma maciça. Isso é atribuído a uma redução acentuada no número de defeitos nas fibras em comparação com os da forma a maciça.

Outra vantagem das fibras, quando comparadas aos demais tipos de reforços, é que elas exibem alta relação de área superficial por unidade de volume, isso propicia uma melhor transferência de carga. Desta forma, com o aumento da relação comprimento da fibra/diâmetro da fibra, como resultado, obtém-se um aumento na relação área superficial/unidade de volume, sendo, deste modo, capaz de proporcionar uma melhor transferência de carga por todo o composto (MALLICK, 2007).

Três configurações de fibra mais comuns são mostradas na Figura 4. As partes (a) e (b) ilustram o uso de fibras contínuas e fibras discretas (curtas), nesta ordem. A parte (c) mostra a configuração de tecido tramado.

Figura 4 – Três configurações de fibra comuns para reforço de compósito são: (a) fibras contínuas, (b) fibras discretas ou curtas e (c) tecido tramado, que é usado para criar uma estrutura laminada.



Fonte: Retirado de Shackelford (2022).

Altenbach *et al.* (2018) resume alguns requisitos funcionais de fibras e matrizes em um compósito de matriz polimérica reforçada com fibra:

- as fibras devem ter um alto módulo de elasticidade e uma alta resistência final,
- as fibras devem ser estáveis e manter sua resistência durante o manuseio e fabricação,
- a variação das características mecânicas das fibras individuais deve ser baixa, seus diâmetros uniformes e seu arranjo na matriz regular,
- as matrizes têm que unir as fibras e proteger suas superfícies contra danos,
- as matrizes têm que transferir tensão para as fibras por adesão e/ou fricção e
- as matrizes devem ser quimicamente compatíveis com as fibras durante todo o período de trabalho.

Se as fibras de um compósito estão alinhadas ao longo da direção do carregamento, então a rigidez e a resistência são, grosso modo, uma média daquelas da matriz e das fibras, ponderadas por suas frações de volume. Mas nem todas as propriedades compostas são apenas uma combinação linear das propriedades dos componentes. Seu grande atrativo está no fato de que, frequentemente, se ganha algo a mais (ASHBY; JONES, 2006).

3.1.2 Matriz Polimérica

A fabricação de um compósito envolve a impregnação de fibras com uma resina termofixa ou um termoplástico. Tanto termoplásticos quanto termofixos são usados, mas os termofixos são preferidos porque são líquidos, monoméricos e têm baixa viscosidade, de modo que a impregnação das fibras é fácil e possível à temperatura ambiente. Eles são curados em polímeros reticulados, seja termicamente ou com endurecedores e/ou catalisadores. Termoplásticos são polímeros lineares que, ao serem aquecidos, podem se tornar fluidos viscoelásticos para infiltração de fibras contínuas ou mantas, ou misturados com fibras descontínuas sob pressão. O aspecto crítico do último é a alta temperatura necessária para a impregnação e, como consequência, a reprodutibilidade da morfologia do polímero durante o resfriamento (JONES, 2022).

Polímeros termofixos são compostos por longas cadeias (lineares ou ramificadas) de moléculas fortemente entrelaçadas entre si para formar estruturas de rede tridimensionais. Polímeros de rede ou termofixos são como um monte de cordas amarradas umas às outras em vários pontos e não apenas emaranhadas. Cada corda pode ter outras cordas laterais ligadas a

ela. Termofixos são geralmente mais fortes, mas mais frágeis do que termoplásticos. Termofixos não derretem quando aquecidos, mas começam a se decompor. Eles não podem ser facilmente reprocessados após a ocorrência da reação de entrelaçamento, e, portanto, a reciclagem é difícil (WRIGHT; ASKELAND, 2021).

3.1.2.1 Resina Epóxi

As resinas epóxi podem estar na forma de líquidos, pastas ou pós, o que facilita significativamente a sua modificação por mistura com aditivos reativos ou não reativos. As epóxis, devido a uma ampla gama de endurecedores, podem curar à temperatura ambiente ou elevada, atingindo propriedades mecânicas e térmicas favoráveis. No entanto, elas são reforçadas com fibras sintéticas e naturais, como vidro, carbono, basalto, aramída, juta ou linho, devido à sua baixa resistência ao impacto e fragilidade. Os plásticos reforçados com fibras de vidro, em particular os compósitos reforçados com epóxi, são utilizados nas indústrias da construção, aviação e marítima devido às suas propriedades mecânicas vantajosas, leveza, resistência às condições atmosféricas e baixo custo (MATYKIEWICZ, 2020).

Adesivos à base de epóxi estão sendo cada vez mais utilizados para unir diversos substratos, como estruturas de concreto, compósitos poliméricos e componentes metálicos. As resinas epóxi se ligam para formar uma substância amorfa altamente reticulada com uma microestrutura que oferece várias vantagens, incluindo uma variedade de técnicas de cura, boa molhabilidade, mínima contração durante a cura, resultando em uma melhor união com a maioria dos substratos, melhor resistência à corrosão, alta resistência mecânica e coesiva, e resistência química e térmica satisfatórias (KANGISHWAR *et al.*, 2023).

3.1.3 Fibra de Vidro

A fibra de vidro tem sido amplamente utilizada como reforço no mercado de compósitos de poliméricos reforçados com fibras. Hoje, os produtos de fibra de vidro representam mais de 95% dos reforços de fibras usados na indústria de compósitos, principalmente devido à sua relação altamente atraente entre desempenho e preço. Apesar de sua imagem relativamente “low-tech” como um reforço de compósito, a produção de fibras de vidro evoluiu para uma tecnologia muito complexa, com requisitos que desafiam o estado da arte em pesquisa e desenvolvimento de ciência dos materiais. Possivelmente, o componente mais crítico envolvido na fabricação de fibras de vidro e seus compósitos é o tamanho da fibra (THOMASON, 2019).

As fibras de vidro são geralmente extraídas de uma mistura fundida de areia de quartzo, calcário, dolomita e parafina, bem como uma certa fração de soda e ácido bórico. Para facilitar o processo ou alcançar o desempenho desejado, uma fração apropriada de TiO_2 , ZrO_2 ou Al_2O_3 também é incorporada. Os componentes e o processo de extração afetam grandemente o desempenho das fibras finais (YI *et al.*, 2017).

Controlando a composição química e o processo de fabricação, é possível obter uma ampla variedade de fibras de vidro para diferentes tipos de aplicações. No entanto, elas exibem as propriedades típicas do vidro, como dureza, resistência à corrosão e inércia. Além disso, são flexíveis, leves e baratas. Essas propriedades fazem das fibras de vidro o tipo mais comum de fibra usada em aplicações industriais de baixo custo. A resistência elevada das fibras de vidro é atribuída ao baixo número e tamanho dos defeitos na superfície da fibra. Todas as fibras de vidro têm rigidez similar, mas apresentam diferentes valores de resistência e resistência à degradação ambiental (BARBERO, 2017).

Algumas composições de vidro comuns usadas como fibra de reforço, são listadas na Tabela 2. Cada uma é resultado de um desenvolvimento considerável, que levou à utilidade ideal para aplicações específicas.

Tabela 2 – Composições de fibras de vidro de reforço

Designação	Característica	Composição (% p)								
		SiO_2	$(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	B_2O_3	TiO_2	ZrO_2
Vidro-A	Sílica de cal de soda comum	72	< 1	10	14					
Vidro-AR	Resistente a bases alcalinas	61	< 1	5	< 1	14	3	6	7	10
Vidro-C	Resistente à corrosão química	65	4	13	3	8	2	5		
Vidro-E	Composição elétrica	54	15	17	5	< 1	< 1	8		
Vidro-S	Alta resistência e alto módulo	65	25		10					

Fonte: Retirado de Shackelford (2022).

Segundo Yi *et al.* (2017), as fibras de vidro são incombustíveis e não se decompõem, sendo caracterizadas por boa estabilidade química, boa resistência ao calor, alta resistência à tração, alta isolamento elétrica, baixa deformação à tração, baixa isolamento e um baixo coeficiente de expansão térmica. Elas foram as primeiras fibras a serem usadas na preparação de compósitos com matriz polimérica. São comumente conhecidas como reforços de baixo custo para plásticos

reforçados com fibra de vidro (PRFV). Os diâmetros das fibras de vidro variam de 5 a 20 μm , e um diâmetro de fibra mais fino geralmente resulta em melhor desempenho. Algumas suas propriedades típicas estão listadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades de diferentes tipos de vidro

Tipo de vidro	Densidade (g/cm^3)	Resistência à Tração (GPa)	Módulo de Young (GPa)	Alongamento %	Coefficiente de Poisson
E-glass	2.58	3.445	72.3	4.8	-
C-glass	2.52	3.31	68.9	4.8	0.2
S2-glass	2.46	4.89	86.9	5.7	-
A-glass	2.44	3.13	68.9	4.8	0.22
D-glass	2.12	2.415	51.7	4.6	-
R-glass	2.54	4.135	85.5	4.8	-
EGR-glass	2.72	3.445	80.3	4.8	-
AR-glass	2.7	3.241	73.1	4.4	-

Fonte: Adaptado de Morampudi *et al.* (2021).

3.1.4 Processos de fabricação

Alguns processos de fabricação incluem fundição, fundição centrífuga, fundição contínua, formação de colar, moldagem por prensagem, moldagem por transferência, moldagem por pultrusão e enrolamento de filamentos. Além dos métodos já mencionados, outros métodos incluem moldagem termoplástica, infusão a vácuo, lay-up úmido, moldagem por compressão e enrolamento de filamentos por controle numérico computadorizado (CNC) (BHONG *et al.*, 2023).

A laminação manual (*Hand layup*) é o mais antigo entre todos os métodos de fabricação e é o menos dispendioso em relação a outros processos. Apenas um pequeno número de peças é feito por este método, o que não é adequado para produção em massa. Menos capital é necessário e produtos como dutos, piscinas, móveis, cascas, chapas, etc., são produzidos por este processo (MORAMPUDI *et al.*, 2021).

De acordo com Elkington *et al.* (2015) o processo de laminação manual se dá nas seguintes etapas:

- Preparação do Molde

O molde é limpo e preparado com um agente desmoldante para evitar que o laminado grude no molde após a cura.

- Corte e Posicionamento das Fibras

As fibras de reforço (como fibra de vidro ou carbono) são cortadas no tamanho e

formato desejados e posicionadas no molde. Este passo é crucial para garantir que as fibras estejam corretamente alinhadas e sem dobras.

- Aplicação da Resina

A resina é aplicada manualmente sobre as fibras posicionadas. Este processo pode ser feito com pincéis ou rolos para garantir que a resina penetre completamente nas fibras, eliminando bolhas de ar.

- Compactação e Remoção de Bolhas de Ar

As camadas de fibra e resina são compactadas para remover bolhas de ar e garantir uma boa impregnação da resina. Este passo pode incluir o uso de rolos ou ferramentas de compactação.

- Cura

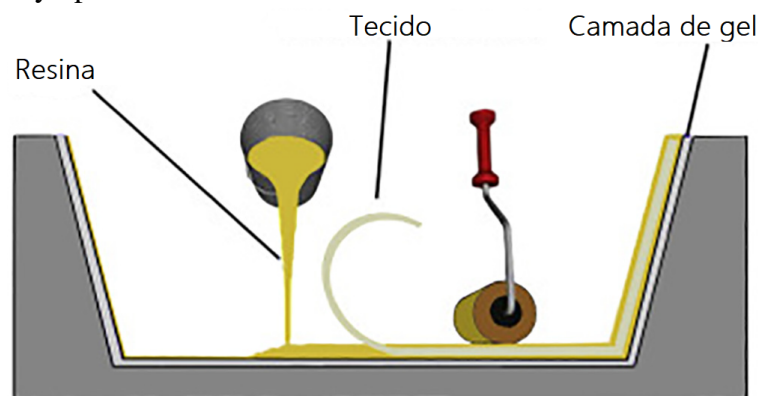
O laminado é deixado para curar, o que pode ser feito à temperatura ambiente ou em um forno, dependendo do tipo de resina utilizada. A cura pode ser acelerada com a aplicação de calor.

- Acabamento

Após a cura, o laminado é removido do molde e qualquer excesso de material é cortado ou lixado para obter o formato final desejado.

Nesse processo, ilustrado na Figura 5, tecidos de fibras são inicialmente posicionadas dentro de um molde, e uma fina camada de revestimento antiaderente é aplicada para facilitar a remoção. Posteriormente, o material de resina é despejado ou pincelado sobre o material de reforço, e um rolo é usado para efetivamente impulsionar a resina no tecido para melhorar a interação entre as camadas sucessivas do reforço e os materiais da matriz (DINITA *et al.*, 2023).

Figura 5 – Hand lay up – method.



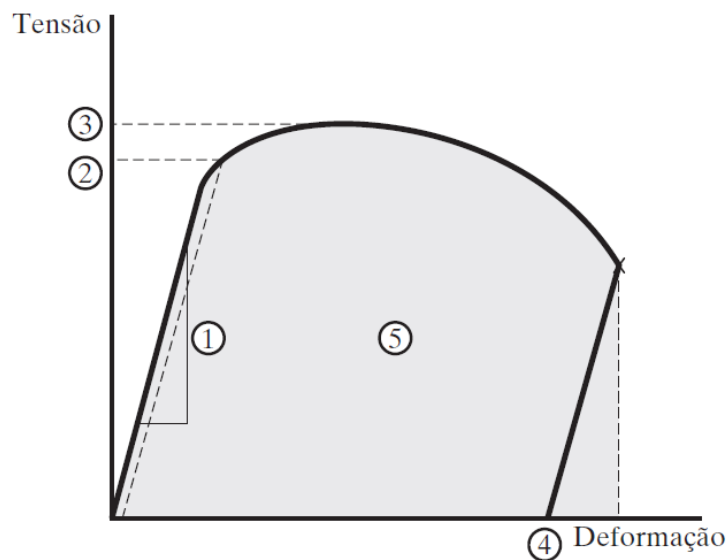
Fonte: Adaptado de Morampudi *et al.* (2021).

3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.2.1 Módulo de elasticidade

Conforme Wright e Askeland (2021), o estresse elástico e a deformação elástica estão linearmente relacionados em diversos materiais. A inclinação de uma curva tensão-deformação na região linear determina o módulo de Young ou módulo de elasticidade (E) de um material. As unidades de E são medidas em libras por polegada quadrada (psi) ou Pascals (Pa) (as mesmas unidades de estresse). A Figura 6 traz as principais propriedades mecânicas expressas através de um ensaio de tração.

Figura 6 – As principais propriedades mecânicas obtidas em um ensaio de tração: (1) Módulo de elasticidade, E ; (2) Tensão limite de escoamento, LE; (3) Limite de resistência à tração, LRT; (4) Ductilidade; e (5) módulo de resiliência.



Fonte: Retirado de Shackelford (2022).

O comportamento linear do gráfico de tensão–deformação na região elástica é uma exibição gráfica da lei de Hooke, que pode ser expressa matematicamente pela Equação 3.1

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.1)$$

onde σ é a tensão e ε a deformação.

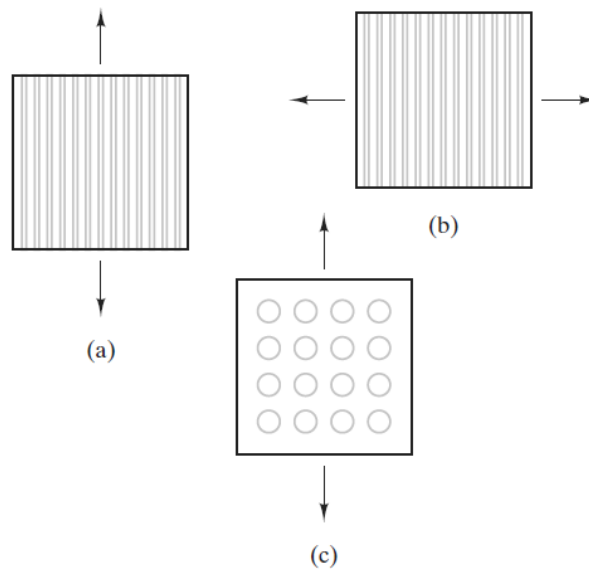
O módulo de elasticidade (E) é um dado muito útil. Ele corresponde a rigidez do material (ou seja, sua resistência à deformação elástica), que se expressa como a quantidade

de deformação abaixo da tensão limite de escoamento e a elasticidade do material durante a acomodação (SHACKELFORD, 2022).

Para materiais ortotrópicos, assim como para materiais isotrópicos, a aplicação de tensão normal em uma direção principal do material (ao longo de uma das interseções de três planos ortogonais de simetria do material) resulta em extensão na direção da tensão e contração perpendicular à tensão. A magnitude da extensão em uma direção principal do material sob tensão normal nessa direção é diferente da extensão em outra direção principal do material sob a mesma tensão normal nessa outra direção. Assim, diferentes módulos de Young existem nas várias direções principais do material (JONES, 2018).

Devido à grande diversidade das geometrias nos compósitos modernos, precisamos ter cautela com generalizações. A Figura 7 ilustra três geometrias idealizadas: (a) uma direção paralela às fibras contínuas em uma matriz (fases em paralelo), (b) uma direção perpendicular à direção das fibras contínuas (fases em série), e (c) uma direção relativa a um compósito agregado uniformemente disperso (SHACKELFORD, 2022).

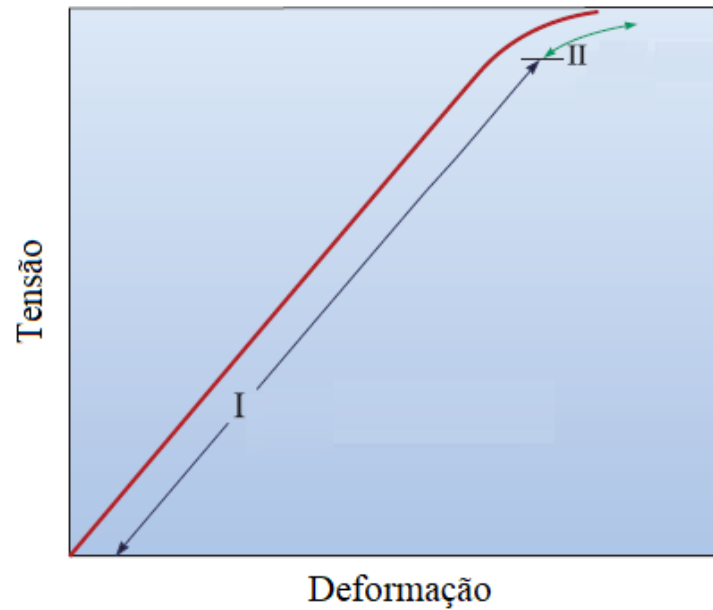
Figura 7 – Três geometrias de compósito idealizadas.



Fonte: Retirado de Shackelford (2022).

Quando a tensão aplicada é muito grande, a matriz começa a se deformar e a curva de tensão e deformação não é mais linear conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8 – A curva de tensão deformação para um compósito reforçado com fibra.

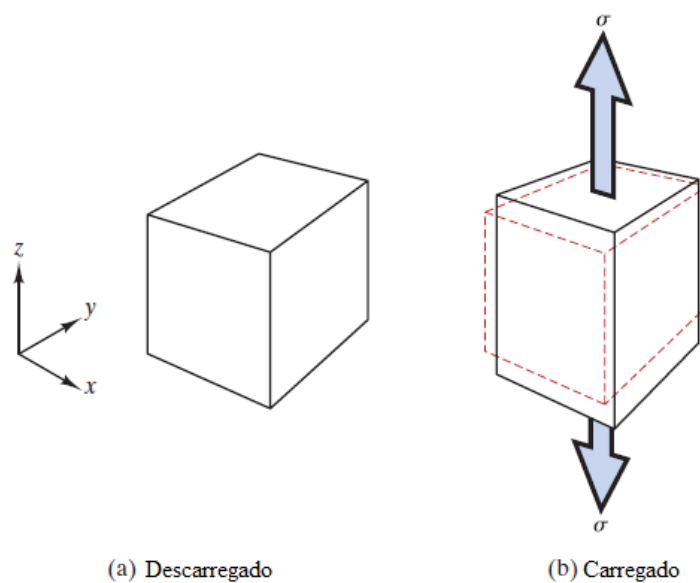


Fonte: Adaptado de Wright e Askeland (2021).

3.2.2 Coeficiente de Poisson

Quando se aplica a uma força de tração axial, uma amostra deformável não apenas sofre um alongamento, mas também sofrerá constrictões lateralmente, como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – O Coeficiente de Poisson (ν) caracterizado pela contração perpendicular à extensão causada por uma tensão de tração.



Fonte: Adaptado de Shackelford (2022).

Do mesmo modo, uma carga de compressão que atua sobre uma amostra provoca contração na direção da força e, no entanto, seus lados se alargam. No início do século XIX, o cientista francês S. D. Poisson notou que, dentro da região elástica, a razão entre essas deformações é uma constante. Essa constante é chamada de coeficiente de Poisson, ν , e para um material homogêneo e isotrópico seu valor numérico é único (HIBBELER, 2018).

Em termos matemáticos, temos a Equação 3.2

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \quad (3.2)$$

Conforme Callister e Rethwisch (2018), basicamente todos os materiais estruturais, ϵ_x e ϵ_z terão sinais opostos; dessa forma, o sinal de negativo foi incluído na expressão anterior para garantir que o valor de ν seja positivo.

Devido às diferentes propriedades nas duas direções principais do material, a contração pode ser maior ou menor do que a contração de um material isotrópico carregado de forma semelhante com o mesmo módulo elástico na direção da carga. Dessa forma, diferentes razões de Poisson estão associadas a diferentes pares de direções principais do material (JONES, 2018).

Para Compósitos Reforçados com Fibras o principal coeficiente de Poisson ν_{xy} obedece à regra da mistura. Os valores das razões de Poisson para fibras ou material da matriz raramente diferem significativamente, de modo que nem as características da matriz nem as da fibra dominam os principais ou os menores parâmetros elásticos (ALTENBACH *et al.*, 2018).

3.2.3 Módulo de cisalhamento

De acordo com Hibbeler (2018) deformação por cisalhamento γ_{xy} mensura a distorção angular do elemento relativamente aos lados que se encontravam, inicialmente, ao longo dos eixos x e y. Grande parte dos materiais de engenharia, apresentará comportamento elástico linear e, portanto, a lei de Hooke para cisalhamento pode ser expressa pela Equação 3.3.

$$\tau = G\gamma \quad (3.3)$$

Na expressão G é chamado módulo de cisalhamento ou módulo de rigidez e τ é tensão de

cisalhamento. Seu valor pode ser medido como a inclinação da reta no diagrama tensão-deformação de cisalhamento.

A abordagem da mecânica dos materiais leva a uma equação inversa da regra das misturas para o módulo de cisalhamento no plano. Se as fibras forem muito mais rígidas do que a matriz ($G_m \ll G_r$), o módulo de cisalhamento no plano pode ser aproximado pela aproximação dominada pela matriz, que é independente das propriedades da fibra (BARBERO, 2017). Essa aproximação é dada pela Equação 3.4

$$G_{xy} \approx \frac{G_m}{1 - V_r} \quad (3.4)$$

A matriz deforma mais do que a fibra no cisalhamento porque a matriz possui um módulo de cisalhamento menor. O comportamento não linear de tensão-deformação por cisalhamento típico de materiais compósitos reforçados por fibras é ignorado, ou seja, o comportamento é considerado como linear (JONES, 2018).

3.3 CONCENTRADOR DE TENSÃO

A concentração de tensões refere-se ao aumento significativo de tensões locais na área adjacente de discontinuidades geométricas, como rebaixos de eixo, chavetas, roscas, furos, ranhuras ou entalhes. O efeito do incremento de tensões é medido pelo fator de concentração de tensão geométrica ou teórica K_t , que se relaciona com a geometria do elemento (JIANG, 2019).

