

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS
DE MATRIZ POLIMÉRICA COM FIBRA DE VIDRO CONTENDO
DESCONTINUIDADES GEOMÉTRICAS**

JOSÉ LIRA BRAGA NETO

**Campina Grande – PB
2015**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA COM FIBRA DE VIDRO CONTENDO DESCONTINUIDADES GEOMÉTRICAS

JOSÉ LIRA BRAGA NETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA
Área de concentração Análise e Projeto de Sistemas Termomecânicos.

Orientador: **PROF. DR. WANDERLEY FERREIRA DE AMORIM JÚNIOR**
Orientador: **PROF. DR. MARCO ANTONIO DOS SANTOS**

Campina Grande – PB
2015

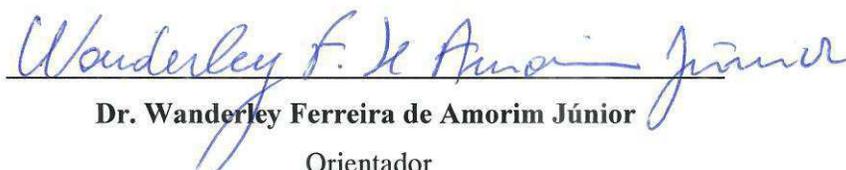
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- B813e Braga Neto, José Lira.
Estudo do comportamento mecânico de compósitos de matriz polimérica com fibra de vidro contendo descontinuidades geométricas / José Lira Braga Neto. – Campina Grande, 2015.
96 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2015.
"Orientação: Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior, Prof. Dr. Marco Antonio dos Santos".
Referências.
1. Materiais Compósitos. 2. Comportamento Mecânico. 3. Concentradores de Tensão. 4. Furo Central. 5. Mecânica da Fratura. I. Amorim Júnior, Wanderley Ferreira de. II. Santos, Marco Antonio dos. III. Título.
- CDU 621.01(043)

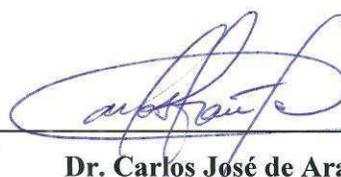
“ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA COM FIBRA DE VIDRO CONTENDO DESCONTINUIDADES GEOMÉTRICAS”.

JOSÉ LIRA BRAGA NETO

Dissertação Aprovada em 30/04/2015 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes membros:


Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior
Orientador
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG


Dr. Marco Antonio dos Santos
Orientador
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG


Dr. Carlos José de Araújo
Examinador Interno
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG


Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire Júnior
Examinador Externo
PPGEM/UFRN

“Aquele que tiver fé, disse Jesus: Fará as obras que eu faço e fará obras maiores que estas”.

(Jô14,12-17).

DEDICATÓRIA

Dedico a meus Pais, minha Esposa, a minha Filha e a todos que me ajudaram direta ou indiretamente, que estiveram ao meu lado em todos os momentos tanto os bons quanto os difíceis e me fizeram acreditar que eu era capaz de superar as dificuldades e chegar ao meu objetivo.

AGRADECIMENTO

Agradeço a DEUS que me iluminou durante todo o meu caminho acadêmico, dando-me fé, esperança, harmonia e força de vontade para que nunca desistisse.

Agradeço aos meus pais Francisco de Assis Bandeira (Tiquinho) e Cecília Maria Braga Bandeira que estiveram sempre presentes em todas as etapas com muita compreensão e paciência.

Agradeço a minha esposa Geovanna Cantalice Braga e a minha filha Fernanda Cantalice Braga que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos de minha vida.

Agradeço aos meus orientadores Wanderley Ferreira De Amorim Júnior e Marco Antônio dos Santos, pela dedicação e incentivo a este estudo e por me proporcionar novos conhecimentos e experiências no meio acadêmico.

Agradeço aos participantes da banca, por aceitarem o convite de fazer parte da avaliação do meu estudo.

Agradeço aos professores e funcionários do Departamento e dos Laboratórios de Engenharia Mecânica, a todos os outros que me incentivaram e apoiaram nesta caminhada.

A CAPES pela concessão da bolsa de pesquisa durante todo o período de mestrado.

Agradeço à Empresa EquiFiber Equipamentos de Fibra LTDA., por ter fabricado as placas compósitas usadas nos ensaios.

Agradeço a meus amigos e amigas que me ajudaram na construção deste trabalho e me proporcionaram momentos de alegria, compreensão e paz para que eu tivesse um desempenho mais eficaz.

Agradeço aquelas pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o término desta pesquisa.

RESUMO

Com o avanço tecnológico as propriedades exigidas aos materiais. Os materiais compósitos, que têm uma ampla aplicação nos mais variados setores. Por outro lado, o desempenho dos compósitos é fortemente dependentes da interface matriz-fibra e conseqüentemente da distribuição e orientação das fibras. A Mecânica da Fratura é o campo da Mecânica que utiliza métodos analíticos e experimentais para descrever o comportamento de sólidos e estruturas com descontinuidades geométricas frente a solicitações mecânicas. Este trabalho tem por objetivo de analisar e avaliar as propriedades mecânicas em compósitos de fibra de vidro e resina poliéster com descontinuidades geométricas (furo central e com variação da distância entre os furos). A caracterização desses materiais foi realizada através de ensaios de tração uniaxial e tenacidade à fratura. Dessa forma, foram observados os valores da tensão máxima de ruptura para os laminados sem furo, com furo central e furos com variação do espaçamento entre os furos, bem como a característica final da fratura. Para a avaliação da possível influência da presença dos furos centrais e a variação da distância entre os furos, a resistência mecânica foi determinada para cada caso. Verificou-se também que o fator de concentração de tensão, como era de se esperar, variou com a distância entre os furos nos compósitos estudados. Os resultados obtidos comprovam que a presença da descontinuidade geométrica tem efeito danoso nas propriedades mecânicas do material, principalmente quando aumentou o diâmetro do furo central de 6 mm para 12 mm de diâmetro. Quanto ao comportamento à fratura dos compósitos estudados, verificou-se uma fratura final do tipo LGM (Lateral e no Meio do Galgo) para os furos centrais de 6 e 12 mm e com a variação da distância entre os furos de 12 e 48 mm de distância, já para a variação da distância entre os furos de 6,2 mm de distância foi AGM (Angular e no Meio do Galgo). No ensaio de tenacidade à fratura as condições exigidas não foram satisfeitas, portanto os fatores de intensidade de tensão K_Q (críticos) determinados não podem ser considerados valores de K_{IC} . Portanto, são dependentes da geometria dos corpos de prova usados.

Palavras – Chaves: Materiais Compósitos, Comportamento Mecânico, Concentradores de Tensão, Furo Central, Mecânica da Fratura.

ABSTRACT

With technological advancement the properties required of conventional materials have changed leading to the appearance of materials capable of meeting the desired requirements of new technologies. One is composite materials, which have a wide application in various sectors. On the other hand, the performance of the composite is strongly dependent on the matrix-fiber interface and hence the distribution and orientation of fibers. The Fracture Mechanics is the field of mechanics that uses analytical and experimental methods to describe the behavior of solids and structures with geometrical discontinuities in against mechanical stress. This field appears as a solid foundation for analyzing the behavior of the morphology of composites. This paper analyzes and evaluate the mechanical properties of composite of glass and polyester resin with geometrical discontinuities in (center hole and change of distance between the holes). The characterization was carried out by uniaxial tensile tests and fracture toughness. Thus they observed values of maximum stress at break for the laminates without holes, with a central hole and holes with varying spacing between the holes and the final characteristic of the fracture. To evaluate the possible influence of the presence of the central holes and the variation of the distance between the holes, the mechanical strength was determined for each case. There was also the factor of stress concentration, as was to be expected, it varies with the distance between the holes in the studied composites. The results obtained show that the presence of geometric discontinuity has harmful effect on the mechanical properties of the material, especially when the increased diameter of the central hole of 6 mm to 12 mm in diameter. The behavior to fracture of the studied composites, presented the final fracture of the LGM type (Side and Middle Greyhound) for central holes 6 and 12 mm and with the change of distance between holes 12 and 48 mm away, as for the change of distance between the holes of 6.2 mm away was AGM (Angle and Half Greyhound). The fracture toughness of the bulk composite, for two different thicknesses of plates (8 and 10 mm nominal values), was not satisfactory service for predicting the fracture of composites containing the concentrators strain studied.

Key - Words: Composite Materials, Mechanical Behavior, Stress concentrators, Central Hole, Fracture Mechanics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista da aeronave EMB-170, mostrando os componentes fabricados em compósitos poliméricos.	6
Figura 2 – Suspensão de um Fórmula 1 feita com fibra de carbono.	7
Figura 3 – Materiais esportivos feitos de compósitos.	7
Figura 4 – Classificação geral dos materiais compósitos.	8
Figura 5 – Esquema das formas mais comuns de reforços.	9
Figura 6 – Formas comerciais de fibra de vidro.	17
Figura 7 – Representação do processo de Manual (Hand Lay-up).	18
Figura 8 – Representação do processo de Spray (Spray-up).	19
Figura 9 – Representação do processo por filamentos (Filament Winding).	19
Figura 10 – Representação do processo de pultrusão.	20
Figura 11 – Os três modos de falha característicos para os materiais compósitos.	23
Figura 12 – Tipos de carregamentos clássicos para compósitos.	24
Figura 13 – Distribuição de tensão na vizinhança de um furo.	28
Figura 14 – Fatores de concentração de tensões e K_{tg} K_{tn} para a tensão de um elemento fino de largura finita com um furo circular.	29
Figura 15 – Dois furos circulares de diâmetro igual, alinhados ao longo σ	30
Figura 16 – Ilustrações dos modos de falha para laminados compósitos carregados sob tração sem descontinuidade geométrica.	34
Figura 17 – Ilustrações dos modos de falha para laminados compósitos carregados sob tração com descontinuidade geométrica.	34
Figura 18 – Delaminação: a) à entrada (peel-up); b) à saída (push-out).	36
Figura 19 – Placa de compósitos para os estudos. (a) Placa de 300x300 mm com 8 e 10 camadas, (b) corte de 50 mm da borda da placa.	38
Figura 20 – Corpos-de-prova sem furo.	39
Figura 21 – Dimensões dos corpos-de-prova com furo central, (a) furo de 6 mm, (b) furo de 12 mm.	39
Figura 22 – Corpos de prova com variação do espaçamento entre os furos. (a) 6,2mm de distância entre raios, (b) 12mm de distância entre raios, (c) 48mm de distância entre raios. ...	40

Figura 23 – Danos no mecanismo de furação.....	42
Figura 24 – Brocas helicoidais de aço rápido. (a) broca de 2 mm de diâmetro, (b) broca de 6 mm de diâmetro.	43
Figura 25 – Gabarito das distâncias entre os furos.	43
Figura 26 – Corpo-de-prova para teste de flexão em três pontos para a avaliação da tenacidade à fratura.....	46
Figura 27 – Gráfico 1 das frações volumétricas dos compósitos.	49
Figura 28 – Curvas de tensão x deformação para os corpos de prova sem furo e com furo central.	51
Figura 29 – Curvas tensão x deformação para os corpos de prova sem furo e com dois furos com variação da distância entre os furos.	53
Figura 30 – Curvas tensão x deformação para os corpos de prova com furo central e com dois furos com a variação da distância entre os furos	54
Figura 31 – Curva tensão x deformação para os corpos de prova sem furo e com furo central.	57
Figura 32 – Curvas tensão x deformação para os corpos de prova sem furo e com dois furos com variação da distância entre os furos.	58
Figura 33 – Curva tensão x deformação para os corpos de prova com furo central e com dois furos com variação da distância entre os furos.	59
Figura 34 – Característica final da fratura em compósitos sem furo.....	61
Figura 35 – Característica final da fratura em compósitos com furo central de 6 mm.	61
Figura 36 – Característica final da fratura em compósitos com furo central 12mm.	62
Figura 37 – Característica final da fratura em compósitos com variação da distância de 12mm entre os furos.	62
Figura 38 – Característica final da fratura em compósitos com variação da distância de 48 mm entre os furos.	63
Figura 39 – Característica final da fratura em compósitos com variação da distância de 6,2mm entre os furos	63
Figura 40 – Curvas de carga x deslocamento do ponto da aplicação da carga" do teste de flexão em três pontos para determinação do K_{IC}	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades típicas da resina poliéster.....	13
Tabela 2 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro, carbono e aramida.....	14
Tabela 3 – Composição de fibras de vidro E, C e S.....	15
Tabela 4 – Propriedades mecânicas dos tipos de fibras de vidro E e S.....	16
Tabela 5 – Codificação dos modos de falha aceitáveis para o ensaio de tração uniaxial.....	33
Tabela 6 – Quantidade de corpos de prova.....	47
Tabela 7 – Densidade e fração volumétrica.....	48
Tabela 8 – Análise do fator de concentração.....	49
Tabela 9 – Valores médios e desvios padrões para as tensões de fratura e deformação de fratura, a partir das curvas de tensão x deformação para os corpos de prova sem furo e com furo.	51
Tabela 10 – Valores médios e desvios padrões para as tensões de fratura e deformação de fratura, a partir das curvas de tensão x deformação para os corpos de prova sem furo e com dois furos com a variação da distância entre os furos.	52
Tabela 11 – Valores médios e desvios padrões para as tensões de fratura e deformação de fratura, a partir das curvas de tensão x deformação para os corpos de prova com furo central e com dois furos com variação da distância entre os furos.	54
Tabela 12 – Valores médios e desvios padrões para as tensões de fratura e deformação de fratura, a partir das curvas de tensão x deformação para os corpos de prova sem furo e com furo central.....	56
Tabela 13 – Valores médios e desvios padrões para as tensões de fratura e deformação de fratura, a partir das curvas de tensão x deformação para os corpos de prova sem furo e com dois furos com variação da distância entre os furos.	58
Tabela 14 – Valores médios e desvios padrões para as tensões de fratura e deformação de fratura, a partir das curvas de tensão x deformação para os corpos de prova com furo central e com dois furos com variação da distância entre os furos.	60
Tabela 15 – Análise da Resistência Residual realizado nos corpos de prova de compósitos com furo central e com dois furos com variação da distância entre os furos, com 8 camadas e espessura de 8,6 mm.....	64

Tabela 16 – Análise da Resistência Residual realizado nos corpos de prova de compósitos com furo central e com dois furos com variação da distância entre os furos, com 10 camadas e espessura de 10,7 mm.....	64
Tabela 17 – Valores médios para P_{max} e P_q	65
Tabela 18 – Valores que sob teste para o ensaio de tenacidade à fratura. (K_{IC}).....	67
Tabela 19 – Valores para o K_I de fratura das placas estudadas com furo central.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGM	Angular e no Meio do Galgo
ASTM	American Society for Testing and Materials
DGM	Delaminação na Borda e no Meio do Galgo
GAT	No Topo e Dentro da Lingueta
LAT	No Topo e Dentro da Lingueta, mas Lateral
LGM	Lateral e no Meio do Galgo
LIT	Lateral no Topo e Dentro da Lingueta
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
MGM	Falha por Tração no Furo com Múltiplos Modos de Falha
PMC	“Polymer Matrix Composites” (Compósitos de Matriz Polimérica)
SENB	Single Edge Notch Bend (Corpo de Prova de Flexão em Três Pontos)
SGM	No Meio do Galgo com Fendas Longitudinais
UAEM	Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica
XGM	Explosiva e no Meio do Galgo

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
a	Comprimento de trinca
a	Raio do furo circular
B	Espessura do corpo de prova para ensaio de tenacidade à fratura
cm	Centímetro
d	Diâmetro do furo
g	Gramma
g/cm ³	Gramma por centímetro cúbico
g/m ²	Gramma por metro quadrado
GPa	Giga Pascal
K	Fator de concentração de tensão
Kg	Quilograma
K _{IC}	Tenacidade à fratura sob deformação plana
KN	Quilo Newton
K _t	Fator de concentração de tensão teórico
K _{tg}	Fator de concentração de tensão para uma placa semi-finita
K _{tn}	Fator de concentração de tensão para uma placa finita
m	Metro
m _c	Massa total do laminado
M _f	Percentual mássico de fibra
m _f	Massa de fibra
mm	Milímetro
M _m	Percentual mássico de resina (matriz)
P _{máx}	Carga máxima atingida durante ensaios mecânicos de tração e tenacidade
RS	Resistência residual (do inglês, Residual Strength)
t	Espessura
V _f	Percentual volumétrico de fibra
V _m	Percentuais volumétricos de resina (matriz)
V _v	Percentuais volumétricos de vazios
W	Largura do corpo de prova
Y	Fator de forma

μm	Micrômetro
ρ	Densidade volumétrica do compósito
ρ_f	Densidade volumétrica da fibra
ρ_m	Densidade volumétrica da matriz
σ	Tensão aplicada
σ_0	Tensão média ou nominal
σ_{CD}	Resistência última do material com a descontinuidade geométrica
$\sigma_{\text{máx}}$	Tensão máxima (na borda do furo).
σ_{SD}	Resistência última do material sem a descontinuidade geométrica.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo Geral.....	3
1.2	Objetivos Específicos	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Materiais Compósitos	4
2.1.1	Materiais compósitos e suas aplicações	5
2.1.2	Classificação dos materiais compósitos	8
2.2	Matriz Polimérica	10
2.3	Fibras de Reforço para Compósitos.....	13
2.4	Processo de Fabricação dos Compósitos	17
2.5	Propriedades Mecânicas dos Compósitos.....	21
2.6	Tenacidade à Fratura de Compósitos.....	25
2.7	Fator de Concentradores de Tensão.....	27
2.8	Mecanismo de Danos em Compósitos.....	32
3	MATÉRIAS E MÉTODOS.....	37
3.1	Materiais	37
3.2	Metodologia.....	37
3.2.1	Confecção das placas.....	37
3.2.2	Corte das placas e confecção dos corpos de prova.....	38
3.2.3	Estratégias para a otimização dos furos nos corpos de prova.....	42
3.2.4	Fração volumétrica	44
3.2.5	Ensaio de tração uniaxial.....	45
3.2.6	Análise macroscópica do dano	45
3.2.7	Tenacidade à fratura	45
3.2.8	Visão geral da quantidade de corpos de prova	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	Fração Volumétrica de Fibra dos Laminados	48
4.2	Fator de Concentração (K_t).....	49
4.3	Análise dos Resultados de Ensaio de Tração Realizado nas Placas de Compósitos ..	50

4.3.1	Caso 1 A – Análise dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova de compósitos sem furo e com furo central (6 ou 12 mm de diâmetro) de 8 camadas e espessura de 8,6 mm	50
4.3.2	Caso 2 A – Análise dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova de compósitos sem furo e com dois furos (6 mm de diâmetro) com a variação da distância entre os furos com 8 camadas e espessura de 8,6mm.	52
4.3.3	Caso 3 A – Análise dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova de compósitos com furo central (6 mm de diâmetro) e com dois furos(6 mm de diâmetro) com a variação da distância entre os furos, com 8 camadas e espessura de 8,6 mm.	54
4.3.4	Caso 1 B Análise dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova de compósitos sem furo e com furo central (6 ou 12 mm de diâmetro) com 10 camadas e espessura de 10,7 mm.....	56
4.3.5	Caso 2 B – Análise dos ensaios de tração realizados nos corpos de provas de compósitos com 10 camadas e espessura de 10.7 mm sem furo e com dois furos (6 mm de diâmetro) com variação da distância entre os furos.	57
4.3.6	Caso 3 B – Análise dos ensaios de tração realizados nos corpos de provas de compósitos com 10 camadas e espessura de 10,7 mm com furo central (6mm de diâmetro) e com dois furos(6 mm de diâmetro) com variação da distância entre os furos.....	59
4.4	Estudo Macroscópico da Fratura	60
4.5	Resistência Residual	64
4.6	Ensaio de Tenacidade à fratura	65
5	CONCLUSÕES.....	69
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1 INTRODUÇÃO

A existência dos materiais compósitos naturais não são novos e têm sua origem na própria natureza. Partem de uma ideia simples e antiga de colocar em serviço dois ou mais materiais macros constituintes, diferindo em composição química e/ou em formato e que sejam essencialmente insolúveis entre si, com o objetivo de obter propriedades específicas, diferentes daquelas que cada constituinte apresenta separadamente.

A utilização de compósitos vem crescendo de maneira acentuada nas últimas décadas, principalmente de compósitos à base de matriz polimérica. Um dos principais fatores da escolha desse tipo de material é devido à combinação de baixa massa específica com excelentes propriedades mecânicas, além de proporcionar flexibilidade na produção de peças complexas com propriedades locais específicas (COSTA, 1998; BOTELHO E REZENDE, 2002).

Estes materiais estão representados em diferentes áreas de exigência e com visibilidade tecnológica, áreas da aeronáutica, espacial, militar, indústria automotiva, artigos desportivos e pretende substituir os materiais tradicionais de engenharia civil.

Por se tratarem de materiais relativamente novos na engenharia, o comportamento mecânico dos compósitos ainda não é tão difundido, quando comparado com o aço por exemplo. Portanto, torna-se fundamental o estudo de suas propriedades mecânicas, visando garantir de forma segura e eficiente à utilização do material em todos os campos tecnológicos da engenharia e indústria.

As propriedades mecânicas dos compósitos dependem de vários fatores, tais como, tipos de reforço e matriz, o percentual de seus constituintes, distribuição e orientação das fibras (MENDONÇA, 2005). Muitos elementos estruturais requerem descontinuidades geométricas como, furos, ranhuras e entalhes de diversos tipos, possibilitando conexões entre peças. Essas descontinuidades geram sérios problemas com relação à distribuição das tensões internas nos elementos estruturais, conhecido como concentração de tensão (AQUINO e TINÔ, 2009).

O efeito da concentração de tensões em compósitos de um modo geral é bem mais complexo em relação aos materiais convencionais (WU, 1968), pois durante os anos alguns modelos experimentais e teóricos vêm buscando essa compreensão.

Neste trabalho será estudada a influência das descontinuidades geométricas caracterizadas por furo central e furos com variação de espaçamentos. Para a avaliação do

fenômeno da “concentração de tensão”. As configurações desenvolvidas se resumem em dois laminados compósitos envolvendo 8 camadas e 10 camadas de manta de fibra de vidro do tipo E, onde foram confeccionadas pela Empresa EquiFiber Equipamentos de Fibra LTDA, pelo processo de modelagem manual (hand lay-up).

As propriedades mecânicas estudadas, tais como resistência última à tração, e deformação de ruptura, foram determinadas a partir da realização do ensaio estático de tração uniaxial nos laminados compósitos nas condições acima especificadas.

A descontinuidade na seção transversal é caracterizada por um furo central de 6 e 12 mm de diâmetros e por dois furos de 6 mm de diâmetro aplicou-se uma variação de espaçamentos entre os furos de 6,2, 12 e 48 mm.

O estudo da concentração de tensão foi analisado pela Resistência Residual (RS), parâmetro mais utilizado em análises de descontinuidade geométrica em compósitos.

As características finais da fratura em níveis, macroscópico, foram realizadas para todas as condições em estudo.

Nesse estudo foram realizadas também testes de análise de tenacidade à fratura, onde verificou-se que o valor crítico de fratura independe do diâmetro da descontinuidade geométrica.

1.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar as propriedades mecânicas de compósitos de fibra de vidro e resina poliéster com descontinuidades geométricas (furo central e furos com variação de espaçamento).

1.2 *Objetivos Específicos*

Como objetivos específicos deste projeto de pesquisa, são:

- ✓ Estudo da resistência e característica final da fratura de compósitos de matriz polimérica reforçados com manta de fibra de vidro-E, submetidos a carregamento de tração uniaxial com descontinuidade geométrica (furo central e furos com variação de espaçamento);
- ✓ Análise da característica final da fratura, em nível macroscópico, para todas as condições estudadas;
- ✓ Estudo do fator de concentração de tensão;
- ✓ Estudo da tenacidade à fratura dos compósitos estudados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado uma revisão teórica necessária para o trabalho proposto. Inicialmente serão apresentados os fundamentos sobre materiais compósitos sua classificação bem como o comportamento mecânico dos compósitos.

2.1 *Materiais Compósitos*

A área de materiais compósitos tem mostrado um desenvolvimento contínuo, motivado pela sua crescente aplicação em setores que exigem produtos com elevados valores de resistência e rigidez específica e baixa massa específica.

Segundo Calister (2007), compósitos são materiais multifásicos produzidos artificialmente que possuem uma combinação desejável das melhores propriedades de suas fases constituintes, sendo uma fase chamada de matriz, que é contínua e envolve a outra fase, chamada de fase dispersa ou de reforço.

Já a norma ASTM D 3878 – 07 define que, compósito é um componente constituído de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, os quais são combinados para formar um material de engenharia com propriedades que estão entre as de seus constituintes.