Conforme Norton (2020), o valor da concentração de tensão em alguma geometria específica é representado pelo fator geométrico de concentração de tensão K_t para tensões normais, ou por K_{ts} para tensões de cisalhamento. A tensão máxima em um concentrador de tensão local é, então, dada pelas equações 3.5 e 3.6

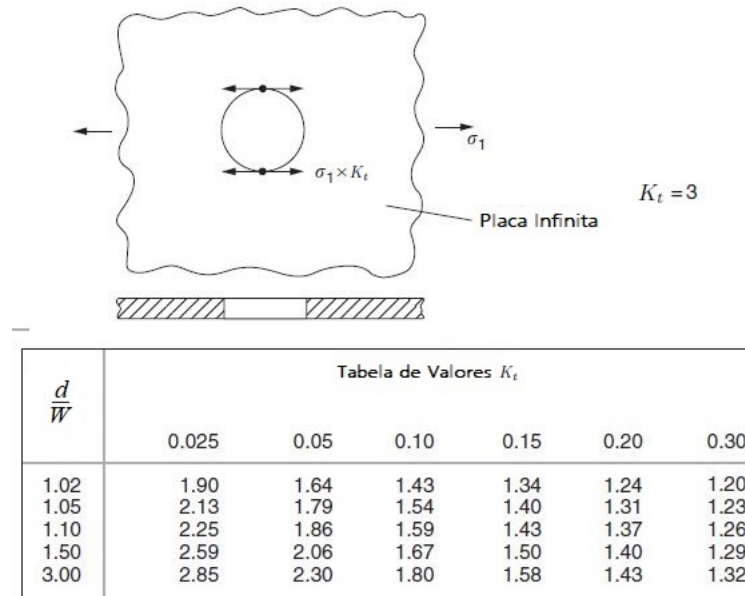
$$\sigma_{max} = K_t \sigma_{nom} \quad (3.5)$$

$$\tau_{max} = K_{ts} \tau_{nom} \quad (3.6)$$

onde σ_{nom} e τ_{nom} são as tensões nominais calculadas para a situação específica de solicitação

e seção transversal local, assumindo uma distribuição uniforme das tensões que incidem na seção transversal igual à uma geometria uniforme. A Figura 10 fornece detalhes do K_t para duas mudanças comuns na seção: um furo em uma placa carregada axialmente e um eixo com ombros em flexão.

Figura 10 – Fatores típicos de concentração de tensão.



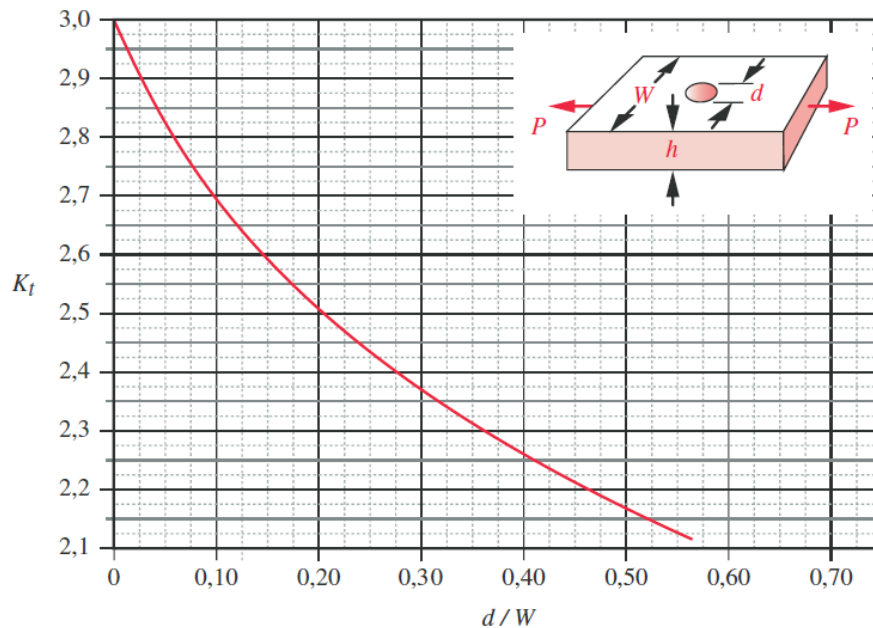
Fonte: Adaptado de Ashby e Jones (2012).

Em carregamento estático, os fatores de concentração de tensão são utilizados de acordo com o tipo de material. Para materiais dúcteis, o fator de concentração de tensão geralmente não é utilizado para prever a tensão crítica, pois a deformação plástica na região da tensão é localizada e provoca um aumento na rigidez. Em materiais frágeis, o fator de concentração de tensões geométrico K_t é aplicado à tensão nominal antes de relacioná-la com a resistência (BUDYNAS; NISBETT, 2019).

Os fatores de concentração de tensão são determinados por dois métodos, o método matemático baseado na teoria da elasticidade e métodos experimentais como a fotoelasticidade. Para formas geométricas simples, os fatores de concentração de tensão são determinados pela fotoelasticidade. Atualmente, pacotes de Análise de Elementos Finitos (FEA) são usados para determinar o fator de concentração de tensão para qualquer forma geométrica (BHANDARI, 2020).

O gráfico para o fator de concentração de tensão para uma placa retangular com um furo transversal carregada em tração ou compressão é mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Chapa fina em tração ou compressão simples com um furo central transversal.



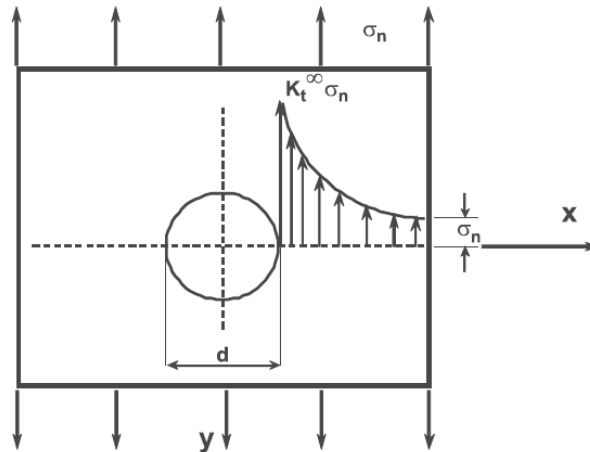
Fonte: Retirado de Norton (2020).

Um fato importante sobre a concentração de tensões é que um único entalhe ou furo isolado tem um efeito pior do que vários concentradores de tensão semelhantes colocados próximos uns dos outros; assim, um único entalhe em ‘V’ reduz a resistência de uma peça mais do que uma rosca contínua de forma quase idêntica. O efeito deletério de um concentrador de tensões inevitável pode, portanto, ser mitigado às vezes pela justaposição de irregularidades de forma adicionais de natureza semelhante, mas a superposição real de concentradores de tensões, como a introdução de um pequeno entalhe em um filete, pode resultar em um fator de concentração de tensões igual ou até superior ao produto dos fatores para os concentradores de tensões individuais (BUDYNAS; SADEGH, 2020).

3.3.1 Furos em Laminados

De acordo com Barbero (2017) Um material frágil falhará quando a tensão máxima (σ_{max}) atingir a resistência do material. Nesse caso, diz-se que o material é totalmente sensível a entalhes. Compósitos multicamadas, como laminados quase-isotrópicos, são capazes de suportar tensões nominais mais altas do que as previstas pela equação 3.5. Isso é explicado pelo conceito de sensibilidade ao entalhe, que também é usado no design de metais. Os altos valores de tensão previstos pela Equação 3.5 e ilustrados na Figura 12 causam danos precoces durante a carga, nas proximidades da descontinuidade.

Figura 12 – Distribuição de tensões próximo a um furo em uma placa infinita.



Fonte: Adaptado de Barbero (2017).

Laminados, como qualquer estrutura, devem ter furos para servir a diversos propósitos. Um propósito óbvio é acomodar um parafuso. Outro propósito é fornecer acesso de um lado do laminado para o outro. A análise das tensões ao redor dos furos é bastante difícil. Muitos materiais de engenharia isotrópicos, como aço ou alumínio, são suficientemente dúcteis para ceder e acomodar concentrações de tensão localmente nas proximidades de uma concentração de tensão. No entanto, a maioria dos materiais compósitos é consideravelmente menos dúctil do que metais isotrópicos. Portanto, os materiais compósitos têm a desvantagem dupla de maiores concentrações de tensão e menos capacidade de ceder do que os metais isotrópicos. Assim, os fatores de concentração de tensão sozinhos são insuficientes para a previsão de falha de placas ortotrópicas e anisotrópicas (JONES, 2018).

Conforme Pilkey *et al.* (2020), sob cargas em um plano, um laminado pode ser modelado como uma placa ortotrópica infinitamente larga carregada na direção x (Figura 12), assim, o K_t^∞ é dado por:

$$K_t^\infty = 1 + \sqrt{2 \left(\frac{E_{xx}}{E_{yy}} - \nu_{xy} + \frac{E_{xx}}{2G_{xy}} \right)} \quad (3.7)$$

A Equação (3.7) é válida para laminados simétricos balanceados com carga uniaxial no plano. Se a flexão ou o cisalhamento forem introduzidos, ou o laminado não estiver balanceado ou o laminado for assimétrico, a teoria apresentada a seguir não será mais válida.

A Equação (3.7) não prevê nenhuma influência do diâmetro do furo no Fator de Concentração de Tensão (K_t). No entanto, dados experimentais indicam que a resistência diminui

com o aumento do diâmetro do furo. Isso é atribuído ao fato de que uma zona de dano é criada perto da borda do furo. Quando o furo é pequeno, a zona de dano é pequena e não ocorre uma redução significativa na resistência. Por outro lado, uma grande zona de dano aparece perto de um furo grande, enfraquecendo o material (BARBERO, 2017).

Ainda de acordo com Barbero (2017), a distribuição de tensão mostrada na Figura 12 pode ser aproximada como:

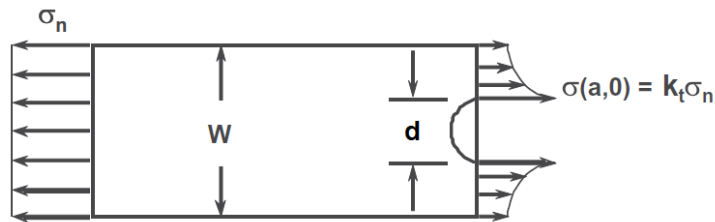
$$\sigma_x \approx \left[1 + \frac{1}{2}\xi^2 + \frac{3}{2}\xi^4 - \frac{(K_t^\infty - 3)}{2}(5\xi^6 - 7\xi^8) \right] \sigma_n f_w \quad (3.8)$$

com $\xi = a/y$, onde a é o raio do furo, y é a distância a partir do centro do furo, K_t^∞ é dado pela Equação 3.7, e f_w é um fator de correção utilizado quando a placa tem largura finita. Esta fórmula se aproxima bastante da solução exata com erros inferiores a dez por cento na maioria dos casos. Quando $d/W \leq 1/3$ (Figura 13), o fator de correção para largura finita pode ser aproximado como:

$$f_w = \frac{2 + (1 - d/W)^3}{3(1 - d/W)} \quad (3.9)$$

Onde d e W são o diâmetro do furo e a largura da placa, respectivamente.

Figura 13 – Placa finita mostrando a concentração real de tensão em um furo.



Fonte: Adaptado de Barbero (2017).

Conforme Ye *et al.* (1998), a diminuição da resistência decorrente da presença de discontinuidades geométricas em materiais compósitos também pode ser avaliada através da Resistência Residual (RS, ou Residual Strength). Em outras palavras, a partir da RS, é possível mensurar o nível de impacto adverso causado por uma discontinuidade geométrica em um compósito, sendo quantificado por meio da equação 3.10.

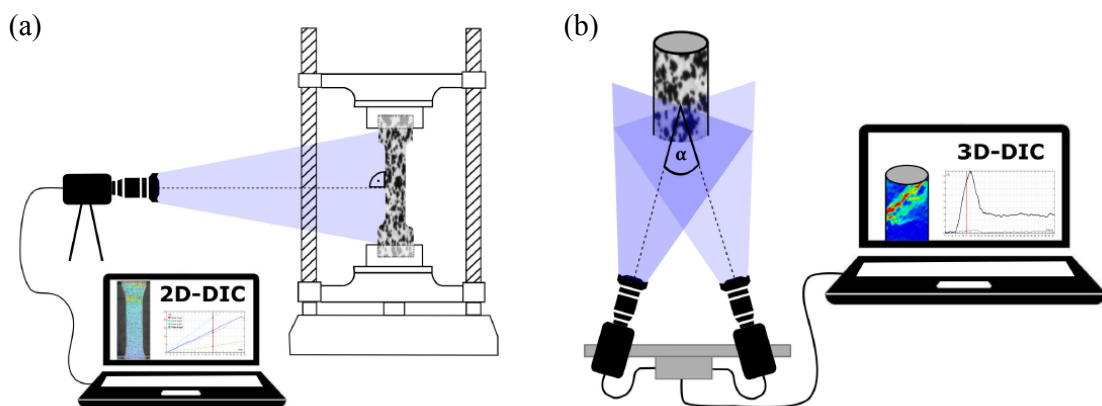
$$RS = \frac{\sigma_N}{\sigma_{LRT}} \quad (3.10)$$

Onde: σ_N é a resistência à tração média dos corpos de prova com descontinuidade geométrica, considerando a área de seção transversal sem a descontinuidade e σ_{LRT} é a resistência à tração do material.

3.4 TÉCNICA DIGITAL IMAGE CORRELATION (DIC)

Excelentes métodos para a caracterização de localizações de deformações relacionadas a diferentes critérios de instabilidade e diferentes escalas de comprimento são as chamadas técnicas de medição de campo completo, como a Correlação Digital de Imagem (DIC), inventada no início dos anos 1980, capaz fornecer campos de deslocamento/deformação 2D e 3D, Figura 14. A técnica DIC é um dos métodos ópticos e sem contato mais aplicados para medições de deslocamentos em larga escala, desde a escala macrométrica até a escala micrométrica e até submicrométrica (WEIDNER; BIERMANN, 2021).

Figura 14 – Representação esquemática das configurações de DIC. (a) Configuração 2D-DIC com uma câmera orientada perpendicularmente à superfície de uma amostra. (b) Configuração 3D-DIC com duas câmeras.



Fonte: Retirado de Mylo e Poppinga (2023).

A correlação digital de imagem (DIC) é um método óptico de campo completo e sem contato que pode capturar a forma, movimento e deformação de objetos sólidos. A base do método é a correspondência dos padrões de cinza de pontos de uma imagem da superfície de um objeto antes e depois da deformação. Os padrões de cinza dos pontos das imagens de um objeto são adquiridos, armazenados, digitalizados e correlacionados para calcular deslocamentos de

forma e superfície. Um processo de correspondência baseado nos níveis de intensidade de cinza é realizado, daí o nome do método correlação digital de imagem (GDOUTOS, 2022).

Coordenadas 2D da superfície podem ser medidas usando um sistema de câmera única, e isso é referido como DIC 2D. Medições de coordenadas 3D da superfície requerem no mínimo duas câmeras orientadas em um ângulo estereoscópico para realizar fotogrametria 3D além da correlação de imagens. Antes que as medições sejam feitas, o sistema de câmera/lente é calibrado capturando imagens de características com distâncias de separação conhecidas (BIGGER *et al.*, 2018).

A evolução dos computadores e a melhoria nas resoluções das câmeras digitais, possibilitaram a análise e quantificação de pequenos deslocamentos causados por diferentes níveis de tensão a partir da sobreposição de imagens. A revolução das imagens digitais impulsionou as possibilidades de observação trazendo consigo resoluções que podem chegar a $20\text{ }\mu\text{m/pixel}$, e quando associadas a algoritmos computacionais, tornam-se uma poderosa ferramenta aliada à engenharia diagnóstica não destrutiva (ASSIS *et al.*, 2022).

3.4.1 Correlação Digital de Imagem Bidimensional - DIC-2D

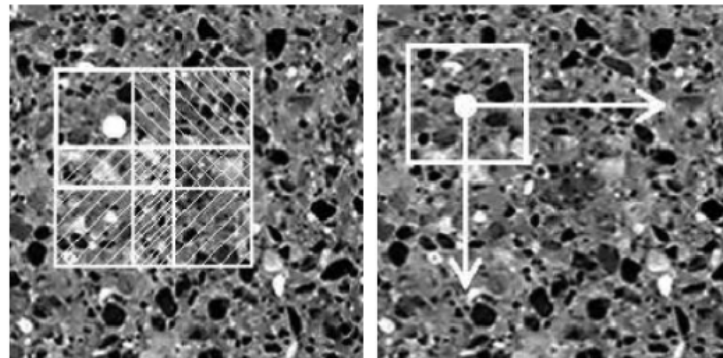
As imagens são capturadas por câmeras digitais, de alta precisão, que dispõem de sensores. Esses sensores são constituídos de pequenos elementos, sensíveis à luz, chamados de pixels. O sistema de correlação de imagem digital deve ter a capacidade de analisar diferentes intensidades de luz, bem como guardar padrões de escalas de cinza para cada pixel, de modo que cada ponto seja único (SANTOS *et al.*, 2015).

Os níveis de cinza variam numericamente entre 0 (preto) e 255 (branco) para uma imagem de 8 bits. Uma chamada área de interesse é cortada da imagem digital e pequenas subáreas sobrepostas de busca são escolhidas (Figura 15). Um padrão de deformação é detectado pela comparação de duas imagens consecutivas capturadas por uma câmera que permanece em uma posição fixa com seu eixo orientado perpendicularmente ao plano de deformação. Para encontrar um deslocamento local entre as imagens '1' e '2', uma zona de busca é extraída da segunda imagem (SKARŻYŃSKI *et al.*, 2011).

Ainda segundo Skarżyński *et al.* (2011), um vetor de deslocamento local correto para cada célula de interrogação é obtido por meio de uma função de correlação cruzada entre duas distribuições de brilho consecutivas em duas imagens digitais. A função calcula deslocamentos simplesmente possíveis correlacionando todos os valores de cinza da primeira imagem com

todos os valores de cinza da segunda imagem. O plano de correlação é avaliado em intervalos de pixel único, o que significa que a resolução é igual a um pixel. Ao ajustar uma função de interpolação à região próxima ao pico, o vetor de deslocamento é estabelecido com alta precisão (igual ao deslocamento de correlação). O pico na função de correlação indica que duas imagens estão se sobrepondo (assim, indica o ‘grau de correspondência’ entre duas imagens).

Figura 15 – Duas imagens digitais sucessivas com os subconjuntos de pixels quadrados marcados (quadrados brancos) e outros subconjuntos de pixels sobrepostos (quadrados com hachuras) da análise de Correlação Digital de Imagem (DIC).

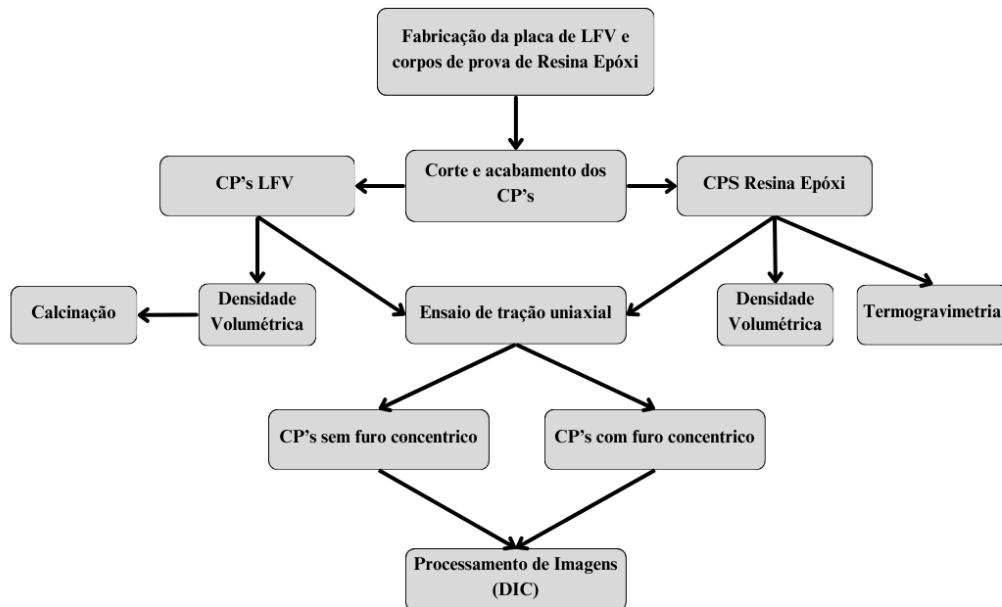


Fonte: Retirado de Skarżyński *et al.* (2011).

4 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os materiais utilizados para fabricação do compósito laminado de fibra de vidro (LFV), o processo de fabricação dos laminados, as configurações dos corpos de prova (CP's), os ensaios realizados para a caracterização dos materiais e o estudo analítico. A Figura 16 elucida as passos de todo o procedimento experimental utilizado para a realização desse estudo.

Figura 16 – Diagrama dos procedimentos realizadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os métodos experimentais utilizados na caracterização dos materiais estudados apresentam procedimentos normatizados. Na Tabela 4, são listadas as normas utilizadas em cada ensaio realizado.

Tabela 4 – Procedimentos experimentais normatizado.

ENSAIOS	NORMA
Densidade da Matriz Polimérica e Laminados Compósitos	ASTM D792-(2020)
Ensaio de Tração da Matriz Polimérica	ASTM D638-(2022)
Ensaio de Tração dos Laminados Compósitos	ASTM D3039/D3039M-(2017)
Ensaio de Tração com Furo	ASTM D5766/D5766M-(2018b)
Ensaio Padrão para Resposta ao Cisalhamento no Plano de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica por Ensaio de Tração de um Laminado $\pm 45^\circ$	ASTM D3518/D3518M-(2018)
Ensaio Padrão para conteúdo constituinte de materiais compostos	ASTM D3171-(2022)

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS NO COMPÓSITO LAMINADO

Para a fabricação do laminado composto por matriz epóxi com tecido de fibra de vidro, foi utilizado uma matriz polimérica composta pelo conjunto resina SQ 2001 e o endurecedor SQ 3154. De acordo com o fabricante esse conjunto de cura ambiente é recomendado para laminados de fibra de vidro, carbono e aramida (Kevlar). A Tabela 5 contém as propriedades do sistema, com base nas informações fornecidas pelo fabricante.

Tabela 5 – Características e propriedades dos componentes e do sistema de resina e endurecedor.

Características dos componentes		
	Resina SQ 2001	Endurecedor SQ 3154
Aparência	Líquido viscoso incolor	Líquido límpido incolor
Viscosidade a 20°C, cP	11.000 a 14.000	100 máximo
Densidade Específica g/cm³	1.16 +/- 0.01	1,005 +/- 0,015
Peso epóxi equivalente (EEW) %	182 – 192	
Propriedade do sistema não curado		
Proporção de mistura (Resina: Endurecedor)	100:50 partes em peso	
Temperatura de manipulação (°C)	18-30	
Tempo de utilização da mistura 100 g (gel time) a 20 °C	20 a 30 min.	
Tempo de endurecimento da mistura (100 g em película, 20° C)	3 a 4 horas	
Cura total a 20 °C	5 dias	
Propriedades do sistema curado		
Temperatura de Deflexão Térmica (HDT) (°C)	95-100	
Força de Compressão (psi)	5000	
Força de Tensão (psi)	3000 - 6200	
Elongação (%)	2.8	
Impacto Izod (ft lb/in)	0.2-0.6	
Dureza Barcol	Mín. 30	

Fonte: AVIPOL (2023).

Para reforço estrutural foi utilizado o tecido bidirecional com trama sarja 3 x 1 de fibra de vidro-E, comercialmente designado de AF-0201, mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Tecido de fibra de vidro-E sarja 3x1



Fonte: AVIPOL (2023).

De acordo com o fabricante, ideal para utilização em resinas poliésteres, epóxi, fenólicas ou ester vinílicas e recomendado para laminação manual de peças submetidas a esforço bi-direcional que requeiram alta resistência mecânica à tração e ao impacto. A Tabela 6 contém as propriedades do tecido, com base nas informações fornecidas pelo fabricante.

Tabela 6 – Características e propriedades do tecido de fibra de vidro.

Características do Produto	
Desenho	Sarja
Tratamento	N/A
Tipo de fio no urdume	Fio de fibra de vidro
Tipo de fio na trama	Fio de fibra de vidro
Gramatura (g/m ²)	160,00 ± 13,00
Espessura (mm)	0,16 ± 0,02
Largura (m)	0,75 ± 0,02
Resistência à tração no urdume (Kgf/cm)	40,00 ± 3,20
Resistência à tração na trama (Kgf/cm)	40,00 ± 3,20
Ponto de amolecimento (°C)	840,0
Temperatura máxima (°C)	Com solicitação mecânica 260,0 Sem solicitação mecânica 550,0

Fonte: AVIPOL (2023).

4.2 FABRICAÇÃO DO COMPÓSITO LAMINADO

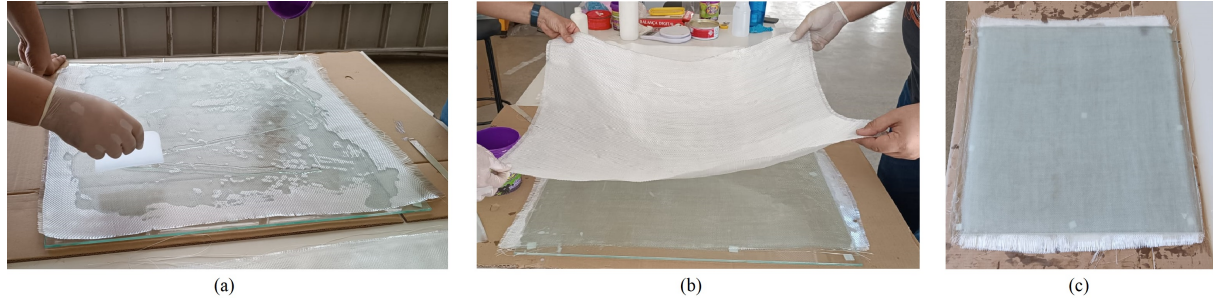
O laminado de fibra de vidro foi produzido através do método de laminação manual (hand lay-up), fabricado no Laboratório de Processos de Ensaios Mecânicos da Universidade Federal do Ceará - Campus Russas. A laminação dos compósitos foi realizada sobre uma lâmina de vidro com dimensões de 750 x 750 mm e 10 mm de espessura, utilizando um agente desmoldante à base de cera de carnaúba chamado TR Mold Release.

Primeiramente foi estipulada uma quantidade aproximada de resina para realizar a laminação. Assim, 450g de resina foi dividida em duas partes iguais e, gradualmente, foi adicionado o endurecedor utilizando uma relação de 1:2, com o objetivo de obter um tempo de gel razoável para realizar todo o processo de laminação. Para remover os gases e vapores liberados antes do processo de cura, a resina misturada foi levada a uma câmara de vácuo a -700 mmHg, por dois minutos, para só então dar início ao processo de laminação.

Antes de iniciar a laminação, foi necessário limpar a base de vidro e aplicar o desmoldante. Então, a superfície do vidro foi coberta com uma camada de resina epóxi, de modo a cobrir toda a área, seguida por camadas intercaladas de tecido e resina. O processo de impregnação dos tecidos foi feito camada por camada, utilizando uma espátula e um rolo para espalhar e remover o excesso de resina conforme ilustrado na Figura 18. O LFV foi feito com

seis (06) camadas de tecido multiaxial, colocadas de forma sequencial, mas mantendo a simetria do mesmo.

Figura 18 – Fabricação do LFV: (a) aplicação da resina, (b) sobreposição de camadas de tecido e (c) placa curada

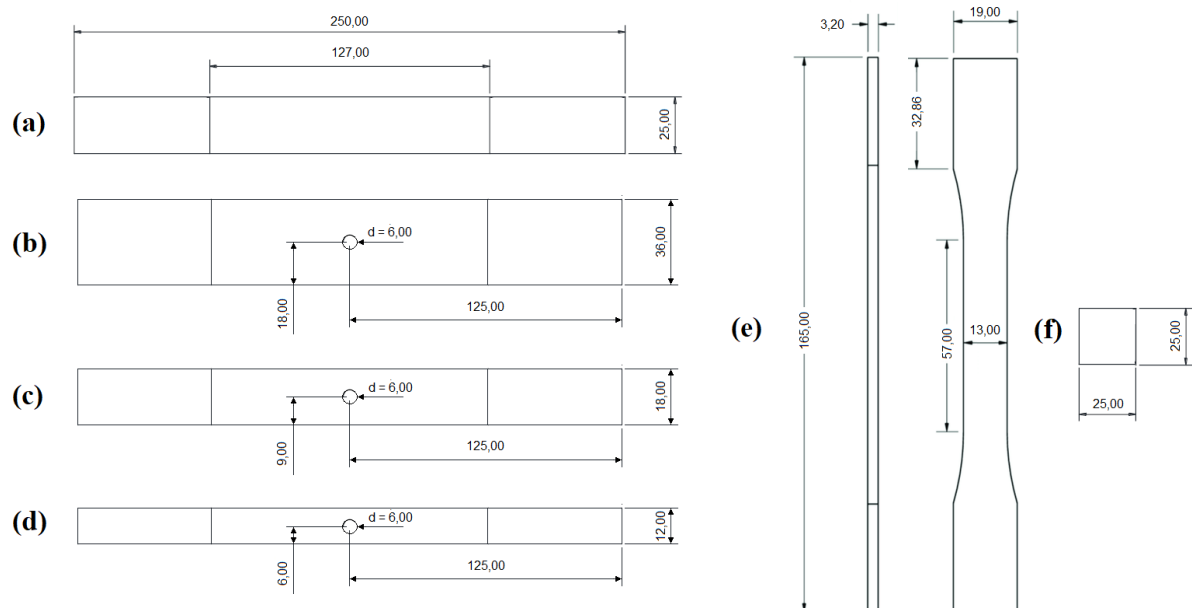


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova para os ensaios de tração uniaxial, densidade volumétrica e calcinação nas amostras do laminado e da resina curada seguiram as orientações das suas respectivas normas. As dimensões desses corpos de prova (em milímetros) são mostradas na Figura 19.

Figura 19 – Medidas dos CP's para os ensaios realizados: (a) Tração uniaxial laminado composto (ASTM D3039/D3039M-2017); (b), (c) e (d) Tração uniaxial na presença do furo concentrico (ASTM D5766-2018); (e) Tração uniaxial resina epóxi; (f) Densidade volumétrica (ASTM D792-2020)

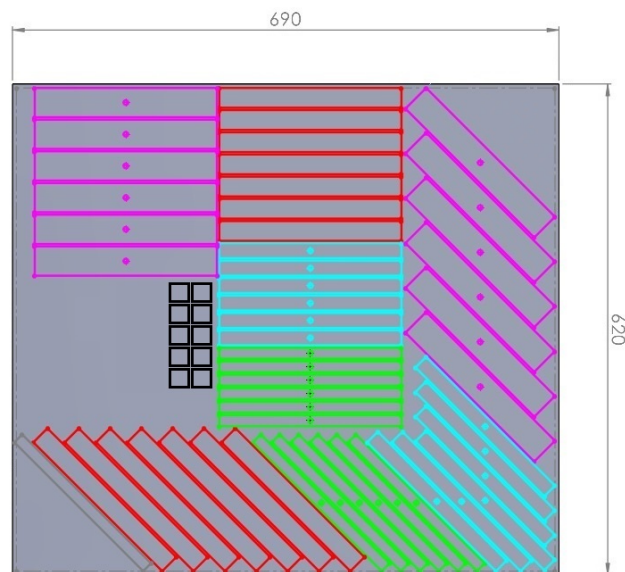


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a obtenção das amostras do laminado optou-se pelo corte com serra circular, fazendo uso do disco diamante segmentada IRWIN $\varnothing 4 - 3/8" \times 3/4"$ (110 mm x 20 mm). Posteriormente, as amostras foram lixadas e polidas, obtendo-se o acabamento e tolerância dimensional requeridas. Para as amostras com furos circulares de 6 mm, os furos foram feitos em um Fre-sadora Vitor & Bueno FU-360 com uma fresa de topo em aço rápido (HSS), com velocidade de corte de 40 mm/s. O fresamento mostrou-se eficaz uma vez que não gerava delaminações e rebarbas após a operação.

Para garantir a qualidade dos corpos de prova, foi removida uma faixa de aproximadamente 5,0 cm das bordas da placa, com o objetivo de eliminar possíveis descontinuidades e imperfeições, tais como variações de espessura e uma maior quantidade de defeitos internos decorrentes do processo de fabricação. Para obter as orientações desejadas e um melhor aproveitamento de material, optou-se pelo arranjo ilustrado na Figura 20 para a retirada dos corpos de prova da placa de LFV.

Figura 20 – Disposição dos CP's retirados do LFV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

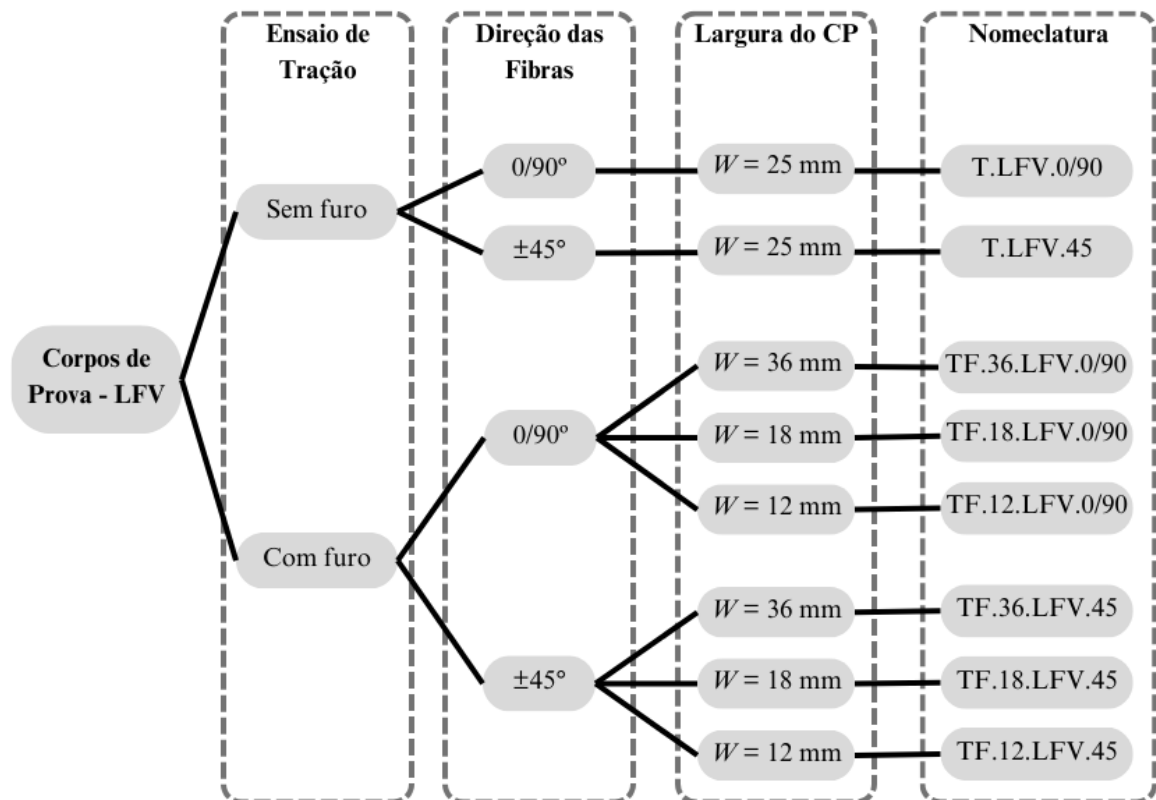
No âmbito dos estudos propostos, é fundamental compreender a influência da anisotropia presente no tecido em relação ao ensaio de tração uniaxial. Para esta análise, foi necessário obter corpos de prova com direções diferentes no tecido, optando-se pelas orientações de $0/90^\circ$ e $\pm 45^\circ$ em relação à aplicação da carga os laminados.

Foram cortados corpos de prova para a realização do ensaio de tração uniaxial na presença de descontinuidade geométrica, caracterizada por um furo central de 6,0 mm de

diâmetro na seção longitudinal, nas direções $0/90^\circ$ e $\pm 45^\circ$. O objetivo foi analisar as influências da anisotropia e da descontinuidade geométrica. Para verificar a influência da relação entre o diâmetro e a largura do elemento, foram confeccionados corpos de prova com de diferentes larguras (36 mm, 18 mm e 6 mm) em ambos os laminados.

Para melhor compreensão, a Figura 21 apresenta um esquema da nomenclatura de todos os corpos de prova de LFV confeccionados.

Figura 21 – Organização da nomenclatura dos CP's do LFV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a comparação com as propriedades de um material isotrópico, foram fabricadas das amostras de resina curada. A mistura resina/endurecedor foi vertida em um molde em PLA - Políácido láctico (do inglês *Polylactic Acid*) obtido por impressão 3D que foi posicionado entre duas lâminas de vidro recobertas com desmoldante, conforme mostrado na Figura 22.

Com o objetivo de analisar as influências da isotropia e da descontinuidade geométrica, utilizando-se do mesmo método citado acima, foram moldados corpos de prova para a realização do ensaio de tração uniaxial na presença de descontinuidade geométrica, caracterizada por um furo central de 6,0 mm de diâmetro na seção longitudinal.

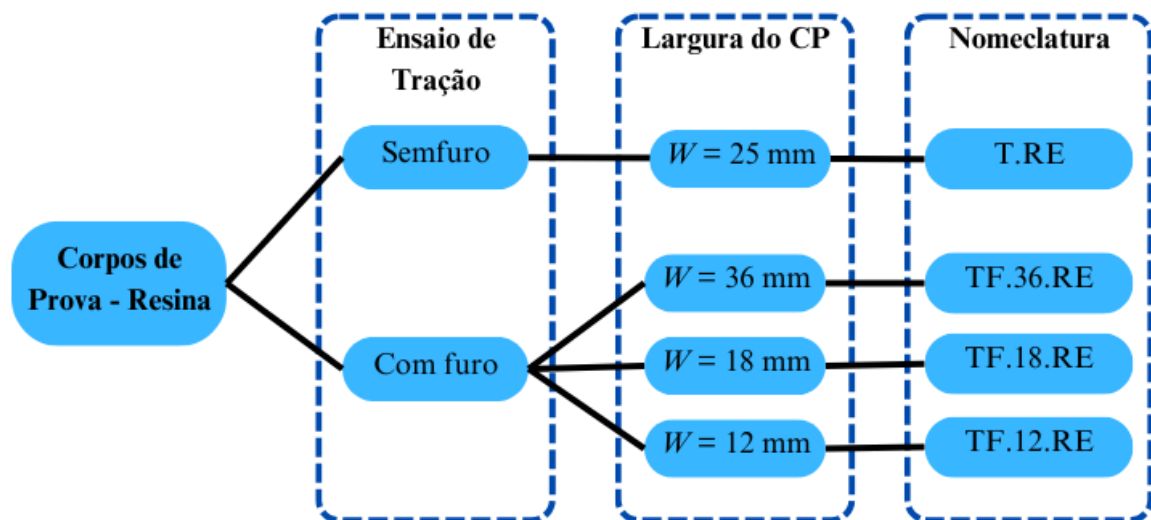
Figura 22 – Conjunto para fabricação dos CP's de Resina Epóxi



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para melhor compreensão, a Figura 23 apresenta um esquema da nomenclatura de todos os corpos de prova de resina epóxi confeccionados.

Figura 23 – Organização da nomeclatura dos CP's de Resina Epóxi.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 7, todos os corpos de prova obtidos são claramente definidos em relação à presença ou ausência de descontinuidade geométrica.

Para cada condição mostrada na Tabela 7, foi preciso fabricar um grupo contendo 7 corpos de prova (CP's). Desta forma, foi preciso de 3 grupos para fazer todos os ensaios nos CP's sem furo e 9 grupos para conduzir todos os ensaios para os CP's com furo central, somando 84 CP's, conforme contabilizados na Tabela 8.

Tabela 7 – Descrição dos CP's em todas as condições de análise.

CP's sem descontinuidade geométrica	
T.LFV.0/90	CP do LFV - Carga aplicada na direção das fibras.
T.LFV.45	CP do LFV - Carga aplicada longitudinalmente para as fibras orientadas à 45°.
T.RE	CP de Resina curada - Carga aplicada longitudinalmente.
CP's com descontinuidade geométrica	
TF.36.LFV.0/90	CP do LFV - Carga aplicada na direção das fibras - Largura de 36 mm.
TF.18.LFV.0/90	CP do LFV - Carga aplicada na direção das fibras - Largura de 18 mm.
TF.12.LFV.0/90	CP do LFV - Carga aplicada na direção das fibras - Largura de 12 mm.
TF.36.LFV.45	CP do LFV - Carga aplicada longitudinalmente para as fibras orientadas à 45° - Largura de 36 mm.
TF.18.LFV.45	CP do LFV - Carga aplicada longitudinalmente para as fibras orientadas à 45° - Largura de 18 mm.
TF.12.LFV.45	CP do LFV - Carga aplicada longitudinalmente para as fibras orientadas à 45° - Largura de 12 mm.
TF.36.RE	CP de Resina curada - Carga aplicada longitudinalmente - Largura de 36 mm.
TF.18.RE	CP de Resina curada - Carga aplicada longitudinalmente - Largura de 18 mm.
TF.12.RE	CP de Resina curada - Carga aplicada longitudinalmente - Largura de 12 mm.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Quantidade de corpos de provas utilizados no ensaio de tração dos compósitos.

Material	Orientação	Com furo	Relação w/d	Quantidade de corpos de prova
Resina epóxi	-	Não	-	7
	-	Sim	0,16	7
	-	Sim	0,33	7
	-	Sim	0,50	7
LFV	0/90°	Não	-	7
	0/90°	Sim	0,16	7
	0/90°	Sim	0,33	7
	0/90°	Sim	0,50	7
LFV	±45°	Não	-	7
	±45°	Sim	0,16	7
	±45°	Sim	0,33	7
	±45°	Sim	0,50	7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, para garantir uma melhor fixação e evitar o escorregamento do CP durante o ensaio, foram colados TAB's de lixa ferro com granulometria de 120 *mesh*. E para uso da técnica de correlação digital de imagens (DIC), os corpos de prova foram pintados com tinta spray preta e pulverizados com gotículas na cor branca, formando uma textura de padrão de cinza na sua superfície. Um exemplo é mostrado na Figura 24.

Figura 24 – Corpos de prova para a realização do ensaio de tração uniaxial no LFV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 TERMOGRAVIMETRIA DA RESINA

A termogravimetria (TGA) é uma técnica de análise térmica que se concentra na medição da variação de massa de um material à medida que sua temperatura é alterada ao longo do tempo. Essa técnica é amplamente utilizada para investigar a cinética de degradação de materiais. Esses resultados são importantes para entender a estabilidade térmica do material e sua adequação para diferentes aplicações. Isso fornecerá dados necessários para o ensaio de calcinação, permitindo a determinação das frações dos materiais que compõem o LFV.

Para a realização da termogravimetria foi utilizado o equipamento TGA Q50 TA Instruments em atmosfera de ar sintético, com fluxo de 40 mL/min e taxa de aquecimento de 10°C/min na faixa de 25 à 900°C. As amostras de resina epóxi foram cortadas com massa de aproximadamente 25 mg.

4.5 ENSAIO DE DENSIDADE VOLUMÉTRICA

A densidade volumétrica do laminado e da resina foram definidas conforme a norma ASTM D792-2020, que trata-se de um método de imersão. Onde pesou-se a amostra seca no ar usando uma balança de precisão Marte AD330. Imediatamente após pesar a amostra no ar, pesou-se a amostra submersa em água destilada, a uma temperatura específica (normalmente 23°C). O aparato utilizado para a realização do ensaio está mostrado na Figura 25.

As amostras de resina epóxi foi preparada utilizando uma relação de 1:2 de massa de endurecedor para massa de resina, conforme a indicação do fabricante. Foram fabricadas 05 amostras retangulares medindo aproximadamente 25 × 25 mm pelo processo de injeção descrito anteriormente. A densidade dos compósitos reforçados também foram obtidas pelo mesmo método. Utilizou-se 05 amostras retangulares medindo aproximadamente 25 × 25 mm.

A densidade volumétrica do laminado foi calculada utilizando a Equação 4.1:

$$D = \frac{a \times 0,9975}{a + w - b} \quad (4.1)$$

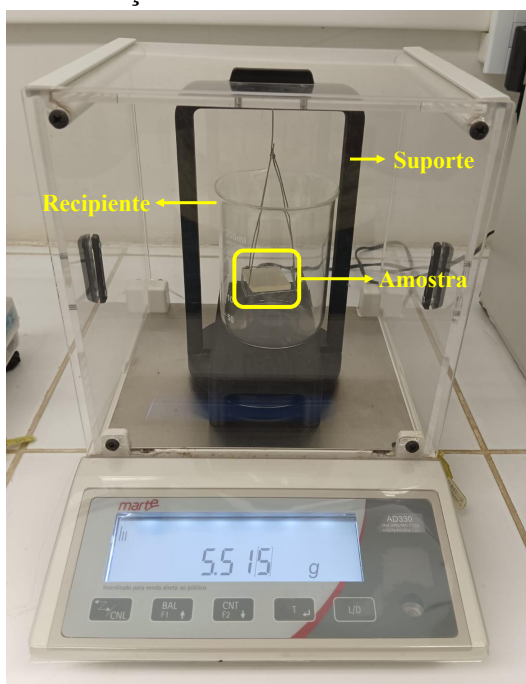
onde:

a - é a massa da amostra seca, no ar (g);

w - é a massa do suporte parcialmente imerso em água (g);

b - é a massa do suporte com as amostras imersas em água (g);

Figura 25 – Aparato para determinação da densidade da resina e do compósito



Fonte: Elaborado pelo autor.

D - é a densidade volumétrica do laminado em g/cm^3 e 0,9975 é o valor da massa específica da água a 23 °C, temperatura na qual foi realizado o ensaio.

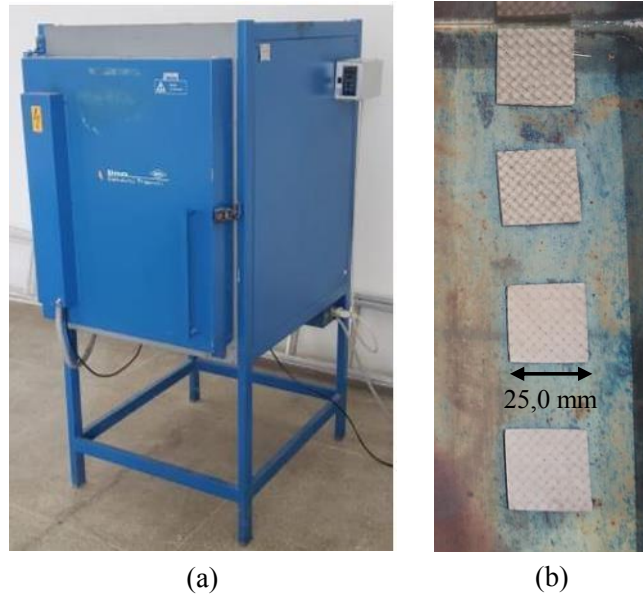
4.6 CALCINAÇÃO

Para determinação das frações da matriz, fibras e vazios do LFV, optou-se pela realização da calcinação das amostras utilizadas na caracterização da densidade dos laminados, utilizando o processo descrito na norma ASTM D3171 (2022).

O procedimento foi feito no Laboratório de Fundição e Soldagem da UFC - campus Russas, em um forno mufla do fabricante Linn Electrotherm, modelo KK-170. Inicialmente realizou-se um pirólise ao ar livre para eliminar os gases provindos da resina. Em seguida, as amostras foram aquecidas até 650°C (temperatura estabelecida após os resultados da termogravimetria) a uma taxa de 10°C/min, mantendo-se essa temperatura por 30 minutos, resultando na perda de toda massa da resina, restando apenas as fibras de reforços. As massas das fibras restantes foram aferidas em uma balança analítica de precisão. O equipamento e as amostras são mostrados na Figura 26.

Com base nos valores obtidos no ensaio de densidade da matriz, os dados do reforço fornecidos pelo fabricante e as medidas de massa do material compósito, foram determinadas as frações volumétricas de resina, fibras e vazios, de acordo com as Equações 4.2 a 4.6.

Figura 26 – Etapas da calcinação: (a) forno utilizado; (b) amostras após a calcinação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com as massas da amostra (m_a) e do reforço (m_r), chega-se a porção de reforço (M_r) e de matriz (M_m), em massa:

$$M_r = \frac{m_r}{m_a} \quad (4.2)$$

$$M_m = 1 - M_r \quad (4.3)$$

Com a densidade volumétrica do compósito (D), a fração, em massa, de reforço (M_r) e a densidade do reforço (D_r), chega-se ao volume de fibras (V_r):

$$V_r = \frac{DM_r}{D_r} \quad (4.4)$$

Da mesma forma, com a densidade volumétrica do compósito (D), a fração mássica (M_m) e a densidade da matriz (D_m), encontra-se a fração, em volume, de matriz (V_m):

$$V_m = \frac{DM_m}{D_m} \quad (4.5)$$

Finalmente, com os valores das frações volumétricas de fibras (V_r) e de matriz (V_m), chega-se a fração volumétrica de vazios (V_v):

$$V_v = 1 - (V_r + V_m) \quad (4.6)$$

4.7 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos da UFC - Campus Russas. O equipamento utilizado foi um máquina universal DL 30000, da marca EMIC, com célula de carga de 300 kN de capacidade e velocidade de ensaio de 0,008 mm/s. Seguindo as normas ASTM D3039/D3039M (2017) para os corpos de prova sem furo, ASTM D638-22 (2022) para a matriz polimérica e ASTM D5766-2018b para corpos de prova com furo circular concêntrico. O ensaio de tração da resina e dos compósitos foram auxiliados pela técnica da Correlação Digital de Imagens. O aparato utilizado para realização dos ensaios está mostrado na Figura 27.

Figura 27 – Ensaio de tração em EMIC DL 30000 com auxílio da técnica DIC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos ensaios foi possível determinar as seguintes propriedades mecânicas do material: resistência a tração do material (σ_{LRT}), módulo de elasticidade longitudinal (E_{yy}), coeficiente de Poisson (ν_{xy}), módulo de cisalhamento (G_{xy}) e deformação na ruptura (ϵ_{rup}).