Os compósitos consistem numa mistura de um material de reforço ou de enchimento (ou fibras), devidamente selecionado, com outro material compatível que serve de ligante (ou matriz), com o propósito de obter, características e propriedades pré-determinadas.

Desta forma muitas variáveis precisam ser consideradas ao se projetar um compósito: o tipo de matriz (metálica, cerâmica e polimérica), o tipo de reforço (fibras ou partículas), suas proporções relativas, a geometria do reforço, método de cura e a natureza da interface. Cada uma destas variáveis deve ser cuidadosamente controlada a fim de produzir-se um material estrutural otimizado para as circunstâncias nas quais será usado (GIBSON, 1994).

O reforço, fase descontínua do compósito, tem a função de dar resistência ao conjunto, sustentando as cargas recebidas que são distribuídas pela matriz. Os principais reforços são as fibras, os enchimentos, os whiskers e os flocos, sendo que as de maior interesse são as fibras devido à facilidade de receber a carga transferida pela matriz.

A matriz, fase contínua do compósito, tem a função de sustentar o reforço, protegê-lo da abrasão e distribuir a carga recebida pelo material. Há vários tipos de matrizes, destacando-se as matrizes poliméricas, metálicas, cerâmicas e vítreas e matrizes de carbono ou grafite. As matrizes poliméricas são divididas em dois grupos: os polímeros termorrígidos e os polímeros termoplásticos.

Apesar da dificuldade em se definir um material compósito, muitos estudos têm sido feitos para desenvolver novos materiais compósitos que possam substituir as ligas metálicas, cerâmicas e poliméricas, com o objetivo de atender em exigências tecnológicas modernas e por apresentar em um excelente desempenho estrutural, com altos índices de resistência e rigidez por unidade de peso; elevado amortecimento estrutural; resistência a vários tipos de corrosão; boa tenacidade à fratura em muitos casos. (HULL E CLYNE, 1996).

Um exemplo prático é na área aeronáutica que vem cada vez mais substituindo seus materiais convencionais por compósitos, que quando comparados ao alumínio são bem mais leves e representam uma redução de cerca de 20 a 30% do peso da estrutura.

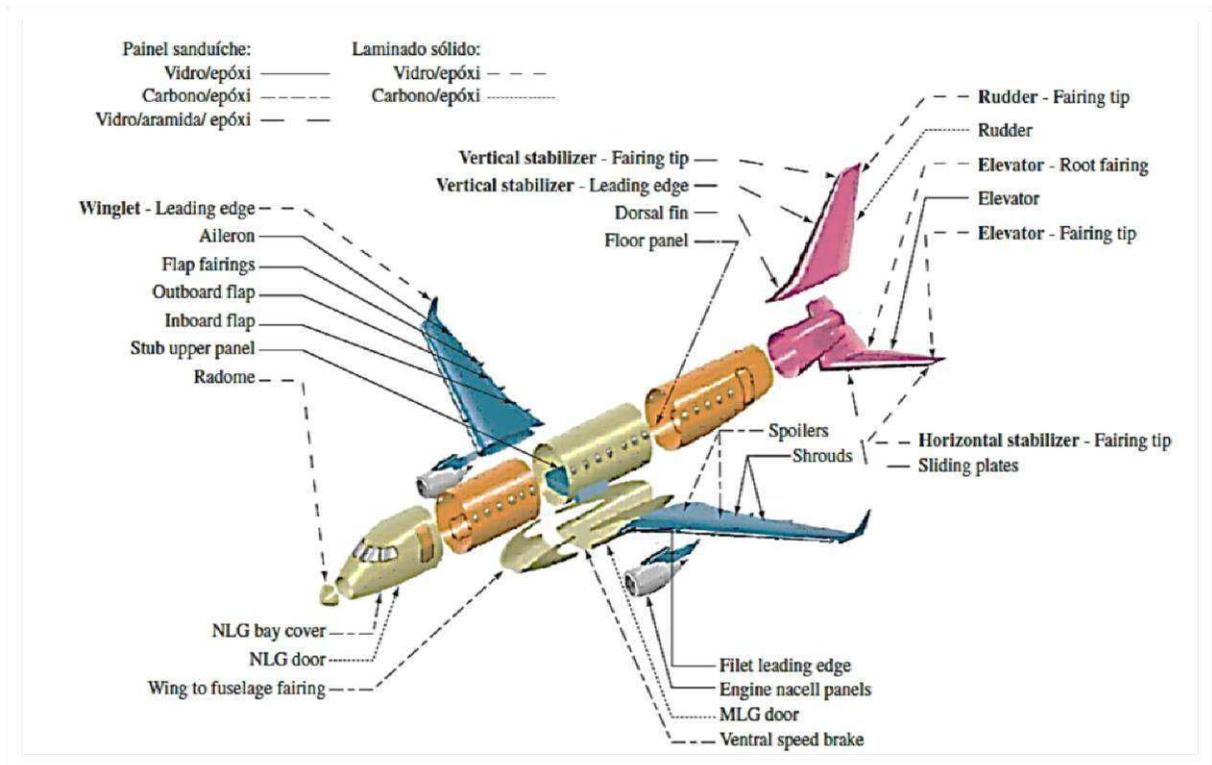
2.1.1 Materiais compósitos e suas aplicações

A aplicação dos materiais compósitos surgiu inicialmente na área aeronáutica devido principalmente, ao grande desafio que a indústria enfrentava no desenvolvimento de componentes que exibissem maiores valores de resistência mecânica e de rigidez específicas entre os materiais disponíveis.

Atualmente, os compósitos de fibras contínuas com matriz termofixas estão sendo utilizados na obtenção de diversos componentes na indústria aeronáutica, tais como: elementos internos; elementos externos; nas nervuras de asas; em trens de pouso, nos radomes (nariz do avião), flaps, bordos de ataque, sistema de freios de aeronaves supersônicas militares e civis, entre outras, Figura 1.

Na indústria aeronáutica os usos de compósitos termoplásticos são promissores para a confecção da fuselagem, permitindo uma redução de peso em torno de 25%, em relação às estruturas metálicas convencionais.

Figura 1 – Vista da aeronave EMB-170, mostrando os componentes fabricados em compósitos poliméricos.



Fonte: EMBRAER, apud REZENDE, 2007.

A utilização dos materiais compósitos dentro da indústria automobilística é bem mais recente do que na área aeronáutica. Inicialmente, eram produzidos somente para-choques e tetos de automóveis. Atualmente, os materiais compósitos são utilizados para a fabricação de capôs, carters de óleo, colunas de direção, árvores de transmissão, molas laminadas, painéis, etc.

Uma das grandes vantagens trazidas para o meio automobilístico pelos materiais compósitos, além da redução de peso, foi facilidade em confeccionar peças com superfícies complexas.

Uma atividade esportiva notória que emprega materiais compósitos é a Fórmula 1, que pode ser considerada como um laboratório para as inovações tecnológicas. Neste caso, o aumento da relação potência/peso é fundamental para um bom desempenho do carro nas pistas, Figura 2

Figura 2 – Suspensão de um Fórmula 1 feita com fibra de carbono.



Fonte: google.com

Em praticamente todas as atividades esportivas, a redução de peso está diretamente ligada à redução do tempo de execução de uma prova esportiva. Como exemplo disto, podemos citar: barcos a vela, skis, bicicletas, etc. Em alguns casos, o que se procura é a agilidade e a perfeição de alguns golpes, como no tênis, com suas raquetes; no golfe, com seus tacos; e no surf, com suas pranchas, Figura 3.

Figura 3 – Materiais esportivos feitos de compósitos.



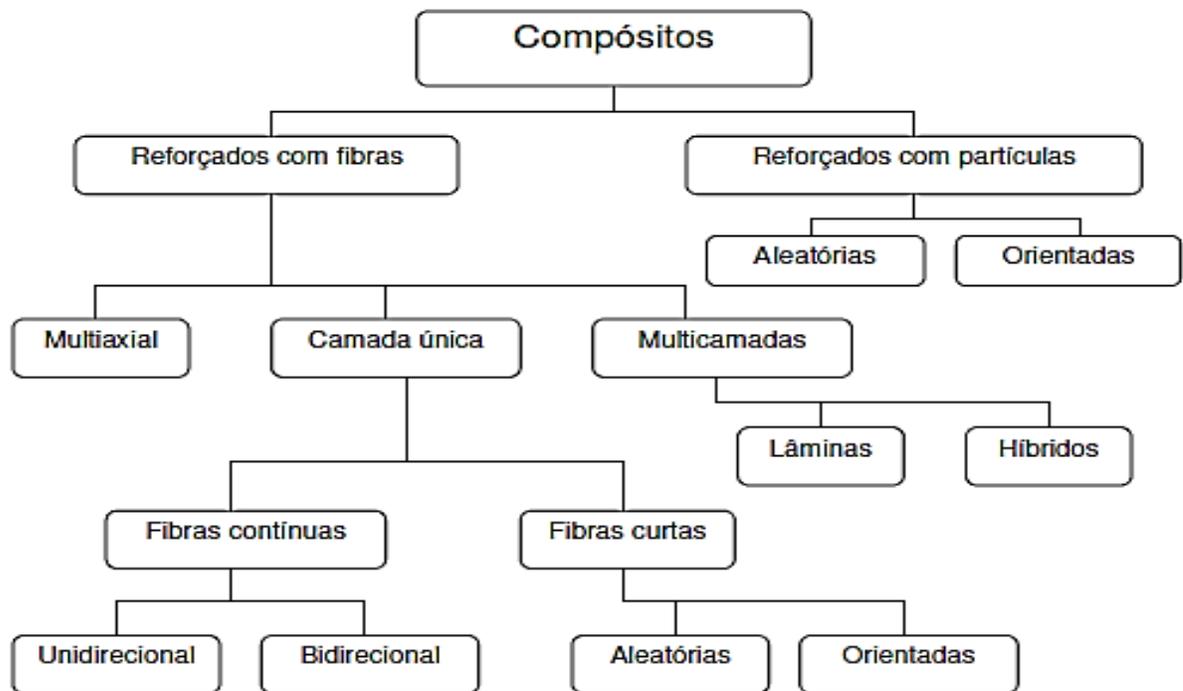
Fonte: google.com

2.1.2 Classificação dos materiais compósitos

Os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com sua natureza podendo ser naturais ou sintéticos, dentre os materiais compósitos sintéticos ainda existe uma subdivisão que os classifica em materiais macrocompósitos e microcompósitos. Os materiais macrocompósitos são aqueles nos quais as fases do material podem ser vistas a olho nu, enquanto que, os materiais microcompósitos são aqueles nos quais as fases do material só podem ser identificadas com o auxílio de microscópio.

Materiais compósitos são genericamente constituídos por dois tipos de fases; uma é chamada matriz, que é contínua e envolve a outra fase, chamada de fase dispersa. A matriz pode ser um polímero, um metal ou uma cerâmica que confere estrutura ao material compósito preenchendo os espaços vazios que ficam no reforço e mantendo-o na sua posição. Já a fase dispersa ou reforço existe em diversas formas sendo a classificação mais geral em três categorias: compósitos particulados, compósitos de fibras descontínuas e compósitos de fibras contínuas. A figura 4 apresenta o esquema da classificação dos compósitos. (VENTURA 2009).

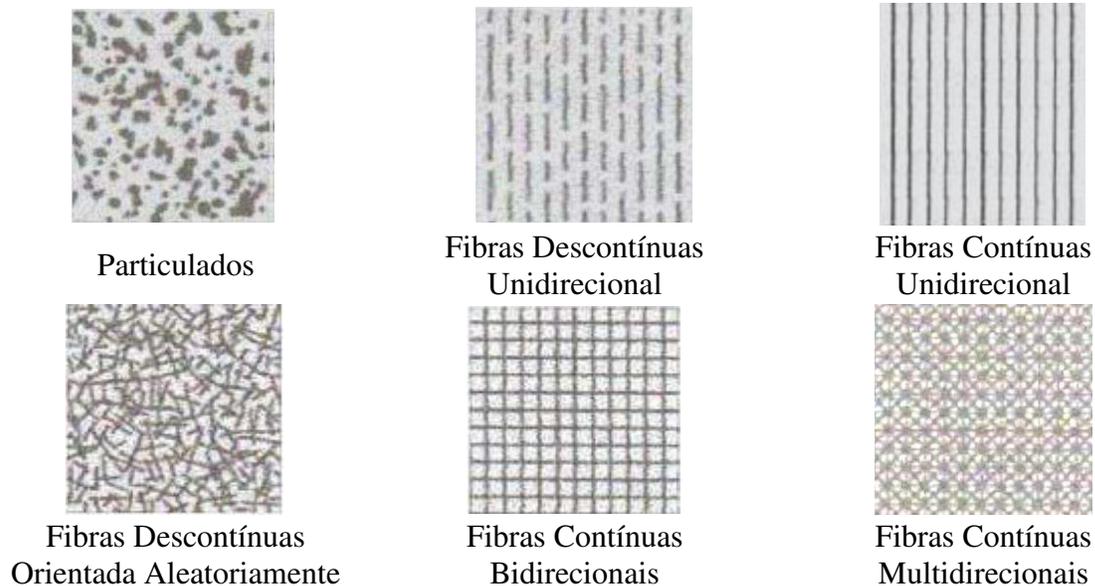
Figura 4 – Classificação geral dos materiais compósitos.



Fonte: VENTURA, 2009

Existem pelo menos duas configurações possíveis em relação à orientação das fibras: uma com fibras (geralmente contínuas) orientadas com relação ao sentido de aplicação da carga e outra com fibras (em geral descontínuas) com disposição totalmente aleatória. As fibras descontínuas podem estar orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas, conforme mostrado na figura 5.

Figura 5 – Esquema das formas mais comuns de reforços.



Fonte: DANIEL e ISHAI, 1994

Os compósitos com fibras contínuas e orientadas possuem melhores respostas mecânicas em relação às fibras descontínuas (curtas) com orientação aleatória, entretanto, em vários casos, a fibra curta com orientação aleatória possui uma maior aplicabilidade industrial devido a seu fácil manuseio quanto ao processo de fabricação. A orientação e comprimento da fibra para um determinado compósito dependem do nível e natureza da tensão aplicada, bem como dos custos de fabricação.

2.2 *Matriz Polimérica*

A matriz de um material compósito é um elemento estrutural preponderante para a sua estrutura e comportamento mecânico, sendo a sua escolha baseada nas propriedades mecânicas e adaptabilidade ao reforço de fibras adicionadas.

Os compósitos de matriz polimérica (PMC – *Polymer Matrix Composites*) consistem de uma resina polimérica como fase matriz e fibras como meio de reforço. Esses materiais são usados na mais ampla diversidade de aplicações dos compósitos, bem como nas maiores quantidades, em vista de suas propriedades à temperatura ambiente, de sua facilidade de fabricação e de seu custo.

A matriz exerce grande influência em suas propriedades, pois determina a resistência do compósito à maioria dos processos degradativos que causam, eventualmente, a falha da estrutura, incluindo os danos de impacto, a delaminação, a absorção de água, ataque químico, resistência à corrosão e resistência à oxidação. Além de exercer influência nas propriedades do compósito, a matriz contribui para uma maior ou menor facilidade de conformação na fabricação do material compósito e influencia no custo final do produto. (MALLICK, 2007).

As matrizes poliméricas são classificadas de acordo com os métodos de preparação da estrutura química e do comportamento mecânico. Quanto ao método de preparação da estrutura química, os polímeros podem ser classificados em etapas. As reações de polimerização podem gerar diferentes tipos de cadeias poliméricas, que são classificadas como: cadeia linear sem ramificações; cadeia linear com ramificações e cadeia com ligações cruzadas, tridimensionais ou reticuladas.

As variações estruturais implicam diretamente nas propriedades físico-químicas dos polímeros, principalmente no que se refere à solubilidade e fusão. Existe uma variedade de polímeros utilizados como matriz em compósitos. Estes podem ser termorrígidos (termofixos) ou termoplásticos, cada tipo possuindo propriedades que devem ser avaliadas. (VINCENZINE, 1995).

Polímeros termoplásticos não endurecem permanentemente e se tornam moles e deformáveis sob aquecimento, assumindo a forma do molde, podendo ser também reciclado. Em

nível molecular, à medida que a temperatura é elevada, as forças de ligação secundárias são reduzidas (devido ao aumento do movimento molecular), de modo tal que o movimento relativo de cadeias adjacentes são facilitadas quando uma tensão é aplicada. Os termoplásticos são relativamente moles e dúcteis e compõem-se da maioria dos polímeros lineares e aqueles que possuem algumas estruturas ramificadas com cadeias flexíveis (LEVY NETO E PARDINI, 2006).

As matrizes termoplásticas possuem como parâmetros de escolha na impregnação dos plásticos, a alta tenacidade, o baixo custo de processamento e temperatura de uso de até 225°C. Os tipos mais comuns são: o polipropileno, a poliamida (Nylon) e os policarbonatos.

As principais desvantagens do uso das resinas termoplásticas como fase continua nos compósitos, podem ser caracterizadas pela baixa resistência mecânica e baixo módulo elástico, limitando a sua aplicação estrutural (sempre com o uso de fibras curtas).

As principais características que essas resinas podem levar aos seus compósitos são: alta resistência a abrasão e ao ataque químico, elasticidade e tenacidade. A faixa de temperatura que pode afetar as propriedades pode variar de 150° a 170° C, dependendo do tipo de resina. Podem possuir também alta resistência à chama e ao impacto, baixa resistência ao ataque de solventes orgânicos, tornando-se frágeis e quebradiços (apresentando microfissuras), como no caso dos policarbonatos.

Os polímeros termorrígidos se tornam duros e rígidos sob aquecimento, sendo que esse fenômeno não se perde com o resfriamento. Uma vez que estejam curados, por meio de uma reação química, os polímeros termorrígidos não podem ser fundidos, pois se degradam e decompõem-se, tornando sua reciclagem impossível de ser feita (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

As matrizes termofixas podem ser escolhidas para o processo de impregnação em função dos muitos parâmetros, tais como: são mais baratas, mais leves e a maioria apresenta certa resistência à exposição ambiental. Os tipos mais comuns são: a resina epóxi, a resina poliéster insaturada e a resina fenólica.

As principais desvantagens dessas resinas são: apresentam comportamento quebradiço, impõe limites no uso pela temperatura, apresentam, em geral, sensibilidade a degradação ambiental devido a umidade e sensibilidade a radiação e oxigenação no espaço.

As temperaturas de uso podem variar de 180° C para epóxi a 300° C para a poliamida. A principal característica que essas resinas podem levar aos seus compósitos é a sua resposta ao calor, já que em geral são isotrópicas, não se dissolvendo ao aquecê-las.

As vantagens do uso deste material são as seguintes:

- ✓ Estabilidade térmica e dimensional;
- ✓ Rigidez;
- ✓ Resistência à fluência e à deformação sob carga;
- ✓ Boas propriedades de isolamento térmico e elétrico.

2.2.1 Resina de poliéster

Poliéster é o nome dado a uma categoria de materiais obtidos por meio de uma reação de condensação entre um poliálcool e um ácido policarboxílico. São polímeros sintéticos versáteis, sendo encontrados comercialmente como fibras, plásticos, filmes e resinas. Dependendo de sua formulação, ausência ou presença de duplas ligações entre os átomos de carbono (insaturações) que formam sua cadeia molecular, os mesmos podem ser classificados em saturados e insaturados. (CALLISTER JR., 2007).

Os poliésteres saturados são obtidos pela reação entre um diol e um diácido saturado, resultando num produto termoplástico, cuja cadeia molecular é composta apenas por ligações simples entre átomos de carbono. Possuem moléculas longas e lineares, e não são sujeitos a reações de reticulação, podendo ser encontrados em forma de fibras ou filmes.

Os poliésteres insaturados são obtidos a partir de diácidos insaturados, um diácido saturado e um diol, resultando num produto termofixo, cuja cadeia molecular é composta por ligações simples e duplas entre os átomos de carbono. É diluído num monômero vinílico inibido para facilitar sua estocagem e posterior utilização. Inicialmente encontra-se no estado líquido e após a adição de um agente de cura, solidifica formando uma estrutura termofixa irreversível.

Existe uma grande variedade de resinas poliésteres, tais como, ortoftálica, tereftálica e isoftálicas que são diferenciadas pela adição de seus constituintes na reação de

condensação para obtenção das mesmas (CARVALHO, 1992). A mais utilizada é o tipo ortoftálica, que é mais simples e de fácil obtenção.

O processo de cura da resina poliéster é iniciado pela adição de uma pequena porção de catalisador, como um peróxido orgânico ou um composto alifático. A cura pode se dar tanto em temperatura ambiente, quanto sob temperatura elevada e com ou sem aplicação de pressão. (MENDONÇA, 2005)

As propriedades mais importantes dos poliésteres insaturados incluem facilidades de manipulação, cura rápida sem liberação de substâncias voláteis e tóxicas, cores claras, estabilidade dimensional e, geralmente, um bom balanço de propriedades mecânicas (Tabela 1), elétricas e químicas. As principais aplicações de resinas poliéster reforçadas por fibras são: armações de barcos (remos e objetos recreativos); meios de transportes (carcaça, partes para transporte de passageiros, cabinas de caminhões); bens de consumo (diversos artigos de bagagens, vara de pesca, cadeiras, carcaças de eletrodomésticos etc.) e materiais de construção como tubos, calhas entre outros (HULL E CLYNE, 1996).

Tabela 1 – Propriedades típicas de resina poliéster.

Propriedades	Valor
Densidade (g/cm³)	1,2–1,5
Resistência a Tração (MPa)	40-90
Módulo Young (GPa)	2,0-4,5
Alongamento (%)	2,0

2.3 *Fibras de Reforço para Compósitos*

Uma das mais importantes formas de materiais poliméricos são as fibras, que podem ser descritas como flexíveis, macroscopicamente homogêneas, com alta relação entre comprimento e seção transversal. As fibras podem ser classificadas de acordo com sua origem em fibras naturais e sintéticas. As fibras naturais são derivadas de animais, vegetais e minerais.

Os três principais tipos de fibras sintéticas que se usam para reforçar materiais poliméricos são: vidro, aramida e carbono. As fibras de vidro são, com grande vantagem, o reforço mais usado e o mais barato. As fibras de aramida e de carbono apresentam resistência mecânica elevada e baixa densidade. Apesar do seu preço mais elevado, são utilizadas em muitas aplicações, especialmente na indústria aeroespacial.

São vários os fatores que influenciam as propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos reforçados com fibras, sendo os principais: módulo e resistência da fibra, estabilidade química da resina, resistência interfacial, diâmetro e comprimento das fibras, fração volumétrica e forma de distribuição das fibras na matriz. Nos compósitos com fibras descontínuas com distribuição aleatória o comprimento e a fração volumétrica são parâmetros importantes no seu desempenho (JOSEPH, 1996). Na tabela 2 apresentam-se algumas propriedades mecânicas das fibras de vidro, carbono e aramida.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro, carbono e aramida.

Propriedades	Vidro	Carbono	Aramida
Resistência à tração (MPa)	2410	3100	3617
Módulo de elasticidade em tração (GPa)	69	220	124
Densidade (g/cm³)	2,54	1,75	1,48
Alongamento (%)	3,5	1,4	2,5

2.3.1 *Fibra de vidro*

As fibras de vidro constituem o tipo de reforço mais utilizado nos materiais compósitos em termos de aplicações industriais. Apresentam excelente aderência fibra/matriz, devido ao tratamento que as mesmas recebem (denominado de encimagem) para serem utilizadas junto às matrizes orgânicas, possuem boas propriedades elétricas e grandes vantagens no que diz respeito à aplicação e custo. E a partir da década de 40, as fibras de vidro têm proporcionado o uso crescente dos plásticos reforçados em aplicações antes reservados exclusivamente aos metais e suas ligas (CARVALHO, 1992).

Os compósitos, de acordo com o tipo e a forma do reforço, podem ser divididos em três classes: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais. A fase dispersa para compósitos reforçados com partículas tem eixos iguais, isto é, as dimensões das partículas são aproximadamente as mesmas em todas as direções; para os compósitos reforçados com fibras a fase dispersa tem a geometria de uma fibra, que podem ser de acordo com o seu comprimento curtas ou longas. (GIBSON,1994)

Como reforços comerciais, as fibras de vidro podem ser produzidas em uma variedade de formas. A configuração do reforço pode ser na forma de fibras picadas, ou moídas; mantas; filamentos ou *rovings*; tecidos uni, bi ou tridimensionais; tranças ou *braid*; malhas ou *knits*; barbantes ou *yarns*. Esses materiais de reforço podem ser combinados em diferentes arranjos. (AQUINO; CARVALHO, 1992).