Assim como, determinar o campo de distribuição da deformação ao longo seção transversal dos materiais através da DIC. Tais propriedades foram calculadas pelas Equações 4.7 a 4.10.

$$\sigma_{LRT} = \frac{P_{\text{máx.T}}}{A_{mT}} \quad (4.7)$$

Onde: σ_{LRT} é a resistência à tração do material, [MPa]; $P_{\text{máx.T}}$ é a carga máxima suportada pelo material, [N]; e A_{mT} é a área média da seção transversal do corpo de prova para ensaio de tração, [mm²].

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{l_0} \quad (4.8)$$

Onde: ε_i é a deformação no ponto i ; δ_i é o deslocamento medido pelo extensômetro no ponto i [mm]; l_0 é o comprimento inicial do extensômetro [mm].

$$E_{yy} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4.9)$$

Onde: E_{yy} é o módulo de elasticidade do material na direção longitudinal [MPa]; $\Delta\sigma$ é a variação da tensão dentro da região linear [MPa]; $\Delta\varepsilon$ é a variação de deformação, também dentro da região linear do gráfico [MPa].

$$\nu_{yx} = -\frac{\Delta\varepsilon_t}{\Delta\varepsilon_l} \quad (4.10)$$

Onde: ν_{yx} é o coeficiente de Poisson no plano yx . $\Delta\varepsilon_t$ representa a variação de deformação lateral e $\Delta\varepsilon_l$ é a variação de deformação longitudinal dentro da região linear elástica.

Para a resina, por se tratar de uma material isotrópico,

$$G_{xy} = \frac{E_{yy}}{2(1 + \nu_{yx})} \quad (4.11)$$

Onde: G_{xy} é o módulo de cisalhamento no plano xy ; ν_{xy} é o coeficiente de Poisson no plano xy ; E_{yy} é o módulo de elasticidade do material na direção longitudinal [MPa].

Para normalizar cálculo das propriedades elásticas à tração da matriz e dos laminados, seguindo as indicações da norma ASTM D3039/D3039M-(2017), utilizou-se o intervalo 0,001 a 0,003 [mm/mm] na deformação para o cálculo de $\Delta\varepsilon$ e $\Delta\varepsilon_t$.

Já para o cálculo módulo de cisalhamento G_{xy} , utilizou-se o método estabelecido pela norma ASTM D3518/D3518M-(2018a), que é usada determinar a resposta ao cisalhamento no plano de materiais compósitos de matriz polimérica por meio de um teste de tração de um laminado com fibras orientadas a $\pm 45^\circ$. Este método é amplamente aplicado para avaliar a resistência e rigidez ao cisalhamento no plano de compósitos, que são essenciais para projetar e analisar componentes estruturais feitos desses materiais.

Esses dados são essenciais para avaliar o efeito da orientação da fibra no laminado composto, bem como quantizar a influência da descontinuidade geometria e a combinação desses efeitos. Além de comparar as propriedades mecânicas dos laminados com as propriedades de uma material isotrópico, neste caso, a resina epóxi.

4.8 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM

Para a utilização da técnica de correlação digital de imagens (DIC), utilizou-se uma câmera fotográfica CANON D60i com lentes macro de 100 mm, para a aquisição de imagem a cada 5 segundos. A preparação da superfície do corpo de prova requer uma textura de boa qualidade. A maneira mais simples de criar o padrão de cinza é aplicando tinta spray na superfície a ser analisada, inicialmente aplicando uma camada homogênea de tinta preta e em seguida deposita-se, de forma aleatória, gotículas de tinta branca, gerando o padrão mostrado anteriormente na Figura 24.

O processamento das imagens obtidas nos ensaios foi realizado no software de código aberto NCORR V1.2, que é um programa correlação de imagem digital 2D desenvolvido em MATLAB. O NCORR oferece uma plataforma robusta e flexível para pesquisadores e engenheiros que trabalham com a DIC. Também é capaz de realizar análises precisas de deslocamento e deformação em 2D, tornando-o adequado para uma ampla variedade de aplicações em mecânica experimental e estudos de materiais. Os valores utilizados como parâmetros para a análise dos ensaios estão mostrados na Tabela 9:

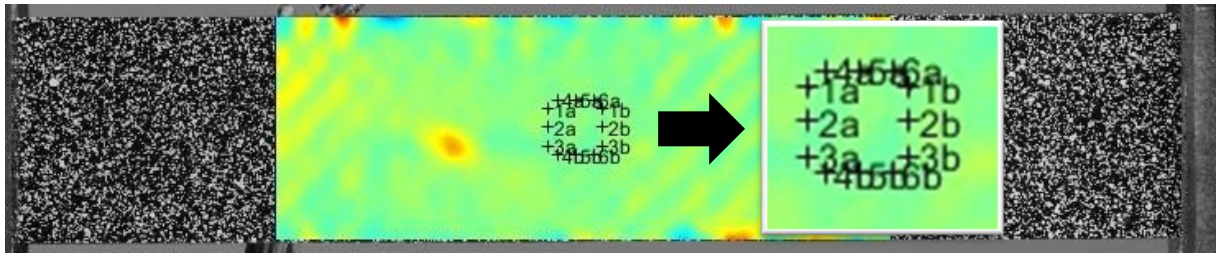
Tabela 9 – Parâmetros utilizados na DIC.

Raio do Subconjunto (pixels)	Espaçamento (pixels)	Número de escalas	Número de interações
50	5	4	50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após analisadas as imagens, utilizou-se a uma extensão do software que simula extensômetros virtuais. Com essa função, é calculado deformação através da distancia entre dois pontos posicionados do corpo de prova a cada foto analisada. Para que os resultados simulem *strain gauges* unidirecionais encontrado comercialmente com dimensões 6 x 6mm, foram posicionados seis extensômetros virtuais, três na horizontal e três nas verticais, igualmente espaçados na região central do corpo de prova, conforme mostrado na Figura 28.

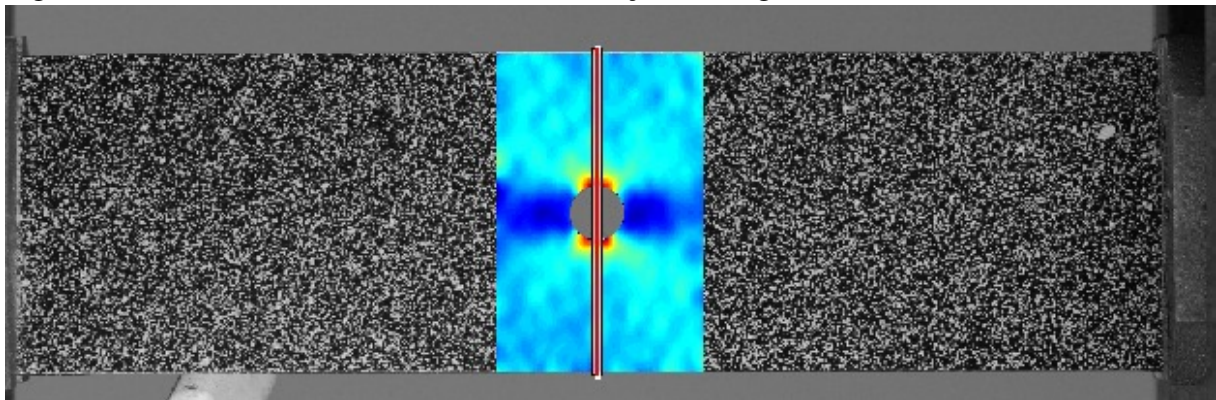
Figura 28 – Posicionamento dos extensômetros virtuais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já para o calculo do fator geométrico de concentração de tensão K_t , utilizou-se outra extensão do NCORR que mede a deformação ao longo de uma linha posicionada no corpo de prova. Uma linha de 1,0 mm de espessura, foi posicionada ao longo de toda a largura dos corpos de prova passando pela região central do furo. A Figura 29 mostra a utilização dessa extensão.

Figura 29 – Posicionamento da linha de deformação ao longo do CP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 RESULTADOS

5.1 FABRICAÇÃO DO COMPÓSITO POR LAMINAÇÃO MANUAL

Com o método de laminação manual (hand lay-up), conseguiu-se atingir um dos objetivos do trabalho, que era fabricar um compósito laminado de maneira prática e econômica, já que requer ferramentas simples, mínimo investimento em equipamentos e não exige tanta habilidade do operador. A resina epóxi também ofereceu excelente manuseabilidade, com boa fluidez e um longo tempo de trabalho, aproximadamente 20 minutos.

Ao término do processo, foi obtida uma placa de compósito com dimensões aproximadas de 750 x 750 mm e um espessura de aproximadamente $1,77 \pm 0,10$ mm (Figura 30), medido a partir dos CP's. Vale salientar que a espessura e a fração de cada material do compósito só pode ser determinada após a cura completa da resina. O LFV apresentou uma superfície lisa, lado em contato com a placa de vidro, e outra com pouca rugosidade. Além de pouca variação de espessura ao longo da placa, demonstrando que o método selecionado é adequado para fabricação.

Figura 30 – Placa do compósito obtido após a cura da resina.

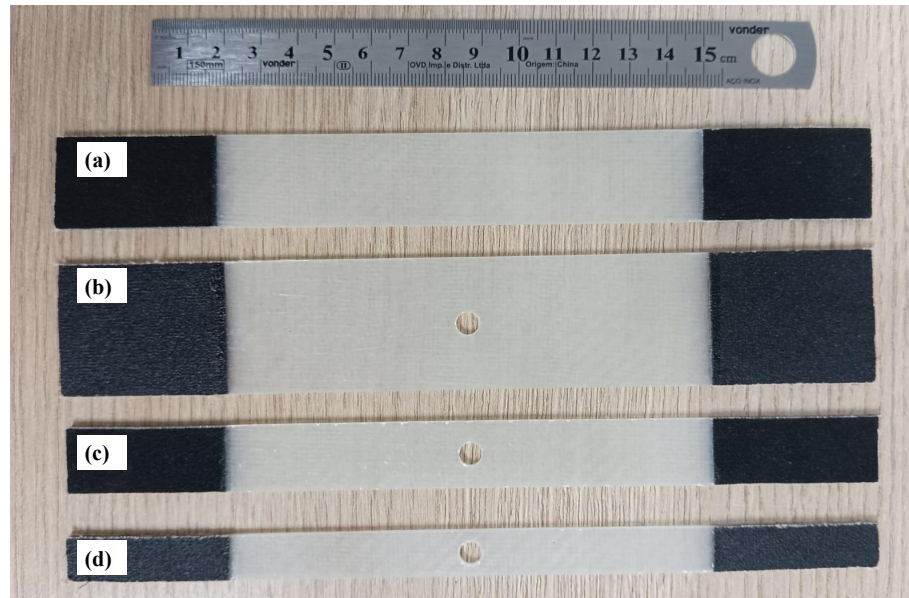


Fonte: elaborado pelo autor.

Os corpos de provas foram cortados nos tamanhos especificados anteriormente na Seção 4.3, conforme ilustrado na Figura 31. Vale salientar que a superfície lisa do laminado

contribuiu para a aplicação da textura necessária para a utilização da DIC.

Figura 31 – Corpos de prova antes da aplicação da textura: (a) Tração Laminado; (b) Tração Laminado com furo $d/W=0,16$; (c) Tração Laminado com furo $d/W=0,33$; (d) Tração Laminado com furo $d/W=0,50$.



Fonte: elaborado pelo autor.

5.2 FABRICAÇÃO DOS CPS DE RESINA EPÓXI POR INJEÇÃO

O método de injeção utilizado na fabricação dos corpos de prova de resina epóxi mostrou-se viável e eficaz, apesar de ser um pouco mais oneroso devido à necessidade de impressão 3D dos moldes. O resultado do processo está mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Corpos de prova de resina epóxi antes da aplicação da textura: (a) Tração Resina com furo $d/W=0,16$; (b) Tração resina com furo $d/W=0,33$; (c) Tração Resina com furo $d/W=0,50$.



Fonte: elaborado pelo autor.

A maioria dos corpos de prova não apresentou bolhas e, ao final do processo, estavam muito próximos das dimensões requeridas, necessitando apenas a remoção de rebarbas e acabamento final.

5.3 DENSIDADE DA MATRIZ EPÓXI E DO LAMINADO COMPÓSITO

Seguindo o procedimento descrito na Seção 4.5 para determinar a densidade da matriz e dos laminados, foram obtidos os dados de densidade para cinco amostras de cada material. O valor da densidade volumétrica para os dois materiais estão expressos na Tabela 10.

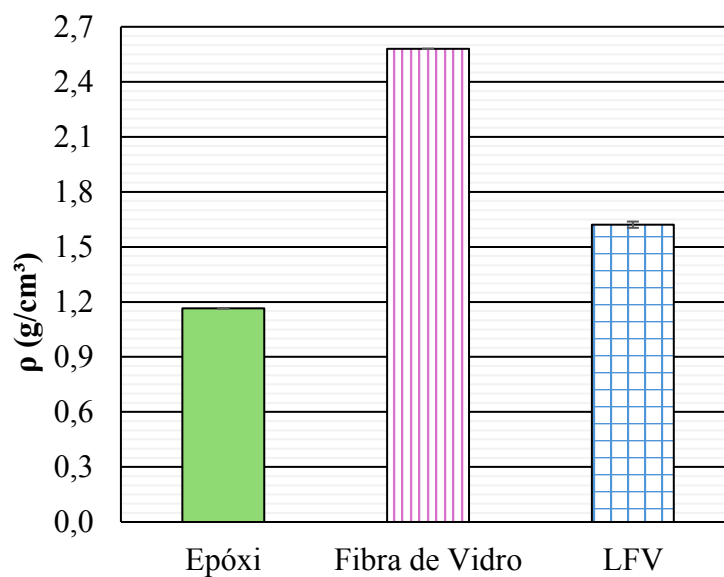
Tabela 10 – Tabela com a densidade dos materiais.

MATERIAL	ρ (g/cm ³)
LFV	1,621 ± 0,017
Epóxi	1,165 ± 0,001

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao comparar os valores obtidos com o valor da densidade da fibra de vidro tipo-E encontrado em Shackelford (2022), 2,58 g/cm³, notamos que, como esperado, a densidade do laminado compósito possui um valor intermediário entre os materiais constituintes. Como pode-se observar no gráfico da Figura 33.

Figura 33 – Comparativo entre valores de densidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

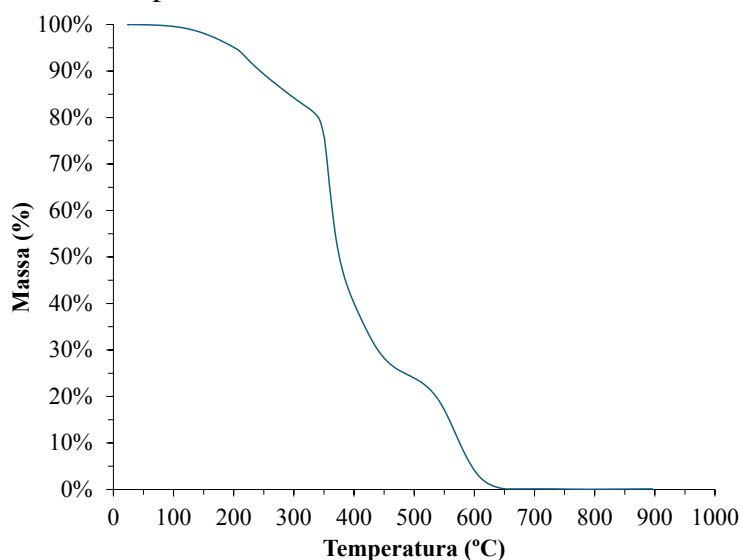
Com os dados obtidos pode-se observar que, o valor da densidade volumétrica para a resina curada está de acordo com o estabelecido pelo fabricante (Tabela 5). O valor de densidade

encontrado para o LFV se aproxima dos valores reportados na literatura, como em Kaw (2005), 1,8 g/cm³, e em pesquisas mais recentes que utilizam o mesmo método de fabricação, como em Megahed *et al.* (2021), 1,58 g/cm³, e El-Baky *et al.* (2022), 1,59 g/cm³.

5.4 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG) DA MATRIZ

A análise permitiu verificar a perda de massa das amostras com o aumento da temperatura ao longo do tempo. A Figura 34 mostra os dados obtidos para as amostras da matriz epóxi.

Figura 34 – Resultado de TG para a resina curada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os dados obtidos podemos identificar basicamente três eventos, sendo o segundo o mais significativo. O primeiro evento com perda de massa de 16,22% que ocorre aproximadamente entre as temperaturas de 100°C e 330°C, atribuído à perda de substâncias voláteis, principalmente água adsorvida. No segundo evento temos a faixa de temperatura onde ocorreu a maior degradação da resina, cerca de 57,59%, entre 340°C - 520°C e o terceiro evento ocorre na faixa de temperaturas de 530°C a 630°C, continuando a degradação da resina até o valor residual de 0,10%.

Com essas informações foi possível determinar a temperatura utilizada no ensaio de calcinação, 650°C, de modo a garantir a eliminação de praticamente toda a resina das amostras do laminado.

5.5 FRAÇÕES MÁSSICA E VOLUMÉTRICA DOS CONSTITUINTES DO LAMINADO

Depois de realizada a calcinação das amostras, toda a massa da matriz epóxi foi eliminada, permanecendo apenas a massa das fibras. Com base na metodologia descrita na Seção 4.6, foram determinadas as frações mássicas da matriz e do reforço do laminado. Os resultados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Tabela com os percentuais mássicos dos constituintes do LFV.

LFV	
Fração Mássica de Matriz – W_m (%)	$47,06 \pm 0,88$
Fração Mássica de Fibras – W_f (%)	$52,94 \pm 0,88$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nas frações mássicas e nas densidades dos constituintes, foram determinadas as frações volumétricas da matriz, do reforço e dos vazios, cujos resultados estão expostos na Tabela 12. Vale ressaltar o baixo teor de vazios apresentados pelo laminado estudado.

Tabela 12 – Tabela com os percentuais volumétricos dos constituintes do LFV.

LFV	
Fração Volumétrica de Matriz – V_m (%)	$65,28 \pm 1,22$
Fração Volumétrica de Fibras – V_f (%)	$33,69 \pm 0,56$
Fração Volumétrica de Vazios – V_o (%)	$1,03 \pm 0,66$

Fonte: Elaborado pelo autor.

A eficiência do método de laminação manual (hand lay-up) é constatada ao comparar o valor da fração volumétrica de vazios com os valores obtidos por outros pesquisadores que utilizaram o mesmo método, como os trabalhos de Targino *et al.* (2019) e Neto *et al.* (2023), que obtiveram um teor de vazios de 5,20% e 4,36%, respectivamente. Esse baixo teor de vazios também se deve à menor gramatura do tecido utilizado, facilitando a impregnação da matriz polimérica. Outro fator que justifica esse resultado é o maior teor de matriz. Vazios podem causar delaminação ou servir como pontos de partida para falhas. Reduzindo os vazios, aumenta-se a vida útil do compósito.

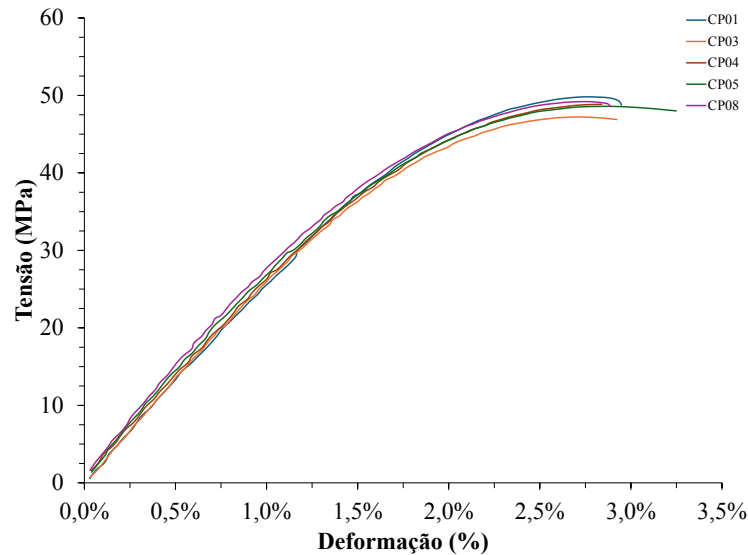
5.6 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

5.6.1 Resina Epóxi - TERE

Com os dados fornecidos pelos ensaios de tração uniaxial dos corpos de prova (CP's) de resina epóxi, foi possível criar os diagramas tensão-deformação mostrados na Figura 35.

Através dos gráficos, observa-se que a resina exibiu um comportamento frágil, praticamente elástico na maior parte do ensaio. Em todas as amostras, não houve a formação de estirções e o limite de resistência à tração foi muito próximo à tensão de ruptura.

Figura 35 – Diagrama tensão-deformação à tração da resina epóxi.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As propriedades mecânicas do material foram calculadas com base nas informações dos diagramas tensão-deformação, conforme mostrado na Tabela 13. Outros pesquisadores, como Mesquita *et al.* (2019), Sritharan e Askari (2022) e Mendonça (2019), também reportaram valores semelhantes, entre 40,95 e 53,33 MPa, para o limite de resistência a tração.

Tabela 13 – Propriedades mecânicas à tração da matriz epóxi.

σ_{LRT} (MPa)	E_{yy} (GPa)	ν_{yx}	G_{xy} (GPa)	$\epsilon_{rup.}$ (%)
$48,734 \pm 0,864$	$2,793 \pm 0,127$	$0,389 \pm 0,032$	$1,03 \pm 0,01$	$2,97 \pm 0,14$

Fonte: Elaborado pelo autor.

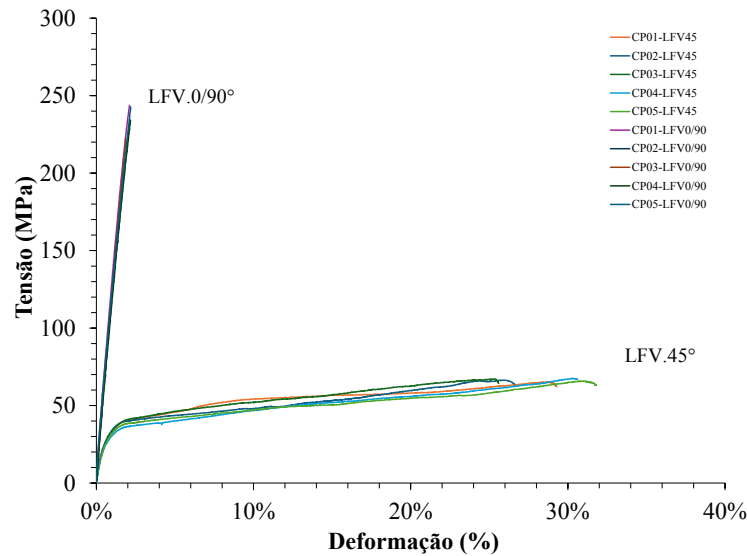
Esse comportamento pode ser justificado pelas longas cadeias de átomos de carbono, todas entrelaçadas, que compõe os polímeros. Existem ligações covalentes ao longo da cadeia de carbono e onde há ligações cruzadas ocasionais. Essas ligações são muito rígidas, quando carregadas, as cadeias deslizam, com muita dificuldade, umas sobre as outras (JONES, 2018).

5.6.2 Laminado de fibra de Vidro - T.LFV.0/90 e T.LFV.45

Os diagramas tensão-deformação para as configurações de orientação T.LFV.0/90° e T.LFV.45° são apresentados na Figura 36. Nota-se um comportamento predominantemente

linear para a configuração LFV.0/90°, típico de laminados com as fibras alinhadas na direção da aplicação da carga. Além disso, observa-se maior resistência e fragilidade quando a carga é aplicada paralelamente às fibras.

Figura 36 – Diagrama tensão-deformação à tração do LFV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No que diz respeito ao ensaio de tração uniaxial para os corpos de prova T.LFV.45°, onde a direção de aplicação da carga não está alinhada com as fibras, observa-se inicialmente o domínio da matriz, resultando em um perfil linear entre tensão e deformação. Em uma segunda fase, a partir de uma tensão aproximada de 30 MPa ou 1% de deformação, ocorre a perda dessa linearidade, indicando a presença de cisalhamento.

Analisando os resultados da Tabela 14 é possível perceber que a adição do tecido na direção 0/90° promoveu um aumento do limite de resistência a tração e módulo de elasticidade, quando comparado ao da resina pura, apresentando uma média de $236,025 \pm 8,772$ MPa para a tensão máxima e $12,773 \pm 0,449$ GPa para o módulo de elasticidade. Porém houve uma diminuição no valor da deformação máxima, em torno de 30%.

Tabela 14 – Propriedades mecânicas à tração do LFV.