As fibras de vidro são usadas para reforçar matrizes poliméricas de modo a se obter compósitos estruturais e componentes moldados. Os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro apresentam as seguintes características favoráveis: elevada razão entre resistência e peso; boa estabilidade dimensional; boa resistência ao calor, à umidade e à corrosão; boas propriedades de isolamento elétrico; facilidade de fabricação; e custo relativamente baixo.

As fibras de vidro possuem diferentes composições, porém todas são à base de sílica (SiO_2) associada a óxidos de cálcio, boro, sódio, ferro e alumínio. A variedade dos percentuais desses constituintes implica em diferentes tipos da fibra, como podemos observar na tabela 3 com os percentuais de três tipos de fibra.

Tabela 3 – Composição de fibras de vidro E, C e S.

Constituintes	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	B_2O_3 (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na_2O (%)
Vidro E	55,2	14,8	7,3	3,3	18,7	-
Vidro C	65	4	5	3	14	8,5
Vidro S	65	25	-	10	-	-

O tipo mais usado industrialmente é a fibra de vidro do tipo E, a qual se destaca, por possuir baixo teor de álcali e excelentes propriedades elétricas, isolantes, além de boas propriedades de resistência mecânica, rigidez e desgaste (VAN VLACK, 1989; TINÔ, 2010).

A composição do vidro pode variar significativamente as propriedades da fibra obtida, como pode ser observado pela Tabela 4. As fibras de vidro do tipo S têm uma dificuldade inerente de serem estiradas devido à estreita faixa de temperatura para a formação do filamento e, portanto, apresentam maior custo.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas dos tipos de fibras de vidro E e S

Tipos de fibras vidro	E	S
Massa específica (g/cm³)	2,54	2,55
Módulo de elasticidade (GPa)	70	86
Resistência à tração (GPa)	2,40	2,80
Preço (US\$)/Kg	1,65 – 2,20	13,0 – 17,5

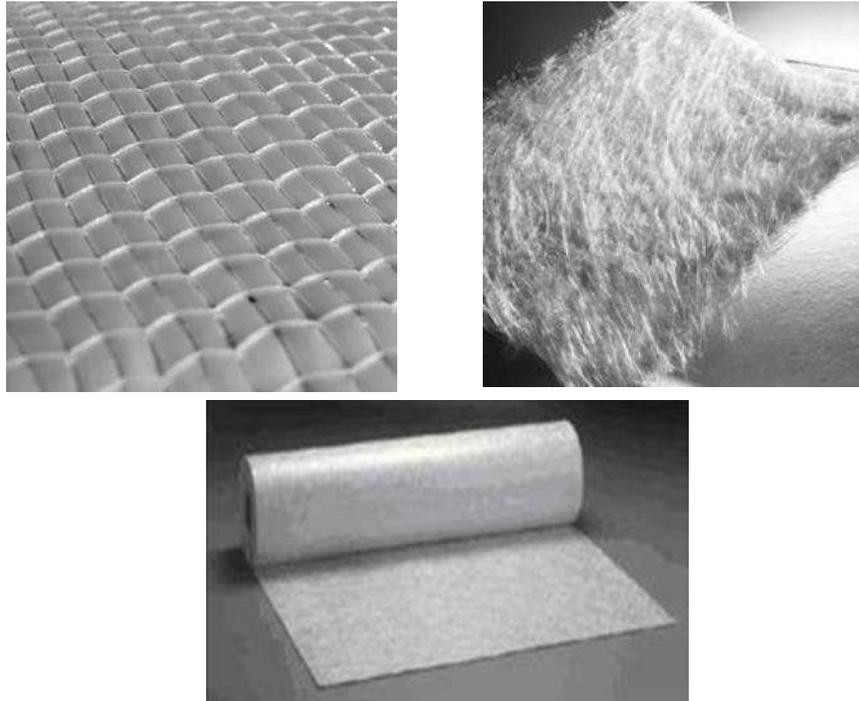
Nesse trabalho foi utilizada fibra de vidro do tipo E que representa cerca de 90% dos reforços nos materiais compósitos de uso em geral. Possuem boas propriedades como resistência à corrosão, baixa densidade, resistência ao calor e ao fogo, resistência à oxidação e resistência a soluções químicas. Estas são características que exercem grande influência na escolha das fibras de vidro para a fabricação dos materiais compósitos, de acordo com a Figura 6.

Na fabricação dos materiais compósitos de fibra de vidro se destaca:

- ❖ Tecidos – são constituídos a partir de mechas de fios (roving) de títulos iguais ou diferentes em trama e urdume, são comercialmente encontrados em dois tipos:
 - Tecidos unidirecionais – onde o número de fios é predominantemente mais elevado em um sentido e os fios estão dispostos em paralelo e unidos entre si, por fios de dimensões muito pequenas, permitindo a obtenção de elevadas propriedades mecânicas na direção das fibras;
 - Tecidos bidirecionais – os fios estão dispostos a 90° uns sobre os outros, na forma de trama e urdume.

- ❖ Mantas – são constituídos a partir de fibras curtas de aproximadamente 5 cm. As fibras estão dispostas de forma aleatória em várias camadas ao longo do tecido.

Figura 6 – Formas comerciais de fibra de vidro.



Fonte: owenscorning.com.br.

2.4 *Processo de Fabricação dos Compósitos*

Na fabricação de compósitos, diversos processos são utilizados industrialmente para a obtenção de peças de excelentes propriedades mecânicas e químicas, termicamente estáveis, leves e com formas arrojadas.

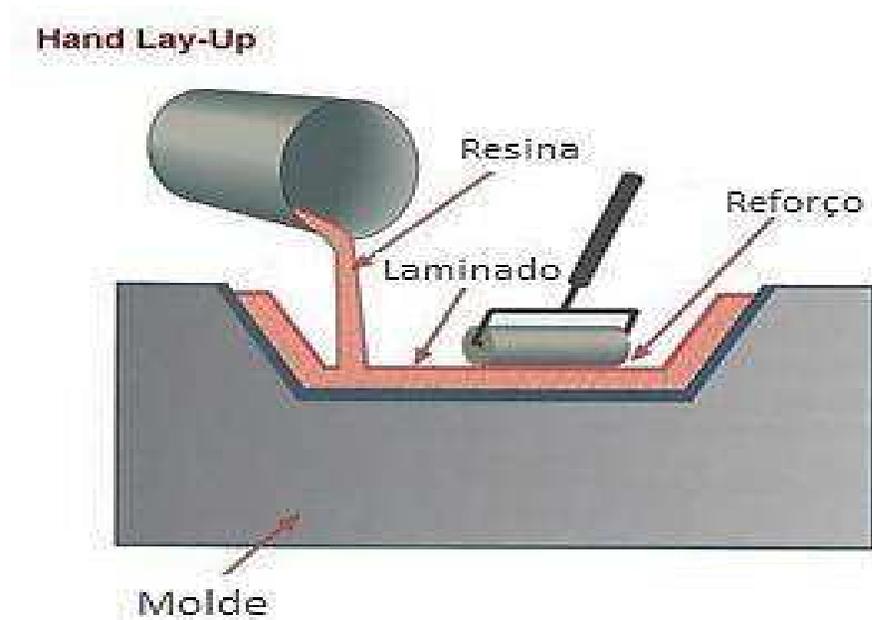
Dentre os processos de fabricação dos compósitos podemos destacar os seguintes:

Processo Manual (*Hand Lay-Up*)

O processo manual consiste na aplicação de camadas intercaladas de resina no estado líquido e com viscosidade adequada, sobre um molde definido, de forma que sobre cada camada de resina aplica-se uma camada de fibra. Neste método pode ser utilizada tanto resina

termorrígida quanto termoplástica e as fibras podem ser na forma de tecido ou rovings, picado ou misto. Estas sucessivas aplicações de camadas de resina e fibras intercaladas são feitas até que a espessura desejada seja alcançada. Após a adição de cada camada de fibra, é feita uma compactação com auxílio de um rolo ou pincel para que sejam obtidos materiais com uma espessura uniforme e isento de vazios e porosidades, na Figura 7.

Figura 7 – Representação do processo de Manual (Hand Lay-up).

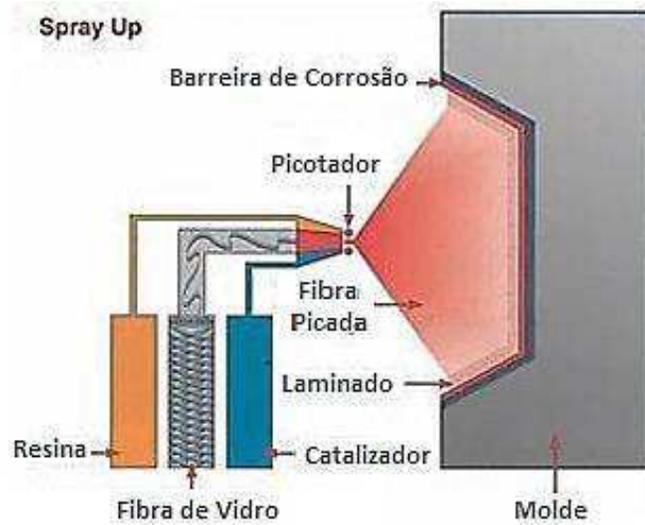


Fonte: Adaptado de flexidynamic.com/method.htm

❑ Moldagem por Spray (*Spray-Up*)

Nesse processo as fibras e a resina são depositadas ao mesmo tempo no molde. As fibras picotadas e junto com a resina são projetadas ao molde por uma pistola. Este processo é usado na fabricação de peças de formas complexas ou peças muito grandes, Figura 8.

Figura 8 – Representação do processo de Spray (Spray-up).

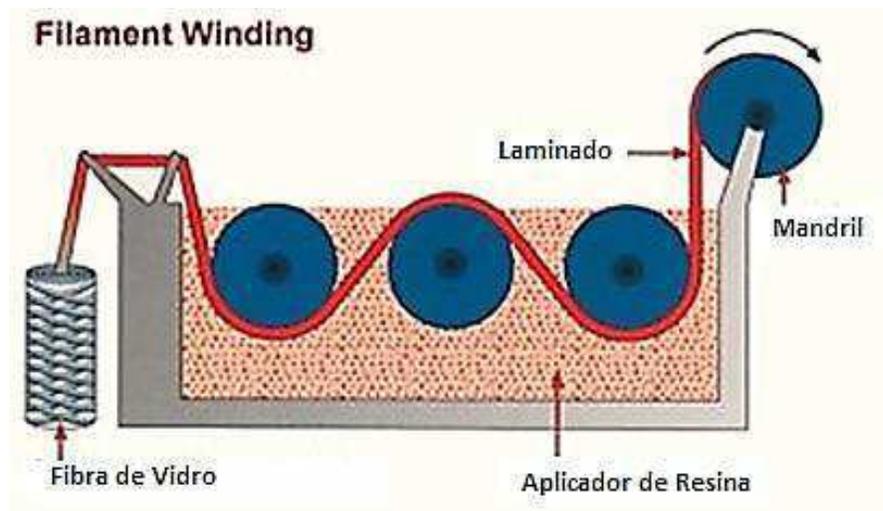


Fonte: Adaptado de flexidynamic.com/method.htm

❑ Enrolamento de Filamentos (Filament Winding)

Consiste na bobinagem de um fio contínuo que recebe a resina, sendo em seguida enrolado em um mandril. É muito utilizado na fabricação de peças cilíndricas que serão submetidas a pressões internas. É um processo que economiza os materiais empregados, Figura 9.

Figura 9 – Representação do processo por filamentos (Filament Winding).



Fonte: Adaptado de flexidynamic.com/method.htm

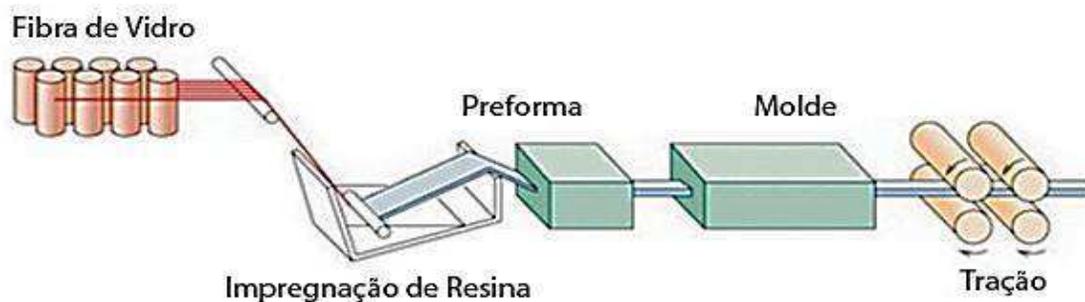
❑ Moldagem à Vácuo

Aprimoramento dos processos manual e à pistola, que utiliza o vácuo para se eliminar bolhas e excesso de resina. Após a aplicação normal das fibras e resina no molde, coloca-se um filme flexível sobre o moldado, antes da cura, de maneira que se cubra totalmente o contorno do molde. O vácuo é aplicado entre o molde e o filme, sendo retiradas as bolhas e o excesso de resina.

❑ Pultrusão

Este processo produz compósitos com as fibras orientadas unidirecionalmente. Os filamentos contínuos são impregnados num banho de resina e então são forçados a passar por uma matriz com uma fenda de geometria desejada. Estufas são normalmente utilizadas, para assegurar uma perfeita cura e aumentar a velocidade do processo. O reforço é unidirecional, longo e orientado na direção do fluxo, Figura 10

Figura 10 – Representação do processo de pultrusão



Fonte: <http://br.cpicfiber.com/>

❑ Moldagem por Compressão

Neste processo utiliza-se molde de duas partes tipo macho-fêmea na fabricação de compósitos. O reforço pode ser utilizado na forma de mantas ou tecidos, que são alternados com a resina. A impregnação fibra-matriz é feita com ajuda de uma espátula, que também serve para retirar bolhas. O molde é fechado e a cura ocorre enquanto o material está restrito às superfícies das duas partes (macho-fêmea) do molde.

2.5 *Propriedades Mecânicas dos Compósitos*

Em sua maioria, os desenvolvimentos dos compósitos têm como objetivos principais à aplicação estrutural e dessa forma, as propriedades mecânicas são as que despertam um maior interesse para as indústrias. (HAGE JUNIOR, 1989).

Com relação essas propriedades deve-se levar em conta a complexidade da interação mecânica entre o reforço e a matriz. As propriedades mecânicas de maior interesse são: resistência à tração, compressão, flexão, impacto, fadiga, e abrasão, além do módulo de elasticidade em tração e flexão, dureza e tenacidade à fratura.

No ensaio de tração são determinadas as propriedades de resistência à tração uniaxial, módulo de elasticidade, alongamento e coeficiente de Poisson. A resistência à tração é avaliada pela carga aplicada ao material por unidade de área, no momento de ruptura. O alongamento representa o aumento percentual do comprimento da peça sob tração, no momento de ruptura. O módulo de elasticidade é medido pela razão entre a tensão e a deformação, dentro do regime elástico, onde a deformação é totalmente reversível e proporcional à tensão. O coeficiente de Poisson é definido como a razão negativa entre a deformação transversal e a correspondente deformação longitudinal de um corpo de prova sob tensão uniaxial, abaixo do limite de proporcionalidade do material.

No ensaio de flexão as propriedades de interesse são a resistência à flexão e o módulo de rigidez em flexão. As configurações de carregamento podem ser flexão em três pontos e flexão em quatro pontos. A resistência à flexão representa a tensão máxima desenvolvida nas fibras externas de uma barra sujeita a dobramento, no momento da quebra. O módulo de rigidez em flexão é determinado tal como em um ensaio de tração: a razão, dentro do regime elástico, entre a tensão e a deformação.

A resistência à compressão, é expressa pela tensão máxima que um material rígido suporta sob compressão longitudinal, antes do colapso.

A resistência à fadiga representa a resistência do material em suportar solicitações cíclicas. O comportamento em fadiga é importante, pois a fratura do material sob carregamento cíclico pode ocorrer em níveis de carga muito menores do que sob carregamento monotônico.

A resistência ao impacto representa a energia para fraturar um corpo de prova sob impacto. Oferece valores comparativos, mas de grande utilidade no desenvolvimento de materiais. Em compósitos, a resistência ao impacto depende fortemente da resistência interfacial. (CALLISTER JR., 2007).

2.5.1 Falhas nos compósitos

Os compósitos poliméricos são amplamente utilizados na engenharia, e em todas as aplicações, a ocorrência de fratura é a maior preocupação. Objetivando simplificar e racionalizar os estudos relativos aos fenômenos de fratura, pesquisadores desenvolveram um campo de pesquisa denominado de Mecânica da Fratura.

A fratura de um laminado compósito é classificada de maneira geral em dois modos: modo fibra e modo matriz. O modo fibra está relacionado ao carregamento longitudinal à direção do reforço, seja trativo ou compressivo. Já o modo matriz está relacionado ao carregamento transversal ao reforço ou a uma carga cisalhante no plano, também trativo ou compressivo (SUN *et al.*, 1996).

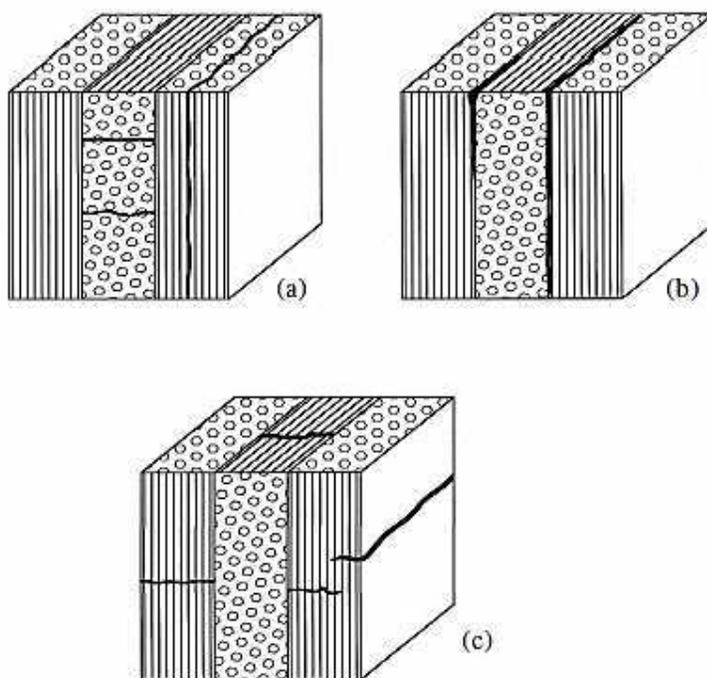
Materiais compósitos são, por definição, heterogêneos em uma escala macroscópica. A propagação das trincas em um compósito não é simples como acontece nos metais. Pode-se descrever, neste caso, uma zona de danos caracterizada por trincas na matriz, quebras das fibras e delaminação. Estes vários modos de falha interagem e podem ocorrer simultaneamente ou sequencialmente (MASTERS, 1987; TSAI, 1980).

As falhas em materiais compósitos podem ser descritas pelos mecanismos de danos que ocorrem na superfície de fratura. Esses podem ser identificados por quebra das fibras, trinca da matriz ou delaminação interlaminar. A quebra de fibras e a trinca da matriz são dependentes das propriedades de resistência dos constituintes, enquanto que a delaminação pode ser causada por anomalias durante a fabricação, sequência de empilhamento de camadas, processo de cura inadequado ao sistema de resina ou impactos que ocorrem na vida em serviço. Com a progressão do carregamento, o acúmulo de danos, ou das falhas locais existentes no laminado, provoca a falha final do compósito. A falha catastrófica raramente acontece na carga correspondente à falha inicial ou à falha da primeira camada. A falha inicial de uma camada pode ser prognosticada pela aplicação de um critério de falha apropriado ou pela teoria de falha da

primeira camada. A predição da falha subsequente requer o entendimento dos modos de falha e dos modos de propagação das falhas no laminado (SLEIGHT, 1999).

Os tipos desses danos estão diretamente relacionados com a orientação das fibras e a direção de aplicação do carregamento. Os modos de falha podem ser dos tipos: interlaminar, intralaminar e translaminar, como mostrado na Figura 11 (SMITH, 1987).

Figura 11 – Os três modos de falha característicos para os materiais compósitos.



- a) intralaminar,
- b) interlaminar
- c) translaminar

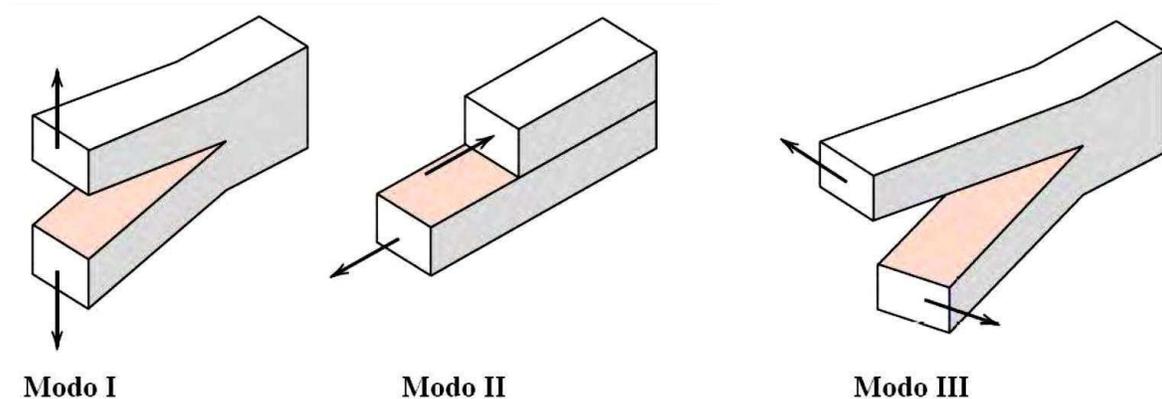
Fonte: SMITH, 1987.

Geralmente, um componente danificado apresenta um ou mais desses três tipos de ruptura. Por isso, é de grande importância identificar por quais modos de falha o material se rompe e qual é a sequência de eventos ocorrida, para definir as ferramentas de análise mais adequadas a serem utilizadas. A superfície de fratura é a principal fonte de referência para se determinar a causa da falha. Nela está registrada de forma detalhada a história dos danos ou de parte dele, contendo as evidências do tipo de carregamento, os efeitos envolvidos e a qualidade do material.

O tipo de ruptura é definido pelos modos de carregamento. Da mesma forma que acontece com os metais, a ruptura dos compósitos pode ocorrer sob os seguintes modos: modo I é

o modelo de abertura de trinca ou carregamento de tração, onde as superfícies da trinca se movem na direção da aplicação da força; no modo II, deslizamento ou cisalhamento, as superfícies da trinca escorregam uma sobre a outra, enquanto que no modo III, rasgamento, as superfícies da trinca se movem em direções opostas, paralelas à borda dianteira da trinca (KERLINS, 1987; MASTERS, 1987; O'BRIEN, 2001).

Figura 12 – Tipos de carregamentos clássicos para compósitos.



Fonte: CAMPOS, 2010

Fraturas interlaminar e intralaminar têm a tendência de serem influenciadas pela fratura da matriz e pelo descolamento fibra/matriz. Em geral, as condições mais comuns, em que ocorre o descolamento fibra/matriz, são na interface sob o modo I e o modo II. Fraturas interlaminares descrevem falhas orientadas entre as camadas e as intralaminares as falhas ocorridas internamente às camadas. Ambas ocorrem no plano do laminado, fraturando principalmente a matriz, com pouca ou nenhuma fratura de fibra. Fraturas translaminares são aquelas que ocorrem transversalmente ao plano do laminado, causando um significativo rompimento das fibras. Normalmente, encontram-se componentes que apresentam os três tipos de fraturas simultaneamente. Neste caso, é importante que se diferencie entre os três tipos para se preparar a amostra para a análise, de maneira mais apropriada a não se perder nenhum aspecto da falha (PURSLOW, 1981; SMITH, 1987).

Quando a origem de uma fratura é determinada, destaque especial é dado à identificação da causa da falha. Diferente do que ocorre nos metais, a origem da falha nos compósitos não se limita a um pequeno ponto, dependendo do tamanho da peça, chegando a áreas

de centímetros de diâmetro. Como regra geral, peças que apresentam grandes áreas de origem de fraturas ou pontos de origem, facilmente definidos como danos após o início da falha, normalmente passaram por carregamento excessivo em toda a sua estrutura, até a falha total do componente. Outra condição é a que apresenta o ponto original da falha pequeno e bem localizado, como entalhes e porosidades, de modo que a falha ocorre na maior parte das vezes abaixo da carga máxima suportada pela peça (KAR, 1992).

Dependendo do tipo de carregamento ao qual está sendo submetido o material é gerado um tipo específico de superfície de fratura. No caso de carregamento por tração, por exemplo, a superfície da fratura pode apresentar efeitos de arrancamento de fibras (efeito *pull out*), enquanto que o carregamento por cisalhamento interlaminar pode gerar delaminações no material (PINHO; ROBINSON; IANNUCCI, 2006).

2.6 Tenacidade à Fratura de Compósitos

A avaliação da tenacidade à fratura em compósitos apresenta algumas dificuldades normalmente não encontradas nos materiais homogêneos. Isto ocorre porque estes materiais apresentam propriedades mecânicas que variam com a orientação das fibras.

Para os compósitos reforçados com fibras curtas, a determinação da tenacidade à fratura é mais simples e sendo assim mais comumente utilizada (WONG; MAI, 1998; ATODARIA et al., 1997). Comparado aos compósitos com fibras longas, estes compósitos possuem menor tenacidade e resistência à fratura, devido, entre outros motivos, à concentração de tensão no final das fibras (CHOI; TAKAHASHI, 1996).

Nestes compósitos, o efeito das extremidades das fibras é de grande importância, pois estas extremidades atuam como pontos de concentração de tensão e são potenciais iniciadores de trincas. Trincas locais na matriz ou na interface podem colocar em risco a integridade do compósito, ainda que as fibras restantes permaneçam inalteradas.

Para estes materiais, a avaliação da tenacidade à fratura é feita utilizando-se os conceitos da Mecânica da Fratura Linear Elástica MFLE. A resistência à fratura é avaliada em termos dos parâmetros K (fator de intensidade de tensão), este parâmetro é uma medida para a singularidade de tensão na extremidade da trinca. O estado de tensões em torno da extremidade

da trinca é responsável pela possibilidade de que a tensão principal atinja um certo valor para iniciar o crescimento da trinca. O fator de intensidade de tensão K para um corpo de prova de dimensão infinita pode ser calculada pela Equação 2.1, onde σ é a tensão aplicada, a é a metade do comprimento da trinca (trinca central) e Y é um fator de forma que depende do modo de abertura da trinca e da geometria do corpo.

$$K = Y\sigma\sqrt{(\pi a)} \quad (2.1)$$

O fator de intensidade de tensão mede a severidade de uma trinca. O material é capaz de suportar forças sem sofrer fratura, dado certo comprimento de trinca e uma determinada geometria do corpo, desde que a tensão aplicada seja tal que um determinado valor crítico K_c não seja atingido. Este valor é uma propriedade do material, quando sob deformação plana, para uma determinada espessura do corpo. Em particular, no estado plano de deformação e no modo de abertura (modo I) esta propriedade passa a ser independente da espessura e é conhecida por tenacidade à fratura em estado plano de deformação – K_{Ic} .

Os ensaios de tenacidade à fratura de polímeros são disciplinados por normas técnicas, como a ASTM D 5045-14. Nestes ensaios um corpo de prova padronizado contendo uma pré-trinca é carregado em uma máquina de ensaios mecânicos, a velocidade constante, registrando-se os valores de carga e deslocamento até a ruptura.

Para uma trinca circular em uma placa infinita, com dimensões constantes Y , o fator de intensidade de tensão de raio “ a ” pode ser obtido através da seguinte equação:

$$K = \frac{2}{\pi} \sigma_0 \sqrt{(\pi a)} \quad (2.2)$$

Onde: σ é a tensão aplicada, a é o raio do furo circular.

2.7 *Fator de Concentradores de Tensão*

Toda abordagem da mecânica da fratura procura considerar o campo de tensões e deformações junto a defeitos em componentes. A presença de cantos vivos, defeitos superficiais, reduções de seções e linhas de emendas resultam em concentradores de tensões, que são responsáveis por diversas falhas em materiais (PILKEY, 2008). Devido à presença destas discontinuidades ocorre um aumento no valor da tensão, geralmente quantificado pelo fator de concentração de tensão.

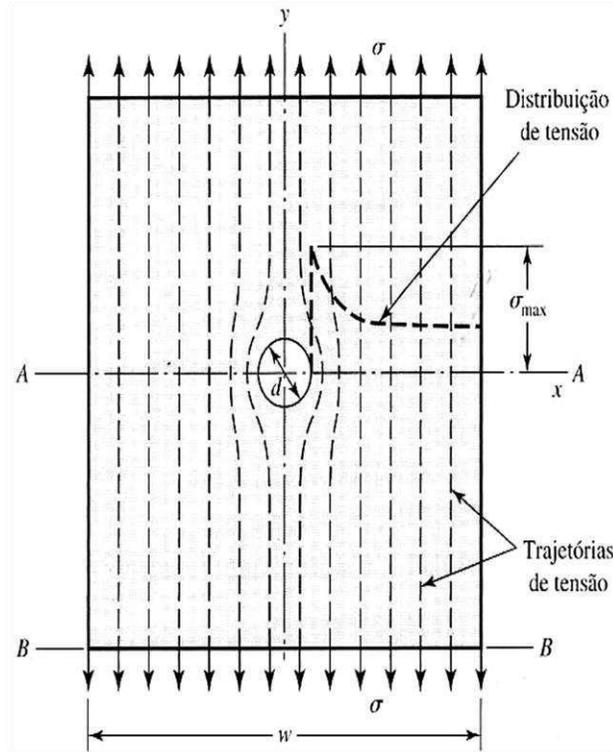
Essa concentração de tensão ocorre devido a um acúmulo de energia, no qual o fluxo de tensão próximo (região lateral) da descontinuidade geométrica passa a ter um valor bem maior de tensão média nessa região em relação às áreas mais afastadas das descontinuidades, e é nessa região onde as trincas são originadas e propagadas até a ruptura final do material (AWERBUCH; MADHUKAR, 1985).

Na figura 13 ilustra-se esse fenômeno para o caso de um material isotrópico e homogêneo, essas linhas de tensão (ou linhas de Euler) são uniformes em todos os locais, exceto na vizinhança do furo; nele, entretanto, essas linhas se desviam e contornam a descontinuidade, acumulando-se na lateral do furo.

O fenômeno da concentração de tensão pode, também, ser definido como um fenômeno extremamente localizado caracterizado pela não uniformidade na distribuição da tensão devido à aplicação de uma carga pontual ou presença de descontinuidade geométrica na seção (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

O fator de concentração K é um parâmetro quantitativo da intensidade desse fenômeno de concentração de tensão e é aplicado de forma gráfica e prática na maioria dos materiais tidos como convencionais (HIBBELER, 2004). Ele é determinado pela razão entre a tensão máxima, localizada na vizinhança da descontinuidade geométrica, e a tensão média determinada nesta mesma seção. (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Figura 13 – Distribuição de tensão na vizinhança de um furo.



Fonte: SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005

Para materiais isotrópicos homogêneos, o fator de concentração de tensão geométrico (ou teórico) é definido pela equação 2.3.

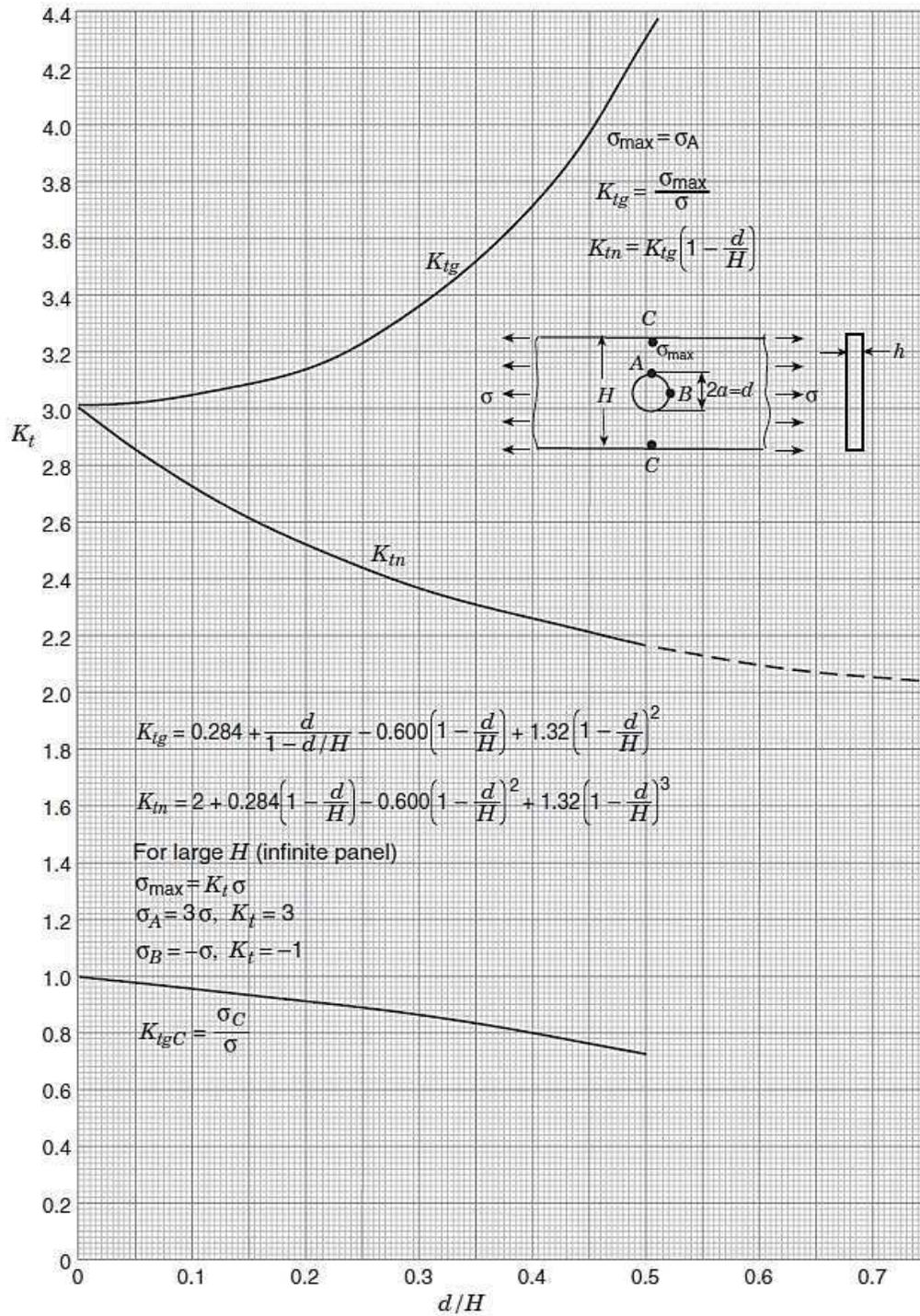
$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \quad (2.3)$$

Onde K_t é o fator de concentração de tensão relativo a tensões normais, σ_0 é a tensão média ou nominal e σ_{max} é a tensão máxima (na borda do furo).

O índice t em K_t significa que esse fator de concentração de tensão depende somente da geometria da peça. Ou seja, o material utilizado, nesse caso, não influencia no valor de K_t . Por isso, ele é chamado de fator de concentração de tensão teórico.

O efeito da dimensão de um furo central no fator de concentração de tensão teórico (K_t), para materiais convencionais (isotrópicos e homogêneos) é mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Fatores de concentração de tensões e K_{tg} K_{tn} para a tensão de um elemento fino de largura finita com um furo circular



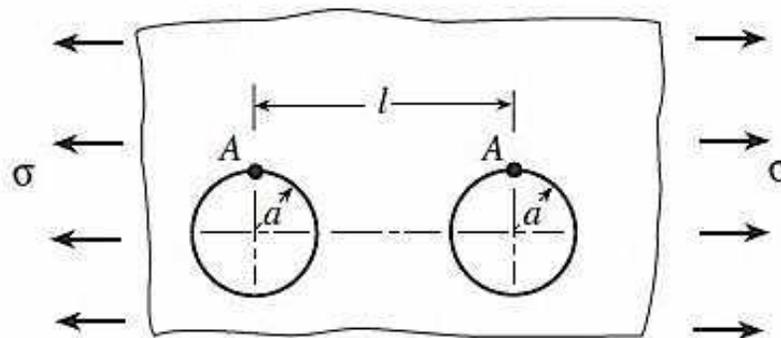
Fonte: PILKEY, 2008

Um processo fundamental de concentração de tensão é o estudo da distribuição de tensão em torno de um orifício circular numa placa infinita, que está sujeito a esforço de tensão uniaxial no plano. Esta é a tensão máxima em torno do círculo, de modo que o fator de concentração de tensão para este caso é igual a 3.

Considere fatores de concentração de tensão para o caso de dois furos iguais em uma chapa fina submetido à tensão uniaxial. Neste caso, quando $l > 6a$, a influência entre os dois orifícios será fraco e devemos adotar os resultados para um único furo com $K_t = 3$.

Se os orifícios se encontram ao longo de uma linha que é paralela ao plano de tensão a situação é diferente, como se mostra na Figura 15. Como acontece para um único furo, a tensão máxima ocorre no ponto A e diminui muito rapidamente na direção paralela à σ . Para dois furos há alguma influência entre as duas localizações. Para “ l ” pequeno, a distribuição de tensões tende a tornar-se uniforme mais rapidamente do que no caso de um único orifício, então o fator de concentração de tensão é inferior a 3. No entanto, quando l aumenta, a influência entre os dois furos diminui, assim K_t tende para o valor 3. Se l for igual $10a$ o K_t vai tender para 2,98, que é bastante próximo do fator de concentração de tensão do caso de um único furo e é consistente com a distribuição de tensão para único furo.

Figura 15 – Dois furos circulares de diâmetro igual, alinhados ao longo σ .



Fonte: PILKEY, 2008

A presença do entalhe afeta a Resistência Mecânica dos materiais, incluindo os compósitos, assim especificar a perda de resistência, pela a presença do entalhe, se torna

imprescindível. A simples presença, por exemplo, de um furo no material leva o mesmo a suportar cargas menores devido ao efeito da concentração de tensão (LIN YE *et al.*, 1998).

Segundo Lin Ye *et al.* (1998) essa diminuição da resistência do material, também denominado de Resistência Residual, é dada pela razão:

$$RS = \frac{\sigma_{CD}}{\sigma_{SD}} \quad (2.4)$$

Onde: σ_{CD} é a resistência última do material com a descontinuidade geométrica e

σ_{SD} é a resistência última do material sem a descontinuidade geométrica.

Neste sentido, através do fator RS pode-se quantificar o grau de nocividade da descontinuidade geométrica no elemento estrutural. É importante ressaltar que a tensão média é calculada na área maior da seção transversal, ou seja, na seção sem a presença da descontinuidade geométrica.

O estudo desse fenômeno nos materiais compósitos é complexo, pois estes não são considerados homogêneos e isotrópicos, como os metais, por exemplo, onde o fenômeno da concentração de tensão pode ser analisado de forma simples através de tabelas e gráficos, com dados do tipo de carregamento e geometria da peça (HIBBELER, 2004).

As principais técnicas experimentais, modelos numéricos e teóricos usados para o estudo da presença da descontinuidade geométrica em materiais compósitos são (HALLETT *et al.*, 2009; Aquino, 1992; O'Higgins *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2000, Mollenhauer *et al.*, 2006;):

- ❖ Ensaio mecânico;
- ❖ Radiografia;
- ❖ Fotoelasticidade;
- ❖ ESPI (Interferômetro Eletrônico Padrão a Laser);
- ❖ Elementos finitos.

2.7.1 Tipo e tamanho do furo

A sensibilidade ao entalhe para os materiais compósitos varia de acordo com o tipo e a forma do furo presente. Segundo Hull (1988), para um orifício elíptico em uma placa plana e isotrópica sob a ação de uma carga o efeito do concentrador de tensão, será maior do que

em uma mesma placa com orifício circular. Portanto, quanto mais aguda for essa descontinuidade geométrica, maior será a concentração de tensão.

O furo circular sem dúvida é uma das descontinuidades geométricas mais usadas na engenharia, uma dessas razões que já foi falada anteriormente, é para evitar descontinuidades bruscas (agudas) e a outra pelo fato de ser encontrado em maior número de trabalhos e pesquisas na área. Ainda em relação ao orifício circular é importante salientar que, a variação de seu diâmetro, também leva a um diferente comportamento mecânico. (KREMER E SCHÜRMAN, 2007).

A norma ASTM D5677-11 fala da importância de relação entre a largura (w) da placa e o diâmetro do furo (d), esta razão deve ser mantida em torno de 6,0 (seis), sempre que for usado um material compósito considerado isotrópico. Caso seja um material considerado ortotrópico, outra razão entre a espessura (t) e o diâmetro do furo deve também ser obedecida e ficar entre 1,5 e 3,0.

2.8 Mecanismo de Danos em Compósitos

As características das estruturas de material compósito é que, na maioria dos casos, a falha não é um único evento, mas uma sequência gradual de micro trincas, delaminações e falha das fibras levando ao colapso da estrutura que é conhecido como “dano” (REIFSNIDER, 1982).

A forma e o tipo do dano podem ser influenciados por diversos fatores, como o tipo e o sentido da carga aplicada, as propriedades físicas, químicas e mecânicas da fibra e da matriz, o processo de fabricação, a configuração do material compósito, os percentuais de fibra, matriz e vazios, a umidade absorvida, a temperatura de trabalho e a presença de elementos concentradores de tensão como descontinuidades geométricas (LEVY NETO E PARDINI, 2006; AQUINO *et. al.*, 2007).

Devido à dependência do mecanismo com relação a todos esses fatores, se torna difícil prever onde e como um dano, irá iniciar, até mesmo, a sua propagação em um material compósito. Segundo Hull (1988), a formação e a propagação do dano é muito sensível aos fatores

acima citados, dessa forma, ocorrendo alguma variação desses fatores, ocorrerá mudanças nos mecanismo de danos.

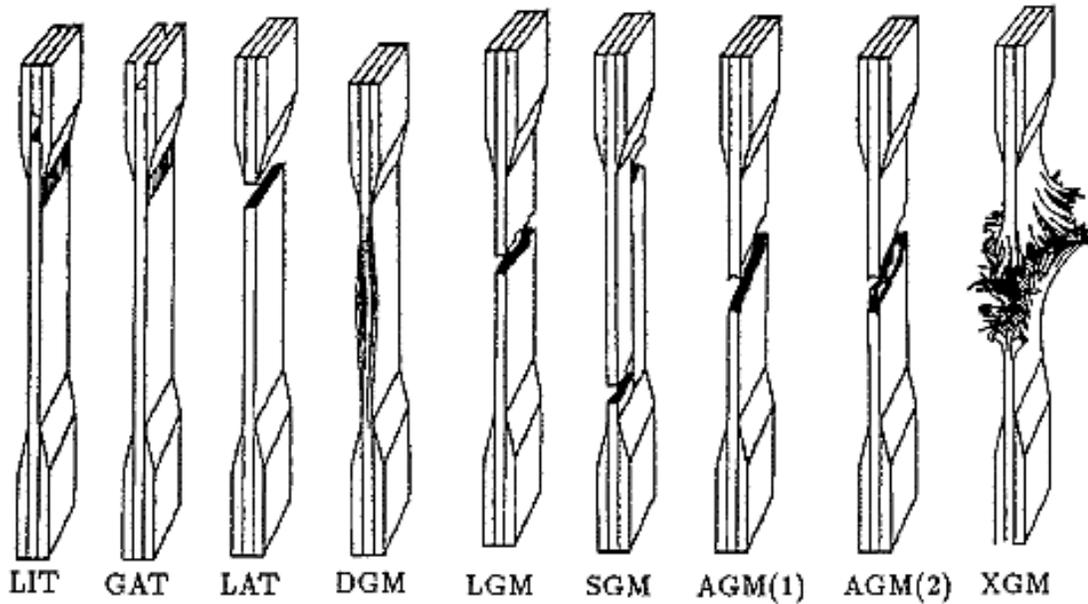
Segundo a norma ASTM D 5766-11, a fratura final em laminados com presença de descontinuidades geométricas (entalhes e furos) sempre deverá ocorrer na seção da área com presença dessas descontinuidades.

Na Tabela 5 e na Figura 16 têm-se a codificação do modo de falha para o ensaio de tração uniaxial segundo a norma ASTM D 3039-14, ou seja, para laminados com ou sem a presença de descontinuidades geométricas.

Tabela 5 – Codificação dos modos de falha aceitáveis para o ensaio de tração uniaxial.

CÓDIGO	DEFINIÇÃO DO CÓDIGO
LIT	Lateral no topo e dentro da lingueta
GAT	No topo e dentro da lingueta
LAT	No topo e dentro da lingueta, mas lateral
DGM	Delaminação na borda e no meio do galgo
LGM	Lateral e no meio do galgo
SGM	No meio do galgo com fendas longitudinais
AGM	Angular e no meio do galgo
XGM	Explosiva e no meio do galgo

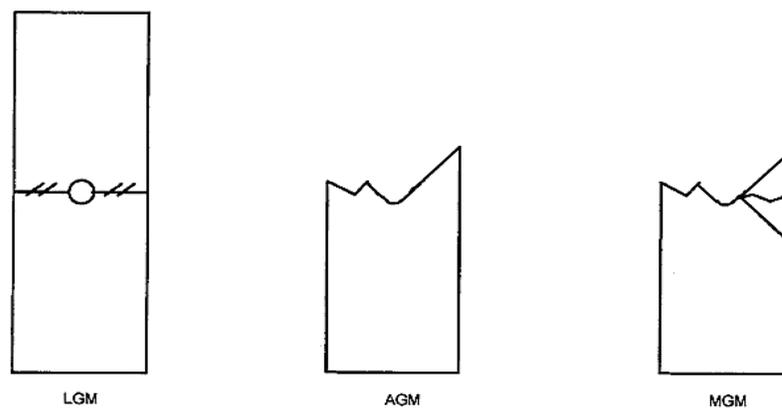
Figura 16 – Ilustrações dos modos de falha para laminados compósitos carregados sob tração sem descontinuidade geométrica.



Fonte: ASTM D 3039-2014

Para laminados compósitos com descontinuidade geométrica, a norma ASTM D5766 – 11 definem três modos de falhas aceitáveis.

Figura 17 – Ilustrações dos modos de falha para laminados compósitos carregados sob tração com descontinuidade geométrica.



Fonte ASTM D5766 – 2011

- LGM – Falha do laminado por tração lateralmente através do furo. Trincas e delaminações podem estar presentes;
- AGM – O laminado geralmente falha por tração no furo. Mas partes de camadas inclinadas atravessam o furo lateralmente à linha de centro. Trincas e delaminações podem estar presentes;
- MGM – O laminado falha por tração no furo e exhibe múltiplos modos de falha em várias camadas. Várias trincas e delaminações presentes.

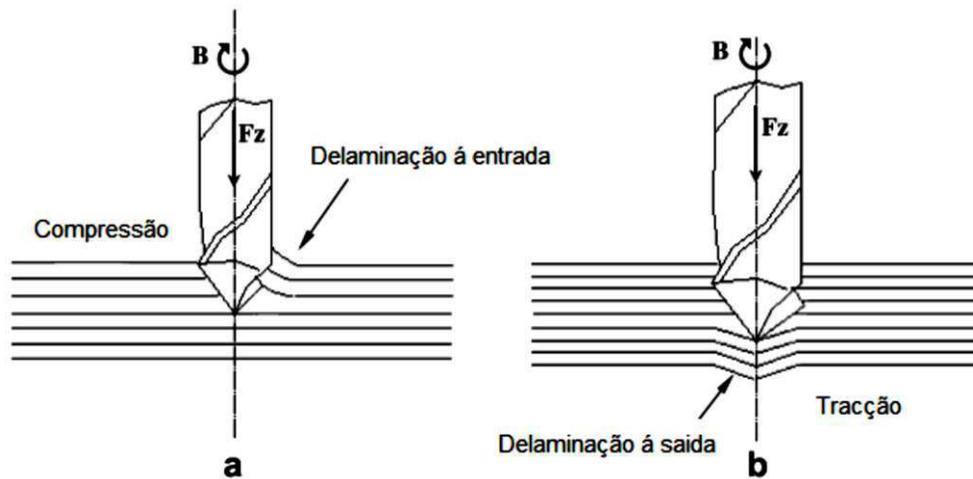
Os principais tipos de danos encontrados nos materiais compósitos laminados são (HULL, 1988 E AQUINO *et. al.*, 2007):

- Fissuração na matriz – ocorrência de uma ou mais fissuras na matriz do material compósito e também definida como fratura coesiva na matriz.
- Ruptura da fibra – ocorrência da ruptura transversal e/ou longitudinal da fibra, sendo nesse último caso definida como fratura coesiva na fibra.
- Desaderência fibra/matriz – separação na interface entre fibra e matriz, definida como fratura adesiva.
- Delaminação – Falta de aderência entre as camadas de um compósito laminado.

A delaminação é uma falha no laminado, que pode também ser induzida durante a furação do compósito, que é um fenómeno indesejável e que foi reconhecido como o maior dano encontrado quando da furação do compósito.

Este fenómeno de delaminação pode ocorrer na entrada e na saída da periferia do furo. Estes são chamados de “Peel-up” e de “Push-out” respectivamente.

Figura 18 – Delaminação: a) à entrada (peel-up); b) à saída (push-out).