LAMINADO	σ_{LRT} (MPa)	E_{yy} (GPa)	ν_{yx}	G_{xy} (GPa)	$\epsilon_{rup.}$ (%)
LFV.0/90	$236,025 \pm 8,772$	$12,773 \pm 0,449$	$0,159 \pm 0,004$	$2,093 \pm 0,031$	$2,10 \pm 0,11$
LFV.45	$65,846 \pm 0,813$	$5,056 \pm 0,157$	$0,573 \pm 0,035$	$5,914 \pm 0,521$	$28,68 \pm 1,15$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Podemos encontrar resultados semelhantes para os estudos de Feli e Jalilian (2016), Kastratović *et al.* (2021), Turaka e Reddy (2018) e Ekşi e Genel (2017), valores entre 201,76 e

283,54 MPa para a tensão máxima e dentro do intervalo de 7,17 e 14,35 GPa para o módulo de elasticidade.

Já para o LFV45°, também notou-se um aumento no limite de resistência a tração, módulo de elasticidade e deformação máxima, quando comparado com os valores obtidos para a resina epóxi. Apresentando uma média de $65,846 \pm 0,813$ MPa para a tensão máxima, $5,056 \pm 0,157$ GPa para o módulo de elasticidade e uma deformação máxima de $28,685 \pm 0,146$ %. Esses valores estão próximos dos mensurados por Nugroho *et al.* (2020), Malingam *et al.* (2018) e Turaka *et al.* (2024), que repostaram valores entre 65,43 e 81,84 MPa para o limite de resistência a tração e entre 4,01 e 7,01 GPa para o módulo de elasticidade.

As médias obtidas para o coeficiente de Poisson para ambos os laminados estão condizentes com a bibliografia conforme Barbero (2017). Já o módulo de cisalhamento transversal, pode-se encontrar valores semelhantes, para o LFV.0/90, em trabalhos como os de Turaka *et al.* (2024), Almeida *et al.* (2015) e Taheri-Behrooz *et al.* (2020), que reportaram aproximadamente 1,57, 2,20 e 2,56 GPa, respectivamente. Já Paepegem *et al.* (2006), Naresh *et al.* (2018) reportaram valores entre 4.67 e 7.15 GPa para o módulo de cisalhamento transversal para o LFV45°.

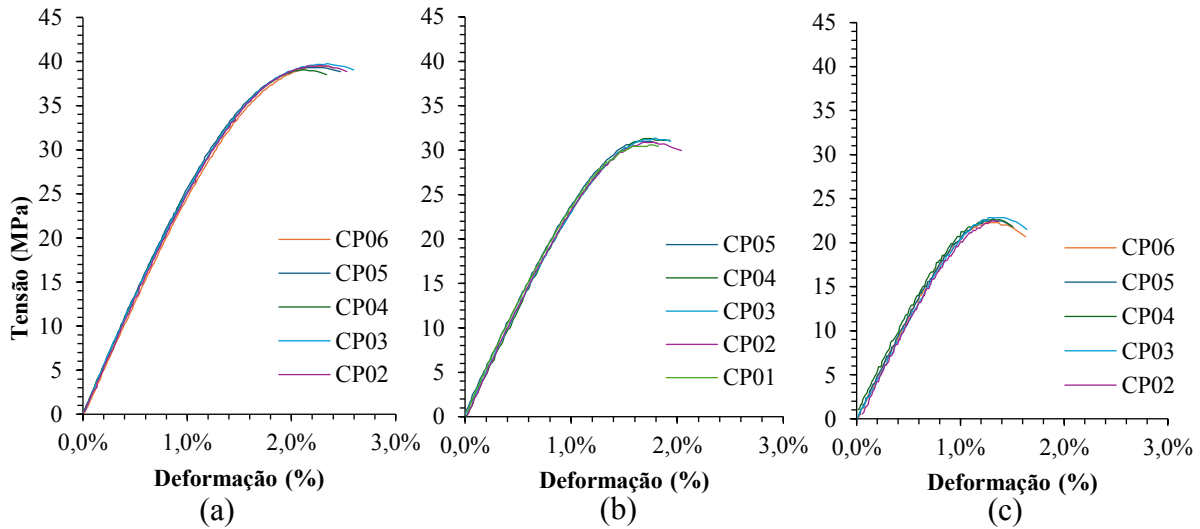
5.7 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL PARA OS CP's COM DESCONTINUIDADE GEOMÉTRICA

Nesta seção, são exibidos os dados experimentais referentes às propriedades mecânicas à tração da matriz epóxi e laminado compósitos em diferentes orientações, na presença de um concentrador de tensão.

5.7.1 Resina Epóxi - TF.RE

Os gráficos Tensão x Deformação obtidos no ensaio de tração da matriz epóxi na presença de um concentrador de tensão estão representados na Figura 37. Neles, é possível observar as curvas conforme o valor da relação d/W . Nota-se um comportamento semelhante ao do material sem a presença do furo, porém com uma redução gradual das propriedades analisadas. Além disso, observa-se um perfil linear até o início do dano, caracterizando um comportamento “frágil”. O mesmo comportamento também foi observado por Saada *et al.* (2023).

Figura 37 – Diagrama tensão-deformação à tração dos CP's: (a) TF.36.RE; (b) TF.18.RE e (c) TF.12.RE.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores médios e os desvios padrão obtidos para o Limite de Resistência à Tração, para o Módulo de Elasticidade Longitudinal e para a Deformação na Ruptura estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Propriedades mecânicas à tração da matriz epóxi com descontinuidade geométrica.

CP's	d/W	σ_{LRT} (MPa)	E_{yy} (GPa)	$\epsilon_{rup.}$ (%)
TF.36.RE	0,16	$39,464 \pm 0,240$	$2,703 \pm 0,085$	$2,47 \pm 0,10$
TF.18.RE	0,33	$31,059 \pm 0,278$	$2,515 \pm 0,127$	$1,91 \pm 0,08$
TF.12.RE	0,50	$22,729 \pm 0,198$	$2,290 \pm 0,049$	$1,53 \pm 0,10$

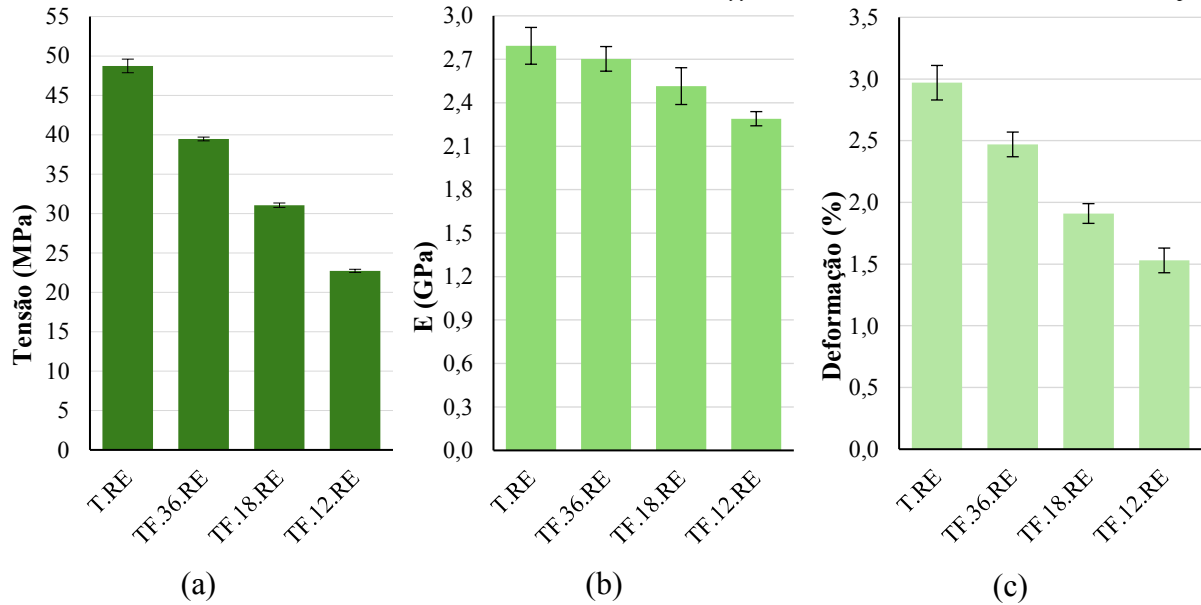
Fonte: Elaborado pelo autor.

À medida que aumenta o valor da relação d/W , observa-se que TF.36.RE apresenta o maior Limite de Resistência à Tração, atingindo aproximadamente 39,468 MPa, e a deformação é um pouco maior (2,47%). Já para a amostra TF.18.RE, esse valor é ligeiramente menor, alcançando 31,059 MPa, o que sugere que a resistência mecânica diminui conforme a largura do corpo de prova é reduzida; a deformação também é um pouco menor (1,91%). Por fim, a amostra TF.12.RE apresenta a menor valor de tensão (22,729 MPa) e deformação (1,53%), indicando que essa configuração concentra mais tensões, reduzindo a resistência do material.

Quando comparados os resultados obtidos para os corpos de prova (CP's) de resina epóxi com e sem furo, apresentados na Figura 38, observa-se que o Limite de Resistência à Tração apresenta uma degradação mais acentuada na presença de uma descontinuidade geométrica, variando de 19,0% a 53,0% à medida que o valor de d/W aumenta. O Módulo de Elasticidade Longitudinal, por sua vez, é menos impactado, registrando uma queda entre 3,2% e 18,0%.

Finalmente, a Deformação na Ruptura sofre uma redução gradual, alcançando 48,0%.

Figura 38 – Propriedades da CP's de Resina Epóxi com e sem furo: (a) Limite de Resistência à Tração (σ_{LRT}); (b) Módulo de Elasticidade (E_{yy}); (c) Deformação na Ruptura (ϵ_{rup}).

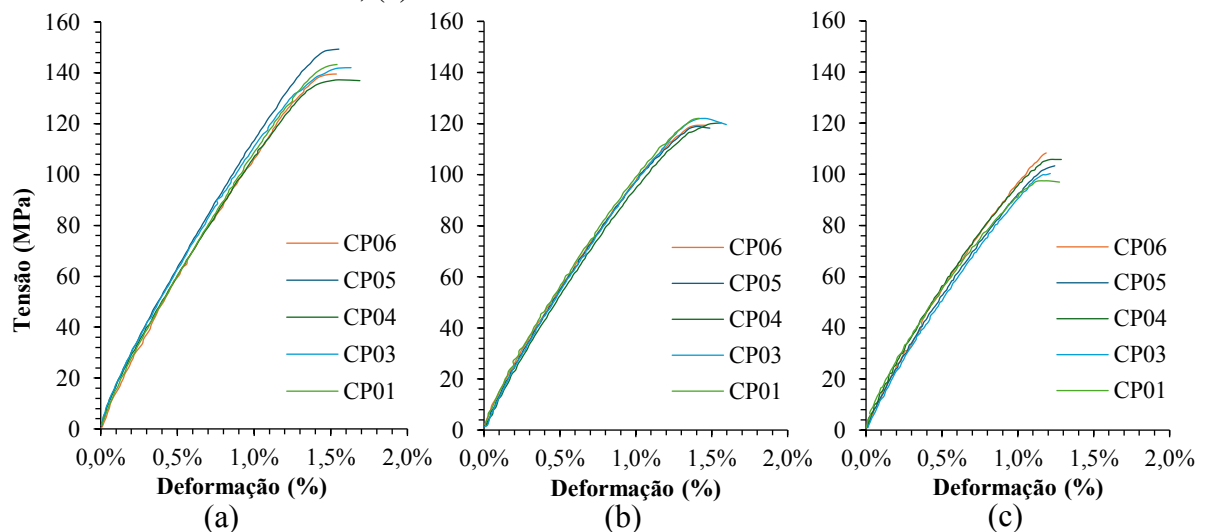


Fonte: elaborado pelo autor.

5.7.2 Laminado de Fibra de Vidro - TF.LFV.0/90°

Em relação ao ensaio de tração uniaxial nos corpos de prova TF.36.LFV.0/90, TF.18.LFV.0/90 e TF.12.LFV.0/90, a Figura 39 apresenta os gráficos Tensão x Deformação obtidos.

Figura 39 – Diagrama tensão-deformação à tração dos CP's: (a) TF.36.LFV.0/90; (b) TF.18.LFV.0/90; (c) TF.12.LFV.0/90.



Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se um comportamento similar em todas as configurações, com um perfil linear até o início do dano (próximo à resistência última à tração do material). Além disso, é evidente que a diminuição dos valores de resistência está diretamente relacionada à relação d/W . Os valores de resistência do laminado diminuem conforme o valor de d/W aumenta, ou seja, à medida que a largura do corpo de prova é reduzida.

Na Tabela 16 estão apresentados os valores médios e os desvios padrão obtidos para o Limite de Resistência à Tração, para o Módulo de Elasticidade Longitudinal e para a Deformação na Ruptura para o laminado com fibras orientadas à 0/90° na presença do furo. Para uma melhor comparação com as propriedades do material sem o furo, temos a Figura 40 que expressa essas propriedades.

Tabela 16 – Propriedades mecânicas à tração do laminado compósito LFV.0/90° com descontinuidade geométrica.

CP's	d/w	σ_{LRT} (MPa)	E_{yy} (GPa)	$\epsilon_{rup.}$ (%)
TF.36.LFV.0/90	0,16	142,455 ± 4,090	11,816 ± 0,402	1,59 ± 0,06
TF.18.LFV.0/90	0,33	120,747 ± 1,325	10,794 ± 0,142	1,50 ± 0,07
TF.12.LFV.0/90	0,50	103,534 ± 3,877	10,696 ± 0,218	1,24 ± 0,04

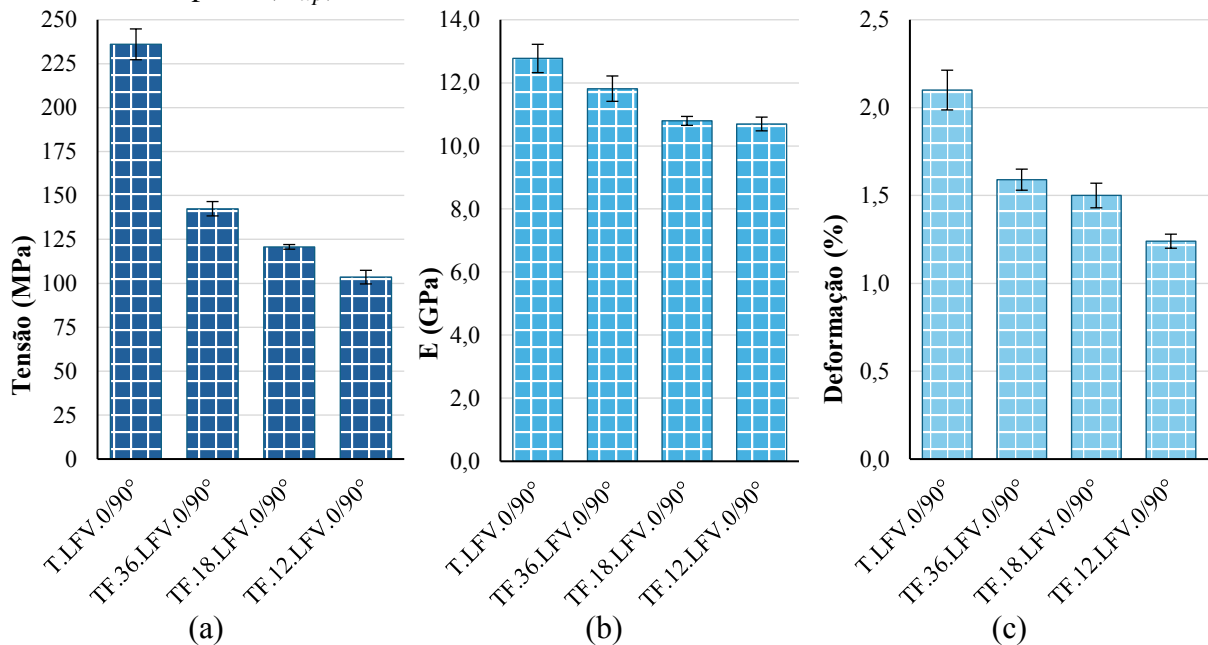
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao comparar os resultados obtidos para os corpos de prova TF.36.LFV.0/90 com os T.LFV.0/90, nota-se que a presença do furo resultou em uma redução de aproximadamente 40,0% no Limite de Resistência à Tração. Esse valor é superior aos resultados encontrados por Khechai *et al.* (2018a) e Samlal *et al.* (2022), que investigaram a influência das dimensões de um concentrador de tensão em um laminado compósito de resina epóxi reforçado com fibra de vidro-E. Nesse estudo, a perda de resistência devido a um furo central de 4,0 mm de diâmetro em uma placa de 25,0 mm de largura foi de aproximadamente 32,0%.

Verifica-se também que o Módulo de Elasticidade Longitudinal, assim como observado por Targino *et al.* (2019) e Fontes (2017), é muito menos sensível a presença do furo, sofrendo uma queda de apenas 7,5%, diferentemente ao comportamento observado na Resistência Última à Tração. O mesmo comportamento pode ser observado quando a largura dos corpos de prova foram reduzidas.

Já quando comparamos os resultados dos corpos de prova TF.18.LFV.0/90 com o laminado de mesma orientação, temos que, que 50% da resistência foi mantida com a redução da largura do corpo de prova. Resultado semelhante ao encontrado por Khechai *et al.* (2018a) quando aumenta o diâmetro do furo, aproximadamente 45%. O Módulo Elasticidade Longitudinal se mostra menos sensível ao entalhe diminuindo cerca de 16,0%.

Figura 40 – Propriedades da CP's do LFV.0/90° com e sem furo: (a) Limite de Resistência à Tração (σ_{LRT}); (b) Módulo de Elasticidade Longitudinal (E_{yy}); (c) Deformação na Ruptura (ϵ_{rup}).



Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos pelos corpos de prova TF.12.LFV.0/90 revelaram uma perda de resistência de 57,0% com a redução da largura do corpo de prova. Quanto ao Módulo Elasticidade Longitudinal, não sofreu alteração quando comparado com o TF.18.LFV.0/90. Já a deformação de ruptura continuou a reduzir, chegando a uma perda de aproximadamente 40,0%. Comportamento semelhante ao reportado por Samlal *et al.* (2022).

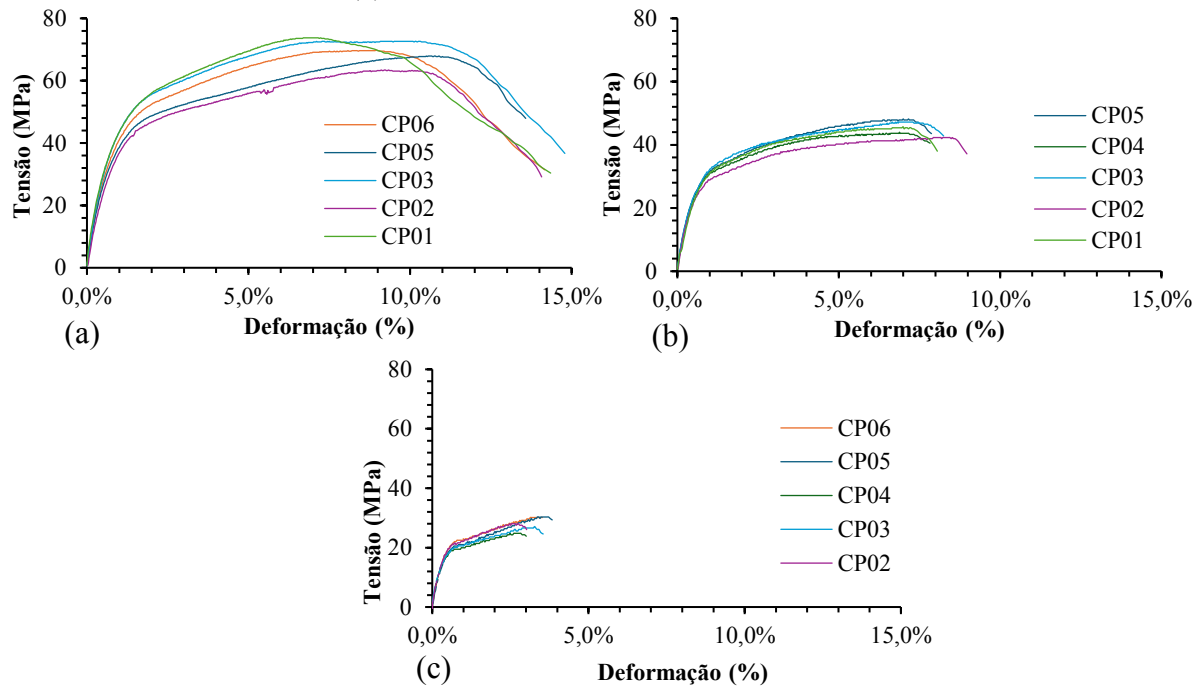
5.7.3 Laminado de Fibra de Vidro - TF.LFV.45°

Os corpos de prova (CP's) TF.36.LFV.45, TF.18.LFV.45 e TF.12.LFV.45 apresentam o comportamento mecânico característico ilustrado na Figura 41.

Observa-se um comportamento similar em todas as configurações, com uma fase inicial de perfil linear entre tensão e deformação, seguida por uma segunda etapa onde predomina o comportamento de cisalhamento em relação à tração uniaxial. Nesse estágio, parte do suporte de carga é mantido, resultando em uma elevada deformação.

Os valores médios e os desvios padrão referentes ao Limite de Resistência à Tração, ao Módulo de Elasticidade Longitudinal e à Deformação na Ruptura para as diferentes configurações de descontinuidade geométrica no laminado orientado à 45° estão apresentados na Tabela 17.

Figura 41 – Diagrama tensão-deformação à tração dos CP's: (a) TF.36.LFV.45; (b) TF.18.LFV.45; (c) TF.12.LFV.45.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 17 – Propriedades mecânicas à tração do laminado compósito LFV.45° com descontinuidade geométrica.

CP's	d/w	σ_{LRT} (MPa)	E_{yy} (GPa)	$\epsilon_{rup.}$ (%)
TF.36.LFV.45	0,16	$69,582 \pm 3,740$	$5,676 \pm 0,291$	$14,19 \pm 0,39$
TF.18.LFV.45	0,33	$45,611 \pm 2,090$	$4,778 \pm 0,077$	$8,20 \pm 0,41$
TF.12.LFV.45	0,50	$28,266 \pm 2,245$	$3,863 \pm 0,223$	$3,39 \pm 0,32$

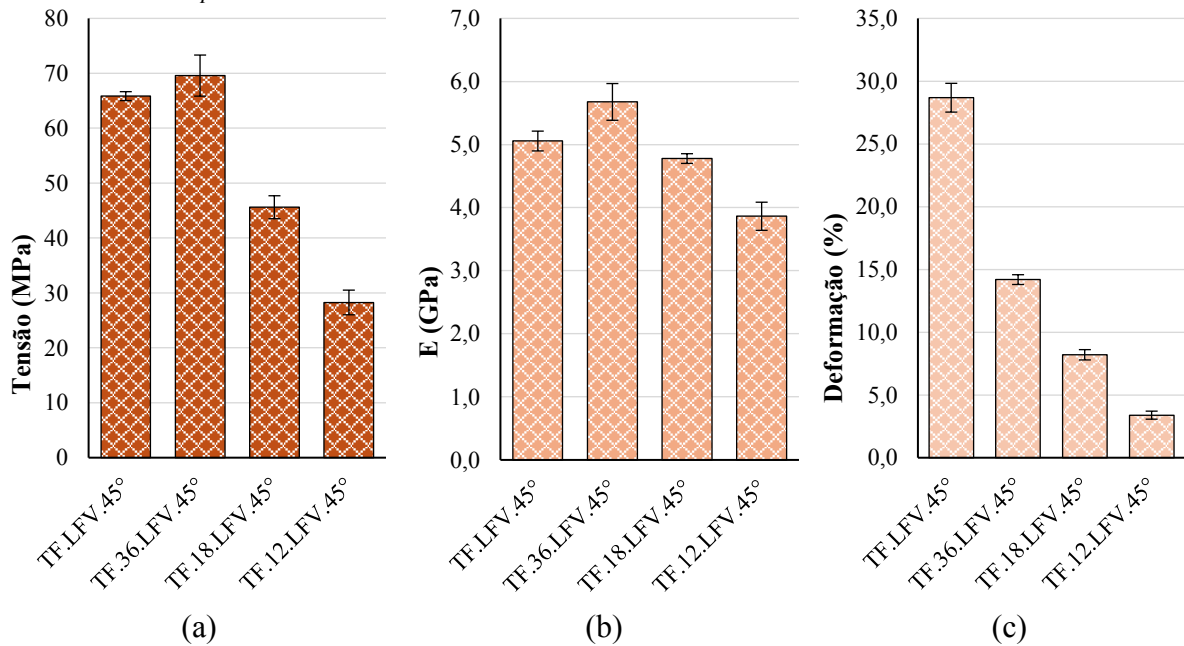
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao comparar com os resultados observados no T.LFV.45, Figura 42(a), Verifica-se que para o TF.36.LFV.45, dentro da dispersão dos resultados obtidos, não há perda no Limite de Resistência à Tração, em função da presença do furo nos CP's com fibras orientadas à $\pm 45^\circ$, em grande parte devido a um cisalhamento de menor intensidade na resposta do material, assim como o observado por Vasconcelos (2018). Conforme Wei *et al.* (2019), modelos de dano progressivo mostram que a orientação das fibras a $\pm 45^\circ$ ajuda a controlar a propagação de trincas e outros danos, mantendo a resistência do material. Tal comportamento não se matem a medida em que se reduz a largura do corpo de prova, tendo uma queda de aproximadamente 31% e em seguida de 58,0%.