Fonte: TAVARES, 2013

Delaminação “Peel-up” ocorre na periferia da entrada do furo, quando as arestas de corte da ferramenta entram em contato com o compósito, e em consequência do avanço da ferramenta de corte, o material tem tendência a ser puxado para cima ao longo das espiras da fresa em vez de ser cortado. Este efeito faz com que as camadas superiores do material se separem do resto da placa. Normalmente este problema resolve-se com a diminuição do avanço.

O “Push-out” ocorre na periferia da saída do furo é consequência da força compressiva que a fresa exerce sobre o compósito. As camadas de laminado que se encontram por baixo da fresa são empurradas e tendem a separar-se das camadas superiores, fraturando as ligações intralaminares à volta do furo. Este problema pode ser reduzido com uma configuração de geometria de ponta de fresa adequada ou com a seleção dos parâmetros de corte adequados para a configuração do compósito.

3 MATÉRIAS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e equipamentos utilizados nesta pesquisa, seguidos pela metodologia empregada para a realização dos experimentos.

3.1 *Materiais*

- *Resina*

A resina utilizada para esse estudo foi a de Poliéster Insaturada Orto-Teraftalica como matriz polimérica para a confecção do laminado foi fornecida pela Empresa EquiFiber Equipamentos de Fibra LTDA.

- *Fibra de vidro*

O reforço utilizado para a confecção do laminado foi a manta de fibra de vidro-E com gramatura de 450 g/m², também foi fornecida pela Empresa EquiFiber Equipamentos de Fibra LTDA.

3.2 *Metodologia*

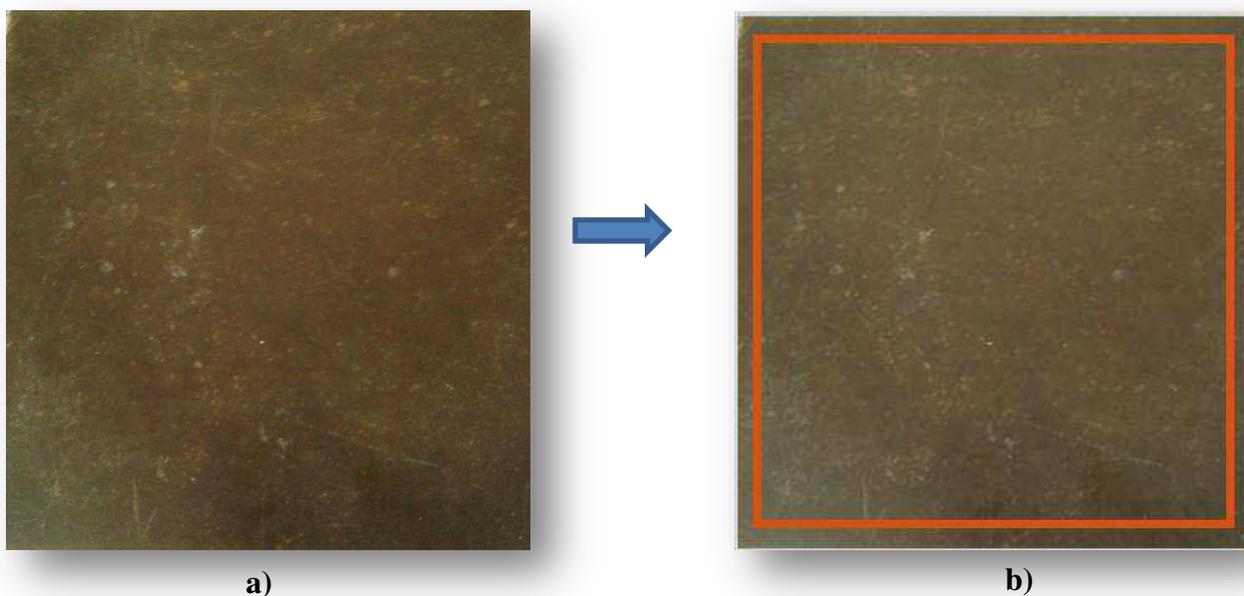
3.2.1 *Confecção das placas*

Para a confecção das placas utilizou-se o processo de moldagem manual (Hand Lay-Up), onde a manta de fibra de vidro do tipo E foram empilhadas em camadas contendo 8 e 10 camadas, com espessura média de 8,6 milímetros e 10,7 milímetros respectivamente. As placas foram fabricadas com dimensões de 300x300 milímetros. Todas foram confeccionadas pela Empresa EquiFiber Equipamentos de Fibra LTDA.

3.2.2 Corte das placas e confecção dos corpos de prova

Para o corte das placas utilizou-se um disco de corte para evitar possíveis danos nas camadas de fibras de vidro. Para melhor obtenção dos corpos de prova, foi retirada uma rebarba de aproximadamente 50 mm das laterais da placa, com o intuito de eliminar possíveis discontinuidades e mau acabamento.

Figura 19 – Placa de compósitos para os estudos. (a) Placa de 300x300 mm com 8 e 10 camadas, (b) corte de 50 mm da borda da placa.



Fonte: Autoria Própria

Após o corte das placas, foram realizados os procedimentos de lixamento e polimento nas faces cortadas pelo disco de corte. Foram utilizadas lixas d'água de números 200,400, 600 e 1200, e o polimento, utilizando como abrasivo a alumina de 0,01 μm .

Como a espessura do laminado apresentou variações em função do processo de fabricação utilizado, foram necessárias pelo menos 05 (cinco) medidas na região do galgo para a obtenção do valor médio das dimensões de cada corpo de prova. Para isso, utilizou-se um paquímetro digital do fabricante Messen com resolução de 0,01 mm.

Os corpos de prova sem a presença do furo seguiram as recomendações da norma ASTM D3039-14. As dimensões desses corpos de prova (em milímetros) são mostradas na Figura 20, com um comprimento útil de 127,0 mm e largura de 25,0mm.

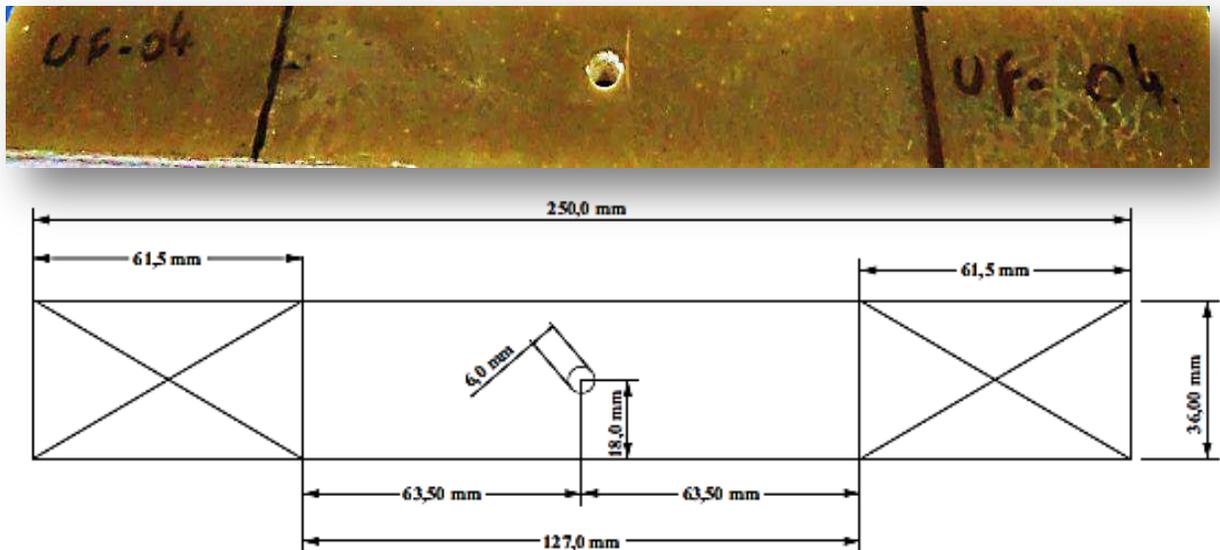
Figura 20 – Corpos-de-prova sem furo.



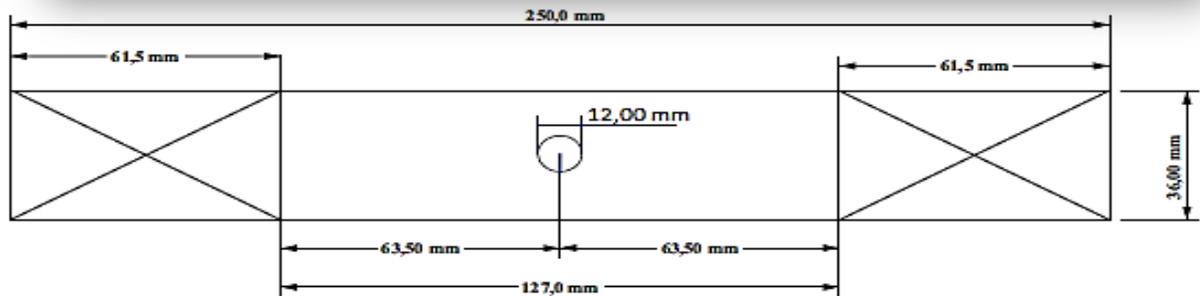
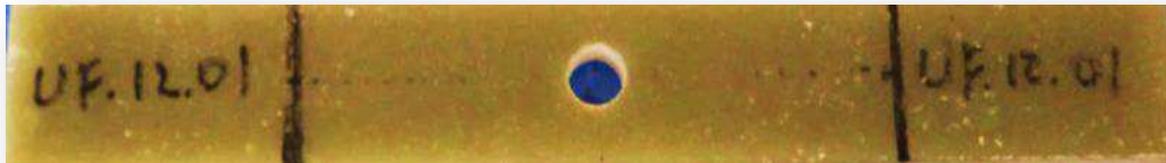
Fonte: Autoria Própria

Para os corpos de prova com entalhes às dimensões seguem a norma ASTM D 5766-11, como mostra a Figura, 21, com comprimento útil de 127,0mm, largura de 36mm e diâmetro do furo central de 6,0 mm. Também se verificou a influência do furo central com 12 mm.

Figura 21 – Dimensões dos corpos-de-prova com furo central, (a) furo de 6 mm, (b) furo de 12 mm.



a)

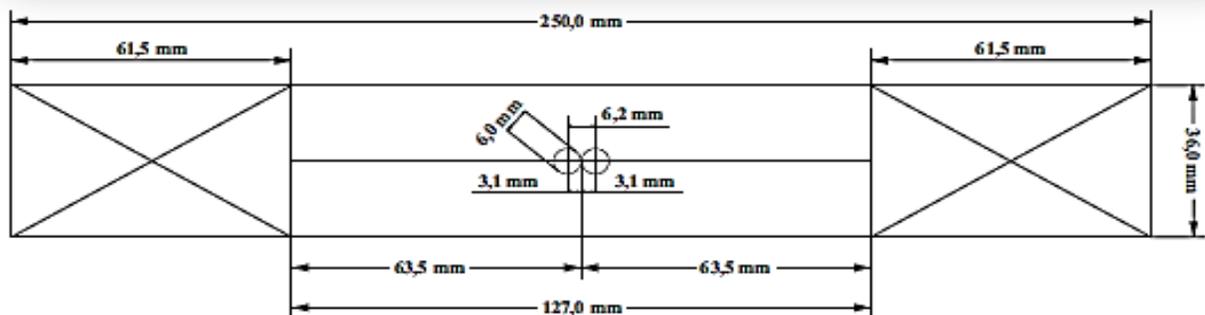


b)

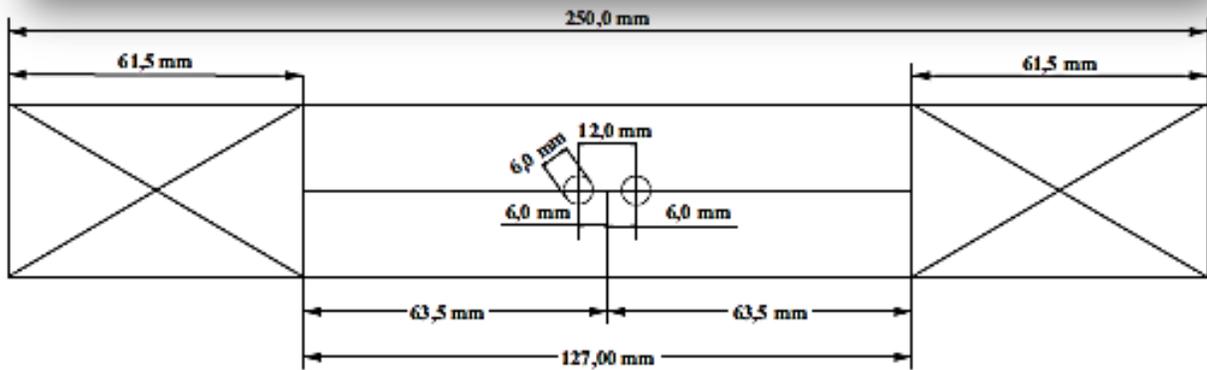
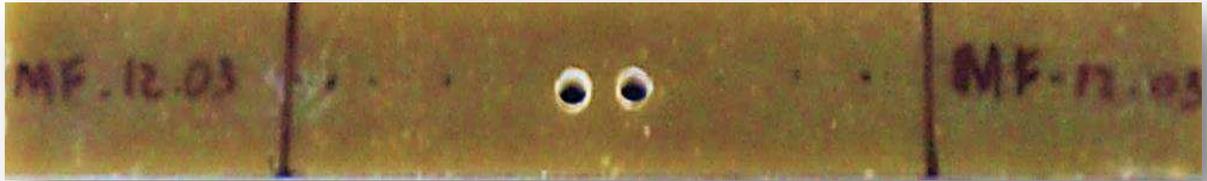
Fonte: Autoria própria

Nos corpos de prova com variação de espaçamento entre os furos temos três configurações testadas. Na configuração “a” temos uma distância entre raios de 6,2 mm, já na configuração “b” a distância entre raios é de 12 mm e na configuração “c” essa distância entre os raios foi de 48 mm, com comprimento útil de 127,0mm, largura de 36mm e diâmetro do furo central de 6,0 mm para que possamos verificar a interação entre eles, conforme a figura 22.

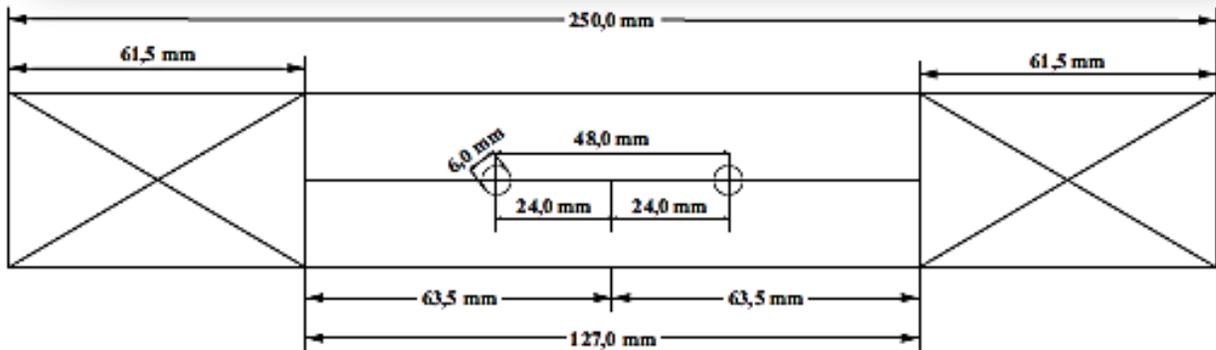
Figura 22 – Corpos de prova com variação do espaçamento entre os furos. (a) 6,2mm de distância entre raios, (b) 12mm de distância entre raios, (c) 48mm de distância entre raios.



a)



b)



c)

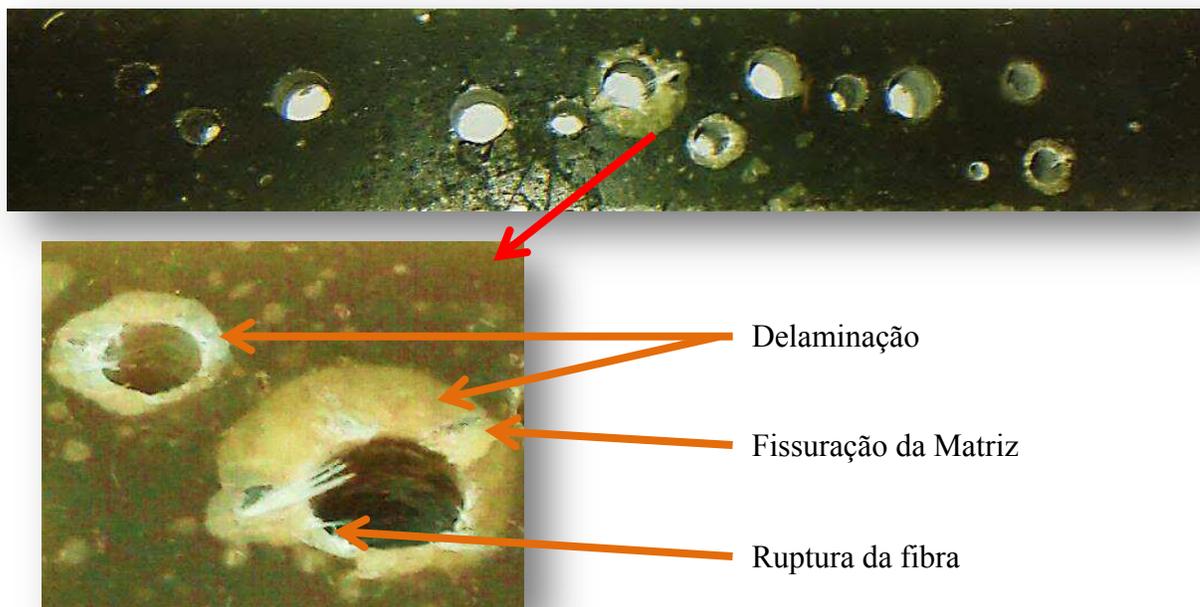
Fonte: Autoria própria

3.2.3 Estratégias para a otimização dos furos nos corpos de prova

Para a obtenção de furos bem-acabados foram necessários à realização de diversos procedimentos experimentais, de tal forma a obter-se uma metodologia específica para a furação. No início teve-se algumas dificuldades e houve alguns danos como observa-se na Figura 23.

Após um estudo detalhado sobre o tema verificou-se que as melhores condições para realização dessa tarefa seriam brocas helicoidais de aço rápido. Utilizou-se uma broca da marca “rocast perfection”, em uma furadeira de bancada, da marca Motomil FBM-130i que, então, possibilitou uma boa qualidade da superfície do furo.

Figura 23 – Danos no mecanismo de furação.



Fonte: Autoria Própria

Inicialmente utilizou um pré-furo com uma broca de 2 milímetros de diâmetro para evitar os danos, Em seguida brocas de 6,0 mm e 12 mm de diâmetro, para conclusão do trabalho, Figura 24.

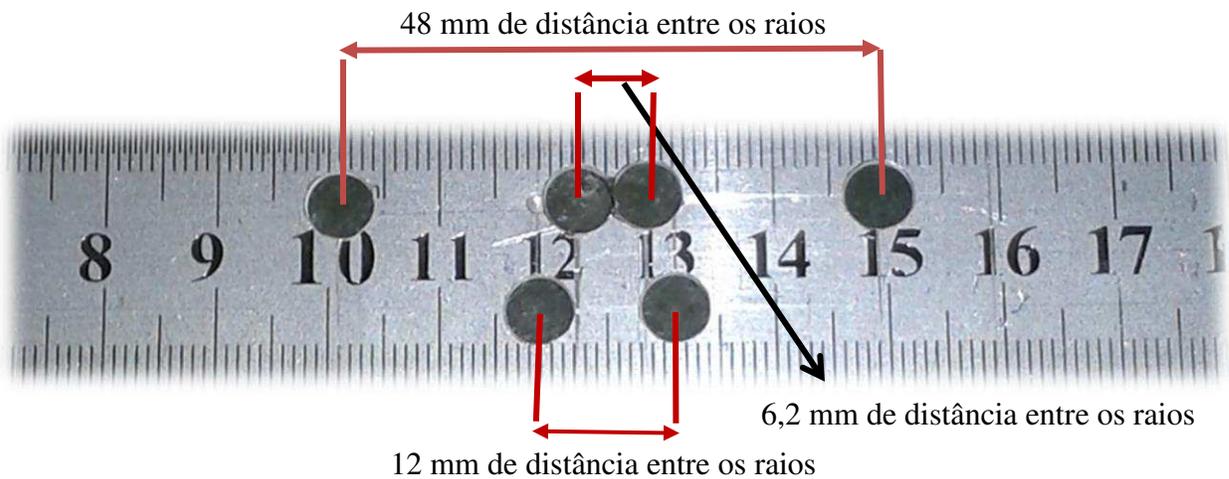
Figura 24 – Brocas helicoidais de aço rápido. (a) broca de 2 mm de diâmetro, (b) broca de 6 mm de diâmetro.



Fonte: Autoria Própria

Para obter-se uma melhor simetria e manter os espaçamentos entre os furos foi fabricado um gabarito, com as distâncias necessárias conforme a Figura 25.

Figura 25 – Gabarito das distâncias entre os furos.



Fonte: Autoria Própria

3.2.4 Fração volumétrica

A determinação da fração volumétrica de fibra e resina nos compósitos estudados foram obtidas pelo método da calcinação. Cinco amostras foram retiradas das placas de compósito e cortadas nas dimensões 10x20mm (mantendo-se as espessuras dos compósitos). As amostras foram previamente medidas e pesadas em uma balança digital da marca Marte com capacidade máxima de 210g e resolução de 0,1mg, sendo então levadas para um forno mufla onde permaneceram durante uma hora à 650°C para queima da matriz. Depois de queimada a fase polimérica, a fração em massa de fibra do compósito (M_f) foi determinada através da pesagem do cadinho com as fibras calcinadas.

Para a densidade do compósito se calculou o volume através da diferença de volumes, utilizando-se um picnômetro, e então, determinou-se a massa específica do compósito.

$$M_f = \frac{m_f}{m_c} 100 \quad (3.1)$$

$$M_m = 100 - M_f \quad (3.2)$$

$$V_f = \frac{\rho m_f}{\rho_f} \quad (3.3)$$

$$V_m = \frac{\rho m_m}{\rho_m} \quad (3.4)$$

$$V_v = 100 - (V_f + V_m) \quad (3.5)$$

Onde:

M_f – é o percentual mássico de fibra;

M_m – é o percentual mássico de resina (matriz);

m_f – é a massa de fibra (g);

m_c – é a massa total do laminado (g);

ρ – densidade volumétrica do compósito;

ρ_f – é a densidade volumétrica da fibra, com 2,56 (g/cm³) fornecido pelo fabricante das placas;

ρ_m – é a densidade volumétrica da matriz com 1,3 (g/cm³) fornecido pelo fabricante das placas;

V_f – é o percentual volumétrico de fibra;

V_m e V_v – são os percentuais volumétricos de resina (matriz) e de vazios, respectivamente.

3.2.5 Ensaio de tração uniaxial

Para determinar as propriedades mecânicas dos laminados compósitos, os corpos de prova foram selecionados e ensaiados à tração uniaxial de acordo com as normas ASTM D3039-14 e ASTM D5766-11.

Os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM). Foi utilizada uma máquina de ensaios mecânicos servo hidráulica MTS modelo 810, com célula de carga de 100 KN e com uma velocidade de deslocamento do atuador da máquina de 2,0 mm/minuto. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente ($25^{\circ}\text{C} \pm 2$). Durante a realização dos ensaios foram tomados alguns cuidados especiais, tais como ajustes dos corpos de prova nas garras da máquina para minimizar os problemas de “arraste” no início do carregamento e garantir, dimensões precisas do comprimento útil do corpo de prova.

3.2.6 Análise macroscópica do dano

Como forma de se avaliar o tipo de fratura predominante em cada amostra estudada foram geradas imagens da superfície de fratura dos corpos de prova, após ensaio de tração através de uma câmera digital da marca Sony, modelo DSC-W520, com resolução de 14.1 Megapixels. Dessa forma onde foi possível uma análise mais detalhada da fratura obedecendo-se às normas da ASTM D3039-14 e ASTM D5766-11.