Verifica-se também que o Módulo de Elasticidade Longitudinal, para o TF.36.LFV.45, apresentaram valores mais altos em relação aos corpos de prova sem furo, resultando em um aumento de 12,0%. Nesse cenário, a presença do furo central realmente influenciou a resposta do material, uma vez que a diferença percentual entre as duas condições se encontra fora da

margem de variação dos resultados obtidos. Comportamento semelhante aos reportados por Fontes (2017) e Tinô e Aquino (2016).

Figura 42 – Propriedades da CP's do LFV.45° com e sem furo: (a) Limite de Resistência à Tração (σ_{LRT}); (b) Módulo de Elasticidade Longitudinal (E_{yy}); (c) Deformação na Ruptura (ϵ_{rup}).



Fonte: elaborado pelo autor.

Albadrani (2022) afirma que As fibras orientadas a $\pm 45^\circ$ são eficazes na distribuição das tensões ao redor do furo, reduzindo a concentração de tensões e, consequentemente, aumentando a rigidez do material. Passando para as outras configurações temos uma perda de 5,5% e em seguida uma de 24,0%.

Em relação à deformação de ruptura, observou-se que esta se mostrou mais sensível às variações na largura dos corpos de prova, apresentando perdas mais significativas conforme a largura do corpo de prova diminuía, variando de 50,5% a 88,0%.

5.8 RESISTÊNCIA RESIDUAL

A resistência residual reflete o nível de dano causado pela presença de uma descontinuidade geométrica no Limite de Resistência à Tração. A Resistência Residual para os corpos de prova de resina epóxi e do laminado em diferentes orientações foram determinados conforme a Equação 3.10. Os valores de RS obtidos demonstram que há uma diferença estatisticamente significativa entre os valores obtidos conforme a Tabela 18.

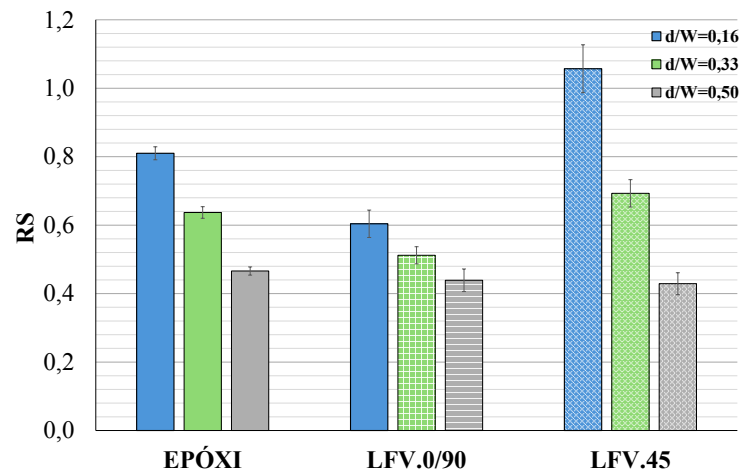
Tabela 18 – Resistência Residual.

CP's	RS
TF.36.RE	0,810 ± 0,019
TF.18.RE	0,637 ± 0,017
TF.12.RE	0,466 ± 0,012
TF.36.LFV.0/90	0,604 ± 0,040
TF.18.LFV.0/90	0,512 ± 0,025
TF.12.LFV.0/90	0,439 ± 0,033
TF.36.LFV.45	1,057 ± 0,070
TF.18.LFV.45	0,693 ± 0,040
TF.12.LFV.45	0,429 ± 0,32

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para avaliar a propriedade de resistência residual (considerando todas as variações de d/W), foi elaborada a Figura 43. Neste estudo, observa-se uma relação inversa entre a resistência à tração e a razão d/W , exceto para o TF.36.LFV.45 ($d/W = 0,16$), onde se destaca um ganho na capacidade de resistência mecânica.

Figura 43 – Resistência residual para a matriz epóxi e os laminados.



Fonte: elaborado pelo autor.

A resina epóxi apresenta uma resistência residual máxima de aproximadamente 0,8 para $d/W = 0,16$, o que mostra uma boa retenção de resistência mesmo com a presença de um furo. No entanto, a redução é linear e mais acentuada à medida que o furo aumenta em relação à largura.

O LFV.0/90 mostra um comportamento similar ao da resina epóxi, porém com uma resistência residual ligeiramente menor para todos os valores de d/W . Isso sugere que o LFV.0/90 tem uma sensibilidade ao furo ligeiramente maior que a resina epóxi, o que é esperado, pois a orientação das fibras pode ter menos influência direta na resistência ao redor do furo.

Já o LFV.45, exibe a maior resistência residual entre os três materiais testados para

a relação $d/W = 0,16$, com um valor acima de 1,0. Isso sugere que a orientação das fibras a 45° pode proporcionar uma maior redistribuição das tensões ao redor do furo, resultando em um melhor desempenho. No entanto, conforme o d/W aumenta, a resistência residual diminui para valores comparáveis aos outros materiais. Esse comportamento demonstra que, embora a orientação de 45° favoreça a resistência residual em pequenos furos, a tendência de queda permanece significativa conforme o tamanho do furo aumenta.

5.9 PERFIL DE DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO EXPERIMENTAL E ANALÍTICO

Nesta seção, discute-se o comportamento das distribuições de tensão na seção transversal contendo o furo circular concêntrico, levando em consideração a variação da relação d/W na matriz epóxi e no laminado com diferentes orientações de fibras. É importante destacar que a diferença no comprimento das curvas em relação ao eixo x se deve à redução na largura (W) dos corpos de prova (CP's).

As curvas apresentadas foram obtidas por meio de abordagens analíticas e ensaios experimentais, sendo que, para a análise experimental, utilizou-se a média de cinco corpos de prova. As tensões ao longo do eixo foram normalizadas no formato σ_y/σ_m , o que facilita a comparação entre as diferentes configurações avaliadas. Conforme destacado anteriormente, o valor máximo de σ_y/σ_m corresponde ao fator de concentração de tensão, conforme a Equação 3.7.

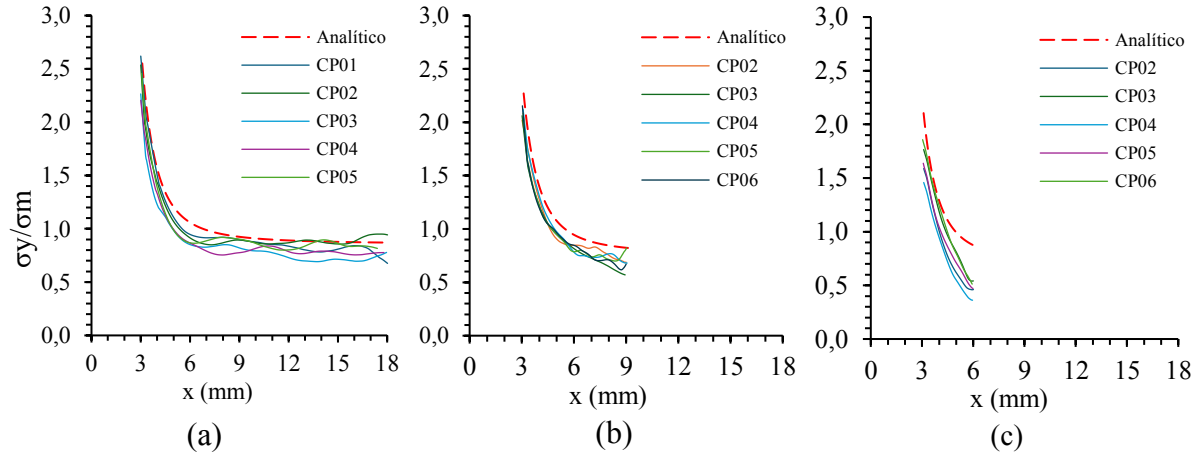
5.9.1 Resina Epóxi (RE)

Os resultados obtidos para a matriz epóxi com entalhe, considerando as três razões de d/W , estão representados na Figura 44. Observa-se uma boa concordância entre as curvas TF.36.RE e TF.18.RE ($d/W = 0,16$ e $d/W = 0,33$). Na região próxima à borda do furo, localizada entre 3 mm e 5 mm, os resultados das análises experimental e analítica são bastante semelhantes. Entretanto, as curvas começam a divergir a partir de 5 mm, apresentando uma maior oscilação à medida que se distanciam da borda do furo.

Conforme observado na curva TF.12.RE ($d/W = 0,50$), não foi obtida uma concordância tão significativa entre os dados analíticos e experimentais. Os valores localizados próximos à borda do furo, em $x = 3$ mm, apresentam uma diferença considerável em comparação com os resultados analíticos. De maneira geral, quando o valor de d/W atinge seu menor valor,

as curvas experimentais tendem a apresentar valores de tensão menores em relação aos dados analíticos.

Figura 44 – Distribuição de tensão em torno do furo: (a) TF.36.RE; (b) TF.18.RE; (c) TF.12.RE.

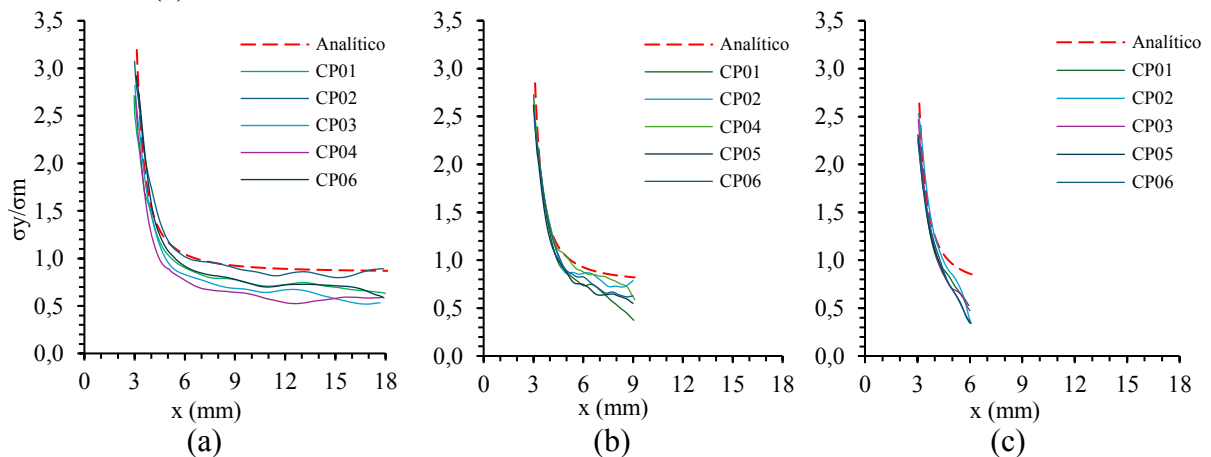


Fonte: elaborado pelo autor.

5.9.2 Laminado Compósito LFV.0/90

Os resultados obtidos para o LFV.0/90 com entalhe, considerando as três razões de d/W , estão representados na Figura 45. Comparando com os resultados obtidos para a resina epóxi, pode-se dizer que, de modo geral, o LFV.0/90 apresenta um comportamento semelhante ao da resina. Apesar das diferenças, em termos de magnitude de tensões e tendência de decaimento das curvas, ambos os materiais seguem padrões semelhantes, com uma redução acentuada das tensões na região imediatamente ao redor do furo e um comportamento mais estável em áreas mais distantes da borda do entalhe.

Figura 45 – Distribuição de tensão em torno do furo: (a) TF.36.LFV0/90; (b) TF.18.LFV0/90; (c) TF.12.LFV0/90.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para as duas primeira configurações onde as relações d/W são menores TF.36.LFV.0/90 e TF.18.LFV.0/90), os resultados experimentais tendem a seguir mais de perto as curvas analíticas, principalmente próximo à borda do furo. No entanto, à medida que d/W aumenta para 0,50 (em TF.12.LFV.0/90), a influência da descontinuidade parece intensificar as diferenças entre os resultados analíticos e experimentais.

Para TF.36.LFV.0/90 ($d/W = 0,16$), observa-se uma boa concordância entre as curvas analíticas e experimentais, especialmente nos primeiros milímetros (até $x \approx 5$ mm) próximos à borda do furo. A partir dessa região, há uma leve divergência, com as curvas experimentais tendendo a apresentar valores de tensão levemente inferiores ao analítico.

Do mesmo modo, observa-se que para o TF.18.LFV.0/90 ($d/W = 0,33$) a concordância entre os resultados analíticos e experimentais continua sendo boa, especialmente até $x \approx 5$ mm. A divergência entre as curvas analíticas e experimentais tendem a ser um pouco mais acentuada em comparação com a primeira configuração, principalmente após os 6 mm.

Na configuração TF.12.LFV.0/90 ($d/W = 0,50$), não há uma diferença significativa entre as curvas analíticas e experimentais logo nas proximidades da borda do furo ($x \approx 3$ mm). Comportamento sementante ao encontrado para as outras configurações. Comparando os gráficos da resina epóxi e do laminado LFV.0/90 para $d/W = 0,50$, pode-se destacar que no gráfico da resina epóxi, há uma maior variabilidade entre as curvas experimentais, o que não ocorre de forma tão evidente no gráfico da do laminado LFV.0/90, apesar da heterogeneidade do laminado, que é composto de fibras orientadas.

5.9.3 Laminado Compósito LFV.45

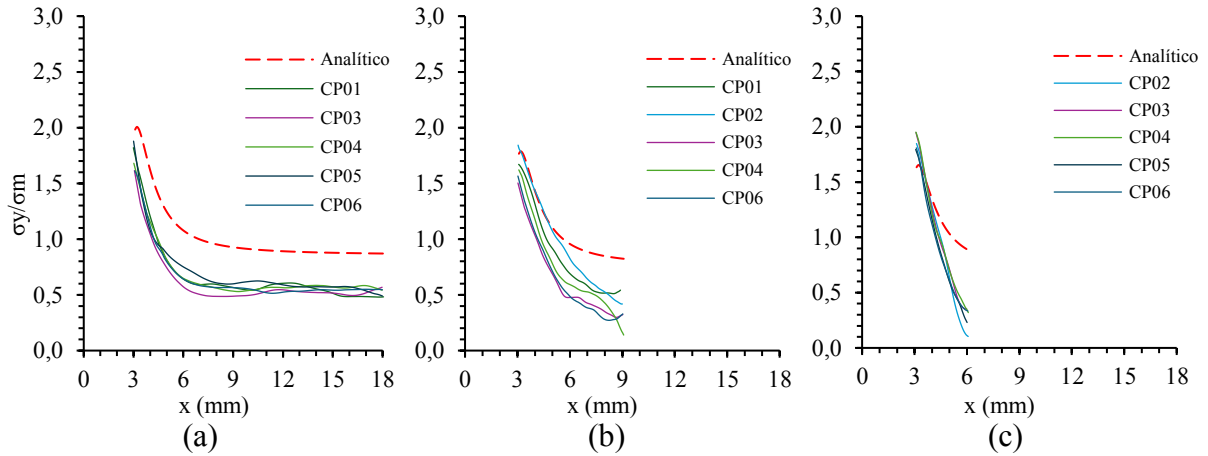
Os resultados obtidos para o LFV.45 com entalhe, considerando as três razões de d/W , estão representados na Figura 46. No geral, a distribuição das tensões nos laminados com orientação $\pm 45^\circ$ apresenta uma variação mais acentuada nas proximidades do furo, principalmente para as maiores razões de d/W .

Para o TF.36.LFV.45 ($d/W = 0,16$), observa-se uma discrepância maior entre as curvas analítica e experimental ao longo de todo o gráfico. Essa diferença é mais acentuada em comparação aos outros laminados (0/90°) e à resina epóxi, sugerindo que a orientação das fibras a $\pm 45^\circ$ exerce uma influência significativa na distribuição de tensões.

Para a configuração TF.18.LFV.45, as curvas analítica e experimental se aproximam mais, mas ainda há uma leve divergência nas proximidades do furo. Em geral, há uma maior

diferença entre os valores experimentais e analíticos nas regiões mais distantes do furo.

Figura 46 – Distribuição de tensão em torno do furo: (a) TF.36.LFV.45; (b) TF.18.LFV.45; (c) TF.12.LFV.45.



Fonte: elaborado pelo autor.

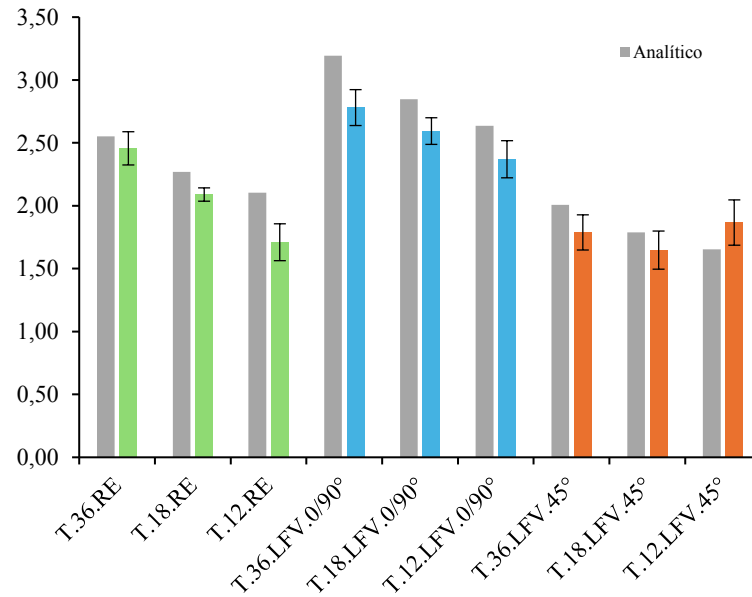
Quando $d/W = 0,50$, o comportamento do laminado com orientação $\pm 45^\circ$ se mostra ligeiramente mais disperso em comparação ao laminado $0/90^\circ$ e à resina epóxi. Além disso, essa é a única configuração em que as curvas experimentais apresentaram valores superiores aos da análise analítica. Isso sugere que a orientação das fibras influencia diretamente a concentração de tensões, provavelmente devido à maior flexibilidade do laminado com essa disposição de fibras.

5.10 CONCENTRADOR DE TENSÃO

Através do perfil de deformação longitudinal da seção transversal dos CP's com furo circular obtidos pelas análises experimentais, foi possível mensurar a deformação longitudinal máxima e, desse modo, determinar a tensão máxima e a concentração de tensão resultante da presença da descontinuidade geométrica. A Figura 47 apresenta uma comparação entre os dados analíticos e experimentais dos valores dos concentradores de tensão nos laminados e na matriz epóxi. Esses valores também estão registrados na Tabela 19.

Analisando o comportamento do gráfico ilustrado na Figura 47, de maneira geral, os resultados experimentais e analíticos, exceto para a configuração TF.12LFV.45, mostram que há uma redução do fator de concentração de tensão (K_t) com o aumento da razão d/W , indicando que a concentração de tensão ao redor do furo diminui à medida que o furo se torna proporcionalmente maior em relação à largura total da amostra. Comportamento semelhante ao encontrado em bibliografia (Figura 10).

Figura 47 – Comparativo dos K_t analítico e experimental para Resina Epóxi, LFV.0/90° e LFV.45°.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 19 – Concentradores de tensão experimentais e analíticos.

K_t	d/w	Analítico	Experimental	$\Delta\%$
TF.36.RE	0,16	2,552	2,457 ± 0,132	3,72
TF.18.RE	0,33	2,271	2,089 ± 0,053	8,01
TF.12.RE	0,50	2,105	1,710 ± 0,147	18,76
TF.36.LFV.0/90	0,16	3,193	2,781 ± 0,143	12,90
TF.18.LFV.0/90	0,33	2,847	2,594 ± 0,106	8,89
TF.12.LFV.0/90	0,50	2,637	2,370 ± 0,148	10,13
TF.36.LFV.45	0,16	2,007	1,840 ± 0,140	8,32
TF.18.LFV.45	0,33	1,787	1,647 ± 0,152	7,83
TF.12.LFV.45	0,50	1,654	1,867 ± 0,180	12,88

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os resultados da matriz epóxi, temos que para TF.36.RE e TF.18.RE, o valor experimental é muito próximo ao analítico, apresentando uma pequena diferença de aproximadamente 3,7% e 8,0%, respectivamente. Na configuração TF.12.RE ($d/W = 0,50$), o valor experimental tem a maior diferença quando comparado ao analítico, com uma variação de 19,0%.

Os resultados para o LFV 0/90 mostram que o TF.36.LFV.0/90 ($d/W = 0,16$) apresenta uma divergência de cerca de 13,0% entre os valores experimental e analítico. Para TF.18.LFV.0/90 ($d/W = 0,33$), a diferença é menor, com uma variação de aproximadamente 9,0%. Em TF.12.LFV.0/90 ($d/W = 0,50$), há uma diferença maior de 10,0%.

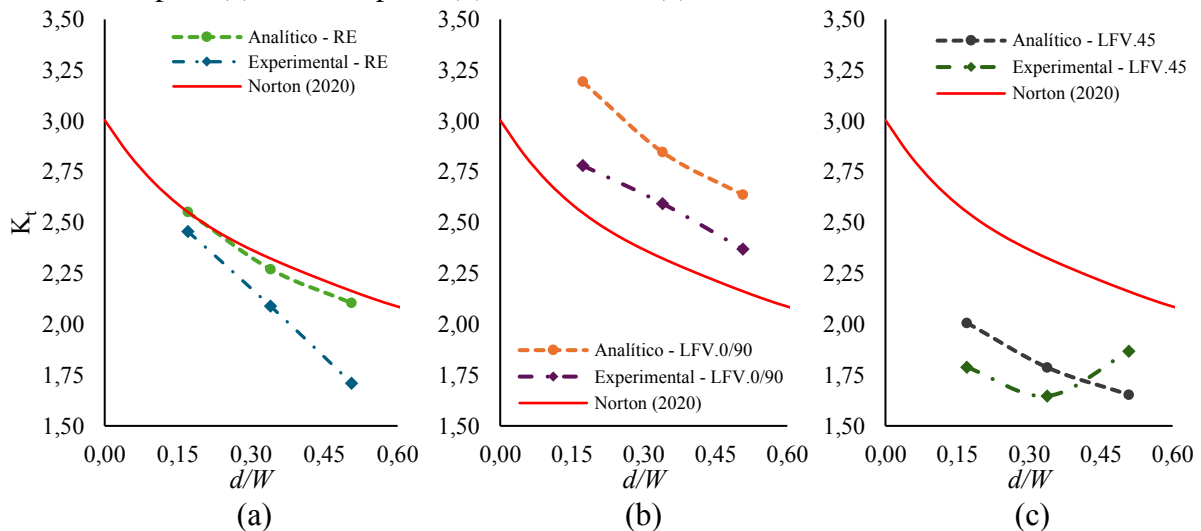
Para o LFV.45, observa-se uma diferença de aproximadamente 8,0% entre os valores experimental e analítico, quando assumem as configurações TF.36.LFV.45 ($d/W = 0,16$) e TF.18.LFV.45 ($d/W = 0,33$). Quando $d/W = 0,50$, as variações entre o valor analítico e

experimental é maior, com aproximadamente 12,9% de diferença. Porém, TF.12LFV.45 apresenta o único valor experimental maior que o analítico.

De maneira geral, os resultados experimentais são ligeiramente inferiores aos valores analíticos, exceto para a configuração TF.12LFV.45. As menores discrepâncias entre os dados analíticos e experimentais são observadas na resina epóxi e no laminado 0/90°. A maior dispersão dos resultados para o laminado $\pm 45^\circ$, especialmente na razão $d/W = 0,50$, sugere que, conforme destacado por Barbero (2017), a equação 3.8, empregada para aproximar a distribuição de tensão em torno de um furo central em uma placa semi-infinita, pode não ser adequada para valores de $d/W = 0,33$ ou para laminados com fibras orientadas a $\pm 45^\circ$.

A Figura 48, mostra as Curvas do Fator geométrico de concentração de tensão K_t analítico e experimental para Resina Epóxi, LFV.0/90° e LFV.45° em relação a razão d/W . Para o comparativo com os valores encontrados em bibliografia está plotada a curva para o fator de concentração de tensão para uma barra plana com orifício transversal em tração axial encontrada em Norton (2020), que descreve o comportamento de um aço.