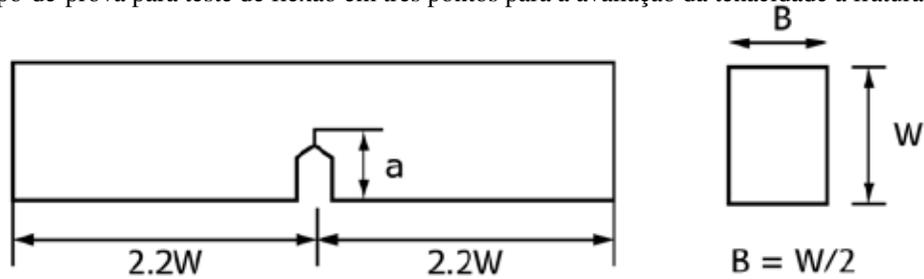
3.2.7 Tenacidade à fratura

Os ensaios de tenacidade à fratura foram realizados segundo a norma ASTM D5045-14, utilizando corpos de prova do tipo SENB (*Single edge notch bend*) como mostra na Figura 26, sendo que as dimensões foram definidas como sendo $W=17,2$ mm, $B=8,6$ mm, $a=8,6$ mm, para de 8 camadas e 8,6 espessura e $W=21,4$ mm, $B=10,7$ mm, $a=10,7$ mm, para de 10 camadas e 10,7 espessura.

Os entalhes foram feitos com uma serra circular com 0,5mm de espessura e a pré-trinca, serra circular de 0,2mm e a razão entre o comprimento inicial da trinca e a largura do corpo de prova (a/W), foi mantida em 0,5.

Os corpos de prova foram ensaiados em um sistema de ensaios foi utilizada uma máquina de ensaios mecânicos servo hidráulico MTS modelo 810, com célula de carga de 100KN e com uma velocidade de deslocamento do atuador da máquina de 10,0 mm/minuto. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente ($25^{\circ}\text{C} \pm 2$).

Figura 26 – Corpo-de-prova para teste de flexão em três pontos para a avaliação da tenacidade à fratura



Fonte: ASTM D5045-2014.

3.2.8 Visão geral da quantidade de corpos de prova

Na Tabela 6 apresenta uma visão geral da quantidade de números de corpos de prova utilizado nessa pesquisa.

Tabela 6 – Quantidade de corpos de prova

Ensaio	Quantidade de corpos de prova		
	8 camadas e 8,6 mm de espessura	10 camadas e 10,7 mm de espessura	
Densidade	5	5	
Fração Volumétrica	5	5	
Sem Furo	5	5	
Tração	Furo Central	6 mm	5
		12 mm	5
	Furo com Variação do Espaçamento (6 mm de diâmetro)	6,2 mm	5
		12 mm	5
		48mm	5
Tenacidade à fratura	5	5	

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de fração volumétrica, nos ensaios de tração uniaxial tanto para os corpos de prova sem descontinuidade geométrica quanto para os corpos de prova com a presença do furo central e também para aqueles com a variação da distância entre os raios.

Para cada condição com furo central e com a variação da distância entre os raios (diferentes distâncias entre os raios) também é apresentado o cálculo da Resistência Residual. Além disso, também foram analisadas as características das fraturas obtidas, em nível macroscópico, para todos os ensaios realizados e também de tenacidade à fratura.

4.1 Fração Volumétrica de Fibra dos Laminados

A densidade dos laminados produzidos, determinada pelo método de picnometria, e a fração volumétrica de fibras, obtida pelo método de queima, podem ser vistas na Tabela 7. Por estes resultados, percebe-se que ambos os laminados possuem densidades baixas, o que é excelente para aplicações em estruturas leves. Ressalta-se também que o laminado com 10 camadas apresenta uma densidade volumétrica maior que de 8 camadas devido ao volume de fibras que foi superior, porém não apresentando qualquer influência maior nos resultados obtidos com relação à resposta final do material.

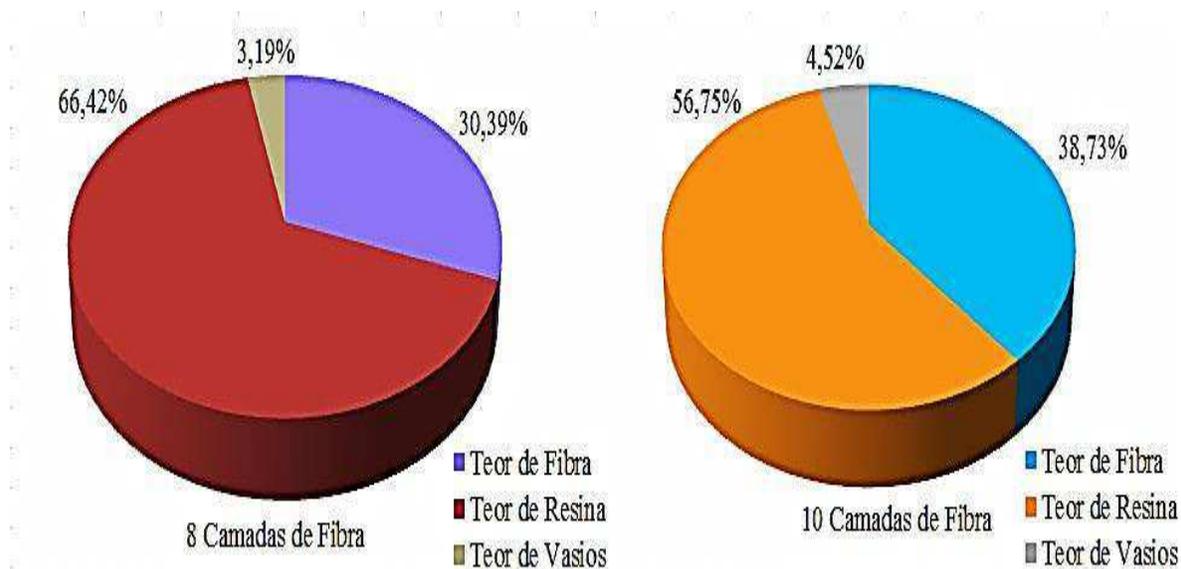
Tabela 7 – Densidade e fração volumétrica.

<i>Número de camadas</i>	<i>Densidade dos compósitos</i>	<i>Fração volumétrica de fibras</i>
8	1,60 g/cm ³	30,39 %
10	1,70 g/cm ³	38,73 %

Os resultados dos ensaios de calcinação para a determinação dos percentuais volumétricos dos constituintes são apresentados na Figura 27. Ele apresenta os compósitos com 8 e 10 camadas.

Observa-se, que o percentual de vazios nas duas configurações é baixo, quando se leva em consideração o processo de fabricação manual utilizado. Apesar de ser um processo industrial há uma boa uniformidade no processo.

Figura 27 – Gráfico 1 das frações volumétricas dos compósitos.



Fonte: Autoria própria

4.2 Fator de Concentração (K_t)

Para o estudo do fator de concentração de tensão foi analisados, através de gráficos e formulas do Pilkey (2008) que confirmam que os laminados estudados para único furo possuem características de uma placa infinita, com o K_t próximo a 3,0.

Tabela 8 – Análise do fator de concentração.

	Fator de Concentração (K_t)	
	Furo	Valor
Furo Central	6 mm	2,96
	12 mm	2,92
Dois Furos com Variação da distância	6,2 mm	2,56
	12 mm	2,71
	48 mm	2,91

Para os casos de dois furos com a variação da distância entre os furos o comportamento apresentado também foi o de uma placa infinita. Verificou-se que quanto menor a distância entre eles, menor o fator de concentrador de tensão, voltando a ficar próximo a 3,0.

4.3 Análise dos Resultados de Ensaio de Tração Realizado nas Placas de Compósitos

Para facilitar o entendimento dos estudos comparativos de tração, os mesmos foram divididos em três tipos de casos:

Caso 1 – *Análise dos ensaios de tração sem furo e com furo central;*

Caso 2 – *Análise dos ensaios de tração sem furo e com furo com a variação das distâncias entre os furos;*

Caso 3 – *Análise dos ensaios de tração com furo central e com furo com a variação das distâncias entre os furos.*

De acordo com o número de camadas e das espessuras, as placas formam denominadas de “A” e “B”:

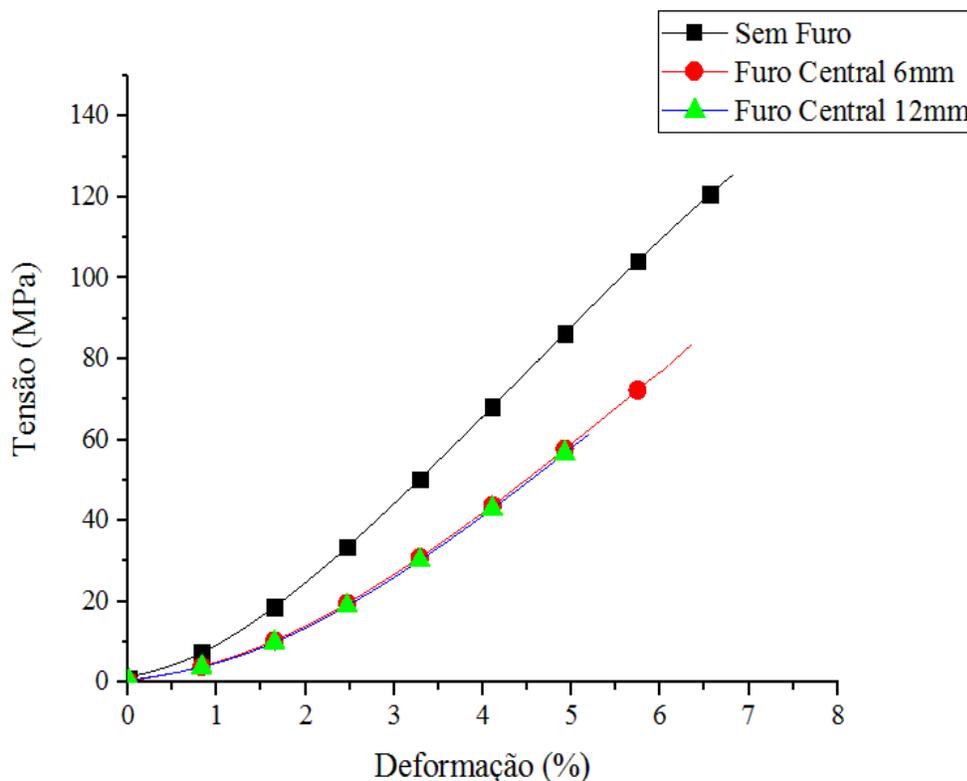
A – *8 camadas e espessura de 8,6 mm;*

B – *10 camadas e espessura de 10,7 mm.*

4.3.1 Caso 1 A – *Análise dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova de compósitos sem furo e com furo central (6 ou 12 mm de diâmetro) de 8 camadas e espessura de 8,6 mm.*

Os testes de tração foram realizados conforme o item 3.2.5. As curvas tensão x deformação geradas nesses testes, típicas de cada um dos materiais testados, podem ser vistas na Figura 28. A não linearidade inicial das curvas tensão x deformação corresponde ao escorregamento e acomodamento dos corpos de prova às garras da máquina do ensaio mecânico.

Figura 28 – Curvas de tensão x deformação para os corpos de prova sem furo e com furo central.



Fonte: Autoria Própria

Como pode ser observada na Figura 28, a tensão de fratura do laminado sem o furo é superior aos demais, isso é justificado pela não presença do concentrador de tensão. Para a placa com furo de 12 mm de diâmetro o efeito na queda de tensão de fratura foi ainda maior.

Tabela 9 – Valores médios e desvios padrões para as tensões de fratura e deformação de fratura, a partir das curvas de tensão x deformação para os corpos de prova sem furo e com furo.

Propriedades Mecânicas	Resistência Última (MPa)	Desvio Padrão (%)	Deformação de Ruptura (%)	Desvio Padrão (%)
Sem Furo	125,52	4,23	6,92	0,12
Furo Central	6 mm	83,59	2,82	0,25
	12 mm	61,44	4,09	0,46

Na Tabela 9, observa-se o valor de tensão de fratura do compósito sem furo é 33% e 51% superior aos dos compósitos com furos centrais de “6,0 mm” e “12,0 mm” de diâmetro, respectivamente, o que reforça a nocividade do concentrador de tensão. O fato da chapa com furo central de 12,0 mm apresentar uma tensão de fratura ainda menor é explicado pelo maior tamanho do defeito, já que o efeito do concentrador de tensão em si é o mesmo, ou seja K_t nominal e igual a 3,0. Quando se analisa este comportamento pela mecânica da fratura, tendo base à tenacidade à fratura dos compósitos, esta característica ficará bem mais clara.

4.3.2 Caso 2 A – Análise dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova de compósitos sem furo e com dois furos (6 mm de diâmetro) com a variação da distância entre os furos com 8 camadas e espessura de 8,6mm.

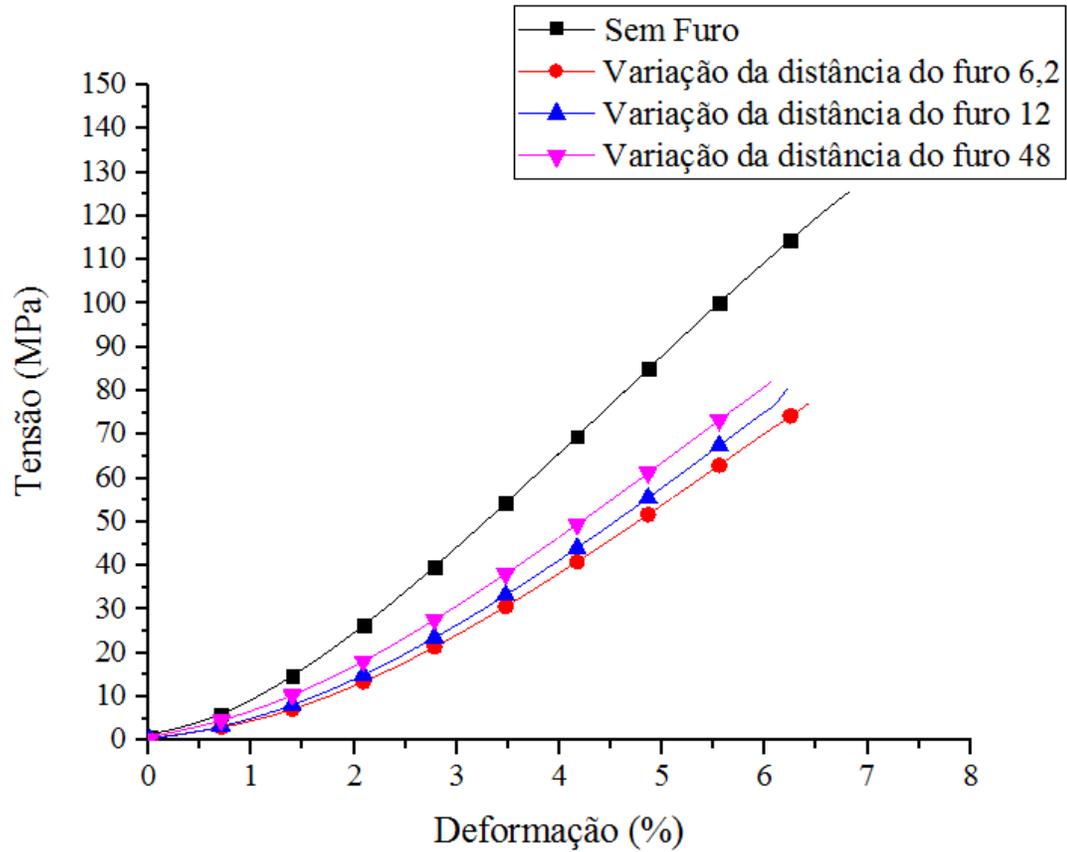
No que se refere ao ensaio de tração uniaxial para os corpos de provas sem furo e com a variação da distância entre os furos na Figura 29, observam-se as curvas de tensão x deformação obtidas. Observa-se que o comportamento apresentado pelo caso 2A é bastante semelhante ao comportamento verificado para o caso 1A. Vale ressaltar que a não linearidade inicial das curvas tensão x deformação corresponde ao escorregamento e acomodamento dos corpos de prova às garras da máquina do ensaio mecânico.

Os valores médios e os desvios padrões obtidos para as tensões de fratura e deformação de fatura estão mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores médios e desvios padrões para as tensões de fratura e deformação de fratura, a partir das curvas de tensão x deformação para os corpos de prova sem furo e com dois furos com a variação da distância entre os furos.

Propriedades Mecânicas		Resistência Última (MPa)	Desvio Padrão (%)	Deformação de Ruptura (%)	Desvio Padrão (%)
Sem Furo		125,52	4,23	6,92	0,12
Furo com Variação da distância (6 mm de diâmetro)	6.2 mm	76,95	6,66	6,55	0,27
	12 mm	80,35	4,82	6,20	0,23
	48 mm	82,58	4,89	6,35	0,39

Figura 29 – Curvas tensão x deformação para os corpos de prova sem furo e com dois furos com variação da distância entre os furos.



Fonte: Autoria Própria

Ao se comparar os resultados obtidos para os corpos de prova sem furo e com dois furos com variação da distância entre os furos, percebe-se que a variação da distância entre os furos, nesse caso, resultou em uma perda de, aproximadamente, 39%, para 6,2 mm de distância entre os furos, de 36% para 12 mm de distância entre os furos, e 34% para 48 mm de distância entre os furos, em termos de tensão de ruptura. Esses valores são semelhantes ao encontrado para o furo central de 6 mm, caso 1A, para o qual a perda foi de 33% quando comparado ao valor obtido para chapa sem furo.

4.3.3 Caso 3 A – Análise dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova de compósitos com furo central (6 mm de diâmetro) e com dois furos (6 mm de diâmetro) com a variação da distância entre os furos, com 8 camadas e espessura de 8,6 mm.

Na Figura 30 observam-se as curvas tensão x deformação obtido para os corpos de prova de compósitos com furo central e com dois furos com a variação da distância entre os furos. O mesmo comportamento observado para os casos 1 e 2, foi registrado para o caso 3. Ressalta-se aqui que a presença do furo central, bem como a variação das distâncias entre os furos, não alterou o comportamento do laminado em termos da relação tensão x deformação. Como ocorreu nos casos anteriores a não linearidade inicial das curvas tensão x deformação corresponde ao escorregamento e acomodamento dos corpos de prova às garras da máquina do ensaio mecânico.

Na Tabela 11, são apresentados os valores médios, bem como seus respectivos desvios padrões, obtidos para a tensão de fratura e de deformação de fratura para os compósitos com descontinuidades.

Tabela 11 – Valores médios e desvios padrões para as tensões de fratura e deformação de fratura, a partir das curvas de tensão x deformação para os corpos de prova com furo central e com dois furos com variação da distância entre os furos.

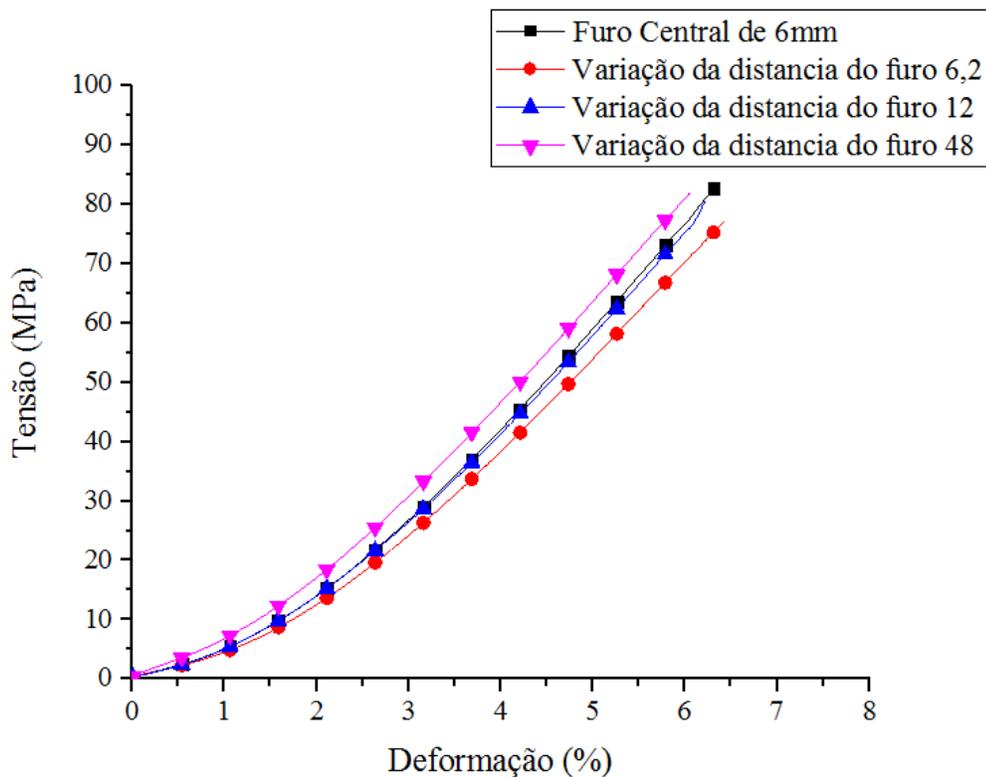
Propriedades Mecânicas		Resistência Última (MPa)	Desvio Padrão (%)	Deformação de Ruptura (%)	Desvio Padrão (%)
Furo Central	6 mm	83,59	2,82	6,43	0,25
Furo com Variação da distância (6 mm de diâmetro)	6,2 mm	76,95	6,66	6,55	0,27
	12 mm	80,35	4,82	6,20	0,23
	48 mm	82,58	4,89	6,35	0,39

Observa-se que à medida que aproximamos os dois furos (alinhados) para 6,2 mm a tensão de fratura foi mais baixa em relação aos furos com a variação da distância de 12 mm e 48 mm, era de esperar-se que efeito atenuante sobre a concentração de tensão, isto pela proximidade entre os furos.

Na verdade, os cálculos teóricos para os valores dos concentradores de tensão para os furos com a variação da distância de 6,2 mm, 12,0 mm e 48,0 mm foram K_t igual a 2,56, 2,71 e 2,91 (subitem 4,2 fator de concentração de tensão) neste trabalho.

Podemos concluir com base nos desvios padrões e nos valores de $K_t = 2,71$ (distância entre furos de 12,0 mm) e $K_t = 2,91$ (distância entre os furos de 48,0 mm) que a tensão de fratura destes compósitos foram as mesmas verificadas para os compósitos com um furo central de diâmetro de 6,0 mm (Tabela 9). Já para a distância entre os furos de 6,2 ($K_t = 2,56$) o resultado indica que a presença do segundo furo influenciou de modo negativo, visto que a tensão de fratura foi menor. Este fato poderá está relacionado com a influência do tamanho e da forma aparente que passou a ter a descontinuidade, ou acabamento inadequado dos furos pela a proximidade dos dois furos.

Figura 30 – Curvas tensão x deformação para os corpos de prova com furo central e com dois furos com a variação da distância entre os furos



Fonte: Autoria Própria

4.3.4 Caso 1 B Análise dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova de compósitos sem furo e com furo central (6 ou 12 mm de diâmetro) com 10 camadas e espessura de 10,7 mm

As curvas tensão x deformação geradas nesses testes, típicas de cada um dos materiais testados, podem ser vistas na Figura 31. Ressaltando-se que a não linearidade inicial das curvas tensão x deformação corresponde ao escorregamento e acomodamento dos corpos de prova às garras da máquina do ensaio mecânico.

Como pode ser observado na Figura 31 a tensão de fratura do laminado sem o furo é superior ao demais, isso é justificado pela não presença do concentrador de tensão. Para a placa de compósito de 12 mm de diâmetro o efeito na queda de tensão de fratura ainda foi maior.