Figura 48 – Curvas do Fator geométrico de concentração de tensão K_t analítico e experimental para (a) Resina Epóxi, (b) LFV.0/90° e (c) LFV.45°.



Fonte: elaborado pelo autor.

A curva analítica para a resina epóxi segue um padrão de redução de K_t com o aumento de d/W , mantendo-se próxima da curva teórica de Norton (2020), uma vez que ambos são materiais isotrópicos. Os resultados experimentais apresentam valores de K_t menores do que os teóricos e analíticos, especialmente para valores mais altos de d/W , indicando que, na prática, a resina epóxi dispersa as tensões de forma mais eficiente que o previsto. Há uma maior divergência entre curva experimental e a teórica para $d/W > 0,25$, sugerindo menor

concentração de tensões na prática.

A curva analítica para o LFV.0/90° apresenta valores de K_t mais altos do que a curva teórica de Norton (2020), o que pode ser atribuído à anisotropia do material. Os resultados experimentais permanecem abaixo da curva analítica, mas ainda acima da curva teórica de Norton (2020), indicando que a orientação das fibras influencia fortemente a distribuição de tensões. Ambos os modelos (analítico e experimental) superestimam K_t em relação à curva teórica, indicando maior concentração de tensão neste laminado em comparação à resina epóxi.

O modelo analítico para o LFV.45° apresenta valores de K_t mais baixos que a curva de Norton (2020), refletindo o comportamento mais uniforme na redistribuição das tensões devido à orientação oblíqua das fibras. Os valores experimentais acompanham de perto os analíticos e estão notavelmente abaixo da curva teórica, especialmente para $d/W > 0,3$, confirmando que a orientação $\pm 45^\circ$ minimiza os efeitos de concentração de tensões. O LFV.45 mostra o menor K_t entre os três materiais analisados, divergindo significativamente da curva teórica e confirmando que este arranjo é o mais eficiente em termos de redistribuição de tensões.

5.11 DISTRIBUIÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM TORNO DO FURO COM AUXILIO DA DIC

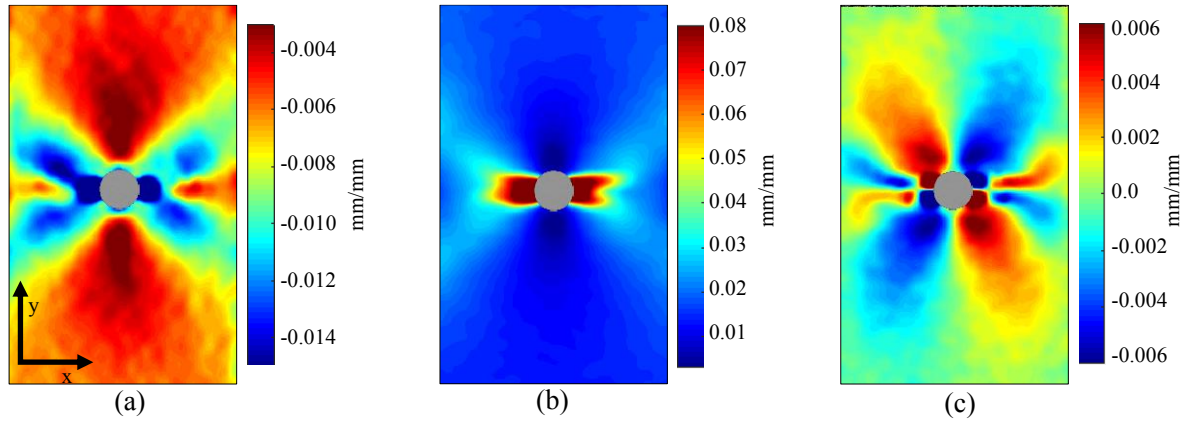
Nesta seção, são apresentados os campos de deformação em torno de furos circulares, obtidos por meio da técnica de Correlação Digital de Imagem (DIC), tanto para os corpos de prova de matriz epóxi quanto para as duas configurações de laminado analisadas. Foram utilizadas as imagens correspondentes ao último estágio antes do início da fratura dos corpos de prova. Essas imagens representam o comportamento típico dos campos de deformação para um subgrupo dos materiais, nas direções dos eixos x , y (direção da aplicação da carga) e xy .

5.11.1 DIC - Descontinuidade Geométrica na matriz epóxi

As Figuras 49, 50 e 51 mostram os três campos de deformação no plano na região do furo, obtidos pela DIC, para a matriz epóxi à medida que a razão d/W é variada. As três configurações com matriz de resina epóxi apresentam padrões similares de deformação, com variações sutis na magnitude das deformações. Em geral, o TF.36.RE mostra as maiores magnitudes de deformação, enquanto o TF.12.RE tem as menores. A simetria das deformações em torno do furo é uma característica constante em todos os casos, refletindo a influência da

isotropia da resina epóxi na redistribuição das tensões.

Figura 49 – Campos de deformação em torno do furo para o TF.36.RE nas direções: (a) x ; (b) y e (c) xy

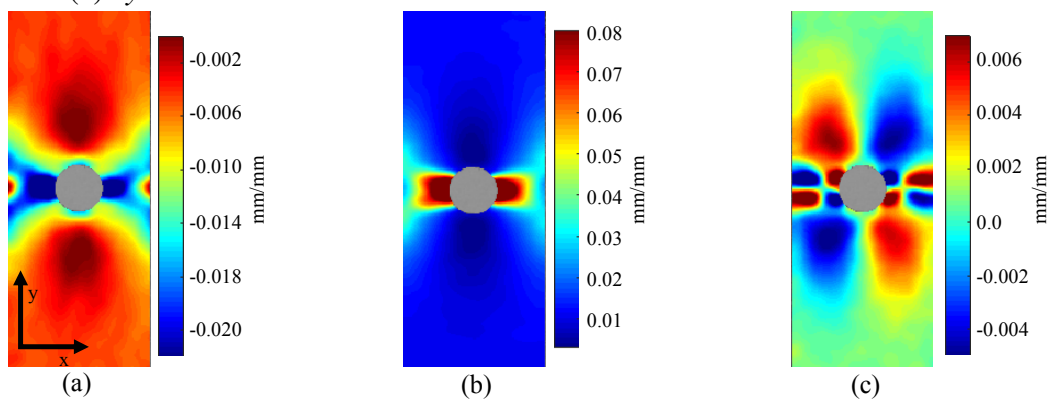


Fonte: elaborado pelo autor.

Nas imagens do TF.36.RE ($d/W = 0,16$), o campo de deformação ao longo da direção x , Figura 49(a), mostra regiões de tração (vermelho) e compressão (azul) simétricas em relação ao furo, com maior intensidade de deformação concentrada em um padrão de “X” em torno do furo. Na direção y , Figura 49(b), a deformação mostra uma distribuição com picos de tração nas bordas laterais do furo e compressão nas regiões superior e inferior. O campo de deformação xy , Figura 49(c), revela padrões simétricos ao redor do furo, com concentrações diagonais que indicam que há tensões de cisalhamento significativas ao redor do furo.

Para o TF.18.RE ($d/W = 0,33$), a deformação ao longo da direção x , Figura 50(a), segue o mesmo padrão observado no TF.36.RE, com concentrações diagonais de tração e compressão em torno do furo. As magnitudes são similares, sugerindo que o comportamento na direção longitudinal continua dominante.

Figura 50 – Campos de deformação em torno do furo para o TF.18.RE nas direções: (a) x ; (b) y e (c) xy

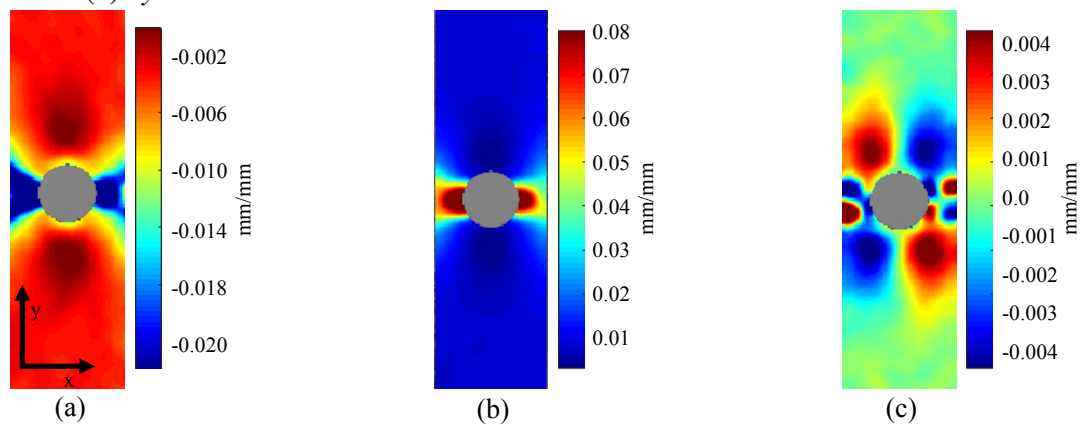


Fonte: elaborado pelo autor.

O campo de deformação y , Figura 50(b), mostra uma redistribuição semelhante, mas com uma magnitude menor em comparação com o TF.36.RE. O cisalhamento xy mostra novamente concentrações diagonais ao redor do furo, com uma distribuição mais simétrica e menos intensa que no TF.36.RE. A magnitude é um pouco menor, indicando uma menor intensidade de deformações cisalhantes.

Finalmente, para TF.12.RE ($d/W = 0,50$), a distribuição da deformação na direção x , Figura 51(a), é similar às duas figuras anteriores, mas com uma redução significativa na intensidade. As regiões de tração e compressão ao redor do furo estão mais localizadas. O campo de deformação na direção y , Figura 51(b), apresenta uma distribuição bastante similar, mas com intensidade ainda menor, especialmente em comparação com o TF.36.RE. A Componente xy , Figura 51(c), segue o mesmo padrão simétrico, mas a intensidade das deformações cisalhantes é ainda menor do que nos casos anteriores, sugerindo que o TF.12 apresenta o menor nível de concentração de tensões de cisalhamento ao redor do furo.

Figura 51 – Campos de deformação em torno do furo para o TF.12.RE nas direções: (a) x ; (b) y e (c) xy

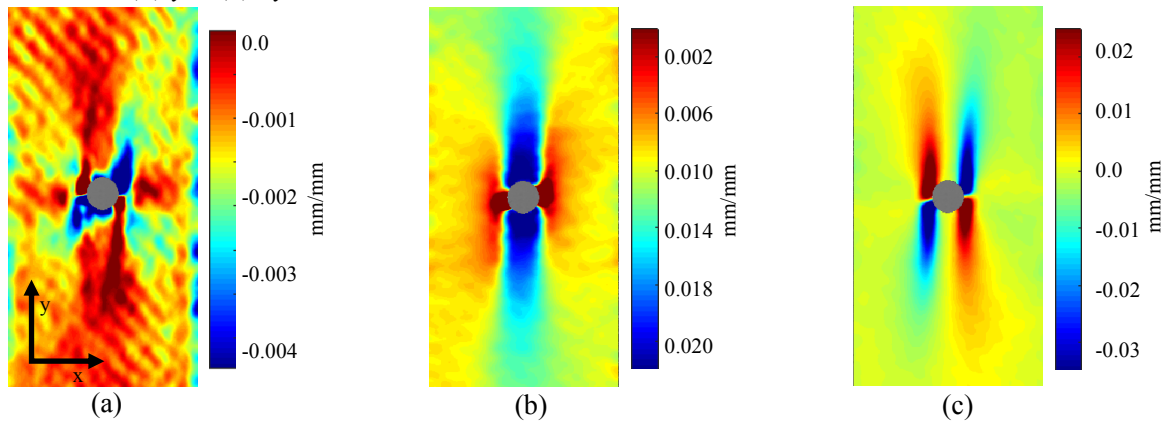


Fonte: elaborado pelo autor.

5.11.2 DIC - Descontinuidade Geométrica no LFV.0/90°

As Figuras 52, 53 e 54 mostram os três campos de deformação no plano na região do furo, obtidos pela DIC, para LFV.0/90 com as três razões d/W diferentes. Os três laminados com orientação de fibras a 0/90° apresentam padrões similares de deformação, com intensidades variáveis conforme a largura do laminado. Em geral, o laminado TF.12.LFV.0/90, por ser o mais fino, apresenta as maiores magnitudes de deformação, enquanto o TF.36.LFV.0/90 apresenta as menores. Esse comportamento também foi observado no estudo de Khechai *et al.* (2018a).

Figura 52 – Campos de deformação em torno do furo para o TF.36.LFV.0/90° nas direções: (a) x ; (b) y e (c) xy



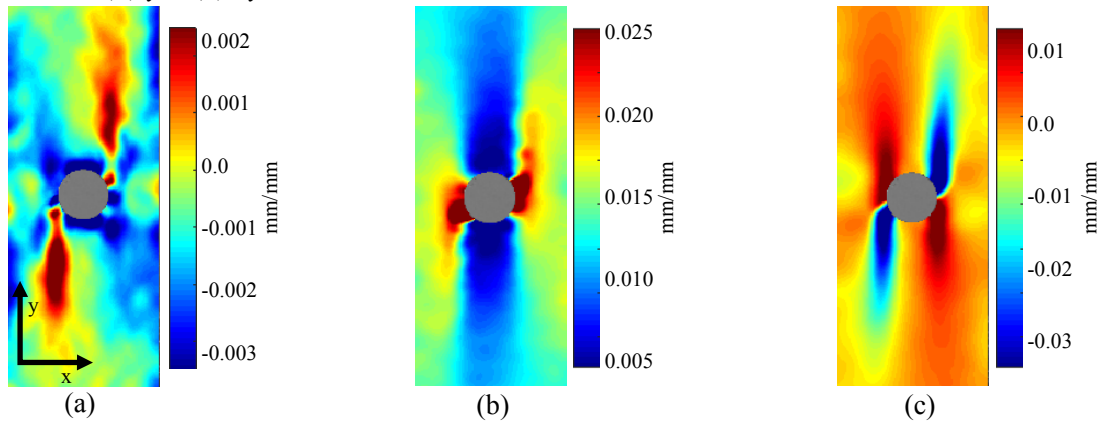
Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando as imagens do TF.36.LFV.0/90 ($d/W = 0,16$), Figura 52(a), o campo de deformação ao longo da direção x mostra uma distribuição assimétrica em torno do furo, com regiões de compressão (azul) em oposição às regiões de tração (vermelho). A deformação é mais pronunciada ao longo das bordas laterais do furo, sugerindo que as tensões estão sendo concentradas nessas áreas.

Na direção y , Figura 52(b), observa-se uma simetria significativa no campo de deformação, com picos de tração nas partes superior e inferior do furo. A deformação é distribuída de forma mais suave em comparação com a direção x , o que pode estar relacionado à configuração das fibras a 90° que resistem às tensões perpendiculares à direção de aplicação da carga. O campo de deformação xy , Figura 52(c), revela concentrações diagonais, especialmente ao redor do furo. A intensidade é baixa, mas presente, sugerindo que há tensões cisalhantes atuando nas bordas do furo, embora o efeito seja menos pronunciado do que nas direções x e y .

Para o TF.18.LFV.0/90 ($d/w = 0,33$), a deformação ao longo de x , Figura 53(a) segue um padrão semelhante ao observado na Figura 53, com a distribuição assimétrica concentrada nas bordas do furo. No entanto, a intensidade da deformação é ligeiramente maior, refletindo o fato de que o laminado TF.18 apresenta uma menor largura, o que pode influenciar a redistribuição das tensões. A distribuição de deformação ao longo de y , Figura 53(b), mantém a simetria observada anteriormente, com maior concentração nas regiões superior e inferior do furo. As deformações estão mais dispersas e a magnitude é levemente maior em comparação com o TF.36.LFV.0/90. O campo de deformação xy apresenta um padrão similar ao TF.36.LFV.0/90, mas com uma intensidade um pouco maior.

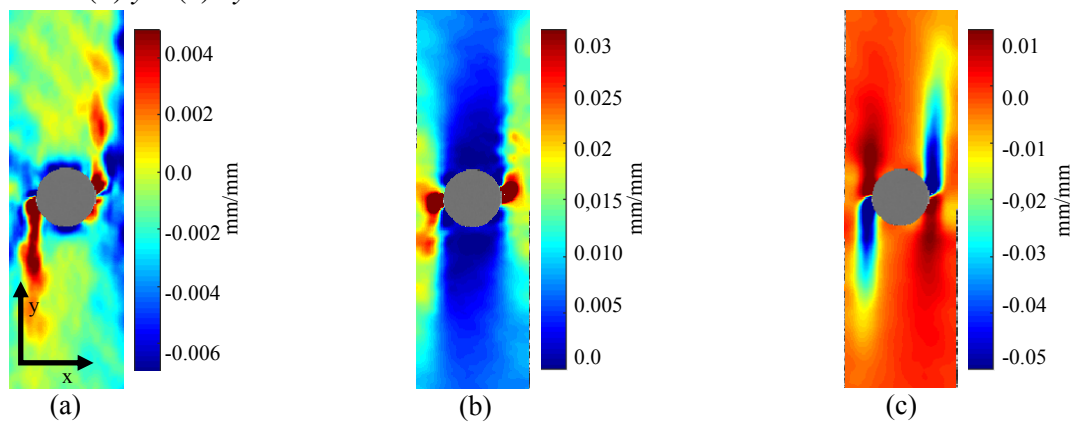
Figura 53 – Campos de deformação em torno do furo para o TF.18.LFV.0/90 nas direções: (a) x ; (b) y e (c) xy



Fonte: elaborado pelo autor.

Para o TF.12.LFV.0/90 ($d/w = 0,50$), a deformação ao longo de x , Figura 54(a), apresenta uma distribuição semelhante aos casos anteriores, mas com a maior intensidade de deformação entre os três laminados. As concentrações de deformação nas bordas laterais do furo são mais pronunciadas, sugerindo que o laminado mais fino é o mais afetado pelas tensões longitudinais. Na direção y , Figura 54(b), o padrão de deformação permanece simétrico, com concentrações nas regiões superior e inferior do furo. No entanto, a magnitude da deformação é a mais alta entre os três casos, reforçando a ideia de que o laminado mais fino apresenta uma maior suscetibilidade às tensões aplicadas. O campo de cisalhamento xy , Figura 54(c), mostra uma concentração de deformações cisalhantes mais intensa em torno do furo, com a maior magnitude observada entre os três laminados.

Figura 54 – Campos de deformação em torno do furo para o TF.12.LFV.0/90 nas direções: (a) x ; (b) y e (c) xy

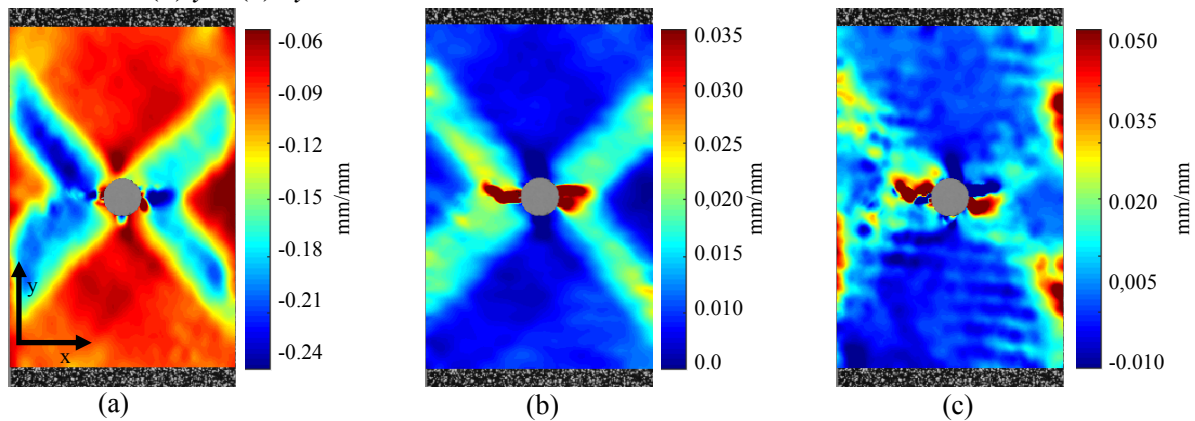


Fonte: elaborado pelo autor.

5.11.3 DIC - Descontinuidade Geométrica no LFV.45

As Figuras 55, 56 e 57 mostram os três campos de deformação no plano na região do furo, obtidos por DIC para o LFV.45 de acordo com cada razão d/W estudada.

Figura 55 – Campos de deformação em torno do furo para o TF.36.LFV.45 nas direções: (a) x ; (b) y e (c) xy



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir dessas figuras, podemos ver claramente o efeito do ângulo de orientação das fibras na distribuição e nos valores das deformações. A distribuição de deformação muda completamente suas direções em comparação com o LFV.0/90, do mesmo modo que o reportado por Khechai *et al.* (2018b). Por outro lado, os resultados da DIC mostram que as maiores deformações continuam localizadas nas bordas do furo, assim como observado para matriz epóxi e o LFV.0/90°.

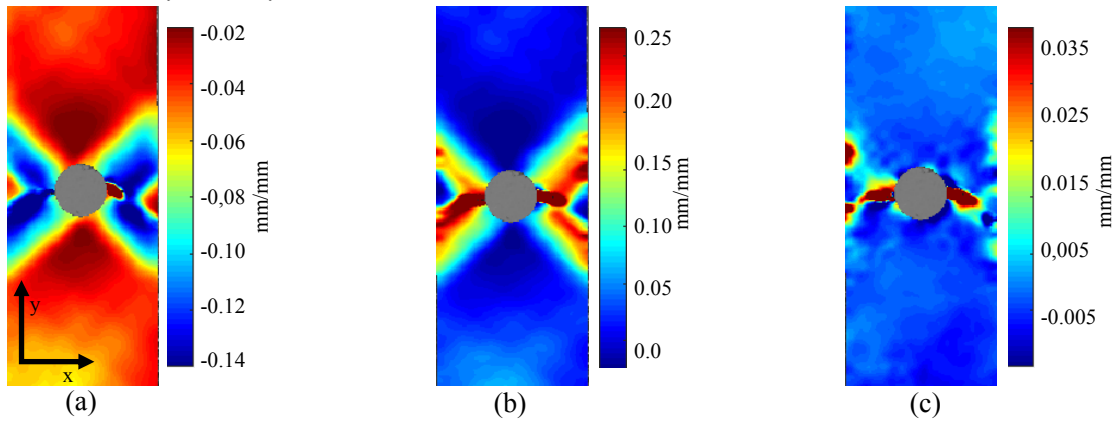
Para o TF.36.LFV.45° ($d/W = 0,16$), Figura 55(a), o campo de deformação ao longo da direção x mostra uma distribuição que se concentra nas áreas diagonais superiores e inferiores, com regiões de menor deformação (em vermelho) em oposição às regiões de tração (em azul).

Na direção y , Figura 55(b), observa-se uma concentração significativa de deformação nas áreas diagonais superiores e inferiores, de modo semelhante a direção x . As áreas em azul indicam regiões onde a deformação é menos acentuada, com uma distribuição simétrica em torno do furo. As áreas em vermelho indicam onde a deformação é mais acentuada, onde podemos identificar que se trata da região onde se inicia a propagação da fratura.

O campo de deformação cisalhante xy , Figura 55(c), revela padrões de concentração ao redor do furo, com uma simetria típica em relação às direções principais. As concentrações estão localizadas nas regiões diagonais, mostrando que o cisalhamento é mais intenso nas áreas próximas ao furo.

Já TF.18.LFV.45 ($d/W = 0,33$), o comportamento da deformação ao longo de x , Figura 56(a), é bastante similar ao observado na Figura 55(a), com as regiões de maior concentração de deformação deslocadas diagonalmente. No entanto, a magnitude da deformação parece ligeiramente menor.

Figura 56 – Campos de deformação em torno do furo para o TF.18.LFV.45 nas direções: (a) x ; (b) y e (c) xy

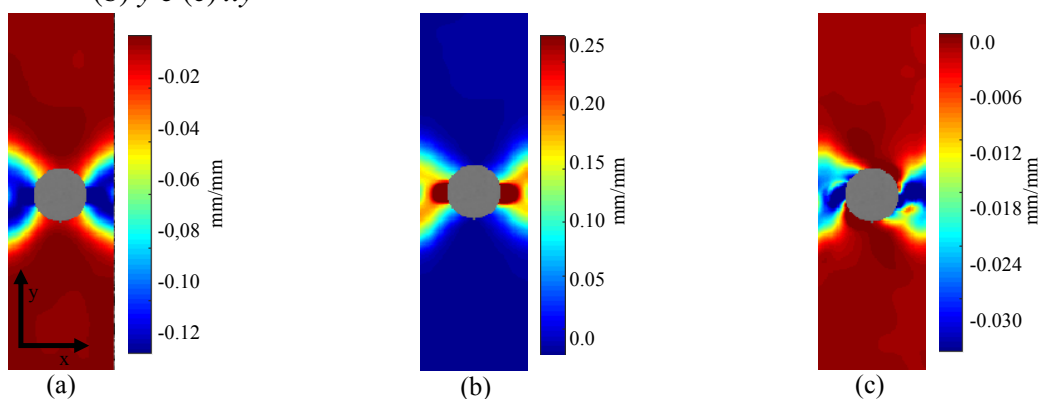


Fonte: elaborado pelo autor.