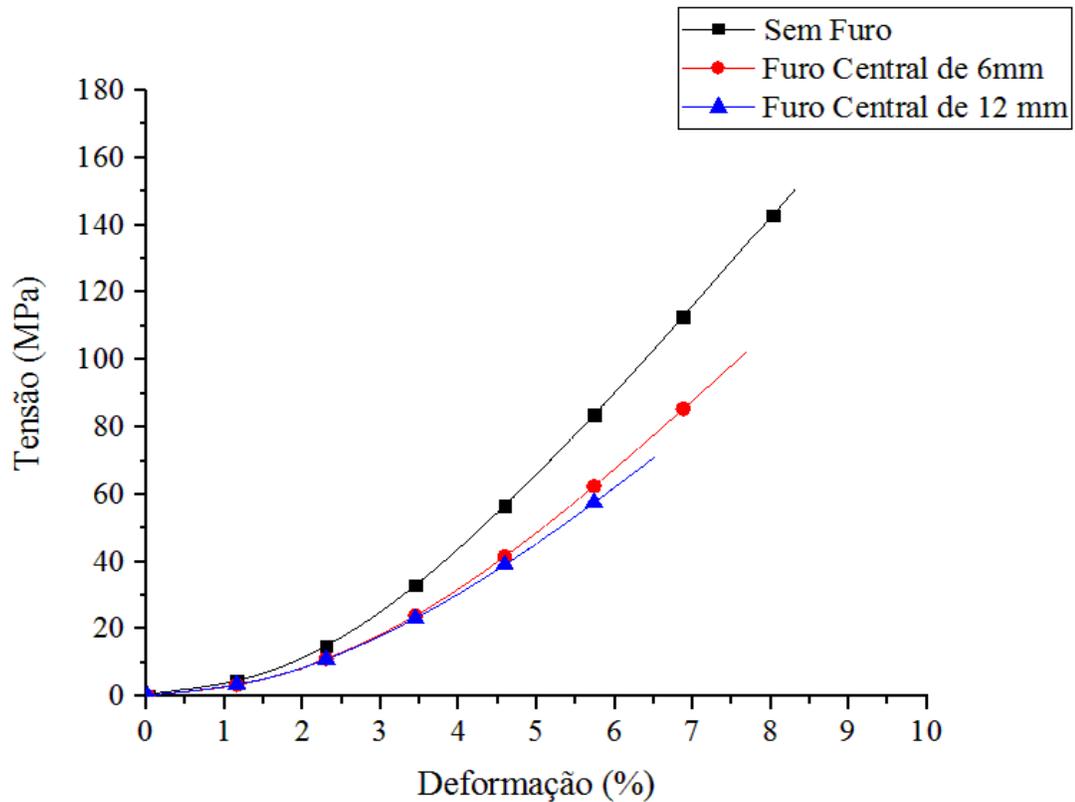
Tabela 12 – Valores médios e desvios padrões para as tensões de fratura e deformação de fratura, a partir das curvas de tensão x deformação para os corpos de prova sem furo e com furo central.

Propriedades Mecânicas	Resistência Última (MPa)	Desvio Padrão (%)	Deformação de Ruptura (%)	Desvio Padrão (%)
Sem Furo	150,58	7,50	7,83	0,06
Furo Central	6 mm	102,59	1,77	0,42
	12 mm	71,06	1,40	0,03

Os resultados das propriedades mecânicas sob tração podem ser vistos na Tabela 12, onde observa-se que o valor de tensão de fratura do compósito sem furo é 32% e 53% superior aos compósitos com furos centrais de “6 mm” e “12 mm” de diâmetro, respectivamente. A mesma análise já realizada para o Caso 1 A, aplica-se também para este caso, ou seja, o fato da chapa com de 12,0 mm apresentou uma tensão de fratura ainda menor é explicado pelo maior tamanho do defeito, já que o efeito do concentrador de tensão, K_t se aproxima de 3,0. Quando se analisa este comportamento pela mecânica da fratura, tendo como base a tenacidade à fratura do compósito, esta característica fica bem mais clara, como podemos ver na seção 4.6.

Outro fato que se observa na Tabela 12 é que a tensão fratura da placa sem furo (150,58 MPa), de 10 camadas e espessura de 10,7 mm foi superior a tensão de fratura (125,52 Mpa) da placa sem furo com 8 camadas e espessura de 8,6mm. Esta diferença deve-se, principalmente, a diferença de fração volumétrica entre os dois compósitos fabricados (Tabela 6).

Figura 31 – Curva tensão x deformação para os corpos de prova sem furo e com furo central.



Fonte: Autoria Própria

4.3.5 Caso 2 B – *Análise dos ensaios de tração realizados nos corpos de provas de compósitos com 10 camadas e espessura de 10.7 mm sem furo e com dois furos (6 mm de diâmetro) com variação da distância entre os furos.*

Para os corpos de provas sem furo e com a variação da distância entre os furos, na Figura 32 observam-se as curvas tensão x deformação obtidas. O comportamento é semelhante ao observado para o Caso 2 A

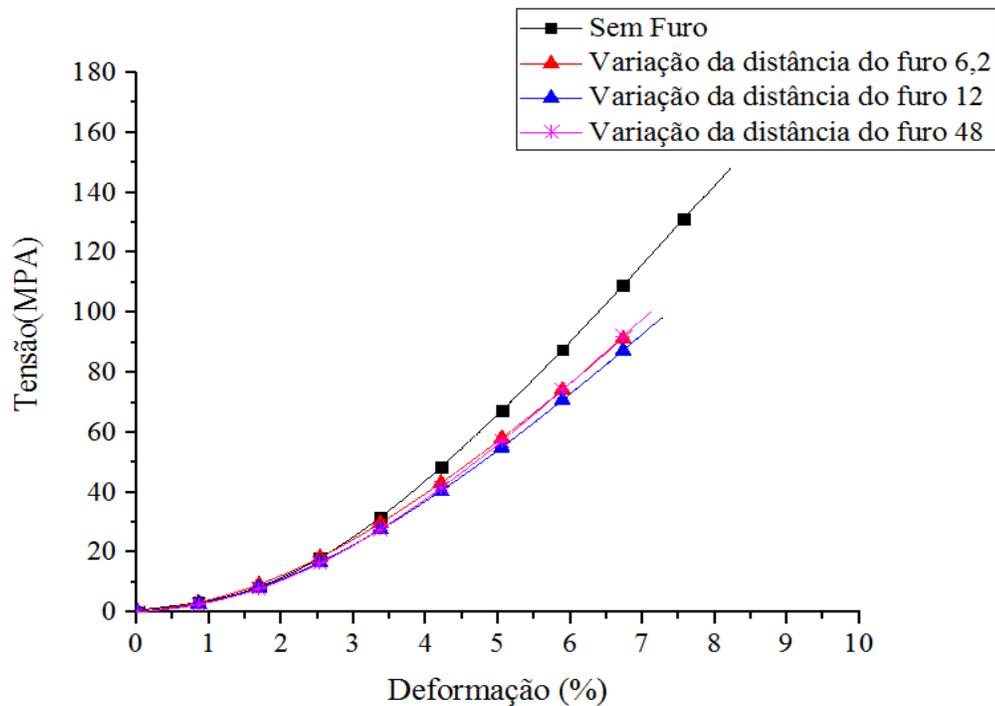
Os valores médios e os desvios padrões obtidos para as tensões de fratura e deformações de fratura estão mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores médios e desvios padrões para as tensões de fratura e deformação de fratura, a partir das curvas de tensão x deformação para os corpos de prova sem furo e com dois furos com variação da distância entre os furos.

Propriedades Mecânicas		Resistência Última (MPa)	Desvio Padrão (%)	Deformação de Ruptura (%)	Desvio Padrão (%)
Sem Furo		150,58	7,50	7,83	0,06
Furo com Variação da distância (6 mm de diâmetro)	6.2 mm	93,93	1,36	7,15	0,01
	12 mm	98,28	0,81	7,20	0,04
	48 mm	100,01	0,95	7,23	0,06

Ao se comparar o resultado obtido para os corpos de prova sem furo e com dois furos com a variação da distância entre os furos, percebe-se que a presença da variação da distância entre os furos, nesse caso, resultou em uma perda de, aproximadamente, 37%, 35% e 33%, em termos de Resistência Última à Tração. Esses valores são próximos ao encontrado para a placa com furo central de 6mm. Em geral o Caso 2 B é semelhante em termos de Resistência Mecânica ao Caso 2 A.

Figura 32 – Curvas tensão x deformação para os corpos de prova sem furo e com dois furos com variação da distância entre os furos.

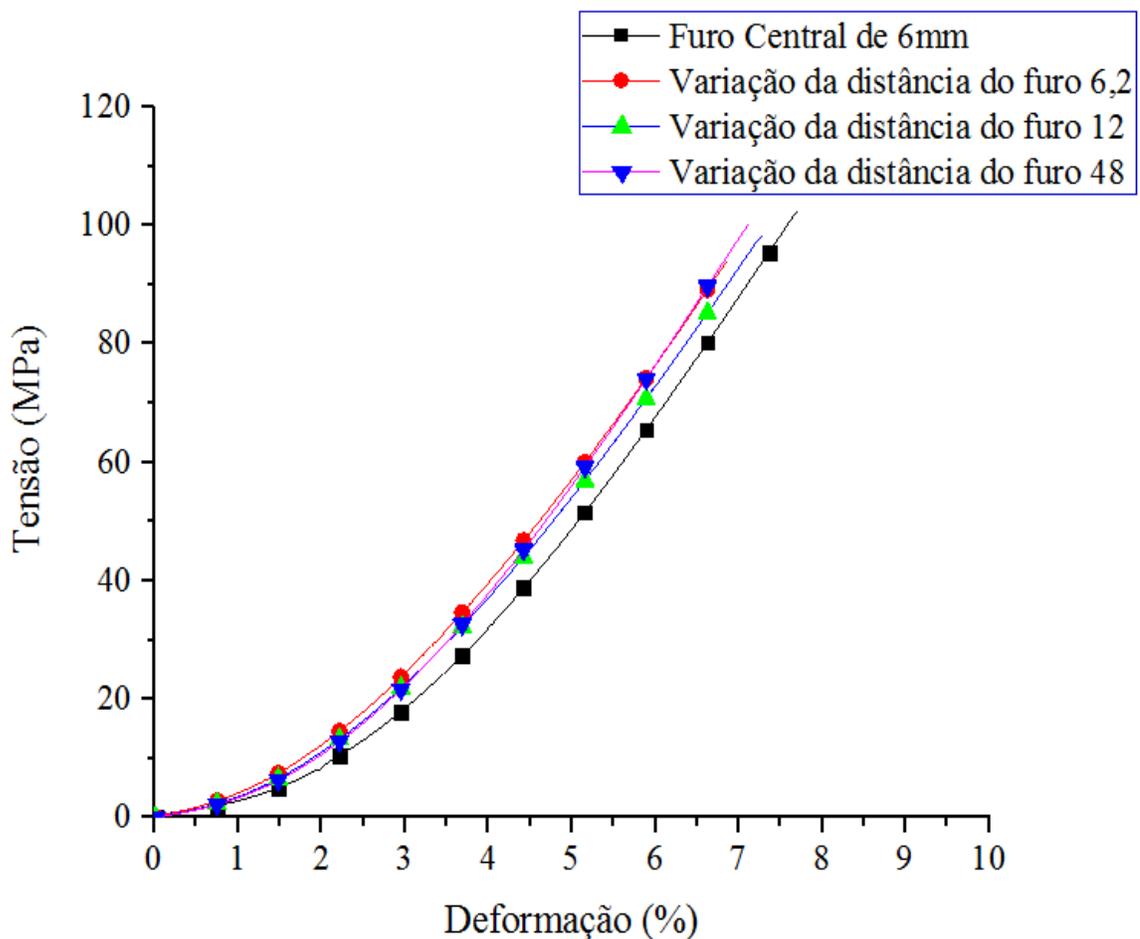


Fonte: Autoria Própria

4.3.6 Caso 3 B – Análise dos ensaios de tração realizados nos corpos de provas de compósitos com 10 camadas e espessura de 10,7 mm com furo central (6mm de diâmetro) e com dois furos(6 mm de diâmetro) com variação da distância entre os furos.

Na Figura 33 têm-se as curvas de tensão x deformação obtidas para os corpos de prova de compósitos com furo central e com dois furos com a variação da distância entre os furos. Observa-se o mesmo comportamento observado para o caso 3 A.

Figura 33 – Curva tensão x deformação para os corpos de prova com furo central e com dois furos com variação da distância entre os furos.



Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 14, são apresentados os valores médios, bem como seus respectivos desvios padrões, obtidos para as tensões de fratura e deformação de fratura dos compósitos estudados. Novamente observa-se que as tensões de fratura para os corpos de prova com dois furos, com distâncias entre os furos de 12,0 mm e 48,0 mm, considerando os desvios padrões, repetem a tensão de fratura do corpo de prova com um furo central de diâmetro igual a 6,0 mm, ou seja, comportamento semelhante à do corpo de prova com um furo central de 6, 0 mm de diâmetro. Observa-se também para o corpo de prova com dois furos separados para uma distancia de 6,2 mm teve uma influência negativa na presença do segundo furo, como vimos no caso 3 A.

Tabela 14 – Valores médios e desvios padrões para as tensões de fratura e deformação de fratura, a partir das curvas de tensão x deformação para os corpos de prova com furo central e com dois furos com variação da distância entre os furos.

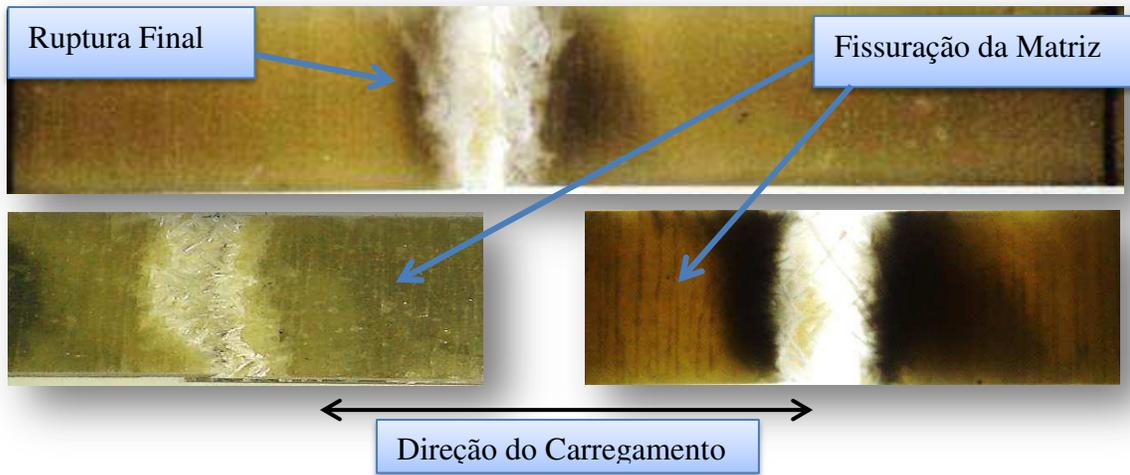
Propriedades Mecânicas		Resistência Última (Mpa)	Desvio Padrão (%)	Deformação de Ruptura (%)	Desvio Padrão (%)
Furo Central	6mm	102,59	1,77	7,88	0,42
Furo com Variação da distância (6 mm de diâmetro)	6.2 mm	93,93	1,36	7,15	0,01
	12 mm	98,28	0,81	7,20	0,04
	48 mm	100,01	0,95	7,23	0,06

4.4 *Estudo Macroscópico da Fratura*

Para o estudo macroscópico da fratura a análise do processo de fratura foi feita com base na norma ASTM D 3039-14 para os corpos de prova sem furo com 8 camadas e 10 camadas.

A fratura do compósito sem furo ocorreu de forma frágil, com total separação do corpo de prova. Nota-se a ocorrência de uma fratura, segundo a Norma ASTM D3039-14 do tipo **LGM**. Observa-se, também, que as fissuras se propagam transversalmente à direção da carga.

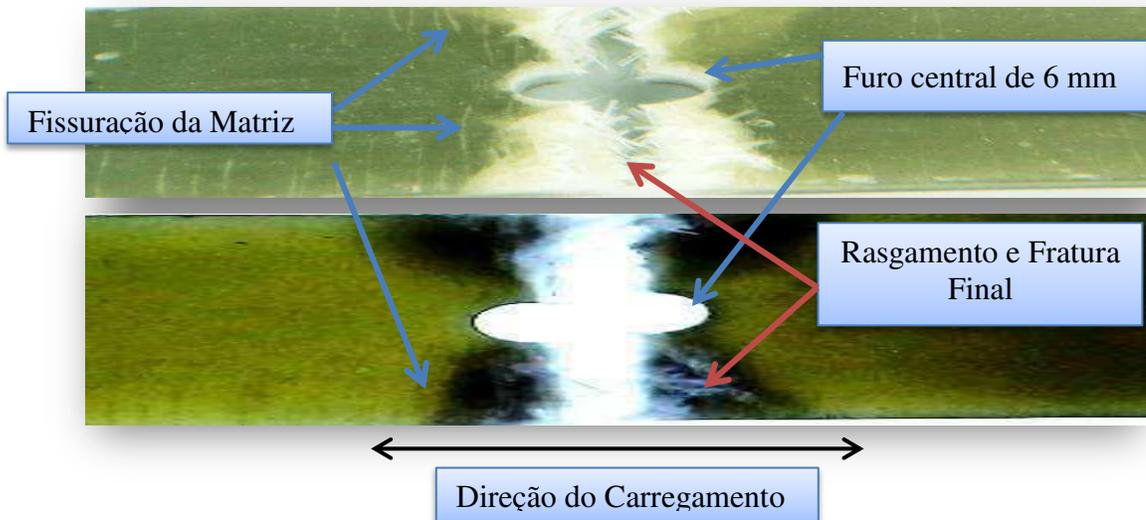
Figura 34 – Característica final da fratura em compósitos sem furo.



Fonte: Autoria Própria

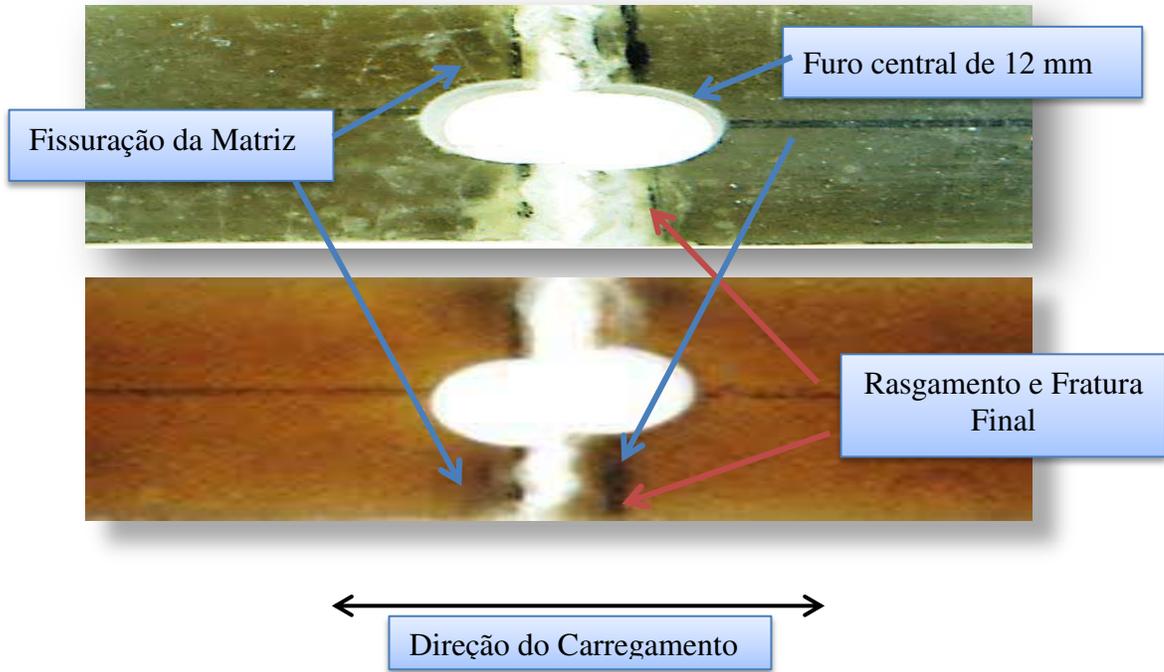
A Análise da fratura dos corpos de prova com furos e com a variação da distância entre os furos foi realizada com o auxílio da norma ASTM D5766-11. As fraturas foram classificadas como lateral ao furo e no meio do galgo (**LGM**), mostrada nas Figuras 35 a 38. Na Figura 39 à fratura foi classificada como angular e no meio do galgo (**AGM**).

Figura 35 – Característica final da fratura em compósitos com furo central de 6 mm.



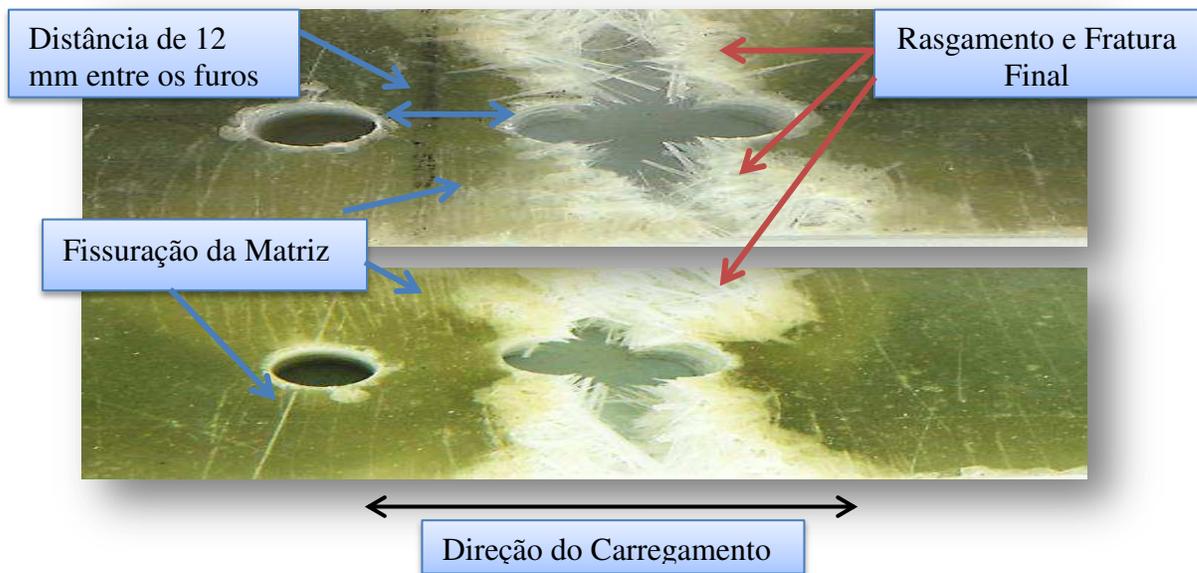
Fonte: Autoria Própria

Figura 36 – Característica final da fratura em compósitos com furo central 12mm.



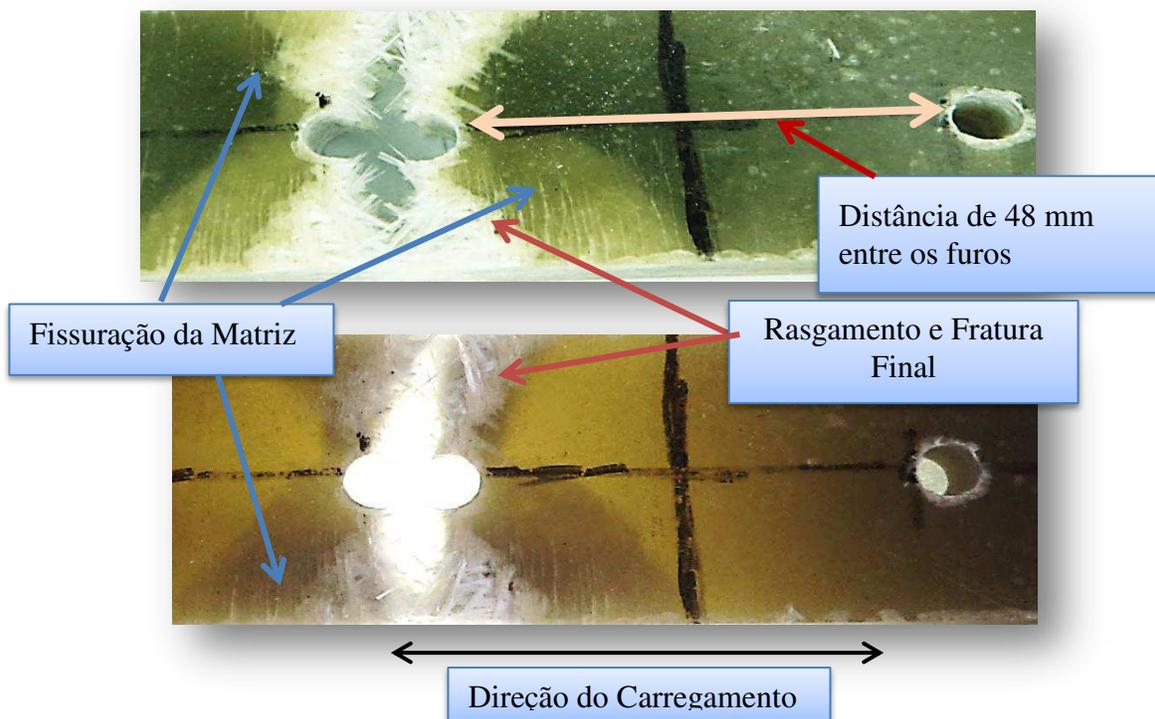
Fonte: Autorial Própria

Figura 37 – Característica final da fratura em compósitos com variação da distância de 12mm entre os furos.