Na direção y , Figura 56(b), o comportamento também é semelhante, mas há uma leve diminuição na intensidade das deformações quando comparado ao TF.36. As áreas ao redor do furo continuam a ser as regiões de maior concentração de deformação. Na direção xy , Figura 56(c), mostra novamente a presença de concentrações diagonais ao redor do furo, mas com uma distribuição de intensidade mais baixa do que no caso anterior. A simetria continua a ser uma característica marcante.

Quando analisamos as imagens de TF.12.LFV.45 ($d/W = 0,33$), as deformações ao longo de x , Figura 57(a), tem intensidade da deformação parece ser a menor entre os três casos.

Figura 57 – Campos de deformação em torno do furo para o TF.12.LFV.45 nas direções: (a) x ; (b) y e (c) xy



Fonte: elaborado pelo autor.

A deformação ao longo de y , Figura 57(b), apresenta um padrão similar, mas com uma redução adicional na magnitude da deformação. As áreas em torno do furo ainda mostram concentração, mas de forma menos intensa. E por fim, o campo de deformação cisalhante xy apresenta concentrações nas mesmas regiões diagonais, mas a magnitude da deformação é a menor entre os três casos. Isso sugere uma menor quantidade de cisalhamento nesses laminados específicos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os objetivos propostos e as análises realizadas, as conclusões deste trabalho são apresentadas em seções, o que torna o texto mais claro e objetivo.

6.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Neste estudo, foi constatado que a fabricação de compósitos com matriz de resina epóxi, reforçados com tecido bidirecional de fibras de vidro-E, utilizando o método de laminação manual (hand lay-up), é capaz de produzir materiais com boas propriedades mecânicas e acabamento satisfatório, mesmo sendo um processo de baixo custo e fácil aplicação. No entanto, é essencial que o processo de fabricação seja realizado com cuidado para evitar a formação de defeitos no material. O mesmo se aplica ao método de injeção utilizado para os corpos de prova de resina epóxi, que resulta em produtos praticamente com as dimensões desejadas.

6.2 DENSIDADE, FRAÇÕES MÁSSICA E VOLUMÉTRICA DOS CONSTITUINTES

Os valores de densidade para o LFV e a resina epóxi estão em conformidade com os encontrados na literatura e, como previsto, a densidade do laminado compósito possui um valor intermediário entre os materiais constituintes. Em relação aos percentuais de constituintes, destacam-se os baixos índices de vazios observados nos laminados, comprovando a eficiência do processo de fabricação adotado. Além disso, os baixos valores de densidade volumétrica do laminado compósito analisado, em comparação com outros estudos reportados na literatura para materiais semelhantes, reforçam a possibilidade de aplicação desses materiais em estruturas leves.

6.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS À TRAÇÃO

Em relação às propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração uniaxial, foram observadas baixas dispersões experimentais, o que indica uma uniformidade microestrutural dos materiais, especialmente em função dos processos de fabricação adotados, destacando-se a baixa quantidade de vazios nos materiais desenvolvidos neste estudo. Notou-se também que a adição do tecido tanto na direção 0/90° como $\pm 45^\circ$ promoveu um aumento do limite de resistência a tração e módulo de elasticidade, quando comparado ao da resina pura. Comparando os dados do

laminado em diferentes orientações, observa-se que a carga de ruptura à tração e o módulo de elasticidade são significativamente maiores quando as fibras estão orientadas a 0/90°.

6.4 INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DA DESCONTINUIDADE GEOMÉTRICA

A presença do furo central e a variação da relação d/W teve um efeito prejudicial sobre a resistência à tração, o módulo de elasticidade e a deformação na ruptura para quase todos os corpos de prova estudados, em comparação com os corpos de prova na condição original. No entanto, para a configuração TF.36.LFV.45°, não houve perda no limite de resistência à tração e foi observado um ganho no módulo de elasticidade.

De maneira geral, observa-se uma diminuição nos valores das propriedades dos materiais estudados à medida que a largura da seção transversal do corpo de prova é reduzida, resultando em um aumento da relação d/W . O módulo de elasticidade é a propriedade menos afetada pelo furo central.

6.5 PERFIL DE DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO EXPERIMENTAL E ANALÍTICO

Experimentalmente, para as três variações de d/W , observou-se que a máxima tensão ocorre na borda do furo, diminuindo ao longo da seção transversal até atingir um ponto mínimo nas bordas dos corpos de prova (CPs). O perfil de tensão obtido experimentalmente se aproxima mais das curvas analíticas para os corpos de prova (CP's) da matriz epóxi e do LFV.0/90°.

As curvas analíticas descrevem de forma satisfatória o comportamento experimental em regiões próximas ao furo. Porém, à medida que se distancia do furo, os dados dos modelos tendem a superestimar os resultados em comparação com os experimentais, exceto na configuração TF.36.LFV.45, onde o valor médio experimental na borda do furo é superior ao obtido analiticamente.

6.6 CONCENTRADOR DE TENSÃO

Os valores experimentais do fator de concentração de tensão (K_t), determinados unicamente em função da geometria, apresentam boa aproximação aos valores analíticos, especialmente quando a relação d/W é igual a 0,16 e 0,33. De modo geral, o valor obtido experimentalmente é menor que o valor analítico, o que indica que os resultados fornecidos pelo modelo utilizado são, de certo modo, conservadores.

De maneira geral, à medida que reduzimos a largura dos corpos de prova (ou seja, conforme d/W aumenta), observa-se uma redução no fator de concentração de tensão (K_t). Comportamento justificado por uma distribuição tensões mais uniforme ao redor do furo, reduzindo o pico de concentração de tensão, que também pode ser constatado pela análise dos campos de deformação, onde os CP's de menor largura apresentam deformações menos intensas.

Quando $d/W = 0,50$, observa-se uma maior diferença percentual entre os valores experimentais e analíticos, especialmente para a configuração TF.12.LFV.45°, o que indica que o modelo utilizado não é recomendado quando $d/W > 0,33$, conforme já indicado por Barbero (2017).

A análise dos gráficos mostra que a curva teórica de Norton (2020) representa bem o comportamento da resina epóxi (RE) em valores analíticos, mas os dados experimentais indicam uma menor concentração de tensão (K_t) na prática. No LFV.0/90°, os valores analíticos e experimentais superestimam K_t em relação à curva teórica, refletindo maior concentração de tensão devido à anisotropia e à orientação ortogonal das fibras. Já o LFV.45° apresenta o menor K_t , com valores experimentais próximos aos analíticos e significativamente abaixo da curva de Norton, destacando a eficiência dessa orientação em redistribuir tensões. Assim, o comportamento anisotrópico dos laminados diverge da previsão teórica baseada em materiais isotrópicos.

6.7 DISTRIBUIÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM TORNO DO FURO

As altas deformações localizadas identificadas pela técnica DIC estavam de acordo com os achados analíticos e experimentais. Mostrando que a máxima tensão ocorre na borda do furo. De maneira geral, as principais diferenças entre as três relações d/W estão na magnitude das deformações, com o TF.36 apresentando os maiores valores e o TF.12 os menores.

A distribuição da deformação em torno do furo apresenta um padrão específico para cada configuração. Na matriz epóxi, há uma simetria das deformações em torno do furo, característica observada em todos os casos. No LFV.0/90°, a deformação é mais acentuada ao longo das bordas laterais do furo, sugerindo que as tensões longitudinais estão concentradas nessas regiões. Já nas três configurações do LFV.45°, observa-se um comportamento bastante similar, com maior concentração de deformações nas áreas diagonais.

7 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros a serem desenvolvidos com a presença de descontinuidades geométricas em laminados compósitos estudados nesta pesquisa, podem ser listadas:

- Investigar as propriedades mecânicas de laminados compósitos com diferentes tipos de reforço;
- Desenvolver novas configurações de compósitos variando também as dimensões e tipos das descontinuidades geométricas e avaliar para determinar a concentração de tensão de cada configuração ;
- Modelagem computacional através do método de elementos finitos, para comparar com os resultados experimentais e analíticos encontrados;
- Análise do comportamento da concentração de tensão submetida a cargas cíclicas;
- Estudo do comportamento anisotrópico à tração em diversas orientações de tecido.

REFERÊNCIAS

- ALBADRANI, M. Failure prediction in 3d printed kevlar/glass fiber-reinforced nylon structures with a hole and different fiber orientations. **Polymers**, v. 14, 2022.
- ALMEIDA, J. H. S.; ANGRIZANI, C. C.; BOTELHO, E. C.; AMICO, S. C. Effect of fiber orientation on the shear behavior of glass fiber/epoxy composites. **Materials and Design (1980-2015)**, v. 65, p. 789–795, 2015. ISSN 0261-3069. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914007900>>.
- ALTENBACH, H.; ALTENBACH, J.; KISSING, W. **Mechanics of Composite Structural Elements**. 2. ed. [S.l.]: Springer, 2018. ISBN 9789811089343.
- ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H. **Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design**. 3. ed. [S.l.]: Elsevier, 2006.
- ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H. Engineering materials and their properties. In: **Engineering Materials 1**. [S.l.]: Elsevier, 2012. p. 1–12.
- ASSIS, L. S. d.; ASSIS, J. T. d.; PESSOA, J. R. d. C.; JÚNIOR, A. D. T. Elaboration of fracture prediction map using 2D digital image correlation - 2D CID. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, FapUNIFESP (SciELO), v. 15, n. 4, 2022.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3039/D3039M-17, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3518/D3518M-18: Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate**. West Conshohocken, PA, 2018. Disponível em: <<https://www.astm.org/Standards/D3518.htm>>.
- ASTM INTERNATIONAL. **Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates**. [S.l.], 2018. ASTM International, West Conshohocken, PA. Disponível em: <<https://www.astm.org/Standards/D5766.htm>>.
- ASTM International. **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://www.astm.org/Standards/D792.htm>>.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D638-22, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. West Conshohocken, PA, 2022.
- AVIPOL. 2023. Acessado em 03 de julho de 2023. Disponível em: <<https://www.avipol.com.br/>>.
- BARBERO, J. **Introduction to Composite Materials Design**. 3. ed. London, England: CRC Press, 2017. (Composite Materials).
- BHANDARI, V. B. **Design of machine elements**. [S.l.: s.n.], 2020.
- BHATTACHARYYA, D.; FAKIROV, S. (Ed.). **Synthetic polymer-polymer composites**. Munich, Germany: Hanser Publications, 2012.

BHONG, M.; KHAN, T. K.; DEVADE, K.; Vijay Krishna, B.; SURA, S.; EFTIKHAAR, H.; Pal Thethi, H.; GUPTA, N. Review of composite materials and applications. **Materials Today: Proceedings**, 2023. ISSN 2214-7853. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323049313>>.

BIGGER, R.; BLAYSAT, B.; BOO, C.; GREWER, M.; HU, J.; JONES, A.; KLEIN, M.; LAVA, P.; PANKOW, M.; RAGHAVAN, K.; REU, P.; SCHMIDT, T.; SIEBERT, T.; SIMONSEN, M.; TRIM, A.; TURNER, D.; VIEIRA, A.; WEIKERT, T. **A good practices guide for digital image correlation**. [S.l.], 2018.

BUDYNAS, R.; NISBETT, K. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. 11. ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2019.

BUDYNAS, R. G.; SADEGH, A. M. **Roark's Formulas for Stress and Strain**, 9e. 9. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2020.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. [S.l.]: Wiley Global Education, 2018.

DINITA, A.; RIPEANU, R. G.; ILINCă, C. N.; CURSARU, D.; MATEI, D.; NAIM, R. I.; TăNASE, M.; PORTOACă, A. I. Advancements in fiber-reinforced polymer composites: A comprehensive analysis. **Polymers**, MDPI AG, Switzerland, v. 16, n. 1, p. 2, 2023. ISSN 2073-4360.

EKŞİ, S.; GENEL, K. Comparison of mechanical properties of unidirectional and woven carbon, glass and aramid fiber reinforced epoxy composites. **Acta Phys. Pol. A.**, Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, v. 132, n. 3-II, p. 879–882, set. 2017.

EL-BAKY, M. A. A.; ATTIA, M. A.; ABDELHALEEM, M. M.; HASSAN, M. A. Flax/basalt/E-glass fibers reinforced epoxy composites with enhanced mechanical properties. **J. Nat. Fibers**, Informa UK Limited, v. 19, n. 3, p. 954–968, mar. 2022.

ELKINGTON, M.; BLOOM, D.; WARD, C.; CHATZIMICHALI, A.; POTTER, K. Hand layup: understanding the manual process. **Advanced Manufacturing: Polymer Composites Science**, v. 1, p. 138 – 151, 2015.

FELI, S.; JALILIAN, M. M. Experimental and optimization of mechanical properties of epoxy/nanosilica and hybrid epoxy/fiberglass/nanosilica composites. **Journal of Composite Materials**, v. 50, n. 28, p. 3891–3903, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0021998315627198>>.

FONTES, R. S. **Compósitos poliméricos reforçados por tecidos multiaxiais acoplados: anisotropia, configuração e concentração da deformação**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil, 2017.

GAY, D. **Composite Materials**. Boca Raton: CRC Press, 2022.

GDOUTOS, E. E. **Digital Image Correlation (DIC)**. Cham: Springer International Publishing, 2022. 251–259 p. ISBN 978-3-030-89466-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-89466-5_12>.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. [S.l.: s.n.], 2018.

HWANG, S.-F. An overview of angle deviations of fiber-reinforced polymer composite angular laminates. **Materials**, MDPI AG, Switzerland, v. 16, n. 13, p. 4844, 2023. ISSN 1996-1944.

INTERNATIONAL, A. **Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials**. West Conshohocken, PA, 2022. ASTM D3171-22. Disponível em: <<https://www.astm.org/Standards/D3171.htm>>.

JIANG, W. **Analysis and design of machine elements**. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2019.

JONES, F. R. **Composites Science, Technology, and Engineering**. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2022.

JONES, R. M. Introduction to composite materials. In: **Mechanics of Composite Materials**. [S.l.]: CRC Press, 2018. p. 1–53.

KANGISHWAR, S.; RADHIKA, N.; SHEIK, A. A.; CHAVALI, A.; HARIHARAN, S. A comprehensive review on polymer matrix composites: material selection, fabrication, and application. **Polym. Bull. (Berl.)**, Springer Science and Business Media LLC, v. 80, n. 1, p. 47–87, jan. 2023.

KASTRATOVIĆ, G.; GRBOVIĆ, A.; SEDMAK, A.; BOŽIĆ, Z.; SEDMAK, S. Composite material selection for aircraft structures based on experimental and numerical evaluation of mechanical properties. **Procedia Structural Integrity**, v. 31, p. 127–133, 2021. ISSN 2452-3216. 4th International Conference on Structural Integrity and Durability, ICSID 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321621000238>>.

KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials, Second Edition**. 2. ed. [S.l.]: CRC Press, 2005. ISBN 9780849313431.

KHECHAI, A.; TATI, A.; GUERIRA, B.; GUETTALA, A.; MOHITE, P. Strength degradation and stress analysis of composite plates with circular, square and rectangular notches using digital image correlation. **Composite Structures**, v. 185, p. 699–715, 2018. ISSN 0263-8223. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822317321165>>.

KHECHAI, A.; TATI, A.; GUETTALA, A.; MOHITE, P. M. A general solution for stress resultants around a circular cutout in laminate plates under different in-plane loadings: analytical and experimental investigations. **Arch. Appl. Mech.**, Springer Science and Business Media LLC, v. 88, n. 7, p. 1187–1208, jul. 2018.

MALINGAM, S. D.; JUMAAT, F. A.; NG, L. F.; SUBRAMANIAM, K.; GHANI, A. F. A. Tensile and impact properties of cost-effective hybrid fiber metal laminate sandwich structures. **Advances in Polymer Technology**, v. 37, n. 7, p. 2385–2393, 2018. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adv.21913>>.

MALLICK, P. **Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design**. 3. ed. [S.l.]: CRC Press, 2007.

MATYKIEWICZ, D. Hybrid epoxy composites with both powder and fiber filler: A review of mechanical and thermomechanical properties. **Materials**, v. 13, n. 8, 2020. ISSN 1996-1944. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/13/8/1802>>.

MEGAHED, A.; Abd El-Wadoud, F.; WAGIH, A.; KABEEL, A. Effect of incorporating aluminum wire mesh on the notched and un-notched strengths of glass fiber/epoxy composites. **Composite Structures**, v. 263, p. 113695, 2021. ISSN 0263-8223. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822321001562>>.

MENDONÇA, V. C. d. S. M. **Caracterização das propriedades mecânicas de uma resina epoxy reforçada com nanotubos de carbono e ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial) — Instituto Politécnico de Leiria, Lisboa, 2019.

MESQUITA, P. H. X. de; SILVA, F. R. da; CODES, R. N. de; VILAR, Z. T. Influência do tratamento alcalino nas propriedades da fibra de sisal e nos seus compósitos de matriz epóxi avaliada pela técnica da correlação digital de imagens. **Engenharia no Século XXI – Volume 7**, 2019. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:203936002>>.

MORAMPUDI, P.; NAMALA, K. K.; GAJJELA, Y. K.; BARATH, M.; PRUDHVI, G. Review on glass fiber reinforced polymer composites. **Mater. Today**, Elsevier BV, v. 43, p. 314–319, 2021.

MOURA, M. F. de S. F. de. **Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico**. 2. ed. [S.l.]: Publindústria, 2010.

MYLO, M. D.; POPPINGA, S. Digital image correlation techniques for motion analysis and biomechanical characterization of plants. **Front. Plant Sci.**, v. 14, p. 1335445, 2023.

NARESH, K.; SHANKAR, K.; VELMURUGAN, R. Experimental and theoretical investigation of a unidirectional glass/epoxy composites under tensile and impact loading. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 11, Part 3, p. 25174–25184, 2018. ISSN 2214-7853. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785318326233>>.

NETO, J. L. B.; CUNHA, R. A. D. da; TARGINO, T. G.; CUNHA, R. D. da; JUNIOR, W. F. de A.; JÚNIOR, R. C. S. F. Study of the mechanical behavior of low-velocity impact loading in the presence of stress concentrators. **J. Mater. Eng. Perform.**, Springer Science and Business Media LLC, v. 32, n. 23, p. 10783–10792, dez. 2023.

NORTON, R. **Machine design**. 6. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2020.

NUGROHO, A.; RUSITA, L.; NURANTO, A. R.; ARITONANG, R. S.; HIDAYAH, V. N. Evaluation of tensile properties of composite lylcal/epoxy polymer laminates reinforced with E-glass fiber $\pm 45^\circ$ woven fabrics. **AIP Conference Proceedings**, v. 2226, n. 1, p. 040006, 04 2020. ISSN 0094-243X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/5.0004659>>.

PAEPEGEM, W. V.; BAERE, I. D.; DEGRIECK, J. Modelling the nonlinear shear stress–strain response of glass fibre-reinforced composites. part i: Experimental results. **Compos. Sci. Technol.**, Elsevier BV, v. 66, n. 10, p. 1455–1464, ago. 2006.

PILKEY, W. D.; PILKEY, D. F.; BI, Z. **Peterson's stress concentration factors**. 4. ed. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2020.

QURESHI, J. A review of fibre reinforced polymer structures. **Fibers**, v. 10, n. 3, 2022. ISSN 2079-6439. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-6439/10/3/27>>.

REDDY, J. N. **Mechanics of laminated composite plates and shells**. 2. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2003.

SAADA, K.; AMROUNE, S.; ZAOUI, M.; HOUARI, A.; MADANI, K.; HACHAICHI, A. Experimental and numerical study of the effect of the presence of a geometric discontinuity of variable shape on the tensile strength of an epoxy polymer. **Acta Mechanica et Automatica**, v. 17, n. 2, p. 192–199, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.2478/ama-2023-0022>>.

SAMLAL, S.; CHANDRU, D.; KUMAAR, K. S. N.; GANESH, G. Study of tensile strength of glass epoxy laminates with varied open hole diameter. **Int. J. Veh. Struct. Syst.**, MAFTREE, v. 14, n. 1, jan. 2022.

SANTOS, A. H. A.; PITANGUEIRA, R. L. S.; RIBEIRO, G. O.; CALDAS, R. B. Study of size effect using digital image correlation. *FapUNIFESP (SciELO)*, v. 8, n. 3, p. 323–340, jun. 2015.

SHACKELFORD, J. F. **Introduction to materials science for engineers, global edition**. 9. ed. London, England: Pearson Education, 2022.

SHARMA, H.; KUMAR, A.; RANA, S.; SAHOO, N. G.; JAMIL, M.; KUMAR, R.; SHARMA, S.; LI, C.; KUMAR, A.; ELDIN, S. M.; ABBAS, M. Critical review on advancements on the fiber-reinforced composites: Role of fiber/matrix modification on the performance of the fibrous composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 26, p. 2975–3002, 2023. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785423018483>>.

SIMÊNCIO, E. C. A. **Ciência dos materiais**. [S.l.]: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2016.

SKARŻYŃSKI, Ł.; SYROKA, E.; TEJCHMAN, J. Measurements and calculations of the width of the fracture process zones on the surface of notched concrete beams. **Strain**, Wiley, v. 47, p. e319–e332, jun. 2011.

SRITHARAN, R.; ASKARI, D. A design of experiment study to investigate the effects of hardener concentration, stirring time, and air bubbles on the tensile strength of epoxy resin. **Journal of Elastomers & Plastics**, v. 54, n. 7, p. 1129–1147, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/00952443221131197>>.

TAHERI-BEHROOZ, F.; ESMKHANI, M.; YAGHOUBI-CHATROODI, A. Effect of testing procedure on the in-plane shear properties of cnf/glass/epoxy composites. **Polymers and Polymer Composites**, v. 28, n. 3, p. 159–169, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0967391119867200>>.

TARGINO, T. G.; TINÔ, S. R. L.; AQUINO, E. M. F. de. Anisotropy, hole, and hybridization influences in polyester polymer composites reinforced by glass and glass/kevlar. **Polymer Composites**, v. 40, n. 12, p. 4669–4681, 2019. Disponível em: <<https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pc.25335>>.

THOMASON, J. Glass fibre sizing: A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 127, p. 105619, 2019. ISSN 1359-835X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X19303689>>.

TINÔ, S. R.; AQUINO, E. M. de. Polymer composites: Effects of environmental aging and geometric discontinuity in the isotropic and anisotropic behaviors. **Journal of Composite Materials**, v. 50, n. 13, p. 1771–1786, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0021998315596454>>.

TURAKA, S.; CHINTALAPUDI, R.; Kannaiyan Geetha, N.; PAPPULA, B.; MAKGATO, S. Experimental and numerical analysis of the microstructure and mechanical properties of unidirectional glass fiber reinforced epoxy composites. **Composite Structures**, v. 331, p. 117887, 2024. ISSN 0263-8223. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822324000151>>.

TURAKA, S.; REDDY, K. Effect of fiber orientation on the mechanical behavior of e-glass fibre reinforced epoxy composite materials. **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development**, v. 8, p. 379–396, 08 2018.

UGURAL, A. C. **Mechanical engineering design (SI edition)**. 3. ed. London, England: CRC Press, 2022.

VASCONCELOS, T. B. **Efeitos da Anisotropia e das Descontinuidades em Laminados Compósitos**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/26547/1/Efeitosanisotropiadescontinuidades_Vasconcelos_2018.pdf>.

WEI, L.; ZHU, W.; YU, Z.; LIU, J.; WEI, X. A new three-dimensional progressive damage model for fiber-reinforced polymer laminates and its applications to large open-hole panels. **Composites Science and Technology**, v. 182, p. 107757, 2019. ISSN 0266-3538. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353818329713>>.

WEIDNER, A.; BIERMANN, H. Review on strain localization phenomena studied by high-resolution digital image correlation. **Adv. Eng. Mater.**, Wiley, v. 23, n. 4, p. 2001409, abr. 2021.

WRIGHT, W.; ASKELAND, D. **The science and engineering of materials, enhanced edition**. 7. ed. USA: Cengage Learning, 2021.

YE, L.; AFAGHI-KHATIBI, A.; LAWCOCK, G.; MAI, Y.-W. Effect of fibre/matrix adhesion on residual strength of notched composite laminates. **Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.**, Elsevier BV, v. 29, n. 12, p. 1525–1533, dez. 1998.

YI, X.-S.; DU, S.; ZHANG, L. (Ed.). **Composite materials engineering, volume 1**. 1. ed. Singapore, Singapore: Springer, 2017.