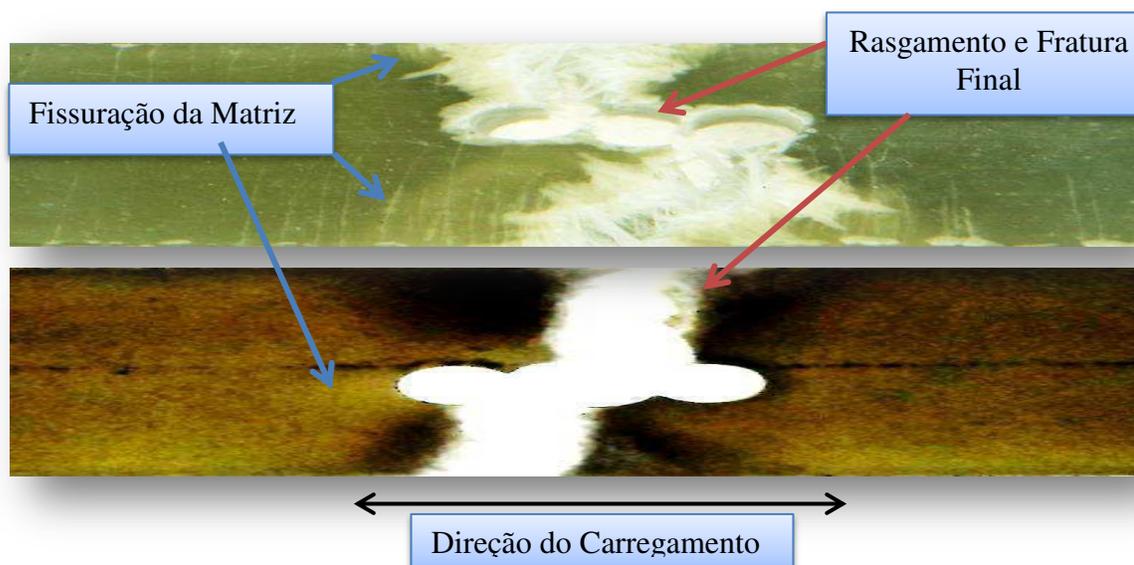
Fonte: Autorial Própria

Figura 38 – Característica final da fratura em compósitos com variação da distância de 48 mm entre os furos.



Fonte: Autoria Própria

Figura 39 – Característica final da fratura em compósitos com variação da distância de 6,2mm entre os furos



Fonte: Autoria Própria

4.5 Resistência Residual

Para materiais considerados isotrópicos e quase-isotrópicos, o valor do fator de concentração de tensão para um furo circular é de aproximadamente 3 (três), o que leva a uma razão da resistência do material com descontinuidade geométrica/sem descontinuidade geométrica, denominada de Resistência Residual (RS), de aproximadamente 0,68 (O'Higgins *et al.*, 2008), valor este próximo aos determinados para o furo central de 6,0 mm e com a variação da distância entre os furos conforme mostra nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 – Análise da Resistência Residual realizado nos corpos de prova de compósitos com furo central e com dois furos com variação da distância entre os furos, com 8 camadas e espessura de 8,6 mm.

		Resistência Última (MPa)	Resistencia Residual
Sem Furo		125,52	–
Furo Central	6 mm	83,59	0,67
	12 mm	61,44	0,49
Furo com Variação da distância (6 mm de diâmetro)	6.2 mm	76,95	0,61
	12 mm	80,35	0,64
	48 mm	82,58	0,66

Tabela 16 – Análise da Resistência Residual realizado nos corpos de prova de compósitos com furo central e com dois furos com variação da distância entre os furos, com 10 camadas e espessura de 10,7 mm.

		Resistência Última (Mpa)	Resistencia Residual
Sem Furo		150,58	–
Furo Central	6 mm	102,59	0,68
	12 mm	71,06	0,47
Furo com Variação da distância (6 mm de diâmetro)	6.2 mm	93,93	0,62
	12 mm	98,28	0,65
	48 mm	100,01	0,66

Deve-se observar que ao se analisar as Tabelas 15 e 16 a resistência residual para os compósitos de 8 e 10 camadas com furo central de 12,0 mm foi menor (aproximadamente 0,49 e 0,47) e, portanto, em discordância com (O'HIGGINS *et al.*, 2008). Entretanto, na literatura técnica especializada são encontrados resultados semelhantes a estes, em que incrementos na dimensão dos furos provocam a queda da resistência residual (ERÇIN *et al.*, 2013; GREEN; WISNOM; HALLETT, 2007).

4.6 *Ensaio de Tenacidade à fratura*

Na Figura 40 observam-se as curvas de carga x deslocamento ponto de aplicação de carga, dos dois compósitos estudados, para a determinação da tenacidade à fratura (K_{IC})

De posse dos valores P_{max} e o valor da carga P_q , ver na Tabela 17, verificou-se a relação entre eles, (Norma ASTM D5045-14), Equação 4.1. A razão encontrada para os corpos de prova com 8 camadas e 10 camadas se manterão menores que 1,1, satisfazendo as exigências da norma para o ensaio de tenacidade à fratura válido.

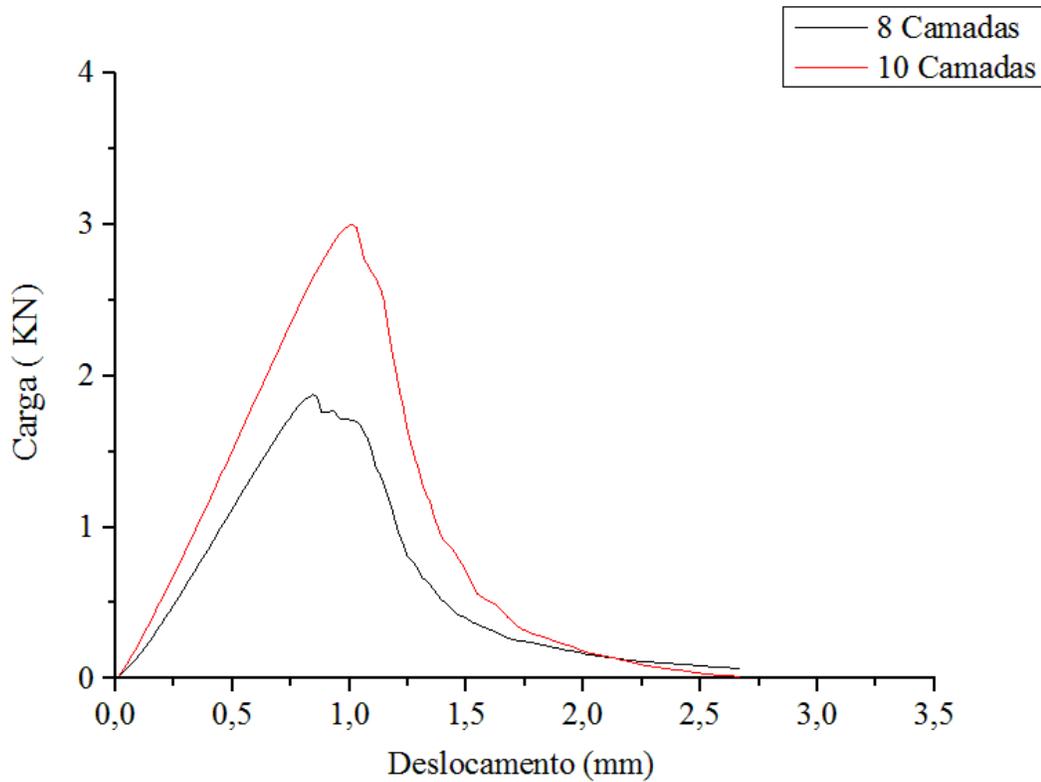
$$\frac{P_{max}}{P_q} < 1,1 \quad (4.1)$$

Tabela 17 – Valores médios para P_{max} e P_q

Valores médios	P_{max} (KN)	P_q (KN)
8 camadas e espessura de 8,6mm	1,88	1,84
10 camadas e espessura de 10,7 mm	3,00	2,98

Satisfazendo-se a condição anterior, calculou-se o fator de intensidade de tensão provisório, K_Q , de 16,99 MPa . m^{1/2} e 20,21 MPa . m^{1/2} para os corpos de prova com 8 camadas e 10 camadas e, respectivamente.

Figura 40 – Curvas de carga x deslocamento do ponto da aplicação da carga" do teste de flexão em três pontos para determinação do K_{IC} .



Fonte: Autoria Própria

Após a obtenção, de um valor provisório do fator de intensidade de tensão é necessário verificar as seguintes condições para que o valor provisório passe a representar o fator de intensidade de tensão K_{IC} (tenacidade à fratura sob deformação plana do material):

$$a, B, (w - a) > 2,5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_y} \right)^2 \quad (4.2)$$

Na Tabela 18 são comparados os valores, sob o teste para o ensaio de tenacidade à fratura K_{IC} .

Tabela 18 – Valores que sob teste para o ensaio de tenacidade à fratura. (K_{IC})

8 camadas e espessura de 8,6mm				10 camadas e espessura de 10,7 mm			
			$2,5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_y} \right)^2$				$2,5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_y} \right)^2$
B(m)	0,0086	<	0,0458	B(m)	0,0107	<	0,0450
a(m)	0,0086	<	0,0458	a(m)	0,0107	<	0,0450
(w-a)(m)	0,0086	<	0,0458	(w-a)(m)	0,0107	<	0,0450

Observam-se que as condições exigidas não foram satisfeitas, portanto os fatores de intensidade de tensão K_Q (críticos) determinados não podem ser considerados valores de K_{IC} (tenacidade à fratura sob deformação plana). Portanto, são considerados valores críticos dependentes da geometria dos corpos de prova usados.

Na Tabela 19 são comparados os valores, sob o teste para o ensaio de tenacidade à fratura K_I para as placas estudadas com furo central.

Tabela 19 – Valores para o K_I de fratura das placas estudadas com furo central

8 camadas e espessura de 8,6mm		10 camadas e espessura de 10,7 mm	
6 mm	5,16 MPa . m ^{1/2}	6 mm	6,34 MPa . m ^{1/2}
12 mm	5,37 MPa . m ^{1/2}	12 mm	6,21 MPa . m ^{1/2}

Na tabela 19 observam-se os valores críticos do fator de intensidade de tensão determinados a partir dos valores da tensão de fratura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração com furos centrais de 6,0 e 12,0 mm (Tabelas 9 e 12 e equação 2.2). Nota-se que uma pequena diferença entre os valores para a placa de 10 camadas quando comparada com a placa de 8 camadas. A pequena diferença está relacionada principalmente com a diferença de fração volumétrica entre as duas placas.

Observou que considerando a mecânica da fratura (fator de intensidade de tensão), o valor crítico de fratura independe do diâmetro do furo (descontinuidade) na placa. Ou seja, a placa entrará em colapso quando a combinação entre a tensão aplicada e a dimensão do defeito gerar um fator de intensidade de tensão (K) aplicado que igual e ou ultrapasse o valor crítico do material.

Uma hipótese que pode ser criada quando comparamos os valores de K_I de fratura (Tabela 19) com os valores de K_Q determinados nos ensaios de tenacidade à fratura reafirma a análise realizada a partir da Tabela 18, ou seja, os corpos de prova de tenacidade à fratura válidos, devem reproduzir um valor de K_{IC} próximo aos valores críticos de K_I obtidos para as chapas com furos.

5 CONCLUSÕES

Analisados os resultados obtidos podemos concluir que:

- ❖ Os resultados de análise de tensão residual indicam que a resistência a tração uniaxial dos compósitos foi reduzidos com mais severidade para os compósitos com um único furo central de 12mm. Esse resultados indicam que os compósitos foram mais “sensíveis” a presença de um furo com maior diâmetro do que com dois furos com a variação da distância entre os mesmos.
- ❖ A tensão de fratura do laminado sem a descontinuidade geométrica foi superior aos demais, isso é justificado pela não presença do concentrador de tensão. Para as duas espessuras de placa com furo central de 12 mm de diâmetro o efeito na queda de tensão de fratura foi ainda maior.
- ❖ Os resultados dos ensaios de tração uniaxial com corpos de prova com dois furos e variando a distância entre os centros dos mesmos indicam que a partir do espaçamento de 12 mm o comportamento a tensão é semelhante ao ensaio de tração uniaxial de um corpo de prova com um único furo: “é como se o segundo furo não fosse “percebido” pelo campo de tensão”.
- ❖ De modo geral, o comportamento do compósito estudado frente ao carregamento de tração uniaxial em todas as condições apresentou um comportamento “**frágil**” até a fratura;
- ❖ Quanto ao comportamento à fratura dos compósitos estudados, de uma forma geral, apresentaram fratura final do tipo **LGM**, já para os corpos de prova com a variação da distância de 6,2 mm entre os furos à fratura final foi do tipo **AGM**.

- ❖ Os resultados de análise de tensão residual indicam que a resistência a tração uniaxial dos compósitos foi reduzidos com mais severidade para os compósitos com um único furo central de 12mm. Esse resultados indicam que os compósitos foram mais “sensíveis” a presença de um furo com maior diâmetro do que com dois furos com a variação da distância entre os mesmos;

- ❖ No ensaio de tenacidade à fratura não foram possível calcular os valores K_{IC} (tenacidade à fratura sob deformação plana) para as espessuras das placas estudadas. Para obter os valores de K_{IC} sugerimos as seguintes espessuras de 45,8 mm para a placa de 8 camadas e 45,0 mm para a placa de 10 camadas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando a continuação do estudo podemos sugerir sugestões para aprofundamento sobre o tema:

- Desenvolver novas configurações de compósitos utilizando outros tipos e formas para o reforço com descontinuidades geométricas;
- Realizar ensaio de flexão em três e quatro pontos e ensaio de impacto com descontinuidade geométrica
- Modelagem computacional através do método de elementos finitos, para comparar com os resultados experimentais encontrados;
- Realizar ensaio de tenacidade à fratura com geometria adequada.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, A. M., et al., **Drilling of fiber reinforced plastics: A review**. Journal of Materials Processing Technology, v. 186, p. 1-7, 2007.

AQUINO, E. M. F.: “**Análisis del Comportamiento Mecánico de Laminados Quasi-Isotropos PRFV**”, Tesi doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, p. 184, 1992.

AQUINO, E. M. F.; SARMENTO, L. P. S.; OLIVEIRA, W.; SILVA, R. V.: “**Moisture effect on degradation of jute/glass hybrid composites**”, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 26, Nº 2, 2007.

AQUINO, E. M. F.; TINÔ, S. R. L.: “**Descontinuidade Geométrica nos Compósitos Poliméricos: Resposta Mecânica e Característica da Fratura**”, In: IX Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica - CIBIM, Las Palmas de Gran Canaria, Anais /2009, Vol. 1, pp. 12/2-12/9, 2009.

ASTM INTERNATIONAL. **D3039/D3039M – 14**: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken, 2014. 13 p.

ASTM INTERNATIONAL. **D3878 – 07**: Standard Terminology for Composite Materials. West Conshohocken, 2007. 5 p.

ASTM INTERNATIONAL. **D5045 – 14**: Standard test method for plane-strain fracture and strain energy release rate of plastic materials. Philadelphia, 1999, 10 p

ASTM INTERNATIONAL. **D5766/D5766M – 11**: Standard Test Method for Open Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates. West Conshohocken, 2011. 7 p.

ATODARIA, D.R.; PUTATUNDA, S.K.; MALLICK, P.K. (1997). **A Fatigue crack growth model for random fiber composites**. Journal of Composite Materials, Lancaster, v.31, n.18, p. 2645-2659.

AWERBUCH, J.; MADHUKAR, M. S.: “**Notched strength of composite laminates: Predictions and experiments – A review**”, Journal of Reinforced plastics and Composites, Vol. 4, 159p, 1985.

BEZERRA, H. A. D. **Estudo da Presença de Entalhes Semicirculares em Compósitos Poliméricos Híbridos**. 2010. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

BOTELHO, E.C., REZENDE, M.C., **Caracterização mecânica de compósitos de poliamida/fibra de carbono via ensaios de cisalhamento interlaminar e de mecânica da fratura**, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v.12, n.3, p. 153-163, 2002.

BROBERG, K.B. **Crack-growth criteria and non-linear fracture mechanics**. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 19, n. 6, p. 407- 418, 1971.

CAMPOS, K A de. **Fractografia Quantitativa: Análise do Comportamento Fractal de Fratura em Compósitos Carbono/Epóxi, por Processamento Digital de Imagens**. 2010. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

CARVALHO, A.: **“Fiberglass x Corrosão – Especificação, Instalação e manutenção de equipamentos de Fiberglass para Ambientes Agressivos”**, ASPLAR, 425 p., São Paulo, 1992.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução**. Editora LTC, 2007.

CHOI, N.S.; TAKAHASHI, K. **Toughness and microscopic fracture mechanisms of unfilled and short-glass-fibre-filled poly(cyano arylether)**. *Journal of Materials Science*, New York, v.31, n. 3, p.731-740, 1996.

COSTA, M.L., **Estabelecimento de parâmetros de processamento de compósitos estruturais via análise térmica e viscosimétrica**, 1998. 142f. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1998.

CPIC BRASIL FIBRAS DE VIDRO Ltda, disponível em <[www. http://br.cpicfiber.com](http://br.cpicfiber.com)>, Acessado em: 21 de outubro de 2014.

CUNHA, J.A.P., **Estudo do comportamento mecânico de compósitos poliméricos termorrígidos em atmosfera salina e condicionamento higrotérmico**. 2004. 116f. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2004.

ERÇIN, G. H. et al. **Size effects on the tensile and compressive failure of notched composite laminates**. *Composite Structures*, Amsterdam, v. 96, n. 1, p. 736-744, 2013.

FLEXIDYNAMIC. Disponível em: <www.flexidynamic.com/method.htm> Acessado em: 06 de novembro de 2014.

FONTES, R. S. **Compósito polimérico híbrido: comportamento mecânico, descontinuidade geométrica e resistência residual**. 2013. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 1999. 247p.

GIBSON, R. F., **Principles of Composite Material Mechanics**, 1 ed. New York, Mc Graw-Hill, 1994.

GREEN, B. G.; WISNOM, M. R.; HALLETT, S. R. **An experimental investigation into the tensile strength scaling of notched composites**. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Amsterdam, v. 38, n. 3, p. 867-878, 2007

HAGE JUNIOR, E.: **“Compósitos e blends poliméricos”**, Campinas: Instituto latino – americano e IBM Brasil, 1989. 203p

HALLETT, S. R.; GREEN, B. G.; JIANG, W. G.; WISNOM, M. R.: **“An experimental and numerical investigation into the damage mechanisms in notched composites”**, Composites: Part A, Vol. 40, pp. 613–624, 2009.

HIBBELER R C. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Prentice Hall; 2004. p. 251.

HULL, D., **Fractography: observing, measuring, and interpreting fracture surface topography**, Cambridge University Press, 1999. 366p.

HULL, D.: **“An Introduction to Composite Materials”**, Ed. Cambridge University Press, Cambridge, 246 p., 1988.

HULL, D., And CLYNE, T.W., **An introduction to composite materials**, Cambridge University Press, 1996. 326p.

JOSEPH, K.: **“Effect of Chemical Treatment on Tensile Properties of Short Sisal Fiber-Reinforced Polyethylene Composites”**, Polymer, 37:4139, 1996

KAR, R. J. **Composite failure analysis handbook: program overview**. Wright-Patterson AFB: Wright Laboratory, 1992a. v.1. (WL/TR-91-4032 / DOT/FAA/CT-91/23).

KREMER, T.; SCHÜRMAN, H.: **“Buckling of tension-loaded thin-walled composite plates with cut-outs”**, Composites Science and Technology, Vol. 68, issue 1, pp. 90-97, 2007.

KERLINS, V., **Modes of fracture**, In:____. ASM Handbook - Fractography, ASM International Handbook Committee, v. 12, p. 33-140, 1987.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F., **Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 5. Auflage. Aachen, 1997. 471 p

LEVY NETO, F., PARDINI, L.C., **Compósitos estruturais**, Edgard Blucher, 2006. 309p.

LIN YE, AFAGHI-KHATIBI, A., LAWCOCK, G.; MAI, Y. W.: “**Effect of fibre/matrix adhesion on residual strength of notched composite laminates**”, Composite Part A, Vol. 29, pp. 1525–1533, 1998.

MALLICK, P. K., , **Fiber-Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design**. 3 ed. Michigan, LLC. 2007

MARSHALL, G. P.; WILLIAMS, J. G.; TURNER, C. E. **Fracture toughness and absorbed energy measurements in impact tests on brittle materials**. Impact Tests on Brittle Materials, p. 949-956, 1973.

MASTERS, J.E., **Basic failure modes of continuous fiber composites**, In: American Society for Metals International. Composites, p. 781-785, 1987.

MAYER, S. **Influência do condicionamento ambiental na resistência à tração de laminados de compósitos poliméricos reparados**. 2003. 218f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

MENDONÇA, P. T. R.: “**Materiais compósitos e Estruturas – Sanduiche: Projeto e Análise**”, Manole, 2005.

MOHAN, N. S. et al, **Delamination Analysis in Drilling Processes of Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) Composite Materials**. Journal of Materials Processing Technology, v.186, p.265-271, 2007.

NUISMER, R.J, WHITNE, J.M. **Uniaxial failure of composite laminates containing stress concentrations**. Fracture Mech Compos ASTM STP 1975;593:117.

O'BRIEN. T.K., **Fracture mechanics of composite delamination**, In: MIRACLE, D.B., DONALDSON, S.L.. ASM Handbook - Composites, ASM International Handbook Committee, v. 21, p. 589-604, 2001.

O'HIGGINS, R. M.; McCARTHY, M. A., McCARTHY, C. T.: “**Comparison of open hole tension characteristics of high strength glass and carbon fibre-reinforced composite materials**”, Composites Science and Technology, Vol. 68, pp. 2770–2778, 2008.

OWENSCORNING disponível em <www.owenscorning.com.br>, Acessado em: 21 de outubro de 2014.

PLASTICSMAG., Machining of Engineering Plastics. The Plastics Distributor and Fabricator - Your Industry Magazine. Disponível em: <<http://www.plasticsmag.com/features.asp?fIssue=May/Jun-06>>. Acesso em: 18 de outubro de 2014.

PETERS, S. T. (Ed.). **Handbook of composites**. 2.ed. London: Chapman & Hall, 1982.

PINHO, S.T., ROBINSON, P., IANNUCCI, L., **Fracture toughness of the tensile and compressive fibre failure modes in laminated composites**, Composites Science and Technology, v.66, p.2069-2079, 2006.

PILKEY, W. D. **Peterson's Stress Concentration Factors: Third Edition**. John Wiley Sons. New Jersey, 2008

PURSLOW, D., **Some fundamental aspects of composites fractography**, Composites, v.12, n.4, p. 241-247, 1981.

REIFSNIDER, K. L.: **“Damage in composite materials”**. ASTM STP 775, 280p, 1982.

REIS, P. E. V. **Furação de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica**. 2005. 230 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2005.

REZENDE, M. C. **Fractografia de compósitos estruturais**. Polímeros, v XVII, p E4- E11, 2007.

SHIGLEY, J. E., MISCHKE, C. R., BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica – 7ª edição**. Editora Bookman, 2005.

SILVA, R. A. - **“Processamento de compósitos metal/fibraestudo de interface”**, Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2003.

SLEIGHT, D. W. **Progressive failure analysis methodology for laminated composites structures**. Hampton: Langley Research Center, 1999. (NASA TP-1999-209107)

SMITH, B.W. **Fractography for continuous fiber composites**. In: ASM International. Composites. Metlas Park: ASM: c1987b. cap. 11, p. 786-793. (Engineered materials handbook, v.1).

SUN, C., QUINN, B., TAO, J., et al, 1996, **Comparative Evaluation of Failure Analysis Methods for Composite Laminates**, Tech. rep., U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.

TINÔ, S. R. L.: **“Descontinuidade na Seção Transversal em Laminados Compósitos Poliméricos: Efeitos e Propriedades”**, Dissertação de mestrado, UFRN, Natal-RN, 97p, 2010.

TSAI, S.W., HAHN, H.T., **Introduction to composite materials**, Technomic Publishing Company, 1980. 455p.

VAN VLACK, L. H.: **“Elements of Materials science and engineering”**, Ann arbor, Addison-Wesley, 498p, 1989.

VENTURA, A. M. F. M.: **“Os compósitos e as suas aplicações na reabilitação de estruturas metálicas”**, **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, vol. 21, n° ¾, 2009.

VINCENZINE, P.: **“Advanced structural fiber composites”**, Italy, Techna Faenza, ,1995 623 p

WONG, S.C.; MAI, Y.W. (1998). **Fracture resistance and microstructures of unreinforced and fiber reinforced PA6,6/PP/SEBS-g-MA**. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE, 56., 1998, Atlanta. Proceedings... 1 CD-ROM.

WATSON, A. R., **Geometry of drill elements**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 25(3), pp.209-227, 1985.

WU, J.; MAI, Y.W. **The essential fracture work concept for toughness measurement of ductile polymers**. Polymer Engineering and Science, v. 36, n. 18, p. 2275-2288, 1996.

